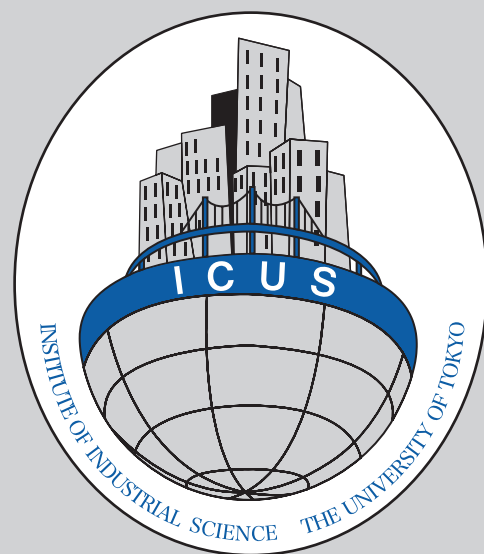




東京大学生産技術研究所

都市基盤安全工学国際研究センター

**社会基盤施設の老朽化に伴う性能低下の
評価技術に関する研究会
平成20年度報告書**

社会基盤施設の老朽化に伴う性能低下の評価技術に関する研究会

(RC－62)

中 間 報 告 書

平成 21 年 5 月

東京大学生産技術研究所

都市基盤安全工学国際研究センター

まえがき

東京大学生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター(ICUS)では、老朽化した社会基盤施設を、地盤から構造物までを包括した全体構造の性能で評価することの意義や、その評価方法に関する検討と提案を目的に、(財)生産技術研究奨励会の特別研究会として、平成20年と平成21年の2年間を活動期間とする「社会基盤施設の老朽化に伴う性能低下の評価技術に関する研究会(RC-62研究委員会)」を設立しました。

我々の生活を支える社会基盤施設には、コンクリート構造物、土構造物、鋼構造物など、様々な材料・構造形式が存在します。これらの施設は、老朽化、求められる機能や使用方法の変化などに伴い、必要な性能が失われた施設が散見されます。また、現時点では要求性能を満足している施設においても、将来にわたってその性能を保証するためには、性能評価に基づいた的確な維持管理が必要です。従来、各種計測技術を活用して、構造物の性能評価が試みられていますが、構造物の性能を適切に評価できる技術は未だ確立されておりません。さらに、地盤から構造物までを包括した全体構造の性能を評価する技術に関しては、全くと言っていいほど検討されていないのが現状です。

このような背景のもと、RC-62研究委員会では、コンクリート構造物および土構造物の性能を定量的に評価する技術、および地盤から構造物までを包括した全体構造の性能を評価する技術に関する調査・検討を行うことを目的とし、民間企業16社に参画をいただいて活動を開始しました。各分野(コンクリート構造物、土構造物、地盤等)における既存の計測・評価技術の整理を行い、特定の分野で用いられている最新の技術の応用やそれらの統合も視野に入れ、将来技術の方向性を模索しています。

初年度の平成20年度は、現状のレビューを目的とし、構造物WGと地盤・土構造物等の性能評価WGの2つのWG、および構造物WGには、SWG1(材料劣化を考慮した構造性能評価)、SWG2(構造性能計測技術)、SWG3(コンクリートと地盤の融合検討)の3つのサブWGを組織し、それぞれの活動の成果をこの報告書にとりまとめました。

最後に本研究委員会の活動にあたり、終始熱心にご協力をいただいた委員諸氏ならびに関係各位、特に、WGの幹事をお引き受けくださった、福浦尚之氏、松井義昌氏、中山聡子氏、恒国光義氏に厚く御礼を申し上げます。

平成21年5月

社会基盤施設の老朽化に伴う性能低下の評価技術に関する研究会
委員長 横田 弘

社会基盤施設の老朽化に伴う性能低下の評価技術に関する研究会(平成 20 年度)

委員会名簿

委員長	横田 弘	東京大学生産技術研究所	客員教授
委 員	加藤 佳孝	東京大学生産技術研究所	准教授
	桑野 玲子	東京大学生産技術研究所	准教授
	遠藤 貴宏	東京大学生産技術研究所	助教
	加藤 絵万	東京大学生産技術研究所	研究員
	鈴木 将充	東京大学生産技術研究所	研究実習生
	勝木 太	芝浦工業大学 工学部	土木工学科
	栗田 守朗	清水建設(株) 技術研究所	安全安心技術センター社会インフラ技術グループ
	稲田 裕	清水建設(株) 技術研究所	安全安心技術センター社会インフラ技術グループ
	佐藤 登	三協(株)	
	天野 勲	(株)保全工学研究所	
幹 事	中山 聡子	(株)保全工学研究所	
	小田部 裕一	住友大阪セメント(株)	セメント・コンクリート研究所生コンクリート技術センター
	門 万寿男	OSMOS 技術協会	
	三好 俊康	OSMOS 技術協会	
	小池 豊	ジオ・サーチ(株)	企画開発部
	瀬良 良子	ジオ・サーチ(株)	企画開発部
	五味 信治	りんかい日産建設(株)	技術研究所
	杉山 長志	中央開発(株)	ソリューション本部 探査計測部
	肥田 研一	(株)K&T こんさるたんと	
幹 事	松井 義昌	(株)K&T こんさるたんと	
	伊波 あかね	(株)K&T こんさるたんと	
幹 事	福浦 尚之	大成建設(株) 技術センター	土木技術研究所 土木構工法室
	柳瀬 高仁	(株)ジャスト	技術部
	川越 洋樹	(株)ジャスト	技術部
	濱田 洋志	東亜建設工業(株)	技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループ
	田口 博文	東亜建設工業(株)	技術研究開発センター 地盤・防災技術グループ
	菅野 友紀	(株)竹中土木	竹中技術研究所 建設技術研究部 地下工法グループ
	安藤 慎一郎	(株)竹中土木	竹中技術研究所 建設技術研究部 構造材料グループ
	松本由美子	(株)竹中土木	技術・生産本部 技術・開発部
	清水 隆史	(株)建設技術研究所	社会システム部 アセットマネジメント室
	岸村 和守	(株)建設技術研究所	社会システム部 アセットマネジメント室
幹 事	恒国 光義	東電設計(株)	土木本部 耐震技術部 保全技術グループ
	早川 健司	東急建設(株)	技術研究所 土木研究グループ
	柴田 頼孝	東急建設(株)	土木総本部 土木技術部 技術推進グループ

順不同

事務局 吉本 英子 東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター 秘書

社会基盤施設の老朽化に伴う性能低下の評価技術に関する研究会

目次

まえがき

委員会の構成

SWG1(材料劣化を考慮した構造性能評価)活動報告

1. SWG1 活動の概要	1
2. 材料劣化を考慮した構造性能評価に関する文献の調査収集	2
2.1 調査対象の設定	2
2.2 文献の調査収集の方針	2
2.3 調査結果	2
3. 収集文献の評価検討	11
3.1 経年作用による老朽化(劣化)の要因	11
3.2 現状及び将来の性能評価技術	13
3.3 まとめと今後	13

SWG2(構造性能計測技術)活動報告

1. 概要	15
1.1 活動方針	15
1.2 活動内容	15
2. 構造性能計測技術の調査	16
2.1 測定対象構造物の検討	16
2.2 地中構造物の調査手法	16
2.3 損傷検知手法(非破壊検査等)	20
2.3.1 測定対象構造物が異なる場合の損傷検知手法	20
2.3.2 杭に着目した文献調査(損傷検知手法)	24
2.4 モニタリング手法	25
2.4.1 測定対象構造物が異なる場合のモニタリング手法	25
2.4.2 杭に着目した文献調査(モニタリング手法)	28
3. まとめ	29

SWG3(コンクリートと地盤の融合検討)活動報告

1. コンクリートと地盤の融合検討	33
1.1 SWG3 の目的	33
1.2 SWG3 の取りまとめの方針	33
1.3 活動経過	33
2. SWG3 における用語の定義	33

3.	事例収集	38
3.1	想定以上の地震力で倒壊した L 型擁壁	38
3.1.1	概要	38
3.1.2	倒壊の原因	39
3.1.3	対応策	39
3.2	土砂吸出しによる重力式擁壁の倒壊事例	40
3.2.1	概要	40
3.2.2	被災状況	40
3.2.3	長期的な砂浜の侵食事例	41
3.2.4	港湾施設に関する地盤と構造物の関係について	41
4.	構造性能低下の評価の現状と課題	42
4.1	護岸・堤防など沿岸防災施設の変状連鎖	42
5.	構造性能低下の評価の現状と課題	47
5.1	擁壁の性能低下の主な原因	47
5.2	擁壁設計時の地盤とコンクリートの関係	47
6.	まとめ	48
6.1	地盤とコンクリートの融合を考慮した設計及び点検・評価	48
6.1.1	設計における考慮	48
6.1.2	点検・評価における考慮	48
6.1.3	点検・調査の難しい構造物	49

WG2(地盤・土構造物等の性能評価)活動報告

1.	概要	51
1.1	WG2 の目的	51
1.2	WG2 の活動方針	51
1.3	活動経過	52
2.	地盤・土構造物等の性能を検討するための事例の調査	53
2.1	概要	53
2.2	事例収集	53
3.	地盤・土構造物等の性能評価項目の検討	58
3.1	概要	58
3.2	地盤・土構造物等の性能評価項目の抽出	58
4.	まとめ	62

資料：事例に基づく地盤・土構造物の性能評価に関する検討	65
付録	77

SWG1 活動報告書

材料劣化を考慮した構造性能評価

SWG1 名簿

氏名	会社名	所属
安藤 慎一郎	(株)竹中土木	竹中技術研究所 建設技術研究部 構造材料グループ
小田部 裕一	住友大阪セメント(株)	セメント・コンクリート研究所 生コンクリート技術センター
岸村 和守	(株)建設技術研究所	社会システム部 アセットマネジメント室
栗田 守朗	清水建設(株)	技術研究所 安全安心技術センター 社会インフラ技術グループ
五味 信治	りんかい日産建設(株)	技術研究所
清水 隆史	(株)建設技術研究所	社会システム部 アセットマネジメント室
土井 達朗	(株)建設技術研究所	社会システム部 アセットマネジメント室
早川 健司	東急建設(株)	技術研究所 土木研究グループ
◎福浦 尚之	大成建設(株)	技術センター 土木技術研究所 土木構工法室

(五十音順)

◎：幹事

1. SWG1 活動の概要

材料劣化を考慮した構造性能評価の枠組みを、既往の知見^{1), 2)}を基に図-1.1のように捉えた。構造物は、その建設にあたり各種設計基準に従い設計されるものであり、この状態においては構造物自体の持つ性能は作用力である荷重・環境作用に対して十分な安全性を持つものとして設計される。但し、その安全性はその後の構造物の性能変化、荷重環境作用に基づく以後の構造物の安全性照査を数値的に行うのに十分な数値的評価がされているわけではない。供用されている構造物の維持管理をふまえた安全性照査を数値的に行うためには、現時点での構造物の状態と荷重・環境作用が定量化されている必要があるためである。さらに、照査自体の行うためには、将来のある時点に対してその構造物の保有性能を予測する必要がある。また、照査に基づく構造物の維持管理を合理的に実施するためには、照査時点において構造物に要求される性能を適切に設定する必要がある。

本 SWG では、この材料劣化を考慮した構造性能評価の枠組みの内、“保有・要求性能の定量化技術”に着目し、文献調査を実施して現状及び将来の性能評価技術について検討を行った。

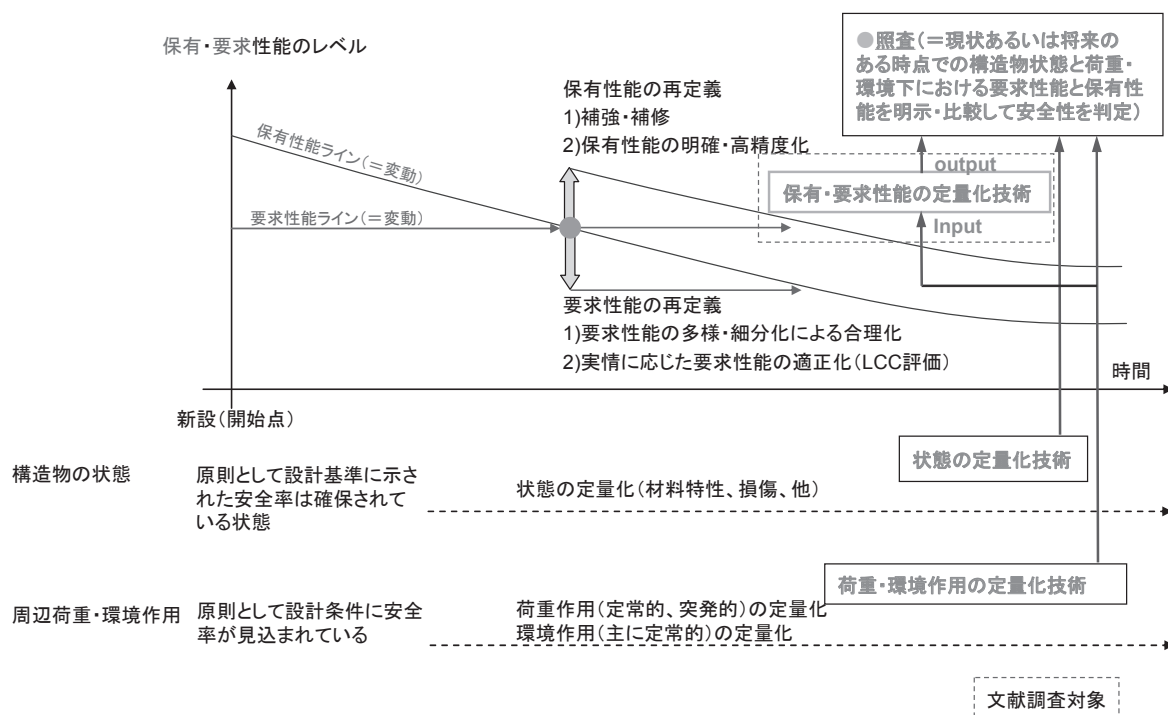


図-1.1 材料劣化を考慮した構造性能評価の枠組み

2. 材料劣化を考慮した構造性能評価に関する文献の調査収集

2.1 調査対象の設定

a) 劣化作用の対象要因

環境作用による経年変化(塩害, 中性化等)を対象とした.

経年変化による荷重作用(水圧・土圧等)の増減等の荷重作用を対象とした.

但し, 作用の要因としての地震は対象としない.

b) 構造性能の評価対象

使用性(たわみ, 応力度等), 終局に関する安全性(耐力, 変形等)とした.

その際, 性能評価の対象としての地震に対する安全性は含まれる.

c) 対象構造

地中・地上構造物は基本的に問わないが, 地上構造物に関する知見はこれまで多くまとめられているため, 地中構造物に関するものに注目することとした.

2.2 文献の調査収集の方針

a) 現状把握の観点から, 原則的に, 実構造物・実環境を対象とした文献を調査対象とした.

b) 室内実験等による, “劣化メカニズム”, “劣化した部材の構造性能”を扱う文献はこれまでに多くあることから, これらに関しては個々の文献は対象とせず, 各種委員会報告を調査対象とした.

c) 劣化に対する事後及び事前の対策工法や材料を扱った文献は原則として除いた. 但し, 一般的な手法に関して評価したものは含める場合がある.

2.3 調査結果

調査した文献の概要を表-2.1~2.6 に示す. そして, これらの調査文献を, 対象構造物・劣化要因・性能評価の際の手法・Input・Output で整理した結果を表-2.7 に示す. また, 構造性能評価の枠組みに関する基準, 各種委員会報告等の調査結果を図-2.1~2.2, 表-2.8~2.9 に示す.

表-2.1 調査文献概要(1)

タイトル:衝撃力を受けるコンクリート水路構造物の非破壊損傷同定³⁾

概要(論文より抜粋)

コンクリート構造物の損傷累積は、複数の環境要因が影響し、耐久性の低下を引き起こす。現状では、既設構造物の損傷度判断においては発生機構の解明と共に損傷度の定量化が重要な課題となっている。

本研究では鉄道による衝撃荷重と水流の影響を受けるコンクリート水路構造物の損傷度を不規則振動条件下での振動特性と AE 法による弾性波挙動から定量的に評価することを試みた。改修後 46 年経過したコンクリート壁面の振動特性は、部位により異なっていた。損傷が目視で確認できる部位では、固有振動数が健全な部位と比較して低下する傾向が確認された。コンクリート損傷度指標である相対損傷度と固有振動の関係から、相対損傷度が低下する部位での固有振動数の減少が明らかになった。振動計測と同時に行った AE モニタリングでは、AE 発生位置と振動特性の関係が示唆された。

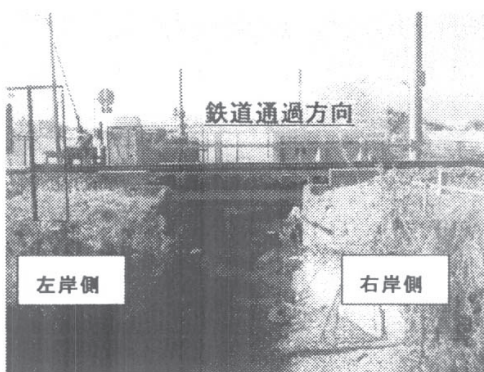


図-1 計測対象施設

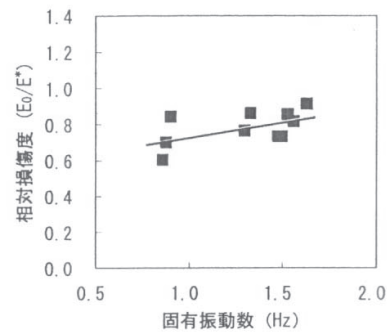


図-8 固有振動数と相対損傷度の関係
(右岸側水路壁面)

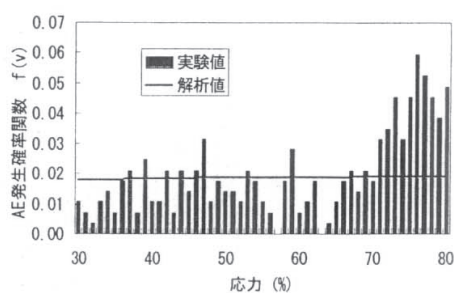


図-11 AE 発生確率関数と応力レベルの関係
(構造体コンクリート)

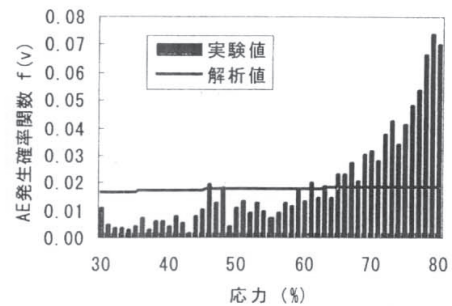


図-12 AE 発生確率関数と応力レベルの関係
(健全コンクリート)

表-2.2 調査文献概要(2)

タイトル:下水道コンクリート構造物のエポキシ樹脂による防食および耐久性について⁴⁾

概要(論文より抜粋)

近年、下水道施設コンクリート構造物において、硫化水素に起因する硫酸の影響でコンクリートの化学的侵食が確認されている。

約10年間、下水道施設における暴露試験の結果、腐食環境の厳しいQ市汚泥処理施設においてもエポキシ樹脂による防食ライニングの有用性が確認された。更に拡散則による寿命推定でも30年以上の寿命が期待でき、R市のような平均的な腐食環境の汚泥濃縮槽では実質的には硫黄浸透によって直接コンクリート躯体が浸食されない結果が得られた。現場における工程管理・施工管理・施工技術の向上が重要と考えられる。

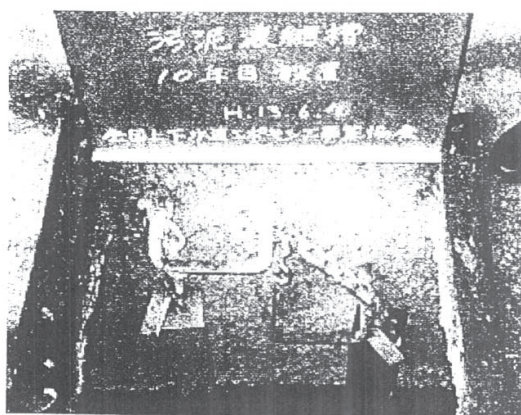


写真-1 コンクリート供試体暴露状況

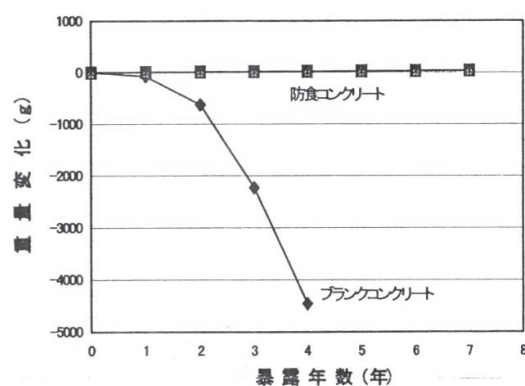


図-2 Q市汚泥濃縮槽における重量変化

$\sqrt{t}$ 則

$$y = b \sqrt{t}$$

y : 劣化因子の浸透深さ (μm)

t : 化学的浸食をもたらす物質に暴露される期間 (日)

b : 劣化因子の浸透速度 ($\mu\text{m}/\sqrt{\text{日}}$)

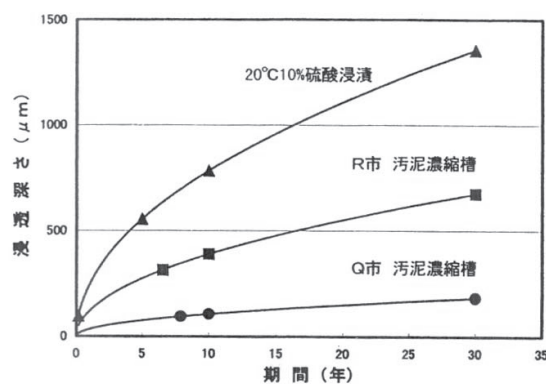


図-3 協会塗料化品の硫黄浸透深さ予測

表-5 硫黄浸透予測

項目	R市処理場		Q市処理場
	予備濃縮槽	汚泥濃縮槽	汚泥濃縮槽
暴露時間	7.9年 (2882日)	7.9年 (2882日)	6.56年 (2393日)
硫黄元素の浸透深さ	8μm	95μm	315μm
b:劣化因子の浸透速度	0.149	1.77	6.44
防食被覆層設計厚	350μm	700μm	700μm
寿命推定	15117年	429年	32年

表-2.3 調査文献概要(3)

タイトル:下水道コンクリート構造物のエポキシ樹脂による防食および耐久性について⁵⁾

概要(論文より抜粋)

かんがい用水の管水路化が早期に実施された地域では、老朽化した既設の管水路の更新や再整備が必要となってきた。一方、管水路が供用中の段階では、老朽化に伴う漏水の発生履歴は把握できるものの、地中に埋設されている管水路の経年劣化の状況や周辺地盤との相互関係などは把握しきれない。

本論では、昭和45年から47年に施工された、口径150mm～200mmの石綿セメント管を対象としている(総延長約110km)。埋設地盤区分別に見た石綿セメント管の漏水の発生割合を図-3に示した地域内の第2段丘堆積物(T2)の路線で発生割合が高い傾向がみられるが、後述するように、T2エリアの中でも管水路の路線沿いに有機質土の層厚変化が認められた区間で、経年劣化などによる漏水の発生多い傾向が認められた。この区間で漏水の発生が多い要因としては、他の土層に比べて軟弱な有機質土層の長期沈下や変形に管水路(継手部も含む)が追従できないため、不等沈下などが生じ漏水の発生が多くなったものと推察される。

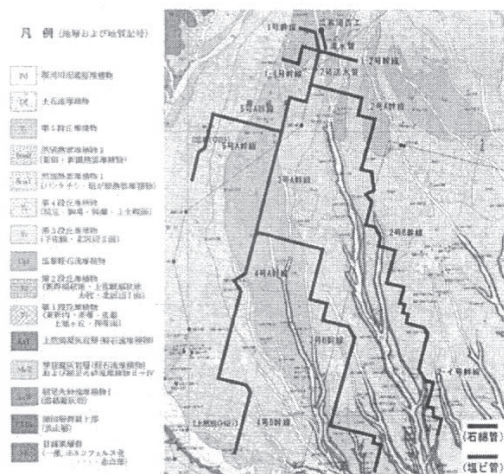


図-1 既設管水路の路線と地盤区分

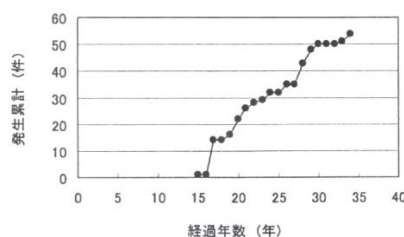


図-2 経過年数と漏水発生累計

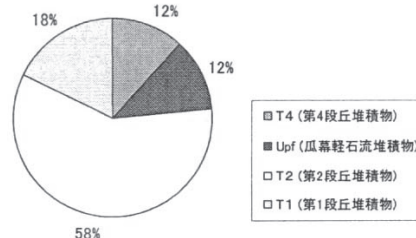


図-3 地盤区分別の漏水発生割合

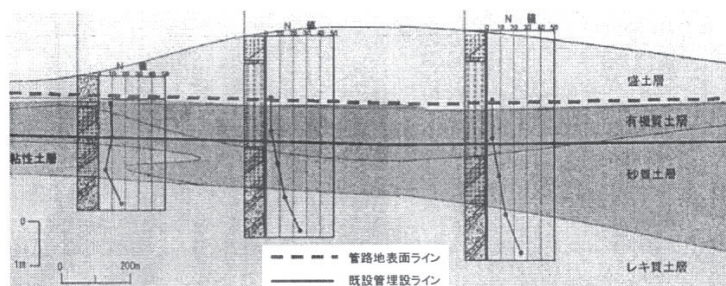


図-4 有機質土の層厚変化がみられた管路埋設地盤の土質断面

表-2.4 調査文献概要(4)

タイトル: AE 法による石油タンク底部の腐食劣化評価に関する共同研究報告書⁶⁾

概要(関連 HP: <http://www.fri.go.jp/cgi-bin/hp/index.cgi> より抜粋)

石油タンク底部の腐食が進むと、穴が開いたり、地震により破損したりすることで大量漏洩事故のおそれが出てきます。現在、石油タンクの腐食状態の診断は、約 10 年に一度、タンクを空にして超音波でタンク底部の鋼板の厚さを測定するという「開放検査」で行っています。しかし、この方法では石油タンクを空にする必要があるだけでなく、腐食している箇所を全て発見するには非常に多くの労力が必要となります。

そこでわたしたちは、「AE 波」を使って、石油タンク底部全体の腐食状況を診断する方法の開発に取り組んでいます。この方法では、石油タンクを空にする必要がなく、短時間で診断ができる可能性があります。この診断技術が確立されると、石油タンク稼働中に検査を行ったり、腐食が進んでいると診断されたタンクのみ早急に精密検査を行い、そうでないタンクについては開放検査を先送りしたりすることができるなど、効果的で効率がよい検査体制が可能になります。

「AE 波」とは、腐食の活性度に応じて放出される微弱な弾性波のことです。これは、タンク各部位で腐食生成物質がはがれたり、割れたりすることにより発生すると考えられています。「AE 波」は、タンクの外側に貼り付けたセンサで検出することができます。これまで、実際の石油タンクを使って「AE 波」の測定実験を繰り返してきました。その結果、石油タンク底部の「腐食危険度」が大きくなるにつれて「AE 活動度」も大きくなるという関係を定量的に把握することができました。この関係を使えば、「AE 波」の測定から腐食程度の推定が可能になります。



石油タンク側板に取り付けられた
AE波センサー
AE wave sensors attached to the
shell plate of an oil tank

■「腐食危険度」(腐食速度に対応する量)と「AE活動度」の関係
Relation between corrosion risk (ratio to corrosion speed) and AE activity

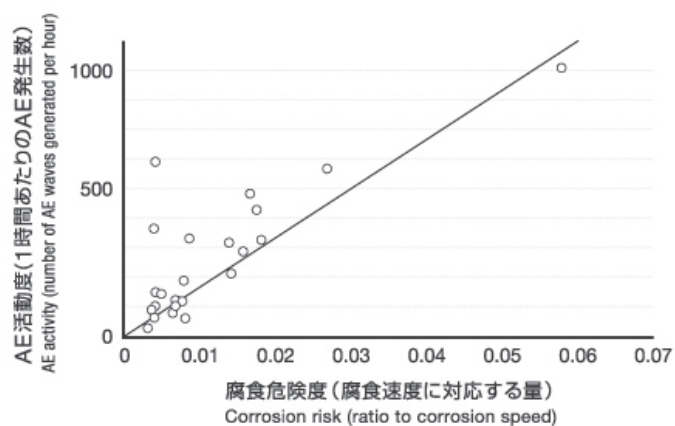


表-2.5 調査文献概要(5)

タイトル:岸壁・護岸背面地盤の空洞・ゆるみ調査手法の開発⁷⁾

概要(論文より抜粋)

近年、臨海部埋立て地では、埋立て土砂が岸壁・護岸の隙間から吸い出されることによって局所的な陥没・沈下が発生する被害が多く報告されている。このような被害は建設から10～20年経過した岸壁・護岸に多く見られ、その合理的な対策が必要とされている。

開発した空洞・ゆるみ調査法は、砂質土の電気比抵抗が間隙率の影響を受けること着目し、電磁探査法の一つであるマルチ周波数型 EM 探査(FDEM 探査)と電気式静的コーン貫入試験等の現位置試験を組み合わせた複合調査法である。本調査法は、従来調査技術では困難であった地下水位以下の空洞・ゆるみ域の評価を可能にしたものである。

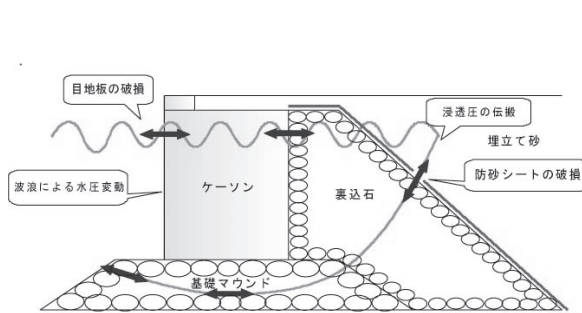


図1 岸壁・護岸の吸い出しの発生メカニズム

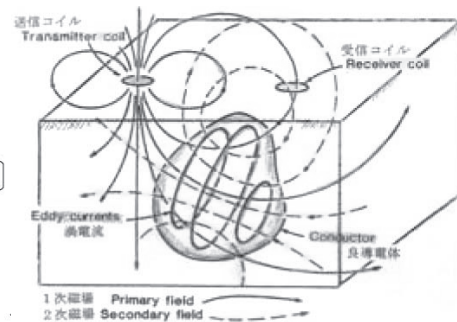


図2 FDEM 探査の測定原理概念図

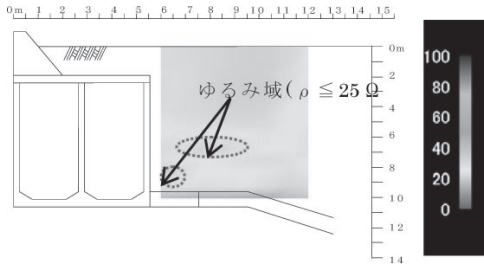


図5(a) 吸い出し箇所の比抵抗分布(A-A断面)

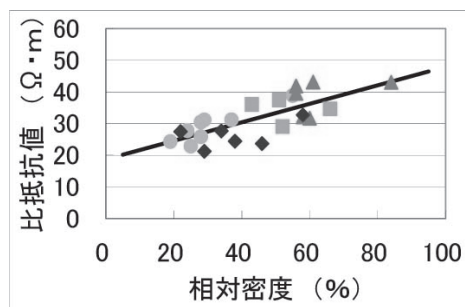


図4 比抵抗～相対密度関係

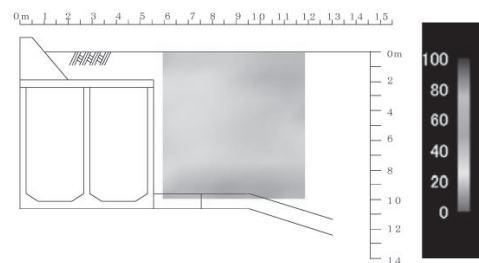


図5(b) 対策箇所の比抵抗分布(A-A断面)

表-2.6 調査文献概要(6)

タイトル:地山の時間依存性を考慮した変状対策工の解析手法に関する検討⁸⁾

概要(論文より抜粋)

わが国においては、道路・鉄道等のトンネルの総数が 10,000 箇所以上、総延長は 4,000km をこえる状況となっている。この中には戦前に建設された古いトンネルが、現在も供用されているものもある。このため、長期に渡って供用されているトンネルに対する維持・管理は重要な課題となっている。

一般に、変状の進展を評価する指標には内空変位速度が適用される場合が多く、変位速度の抑制を目的として対策工の採用が検討される。本論文では、地山挙動の長期的な時間依存性を考慮するために、地山の経時的な変形挙動を地山の強度低下で評価した地山劣化モデルについて報告する。また、長期的な変状に対して段階的な対策を行っているトンネルに対しては梁バネモデルと地山劣化モデルを適用し、変状対策工設計への両解析手法の適用性について検討した結果を述べる。

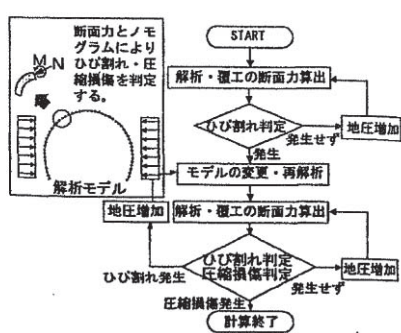


図1 梁ばねモデルによる解析の流れ



図4 六十里越トンネルの主な変状状況

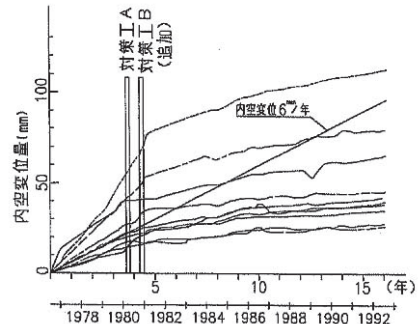


図6 内空変位計測結果⁵⁾

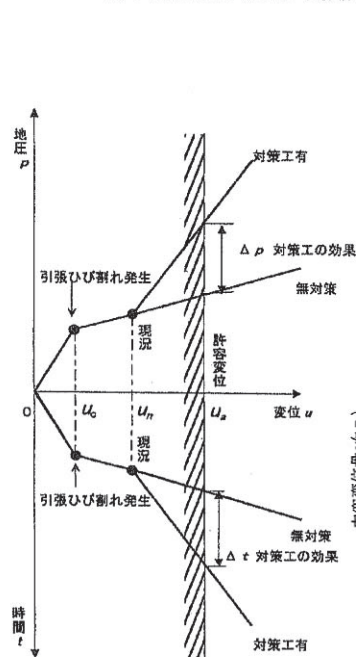


図3 変位勾配による対策効果の評価²⁾

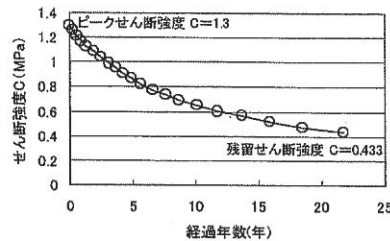


図7 地山劣化モデルにおける経年劣化の状況

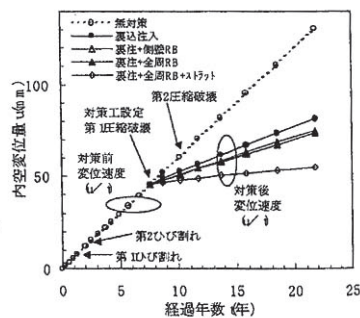


図10 地山劣化モデルによる対策工解析結果

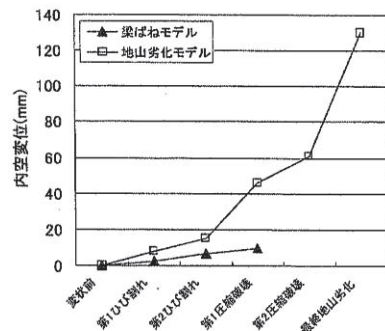


図8 変状の進展と内空変位の発生

表-2.7 文献調査結果(1)

文献	対象構造	劣化要因	性能評価(原因究明・定量化)手法		
			方法	Input	Output
3)	RC 水路	水流・活荷重による経年衝撃力	振動計測, AE 計測と損傷の関係	列車通過時の振動特性, AE 発生確率	目視損傷と振動, AE 特性の定性的関係
4)	下水 RC 構造	硫化水素による化学的侵食	エポキシ塗装した供試体の現地暴露試験	重量変化率 塗膜の硫黄浸透深さ	$\sqrt{t}$ 則の適用
5)	灌漑用水用小口径管	有機質地盤の経年変化	漏水箇所と地盤性状比較	漏水箇所と地盤性状調査	漏水箇所と地盤性状比較に定性的相関
6)	鋼製石油タンク	底版の腐食(漏液, 安全性低下)	腐食生成時, ひび割れ時の AE 計測	AE 活動度	腐食危険度と AE 活動度関係の定量化
7)	岸壁・護岸	波浪による水圧変動, 経年劣化による目地, シートの破損が吸出しによる陥没	電磁探査法(FDEM 法)	比抵抗値の断面分布	Dr(相対密度)との相関関係より緩み域を判定
8)	トンネル	圧ぎ, 引張りひび割れ, 内空縮小	梁バネモデルと地山劣化モデル	経時的な地山強度の仮定	変状箇所, 変位と経過時間関係

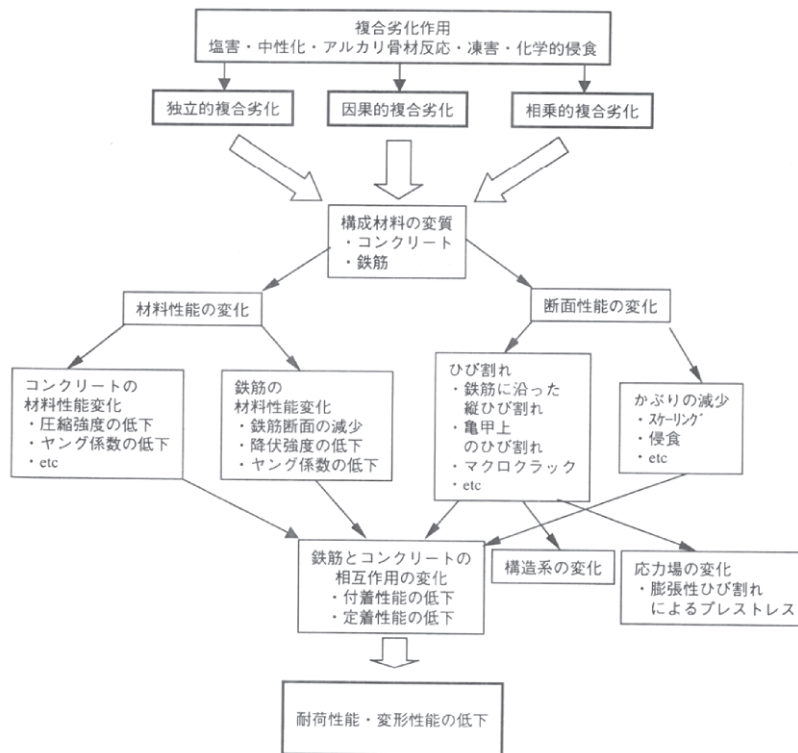


図-2.1 文献調査(2) 耐力・変形性能を評価する際の関連事項
(JCI 複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告 2001.5⁹⁾)

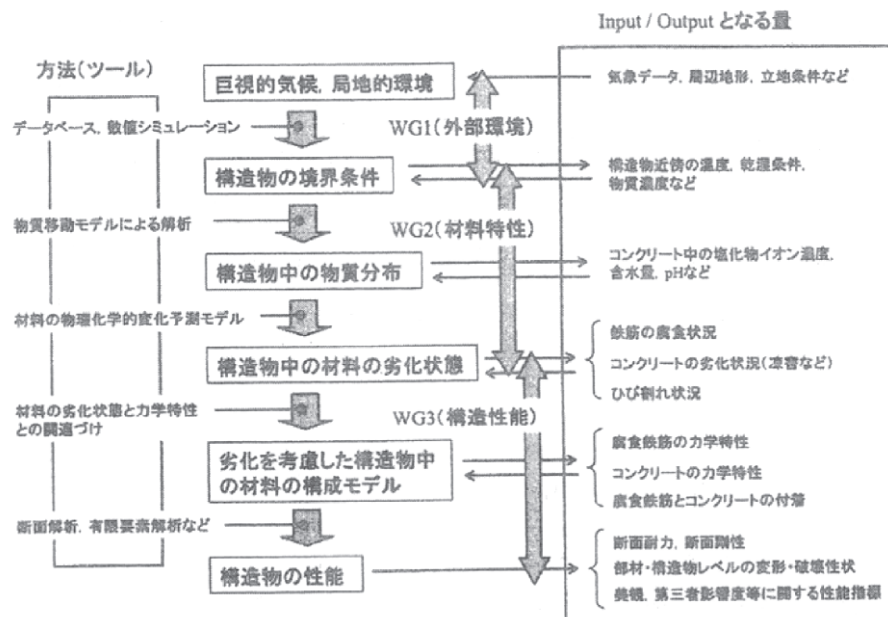


図-2.2 文献調査(3)__コンクリート構造物の長期性能予測フロー
(JCI コンクリート構造物の長期性能支援モデル研究委員会報告 2004.10¹⁰⁾)

表-2.8 文献調査(4)__構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下__塩害
(土木学会コンクリート標準示方書 維持管理編 2007 年版¹¹⁾)

構造物の外観上のグレード	安全性	使用性	第三者影響度	美観・景観
状態Ⅰ-1 (潜伏期)	-	-	-	-
状態Ⅰ-2 (進展期)	-	-	-	-
状態Ⅱ-1 (加速期前期)	-	-	-	美観の低下
状態Ⅱ-2 (加速期後期)	耐力・じん性の低下 ・鋼材断面積の減少 ・浮き・はく離によるコンクリート断面の減少	剛性低下 (変形の増大・振動の発生) ・鋼材断面積の減少 ・鋼材とコンクリートの付着力の低下 ・浮き・はく離によるコンクリート断面の減少	第三者への影響 ・はく離 ・はく落	・ひび割れ ・錆汁 ・鋼材の露出
状態Ⅲ (劣化期)				

表-2.9 文献調査(4)__構造物の外観上のグレードと対策__塩害
(土木学会コンクリート標準示方書 維持管理編 2007 年版¹¹⁾)

構造物の外観上のグレード	点検強化	補修	補強**	機能向上	供用制限	解体・撤去
Ⅰ-1 (潜伏期)	○	○**	※	※		
Ⅰ-2 (進展期)	○	○	※	※		
Ⅱ-1 (加速期前期)	◎	◎	※	※		
Ⅱ-2 (加速期後期)	◎	◎*	※	※	○	
Ⅲ (劣化期)		○*	※	※	◎	◎

◎：標準的な対策 (◎*：力学的性能の回復を含む)

○：場合によっては考えられる対策 (○*：力学的性能の回復を含む)，○**：予防的に実施される対策

※：外観上のグレード以外の基準により実施される対策

補強**：力学的性能を初期の性能より向上させる場合

3. 収集文献の評価検討

3.1 経年作用による老朽化(劣化)の要因

文献等の調査により，経年作用による老朽化(劣化)の要因として以下が挙げられる．

- ・ 化学的環境作用：中性化，塩害，凍害，化学的侵食(酸)，アルカリシリカ反応，
- ・ 力学的作用：活荷重疲労，水・活荷重すり減り，水・活荷重衝撃，
地盤経年変化(一様)，水・活荷重による地盤の局所変化(陥没・吸出し・裏込め変化)，地盤強度の長期時間依存性

劣化機構と要因，指標，現象の関連についての調査結果を表-3.1 に，調査文献 3)-8)に基づく追加分を表-3.2 に示す．

表-3.1 劣化機構と要因，指標，現象の関連
(土木学会コンクリート標準示方書 維持管理編 2007 年版¹¹⁾)

劣化機構	劣化要因	劣化現象	劣化指標の例
中性化	二酸化炭素	二酸化炭素がセメント水和物と炭酸化反応を起こし，細孔溶液中の pH 値を低下させることで，鋼材の腐食が促進され，コンクリートのひび割れやはく離，鋼材の断面減少を引き起こす劣化現象	中性化深さ 鋼材腐食量 腐食ひび割れ
塩害	塩化物イオン	コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンにより促進され，コンクリートのひび割れやはく離，鋼材の断面減少を引き起こす劣化現象	塩化物イオン濃度 鋼材腐食量 腐食ひび割れ
凍害	凍結融解作用	コンクリート中の水分が凍結と融解を繰り返すことで，コンクリート表面からスケーリング，微細ひび割れおよびポップアウトなどの形で劣化する現象	凍害深さ 鋼材腐食量
化学的侵食	酸性物質 硫酸イオン	酸性物質や硫酸イオンとの接触によりコンクリート硬化体が分解，または化合物生成時の膨張圧によってコンクリートが劣化する現象	劣化因子の浸透深さ 中性化深さ 鋼材腐食量
アルカリシリカ反応	反応性骨材	骨材中に含まれる反応性シリカ鉱物や炭酸塩岩を有する骨材がコンクリート中のアルカリ性水溶液と反応して，コンクリートに以上膨張やひび割れを発生させる劣化現象	膨張量 (ひび割れ)
床版の疲労	大型車通行量	道路橋の鉄筋コンクリート床版が輪荷重の繰返し作用によりひび割れや陥没を生じる現象	ひび割れ密度 たわみ
梁部材の疲労	繰返し荷重	鉄道橋梁などにおいて，荷重の繰返しによって引張鋼材に亀裂が生じてそれが破断にいたる劣化現象	累積損傷度 鋼材の亀裂長
すり減り	磨耗	流水や車輪などの磨耗作用によってコンクリートの断面が時間とともに徐々に失われていく現象	すり減り量 すり減り速度

表-3.2 劣化機構と要因，指標，現象の関連(追加分)

劣化機構	劣化要因	劣化現象	劣化指標の例
経年衝撃力	水流・活荷重	水流・活荷重による衝撃力が経年的に作用しひび割れ損傷を生じさせる現象	振動特性, AE 特性
沈下・不等沈下・陥没	地盤種別 (地盤特性) 水流	地盤の経年的沈下・不等沈下により地中埋設管自体の損傷や継手部の損傷により漏水を生じさせる	地盤特性
底版の腐食 (漏液, 安全性低下)	塩化物イオン	鋼製石油タンクの底版が腐食することで, 漏液し使用性, または地震時の安全性が損なわれる	AE 活動度
岸壁・護岸背面の陥没	波浪による水圧変動, 経年劣化による目地, シートの破損	波浪による水圧変動, 経年劣化による目地, シートの破損が背面地盤材料の吸出しにつながり, 局所的な陥没を生じさせる	比抵抗値の断面分布
地山強度低下	地質の長期的時間依存性	地山の長期的な時間依存性により, トンネルの内空変位が進み, 圧ざ, 引張ひび割れ, 内空縮小が生じる現象	内空変位速度

3.2 現状及び将来の性能評価技術

現状及び将来の性能評価技術の現状については、文献等の調査により、以下に分類される。

a) 実構造物を直接評価

- ・通常の維持管理における点検結果に基づくグレーディング手法
- ・通常の維持管理における点検結果に基づく劣化曲線評価
- ・通常の維持管理における点検結果に基づく劣化要因の・対策の総合的判断(評価)
- ・常時観測と事後解析を組合せた評価

b) 模型・要素供試体の実環境下での長期暴露による評価

c) 模型・要素供試体の室内実験による評価

d) 数値解析による評価

実構造物を対象とした構造性能評価の現状としては、グレーディング手法やそれに基づく劣化曲線評価が現実的手法として用いられている。他は、実用化・一般化された手法には至っていないようである。

3.3 まとめと今後

性能評価における照査項目として、コンクリート標準示方書では、安全性、使用性、復旧性、耐久性が上げられている。耐久性の照査では、各劣化指標を直接の照査対象としているが、これは主に新規構造設計を対象とするものであり、維持管理編では日常・定期点検結果、詳細点検結果に基づく性能評価・判定の基本が示されている(表-2.8, 2.9)。

日常・定期点検結果は主に、グレーディング手法及びこれに基づく劣化曲線評価手法に用いられていると考えられる。この手法は、実情に即した方法であるが、詳細な現地状況・各種劣化要因を劣化進展メカニズムとして十分に反映する手法でない為、予測精度が十分検証されていない点が考えられる。しかし、大量の社会資本の維持管理の観点からは、現実問題としてアセットマネジメントの考え方が必須と考えられ、その点では劣化曲線評価手法はこれに適した、組み込みやすい手法である。

詳細点検結果は詳細な性能評価手法に用いることができるとされている。この手法は、各種劣化要因の発生・進展メカニズムを組み込み、対象構造物の現状及び将来の性能を評価するものである。但し、現状、実用化・一般化された手法には至っていないようである。

詳細な性能評価手法では、現状の構造設計における安全性、使用性、復旧性を照査する手法(材料定数の設定、構造解析による応答値算定、耐力式等による限界値の設定、照査)によるのが効率的である。この様な手法を実用化する上では、経年作用による老朽化(劣化)を表す各劣化指標と、構造設計に用いる入力条件を精度良く関係付けることが重要である。また、劣化進展メカニズムに基づく性能評価手法については、具体的な外因→内因→性能低下の相互関係を明確にした上で、標準的な検討方法を示していくことが重要と考えられる。

文献リスト

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の補強指針，コンクリートライブラリー95，1999.9
- 2) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ 71，2006.8
- 3) 鈴木，大津，青木，中村：衝撃力を受けるコンクリート水路構造物の非破壊損傷同定，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol7，pp.397-402，2007.11
- 4) 嘉指，杉田，藤原，猿田：下水道コンクリート構造物のエポキシ樹脂による防食および耐久性について，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol2，pp.47-52，2002
- 5) 小野寺，横木，高橋，田頭，佐藤：小口径管路の経年劣化と埋設地盤，第 42 回地盤工学研究発表会(名古屋)，pp.1527-1528，2007.7
- 6) 消防研究所：AE 法による石油タンク底部の腐食劣化評価に関する共同研究報告書 平成 16・17 年度共同研究報告書，平成 18 年 3 月
- 7) 大野康年：岸壁・護岸背面地盤の空洞・ゆるみ調査手法の開発，日本深海技術協会会報，2006.4
- 8) 松長，朝倉，小島，熊坂：地山の時間依存性を考慮した変状対策工の解析手法に関する検討，第 32 回地盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.41-48，2003.1
- 9) 日本コンクリート工学協会：複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告書，2001.5
- 10) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の長期性能支援モデル研究委員会報告書，2004.10
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編 2007 年版，2007.12

SWG2 活動報告書

構造性能計測技術

SWG2 名簿

氏名	会社名	所属
稲田 裕	清水建設(株)	技術研究所 安全安心技術センター 主任研究員
佐藤 登	三協(株)	代表取締役
門 万寿男	OSMOS 技術協会	日揮(株) 第2PJ本部 環境・新PJ事業部 OSMOS グループ グループリーダー
三好 俊康	OSMOS 技術協会	五洋建設(株) 技術研究所 耐震構造チーム
天野 勲	(株)保全工学研究所	代表取締役
柳瀬 高仁	(株)ジャスト	技術部 部長
恒国 光義	東電設計(株)	土木本部 耐震技術 保全技術グループ 課長代理
肥田 研一	(株)K&T こんさるたんと	代表取締役
◎松井 義昌	(株)K&T こんさるたんと	調査・診断部長

(敬称略, 順不同)

◎ : 幹事

1. 概要

1.1 活動方針

劣化したコンクリート構造物および土構造物の性能を定量的に評価する技術，および地盤から構造物までを包括した全体構造の性能を評価する技術に関する調査・検討を行う．各分野(コンクリート，土構造物，地盤等)における既存の計測・評価技術の整理を行い，特定の分野で用いられている最新の技術の応用やそれらの統合も視野に入れ，将来技術の方向性を模索する．(研究会主旨：抜粋)

1.2 活動内容

基礎構造物，地中構造物(地下構造物)の性能評価のための情報を取得できるような計測技術の調査を行う．

基礎構造物，地中構造物(地下構造物)の不具合事例の収集(地滑り地帯の変状トンネル，沈下を受けた構造物の変状事例，地中構造物に対する近接工事の事例等)を行い，これらの事例から構造性能を評価する上で有効な項目(パラメータ)を選定し，それらに対する計測技術の調査を行う．

2. 構造性能計測技術の調査

2.1 測定対象構造物の検討

測定対象構造物は限定しないが、本研究会の主旨である「劣化したコンクリート構造物および土構造物の性能を定量的に評価する技術，および地盤から構造物までを包括した全体構造の性能を評価する技術に関する調査・検討を行う．」を考慮し，構造系としてコンクリート構造物，土構造，地盤等に着目した選定とした．

これらの構造系に関して，地中構造物及び地盤の調査手法，損傷検知手法(非破壊検査等)，モニタリング手法の各視点からの調査手法を示す．

対象構造物として橋梁を取り上げた場合，橋梁と土構造との接点(影響範囲)は基礎部にある．基礎には，直接基礎，杭基礎等があるが何れも直接目視による観察が困難な部位である．また，橋台・橋脚は，波打ち際や河川等の周辺環境の厳しいところに位置することが多い．このため，上部構造に比べて塩害，ASR，凍害などの劣化現象が発生しやすい．さらに，河川内に位置する橋脚・橋台では洗掘による傾き，土圧作用による変形など，上部構造とは全く異なった損傷を生じる．

そこで，損傷検知手法及びモニタリング手法では，土構造との関係が強く，損傷を直接目視できない「杭」に着目して文献調査を行った．

2.2 地中構造物の調査手法

地中構造物及び地盤の調査手法を以下に示す．地中構造物は，橋梁の橋脚・橋台の基礎部(フーチング，杭等)及びトンネルを指す．基礎部は，その大半が地中に位置するため目視によりその状態を確認することが出来ない．ここでは，これらの位置・長さ等の物理情報を得る手法を示す．また，地盤に関しては，物性値を得る手法を示す．

a) 地中構造物

- | | |
|----------------|-------------------|
| ① ボアホールレーダー | : 地中埋設物(杭，基礎部)の調査 |
| ② 地中レーダー探査 | : 地中埋設物，空洞等の調査 |
| ③ カラーイメージングソナー | : 洗掘状態の調査 |
| ④ 磁気検層 | : 金属を有する構造の調査 |

b) 地盤

- | | |
|--------|-----------|
| ① 速度検層 | : 地盤物性の調査 |
|--------|-----------|

表-2.1 ボアホールレーダー①(地中埋設物(杭, 基礎部)の調査)

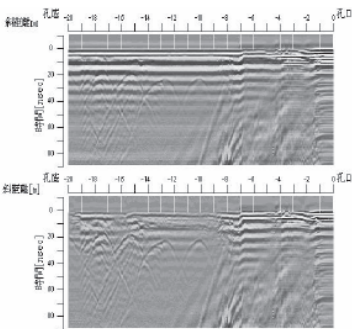
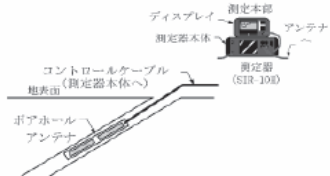
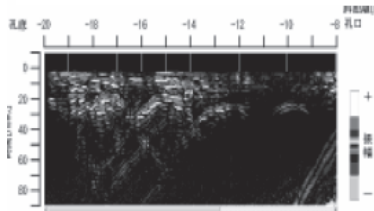
ボアホールレーダー	問い合わせ先	応用地質株式会社
	http://www.oyo.co.jp/	
概要：ボアホールアンテナの挿入による橋台等の基礎杭の杭間隔の測定が可能		
   図2.1 ボアホールレーダの構成と測定模式図 		

表-2.2 ボアホールレーダー②(地中埋設物(杭, 基礎部)の調査)

ボアホールレーダー	問い合わせ先	基礎地盤コンサルタンツ株式会社
	http://www.kiso.co.jp/	

概要：被対象物の 0.5m～1.0m に調査孔を設け、孔壁保護用の塩ビを建て込み、ボアホールアンテナの挿入による被対象物の状態測定が可能

写真1. 孔内測定管

写真2. 測定状況(右)

図2.2 レーダー波形図

(上：直孔、中：調査付近、下：斜孔)

写真3. 調査状況

表-2.3 地中レーダー探査(中埋設物、空洞等の調査)

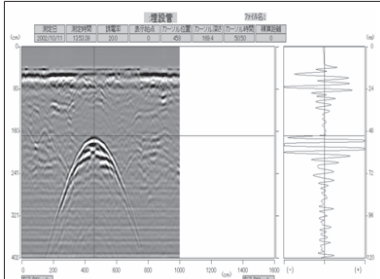
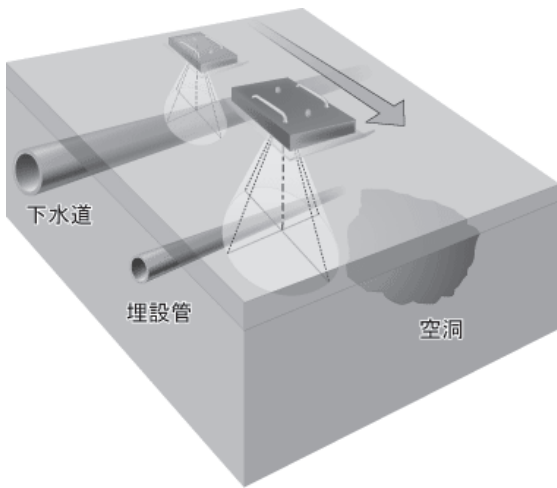
地中レーダー探査	問い合わせ先	株式会社日本地下探査
	http://www.chikatansa.co.jp/index.html	
概要：地盤中の空洞，ゆるみ，トンネルのコンクリート厚・背面の空洞		
		

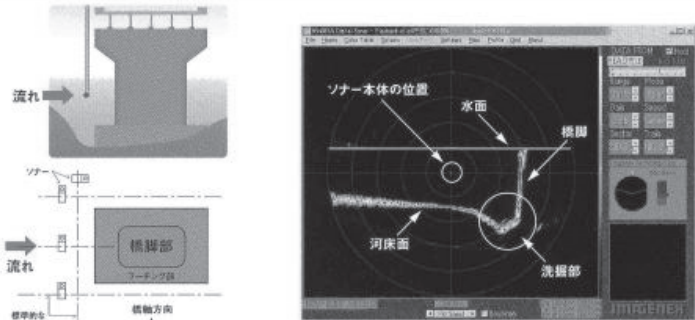
表-2.4 カラーイメージングソナー(洗掘状態の調査)

カラーイメージングソナー	問い合わせ先	株式会社ブリッジ・エンジニアリング
	http://www.hbeng.co.jp/	

概要：河川の水中に設置された橋脚基部の洗掘状況を、超音波を利用したカラーイメージングソナーシステムにより調査

調査方法

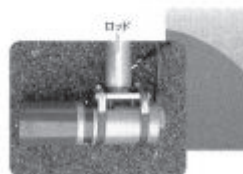
標準的な橋脚周りの洗掘調査は図に示すような、1橋脚当たり4測線で実施します。
定期的を実施する場合は、測線位置(ソナーの設置位置)を橋上にマーキングしておきます。計測データによる経時変化が直ちに判別できます。



モニター画面に映し出された洗掘状況



高欄への取付状況



超音波発信部(ヘッド)

表-2.5 磁気検層(金属を有する構造の調査)

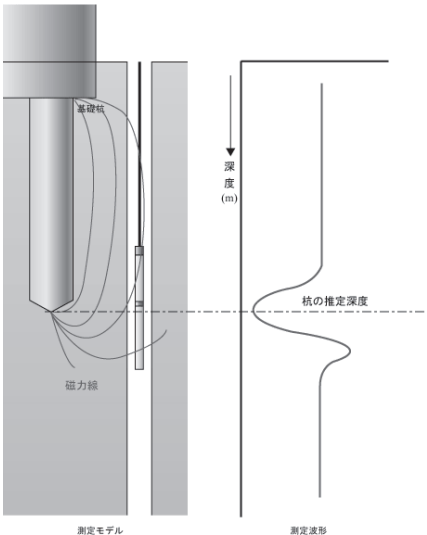
磁気検層	問い合わせ先	株式会社日本地下探査
	http://www.chikatansa.co.jp/index.html	
概要：地中の強磁性体による地場の乱れを計測することにより，強磁性体の分布を推定する．（鋼管杭，PC 杭，場所打ち杭等の金属を使用した杭の検知）		
		

表-2.6 速度検層(地盤物性の調査)

速度検層(P 波検層)	問い合わせ先	株式会社日本地下探査
	http://www.chikatansa.co.jp/index.html	

概要：地盤の大局的な P 波速度構造を求めることが出来る。

The diagram illustrates the process of measuring seismic velocity in the ground. On the left, a cross-section shows a surface with a vibrator (起振) and a measuring device (測定器). A probe (ソンデ) is inserted into the ground, and seismic waves (波動) are shown traveling through the soil layers. On the right, a graph shows the travel time (走時) in milliseconds (ms) versus depth (深度) in meters (m). The graph shows a change in slope at the estimated pile depth (杭の推定深度), indicating the transition from pile velocity (V1) to ground velocity (V2).

起振

測定器

波動

ソンデ

ハンマーによる打撃

測定器

走時 (ms)

深度 (m)

V1 (杭の伝播速度)

杭の推定深度

走時曲線の折れ点

V2 (地盤の伝播速度)

走時曲線

測定モデル

2.3 損傷検知手法(非破壊検査等)

2.3.1 測定対象構造物が異なる場合の損傷検知手法

測定対象構造物が異なる場合の損傷検知手法について以下に示す.

a) 地中構造物

i) 橋梁基礎

- ① インテグリティ試験 : 地中埋設物(杭, 基礎部)の調査
- ② ボアホールカメラ : 杭の破損調査

ii) トンネル

b) 覆工変位測定

- ③ コンバージェンスメジャー : 内空変位測定
- ④ トータルステーション : 内空変位測定

c) 覆工内部調査

- ⑤ 衝撃弾性波法 : 覆工内部空洞調査

d) 地表面：地盤

- ⑥ 変位計測(地回り計) : 地山の変状計測

表-2.7 インティグリティ試験(地中埋設物(杭, 基礎部)の調査)

インティグリティ試験	問い合わせ先	株式会社保全工学研究所
	http://www.hozeneng.co.jp/index.html	

概要：軽量かつ小型の装置で、杭体のひび割れなどの損傷、杭長などを調査することが可能です。

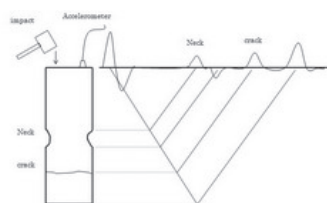


図-1 模式的な測定波形



図-3 測定装置

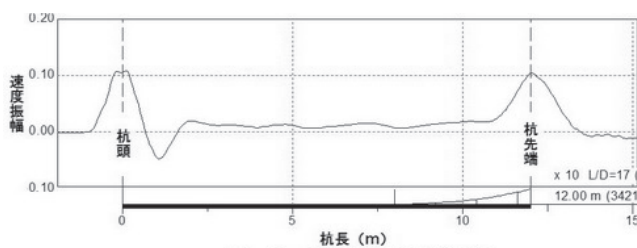


図-2 健全な杭の実測波形例



図-4 測定装置(改良型)

表-2.8 ボアホールカメラ(杭の破損調査)

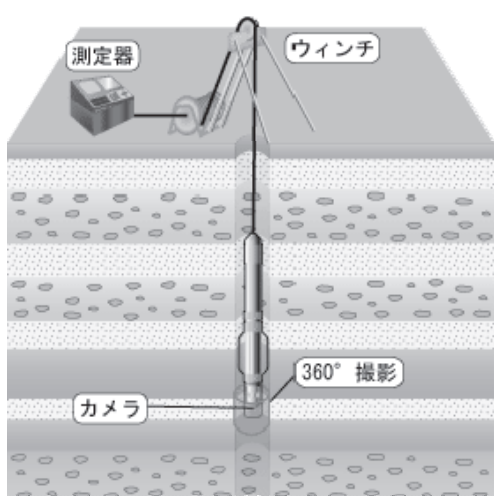
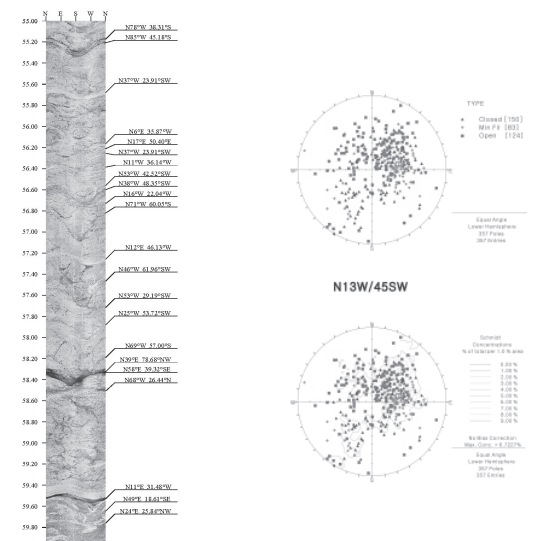
ボアホールカメラ	問い合わせ先	株式会社日本地下探査
	http://www.chikatansa.co.jp/index.html	
概要：ボーリング孔内あるいは杭内部に現れた亀裂等の不連続面をコンピュータ上で360°展開画像として表示し、それらの走向・傾斜を読み取ることが可能。		
 		

表-2.9 コンバージェンスメジャー(内空変位測定)

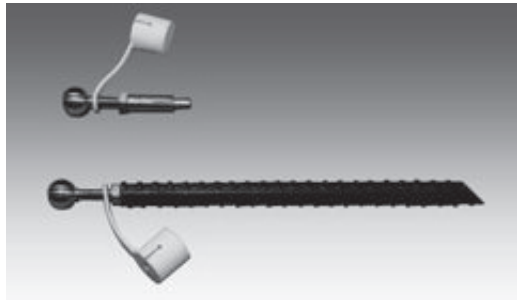
コンバージェンスメジャー	問い合わせ先	株式会社東横エルメス
	http://www.elmes.co.jp/	
概要： 2 点間の微小な相対変位を測定するもので、トンネルの内空変位を迅速かつ正確に、またどの方向でも測定することが出来ます。地すべり、橋台・橋脚・橋桁の変位測定も可能。		
 測定器本体  測定ポイント		

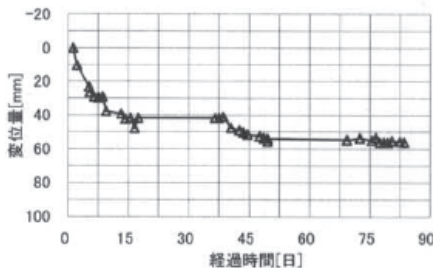
表-2.10 トータルステーション(内空変位測定)

トータルステーション	問い合わせ先	株式会社ニコン・トリンブル
	http://www.nikon-trimble.co.jp/index.html	

概要：トンネル内空形状の計測管理は、周辺地山の安定性を把握する上で非常に重要である。







変位量[mm]

経過時間[日]

経過時間[日]	変位量[mm]
0	0
2	10
4	20
6	30
8	35
10	38
12	40
14	42
16	45
18	48
20	50
22	52
24	55
26	58
28	60
30	62
32	65
34	68
36	70
38	72
40	75
42	78
44	80
46	82
48	85
50	88
52	90
54	92
56	95
58	98
60	100
62	102
64	105
66	108
68	110
70	112
72	115
74	118
76	120
78	122
80	125
82	128
84	130
86	132
88	135
90	138

表-2.11 衝撃弾性波法(覆工内部空洞調査)

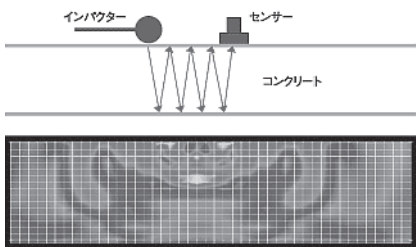
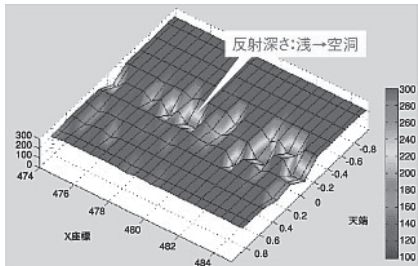
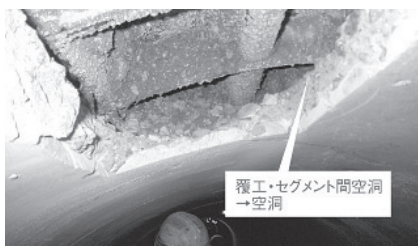
衝撃弾性波法	問い合わせ先	iTECS 技術協会
	http://www.itecs.jp/top/	
概要：コンクリート内部にジャンカ等の脆弱部が存在すると、弾性波の伝搬速度が低下するため、反射時間が長くなります。これらの性質を利用して内部欠陥の位置を推定します。		
   		

表-2.12 変位計測 - 地じり計(地山の変状計測)

変位計測(地じり計測)	問い合わせ先	株式会社東横エルメス
	http://www.elmes.co.jp/	

概要：GPS(Global Positioning System)は、宇宙空間に配置されたGPS衛星から送られる電波を地上のアンテナで受信し、アンテナの位置を3次元的に求める測位方法です。

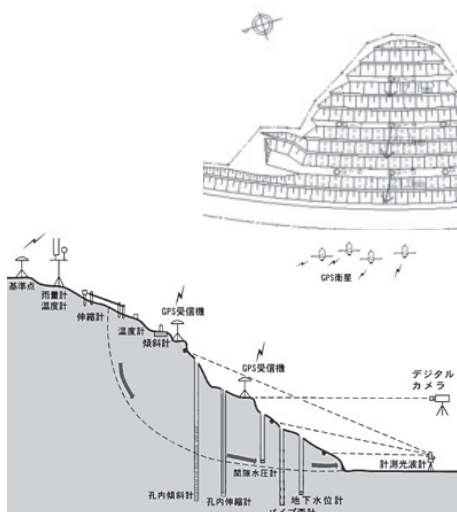


図1: 変位計測の断面図。GPS衛星からの電波を受信するGPS受信機、傾斜計、伸縮計、孔内傾斜計、孔内伸縮計、地下水位計、パイプ量計、デジタルカメラ、計測光線計が示されています。

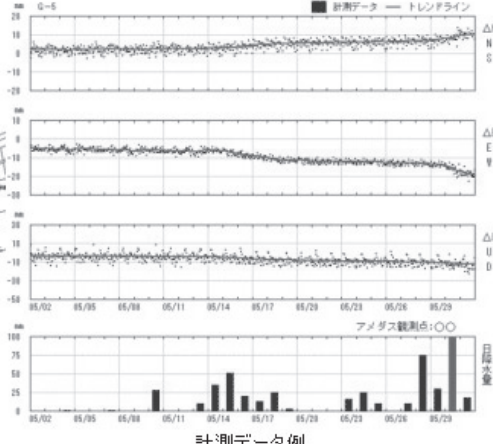


図2: 計測データ例。GPS衛星からの電波を受信するGPS受信機、傾斜計、伸縮計、孔内傾斜計、孔内伸縮計、地下水位計、パイプ量計、デジタルカメラ、計測光線計が示されています。

計測データ例

2.3.2 杭に着目した文献調査(損傷検知手法)

阿部¹⁾は、兵庫県南部地震により被災した杭基礎の被害の状況、調査に用いられた手法、さらに杭性能の評価についてまとめている。そして、地震によって被災した杭の調査方法や評価について統一的な方針や見解が不足していたこと、上部構造に被害がなくても基礎部分が大きく損傷を受けているケースも見られたことを指摘し、調査方法の検討の必要性を示している。また、実際に使われている手法である目視観測、インテグリティテスト(IT)、ボアホールカメラによる観察、傾斜計による測定、載荷試験、AEを利用した測定について、各調査法の特徴や適用性を比較し、以下のような結論を示している。最も確実な被害調査として基礎を掘削し露出させ直接目視する方法があるが、適用箇所は現実的には杭頭部に限られる。地中深部の損傷の有無を判断する手段としては、ITが主に用いられているが、小さな損傷に対しては判断が難しい場合も多い。直接的な調査方法として、ボアホールカメラを用いる方法があるが、クラック幅など損傷の度合いを定量的に評価するには問題がある。

森²⁾らはAE法を利用した杭の損傷度調査法を提案し、室内試験や現場実験によりその有効性を確認している。さらに、実際に兵庫県南部地震により被災したコンクリート杭に対する調査に適用を図っている³⁾。研究の中で、他の被害調査法と併せてその特徴や適用性を比較している。そして、特に地中の杭中間部での被害の検知にはどの手法にも課題があり、AE法を含む有効な非破壊検査法の実用化が必要であることを示している。

非破壊検査法としては、弾性応力波の周波数選択特性による方法の開発も進められている⁴⁾。この手法は不連続面において波の伝播特性が変化する現象を利用したものであり、微細な亀裂を探知できるとしている⁵⁾。また土木研究所を中心として、橋梁基礎を対象とした各種の非破壊検査手法の適用性を実証試験により検討した研究も行われている⁶⁾。既存の杭の損傷を検知するためには、非破壊検査の適用は不可欠であり、今後の非破壊検査技術の高度化・実用化は重要である。

2.4 モニタリング手法

2.4.1 測定対象構造物が異なる場合のモニタリング手法

測定対象構造物が異なる場合のモニタリング手法について以下に示す.

a) 地中構造物

i) 橋梁基礎

① 光ファイバセンサ

ii) トンネル

② 光ファイバセンサ

③ 導電塗料

表-2.13 光ファイバセンサ①(橋梁基礎)

OSMOS (光ファイバセンサ)	問い合わせ先	日揮株式会社 第2PJ本部 環境・新PJ事業部 http://www.osmos.jp/index.htm
概要：光ファイバを3本よった光学ストランドを活用し、建築構造物や自然構造物(斜面、地盤、岩盤)等に数mの光ファイバセンサを取付け、挙動をリアルタイムでモニタリングするシステム		
センサー部		■検測車輛通過時の床版挙動

表-2.14 光ファイバセンサ②(トンネル)

B-OTDR (光ファイバセンサ)	問い合わせ先	アイレック技建株式会社 http://www.airec.co.jp/
概要：構造物の歪み計測、道路斜面や堤防の防災モニタリング、構造物や路面等の分布温度計測など各種環境下における計測が可能です。		
既設NTTとう通と新設シールドトンネルが近接交差する箇所の光計測 とう通内軸方向に設置した光ファイバによる歪み計測を変位量に変換したデータ(電気計測との比較) 図+ひずみ量から算出した変位量と光学計測データの比較		通信用トンネル 設置写真

表-2.15 光ファイバセンサ(トンネル)

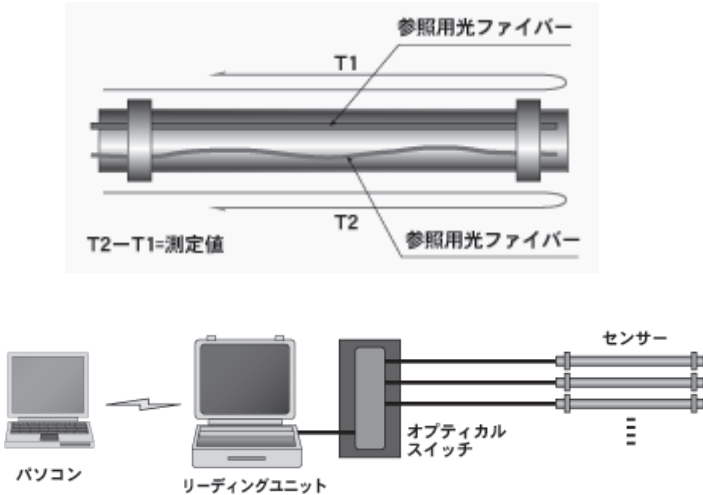
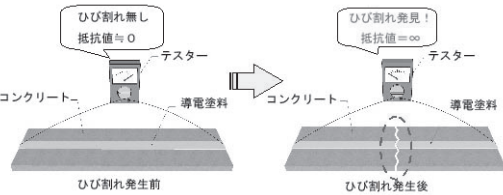
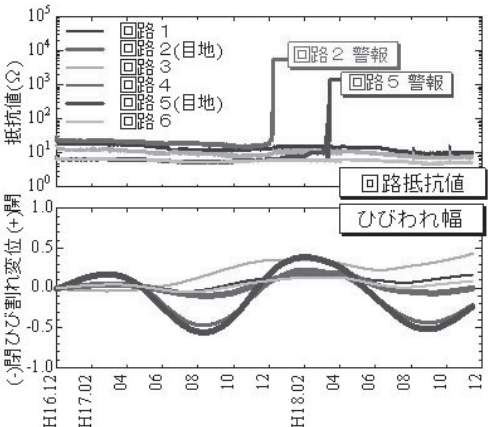
SOFO (光ファイバセンサ)	問い合わせ先 http://www.krcnet.co.jp/index.htm	株式会社計測リサーチコンサルタント
概要：コンクリートに埋め込んだ、あるいは表面に設置したセンサの2点間の伸縮差を精密に検出することにより、構造物の老化状態や構造物の動態現状を的確に把握することが可能。		
  橋梁施工例  トンネル施工例		

表-2.16 導電塗料(トンネル)

導電塗料	問い合わせ先 http://www.rtri.or.jp/index_J.html	財団法人鉄道総合技術研究所
概要：導電材料で、コンクリート表面に帯状に導電回路を作成し、その両端に電圧をかけます。コンクリートにひび割れが入ると、導電回路も破断され電流が流れなくなります。この仕組みを利用し、回路の導通状況を監視することにより、コンクリートのひび割れを検知出来ます。		
 施工状況   モニタリング状況		

2.4.2 杭に着目した文献調査(モニタリング手法)

杭にあらかじめセンサを設置し、それを用いた計測により損傷や変状を検知しようというモニタリングの研究も幾つか行われている。センシングの手法としては様々なものがあるが、光ファイバを用いた計測手法が適用された例が幾つか見られる。

Glisic⁷⁾らは、SOFO方式の光ファイバセンサを用いたモニタリング手法を杭に適用した成果を示し、圧縮や引抜き、さらに曲げ変形に対して有効な計測結果が得られたことを示している。

一方、Klar⁸⁾らはB-OTDR方式の光ファイバ計測により杭のひずみ分布を図り、打設時の近接のトンネル工事による杭の変形計測を行う手法を提案している。彼らは実構造物への適用を図り、その有効性の確認を行っている。

また、加藤⁹⁾らは、順次破断するように光ファイバを設置したセンシングユニットを作成し単純な計測方式であるOTDR方を用いたコンクリート杭の損傷検知手法を提案し、実験によりその有効性を確認している。

光ファイバによる計測以外では、炭素繊維を検知材として用い、電気抵抗値の計測によりひずみやひび割れを検知する研究も進められている。石井¹⁰⁾らはコンクリート杭の健全性モニタリングのためのセンサを開発し、部材試験や構造体試験によりその特性と損傷検知性能を明らかにした¹¹⁾。また実構造物への適用を図り、その有効性を確認した結果が示されている¹²⁾。

その他の新しいモニタリング手法の基礎構造の維持管理への適用に係わる研究として、西岡ら¹³⁾は圧電材料を用いた圧電デバイス、透水性多孔性材料を用いた透水デバイス、さらに通電カプセルなどの研究事例を示している。いずれの手法も鉄道構造物の基礎、特に杭体内の損傷を検知する手法を開発し、維持管理のコストと手間を低減することを目的としている。彼らの研究は被災直後の被害構造物の抽出と供用再開判断の迅速化に向けたものである。

浜本¹⁴⁾らは振動、波動計測によるPHC杭の総合的ヘルスマニタリング技術の構築を目指し、PHC杭の曲げ試験において加振機試験、インパクトハンマ試験、AE試験、超音波試験を実施している。彼らは実験により得られた結果に基づき、地震を受けた杭について、掘削前に振動モニタリングとして加振機試験、波動モニタリングとしてAE試験を実施し、杭基礎全体としての損傷程度と損傷杭の平面位置を把握した後、杭頭を掘削した後に振動モニタリングとしてインパクトハンマ試験、波動モニタリングとして超音波試験を実施する二段階の損傷検出方法を提案している。

3. まとめ

現時点では損傷検知手法及びモニタリング手法について情報の収集を行った段階であり、性能評価のための指標についての整理・分析が必要である。また、対象構造に対する不具合事例については、十分な情報収集に至らなかった。

本 SWG での検討・議論により得られた調査手法ごとの知見を以下に記す。

1) 地中構造物の調査手法

地中構造物のうち橋梁の基礎部においては、その位置・長さ等の特定が重要である。これらに関しては、電磁波を活用したレーダー、ソナー等が有効な手法である。金属を有する材料に対しては磁気探査手法が有効である。

2) 損傷検知手法

損傷検知手法に関しては、地中構造物では弾性波を活用した IT 法が有効であり、トンネルの構造体についてはレーザーあるいはメジャーによる変位測定法、土構造についても変位測定が有効であるが、広範囲を対象とすることもあり GPS を活用したシステムが有効と考えられる。

3) モニタリング手法

モニタリング手法に関しては、光ファイバセンサがその主流をなしているように見受けられる。

来年度以降は、調査対象構造物全般にわたる情報収集と性能指標の分析が行えるよう、活動内容を構築していきたいと考える。

活動報告

WG1(SWG2)第1回 議事録

1. 開催日時場所

日時：2008年12月2日(火曜日) 16:00～16:30

場所：東京大学生産技術研究所 As棟 301-302

2. 出席者

- 稲田(清水建設)
- 佐藤(三協)
- 門 (OSMOS 技術協会)
- 三好(OSMOS 技術協会)
- 天野(保全工学研究所)
- 柳瀬(ジャスト)
- 恒国(東電設計)
- 肥田(K&T こんさるたんと)
- 松井(K&T こんさるたんと)

3. 配布資料

全体会議資料を活用

4. 議事

4.1 門委員より，SWG2の活動方針(案)について説明がなされた．

4.2 活動方針に基づき，具体的な意見交換がなされた．

- ・構造性能設計技術をメインテーマとするが，今年度は「構造物と地盤に関連した構造性能計測技術」に着目して活動を進めることを確認した．
- ・対象構造物は，建築基礎構造物，地下構造物(地下タンク，地下街等)，橋梁下部工，トンネル，ダム，いずれも土構造物との連成作用が考えられるものを考慮することが確認された．
- ・計測技術に関して，時間軸により区分(静的，動的)することも考えられることが確認された．
- ・基礎構造物，地中構造物の不具合の事例が有効との意見があった．
- ・不具合に対して「外力をとらえる」，「応答をとらえる」等，計測対象による計測手法区分も有効との意見がなされた．
- ・キーワード：対象構造物，性能評価指標，評価項目，
調査測定手法(損傷検知，モニタリング)

4.3 SWG 開催場所について，門氏より提供の申し出があった．

文献リスト

- 1) 阿部秋男：杭の健全性の評価，基礎工， Vol.24, No.11, pp.22-29, 1996
- 2) 森伸一郎，塩谷智基：地震で被災したコンクリート杭に対する AE 法による破損度調査法の開発，土木学会論文集，No.605 / I-45, pp.61-77, 1998.10
- 3) 森伸一郎，塩谷智基，岩城圭介：1995 年兵庫県南部地震で被災したコンクリート杭に対する AE 法破損度調査法の適用性，土木学会論文集，No.644 / VI-46, pp.135-147, 2000.3
- 4) 孫建生，塩月隆久：構造物の非破壊探査システム「オーリス」，電力土木，No.272, pp.109-111, 1997.11
- 5) 塩月隆久，孫建生，永井哲夫，池尻健：構造物(特に地下構造物)の損傷度非破壊探査システムの開発，地盤工学会研究発表会，Vol.32, No.H-1, pp.1657-1660, 1997.9
- 6) 秋田直樹，石田雅博，市村靖光，福井次郎，藤井康男：橋梁基礎構造の調査に関する研究(その1)～(その7)，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.54, No.3-A, pp.918-931, 1999
- 7) Glisic, B., Inaudi, D., Vurpillot, S., Bu, E. and Chen, C.-J.: Piles monitoring using topologies of long-gage fiber optic sensor, Proc of Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Vol.1, pp.291-298, 2003.11
- 8) Klar, A., Bennett, P.J., Soga, K., Mair, R.J., Tester, P., Fernie, R., Stjohn, H.D. and Torp-Peterson, G.: Distributed strain measurement for pile foundation, Proc. Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering 159, Paper 14403, pp.1-10, 2006
- 9) 加藤洋一，田村昌仁，勅使川原正臣，坂田光児：光ファイバを利用した杭の損傷検知センサの開発その1～その2，日本建築学会学術講演梗概集，21004-21005, 2005.9
- 10) 石井清，稲田裕，杉村義広：炭素繊維束センサの開発と性能評価 杭の健全性モニタリング手法の開発(その1)，日本建築学会構造系論文集，No.557, pp.129-136, 2002.7
- 11) 稲田裕，石井清，杉村義広，佐々木建一：炭素繊維束センサの杭損傷検知に対する性能評価 杭の健全性モニタリング手法の開発(その2)，日本建築学会構造系論文集，No.563, pp.91-98, 2003.1
- 12) Inada, H., Ishii, K. and Sugimura, Y.: Application of carbon fiber sensor for monitoring damage to concrete piles, Proc. 1st International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructures, Nov. 13-15, 2003
- 13) 西岡英俊，渡辺健治，斉藤正人，村田修，川上英二：インテリジェントマテリアルを利用した基礎構造物の損傷検知手法の提案，土と基礎，Vol.51, No.11, pp.17-19, 2003.11
- 14) 濱本卓司，大村哲矢，堀内大悟：振動・波動計測による PHC 杭の総合的ヘルスマニタリングに関する室内実験，日本建築学会構造系論文集，No.612, pp.47-54, 2007.2

SWG3 活動報告書

コンクリートと地盤の融合検討

SWG3 名簿

氏名	会社名	所属
加藤 絵万	(独)港湾空港技術研究所	地盤・構造部 構造研究チーム
菅野 友紀*	竹中土木(株)	建設技術研究部 地盤・基礎部門地下工法グループ
◎中山 聡子	(株)保全工学研究所	技術部
濱田 洋志	東亜建設工業(株)	技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループ

(五十音順)

◎：幹事

*：途中退会

1. コンクリートと地盤の融合検討

1.1 SWG3 の目的

本 SWG では、地盤と接しているもしくは地中のコンクリート構造物について、経年的な性能低下についてまとめ、構造物の性能低下の原因となる変状について想定を行った。

ただし、WG2 ですでに地盤の性能低下については検討されているため、SWG3 では、地盤と接している構造物の性能低下についてコンクリート側から検討することとした。

1.2 SWG3 の取りまとめの方針

本研究報告では、コンクリートと地盤の融合の検討を行うために、地盤と接しているコンクリート構造物に着目した。これらの構造物に想定される性能低下について例を挙げ、設計項目や点検等の方法について問題提起を行った。着目した構造物の例は以下の通りである。

- ・擁壁
- ・護岸構造物

1.3 活動経過

①2009/1/14 委員会を開催

コンクリートと地盤が接しているもしくは、地盤中のコンクリート構造物について構造物の性能低下事例をあげる。

- ・着目点は、地盤の性能低下とコンクリートの性能低下の関係。
- ・性能低下の原因が地盤側からなのか、それともコンクリート側からなのかなどについて、構造物の担当は以下の通りである。

護岸構造物：加藤委員、濱田委員

擁壁：中山委員

基礎：菅野委員(途中退会)

②2009/3/7 構造物の事例を、メールにて幹事まで提出することとした。

③2009/4/14 委員会を開催した。

- ・報告書(案)について意見交換を行った。
- ・用語の説明を追加することとした。
- ・報告書(案)の方向性を話し合った。

(文責：(株)保全工学研究所 中山聡子)

2. SWG3 における用語の定義

コンクリートと地盤の維持管理の融合検討にあたって、SWG3では、まず、本報告書で使用する用語を定義した。用語の定義にあたっては、既往の文献1)～8)を参考にした。文献の調査結果を表-2.1に、SWG3で使用する用語の定義を表-2.2に示す。本報告書では、コンクリート標準示方書に書かれている用語の定義を引用し、コンクリート標準示方書で定義されていないものに関しては、その他の文献を参考に定義した。

表-2.1 使用する用語の文献調査結果

文 献									
用 語	調査 数量	点検マニュアル類			コンク リ ー ト 構 造 物			鋼構造物	
		橋 梁	港湾施設	海岸保全施設	コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針・2009、(社)日本コンクリート工学協会、2009.3、pp.3 ⁶⁾	土木学会規格として制定が望まれる試験方法の動向・コンクリートの性能評価を可能とする新しい基理体系とは、(社)土木学会、2009.4、pp.12 ⁵⁾	腐食した鋼構造物の耐久性能調査マニュアル、(社)土木学会、2009.3、pp.2 ⁷⁾	土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
維持管理	8	道路橋マネジメントの手引き、(財)海洋技術・橋梁調査会、2004、8、II (p.45) ¹⁾	港物の施設の維持管理技術マニュアル、(財)港湾技術研究所センター、2007.10、pp.3 ²⁾	ライフサイクルマネジメントのための施設保全施設維持管理マニュアル(案)へ提言・港湾・河川の点検・診断へ、農村振興局防災課より、2008.2、pp.5 ³⁾	コンクリート構造方書【維持管理編】、(社)土木学会、2007、pp.5 ⁴⁾	鋼構造物の性能を要求された水準以上に保持するための全ての技術行為。	鋼構造物の状態や健全度を判断するために必要な項目を検討すること。鋼構造物の状態や健全度を判断するために必要な項目を検討すること。鋼構造物の状態や健全度を判断するために必要な項目を検討すること。	土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
維持	3	既設橋の機能を保持するため、一般に日常計画的に反復して行われる措置をいう。		施設の性能の維持あるいは快復のために行う、点検・調査・評価、予防及び補修工事からなる一連の作業の総称。			鋼構造物の性能と能力。		
構造物(部材)の機能	1		目的または要求に応じて構造物が果たすべき役割。		目的または要求に応じて構造物(部材)が果たすべき役割。				
構造物(部材)の性能	2		機能を満足するために構造物が保有する性能。一般に、安全性、使用性、復旧性能がある。		目的または要求に応じて構造物(部材)が発揮する能力。				
要求性能	2		施設あるいは構造物に必要とされる性能。		目的及び機能に応じて構造物に求められる性能。				
点 検	4	施設の損傷、機能等の状態を把握するもの。			複数の試験で構成され、その結果に基づき総合的な評価を行うこと。	コンクリート部材(構造物)の現状を把握する行為で、コンクリート部材(構造物)およびひび割れの状態に対する具体的な情報を得るための行為。	鋼構造物の状態や健全度を判断するために必要な項目を検討すること。鋼構造物の状態や健全度を判断するために必要な項目を検討すること。鋼構造物の状態や健全度を判断するために必要な項目を検討すること。	土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
調 査	6	点検を引き続いて、補修等の対応策を講ずるための損傷特性を詳細に把握するもの、点検結果に基づく対策の一つ。			複数の試験で構成され、その結果に基づき総合的な評価を行うこと。	コンクリート部材(構造物)の現状を把握する行為で、コンクリート部材(構造物)およびひび割れの状態に対する具体的な情報を得るための行為。	鋼構造物の状態や健全度を判断するために必要な項目を検討すること。鋼構造物の状態や健全度を判断するために必要な項目を検討すること。鋼構造物の状態や健全度を判断するために必要な項目を検討すること。	土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
点検・調査	1		点検頻度のために実施する調査、試験等の行為の総称。					土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
踏 査	1							土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
モニタリング	1				構造物や部材にセンサなどを設置し、構造物や部材の状態を把握すること。			土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
測 定	1							土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
試 験	1					測定そのものを指す。		土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
手法	1					直接的な評価を含んだ測定行為。		土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
診 断	1							土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
点検診断	1		構造物の部材の有無を点検・調査により把握し、劣化度を判定する行為。					土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
日常点検	1				1回数日～週程度の頻度で実施する定期的な点検で、目視観察などの簡易な調査を主体としたもの。			土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
通常点検	1	通常点検とは、損傷の早期発見を図るために、道路の通常巡回として実施するもので、道路・バイローラカー内からの目視を主体とした点検をいう。						土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
定期点検	2	橋梁の損傷状況を把握し、損傷の判定を行うために、頻度を定めて定期的に実施するもので、近接目視を基本としながら目的に応じて必要な点検機械・器具を用いて実施する詳細な点検をいう。			1回数年程度の頻度で実施する定期的な点検で、日常点検では確認できない構造物や部材の状態を把握することを目的としたもの。			土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
中間点検	1	中間点検とは、定期点検を補たために、定期点検の中間年に実施するもので、既設の点検設備や路上・路下からの目視を基本とした点検をいう。						土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
特定点検	1	特定点検とは、重害等の特定の事象を対象とし、予め頻度を定めて実施する点検をいう。						土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
異常時点検	1	異常時点検とは、地震、台風、集中豪雨、暴風等の災害や大きな事故が発生した場合、橋梁に予期していなかった異常が発見された場合などに行う点検をいう。						土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
標準調査	1				点検で実施する調査として、維持管理計画の中で予め定められたもの。			土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
詳細調査	2	詳細調査とは、補修等の必要性の判定や補修等の方法を決定するに際して、損傷原因や損傷の程度をより詳細に把握するために実施する調査をいう。			標準調査では得られないより詳細な情報を得るために実施する調査の総称。			土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
追跡調査	1			構造物全体の現状の有無を把握し、応急措置の必要性の判断や、二次点検を実施すべき箇所の選別を行う目的で実施する点検。				土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
一次点検	1			構造物の部材・部材損傷・変状の状況を把握し、健全度評価と必要な対策の検討を行う目的に実施する点検。				土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
二次点検	1					対象とするひび割れが、現状および将来のコンクリート部材(構造物)の性能に与える影響を客観的に求める行為。		土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
評 価	1					評価から得られたコンクリート部材(構造物)の性能に与える影響程度に基づいて、構造物の重要度など固有の性能を加味した上で、ひび割れの補修・補強の要否を決定する行為。		土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
判 定	1		構造物に生じる不具合の総称、劣化や損傷が顕在化したもの、変位・変形なども含まれる。			初期段階、劣化、損傷の総称。		土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
変 状	3		変状の原因、変状の発生と顕在化、変状の結果生じる影響、そして構造物の性能低下へと進行する過程。					土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	
変状連鎖	1		変状の原因、変状の発生と顕在化、変状の結果生じる影響、そして構造物の性能低下へと進行する過程。					土木鋼構造物の点検・診断・対策技術、(社)日本鋼構造協会、2006 ⁸⁾	

表-2.2 SWG3 で使用する用語の定義

用 語	定 義
維持管理	構造物の供用期間において、構造物の性能を要求された水準以上に保持するための全ての技術行為。
構造物(部材)の機能	目的または要求に応じて構造物(部材)が果たすべき役割。
構造物(部材)の性能	目的または要求に応じて構造物(部材)が発揮する能力。
要求性能	目的及び機能に応じて構造物に求められる性能。
点 検	構造物や部材の損傷、異常等を把握する行為の総称。
調 査	構造物や部材の損傷、異常等を調べる行為。点検で実施する。
モニタリング	構造物や部材にセンサなどを設置し、構造物や部材の状態を把握すること。
変状	構造物に生じる不具合の総称。劣化や損傷が顕在化したもの、変位・変形なども含まれる。
変状連鎖	変状の原因、変状の発生と顕在化、変状の結果生じる影響、そして構造物の性能低下へと進行する過程。

3. 事例収集

地盤と接しているもしくは地中のコンクリート構造物の性能低下事例について収集を行った。

3.1 想定以上の地震力で倒壊した L 型擁壁

3.1.1 概要

2004 年 10 月 23 日に発生した新潟県中越地震によって、道路や宅地の法面に施工した L 型擁壁が各地で倒壊した(写真-3.1.1.1)．倒壊した擁壁の製造図面は図-3.1.1.1 の通りであった。



写真-3.1.1.1 被災状況

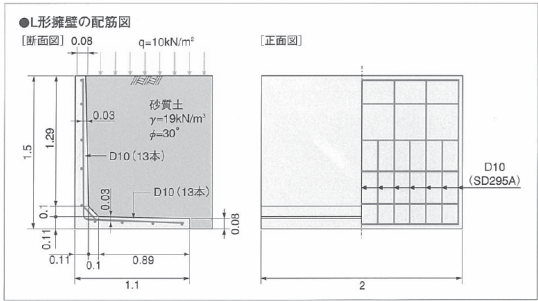


図-3.1.1.1 L 型擁壁の配筋図

(社)日本道路協会の「道路土木－擁壁工指針」に基づいて照査した結果では、旧耐震時の $K_h=0.14$ で設計しており、新耐震後の設計基準は満たしていないと考えられる。

●L形擁壁の構造安定性の照査結果(不等記号の右側は許容値)

		常時	地震時 ($k_h=0.14$)
安定検討	合力の偏心量 (m)	$e=0.10 < e_a=0.37$	$e=0.17 < e_a=0.37$
	滑動の安全率	$F_s=2.1 > 1.5$	$F_s=1.7 > 1.2$
	最大地盤反力度 (kN/m^2)	$q_1=60 < q_a=100$	$q_1=63 < q_a=150$
縦壁の応力度 (N/mm^2)	コンクリートの曲げ圧縮応力度	$\sigma_c=5 < \sigma_{ca}=8$	$\sigma_c=3 < \sigma_{ca}=12$
	鉄筋の引っ張り応力度	$\sigma_s=130 < \sigma_{sa}=160$	$\sigma_{sa}=90 < \sigma_{sa}=270$

図-3.1.1.2 L 型擁壁の構造安定性の照査結果

3.1.2 倒壊の原因

破壊の原因は想定以上の地震力であった。このときの最大加速度は 1308gal で、 $K_h=1308 \text{ gal} \div 980 \text{ gal}=1.33$ であった。またこの値は設計時 $K_h=0.14$ の約 9.5 倍であった。

水平震度が 1.0 (=980 gal) になると縦壁基部に発生する曲げモーメントは、縦壁の破壊抵抗曲げモーメントである 10.5 kN/m を超える。地震波形から 980gal を超える波が 6 つあり、縦壁の破壊抵抗曲げモーメントを繰り返して受けたことによって縦壁が破壊されたと考えられる。

ただし、同じ様な配置の擁壁でも根入れの抵抗が小さい場合は、滑動し破壊はしなかった。これは擁壁が滑動したため、滑動抵抗以上の力が擁壁に伝わらなかったためであると考えられる。

図-3.1.2.1 に水平震度と擁壁基部に働く曲げモーメントとの関係を示す。

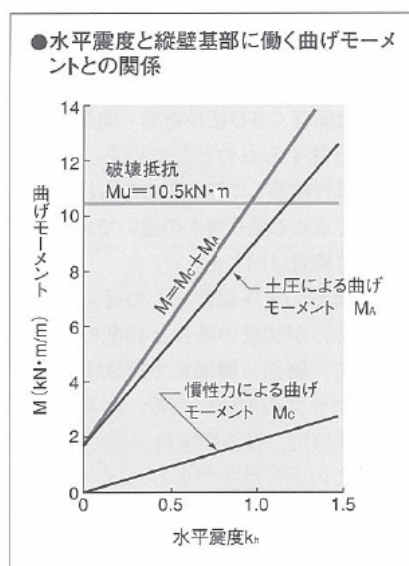


図-3.1.2.1 水平震度と擁壁基部に働く曲げモーメントとの関係

3.1.3 対応策

根入れ抵抗が小さければ倒壊は免れたが、本来の地盤の性能を果たしていない。そのため地盤側の対応策よりも、コンクリート側での断面曲げ破壊を起こさないような耐力設計をすることが必要である。

参考：クイズ土はなぜ崩れるのか 日経コンストラクション編⁹⁾

(株保全工学研究所 中山聡子)

3.2 土砂吸出しによる重力式擁壁の倒壊事例

3.2.1 概要

平成 19 年 9 月，中心気圧 965 hPa という非常に強い勢力の台風 9 号が神奈川県小田原市に上陸した．これにより発生した高波が相模湾沿岸を襲い，西部の海岸に近接した国道 1 号線西湘バイパスの重力式擁壁が延長約 1.0 km にわたって倒壊した．背面土砂の洗掘により，被害の大きい箇所では 4 車線のうち海側 2 車線の路体が流出するなど，その被害は甚大なものであった．国土交通省関東地方整備局横浜国道事務所が主催する「西湘バイパス構造物崩壊に関する調査検討委員会」では，台風 9 号による甚大な被害の背景には，通常より周期が長くエネルギーの大きな波であったこと，海底地形により波が集中したことのほかに，長期にわたる擁壁前面の砂浜の侵食が影響していると報告されている．

3.2.2 被災状況

被災地区前面の海底地形(大磯海脚)の影響により屈曲した波が約 1.0 km の区間に集中し，沖側および西側に向って局所的に著しい土砂移動が生じた．これにより，被災区間の砂浜が急激に侵食されるとともに，重力式擁壁の前面の地盤が 2～3 m 低下し，重力式擁壁直下の土砂が海に吸い出されたことにより擁壁が倒壊した．重力式擁壁の倒壊によって支持を失った道路側の法面を波が洗掘し，被害の大きい箇所では中央分離帯から下り線全ての盛土が崩壊し，アスファルト舗装が陥没した(図-3.2.2.1，写真-3.2.2.1 参照)．

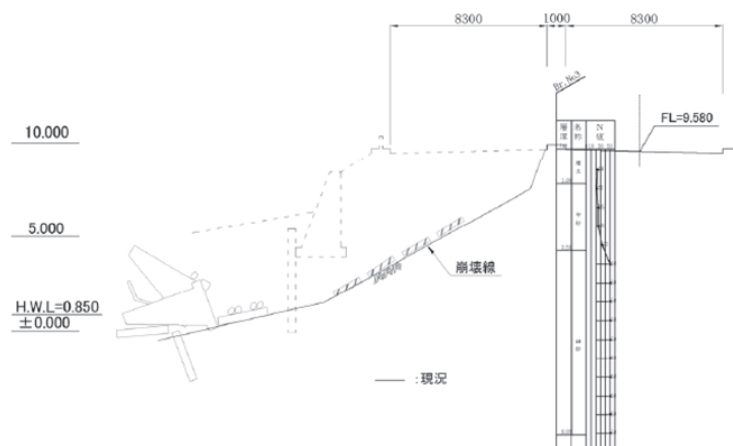


図-3.2.2.1 被災状況断面図(被災程度大)

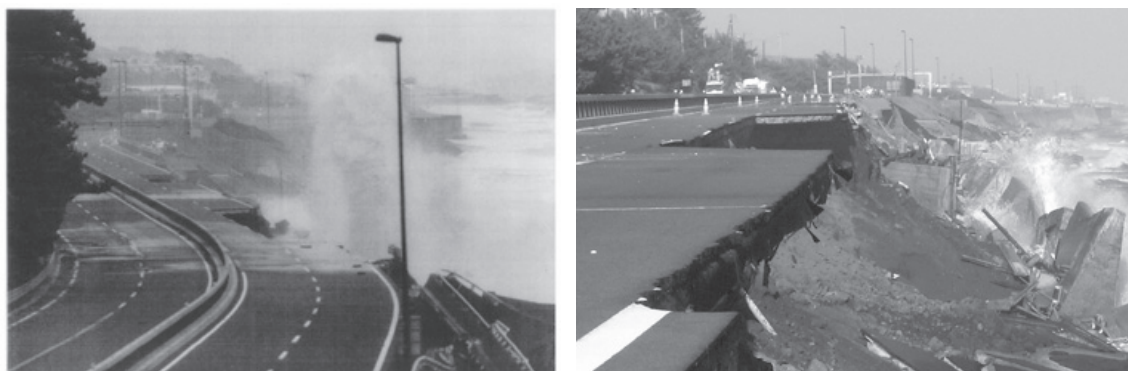


写真-3.2.2.1 被災状況

3.2.3 長期的な砂浜の侵食事例

西湘バイパスは、昭和 47 年(1972 年)に完成し、被災時点で 35 年が経過している。建設当時は、写真-3.2.3.1 に示すように、被災区間全域にわたって約 40 m 程度の砂浜が確保されており、高波浪に対する安全性も高かったものと思われる。

しかし、図-3.2.3.1 に示すように、昭和 39 年(1964 年)以降、被災区間周辺の汀線は侵食傾向にあり、平成 7 年(1995 年)から大規模な養浜が実施されてきたが侵食傾向は変わらず、被災前の汀線の後退量は当時比べて 10 ～20 m にも達していた。

したがって、砂浜の侵食により重力式擁壁周辺まで波が到達しやすくなり、台風時の高波による重力式擁壁の倒壊を助長したものと考えられる。



写真-3.2.3.1 西湘バイパス建設当時の写真

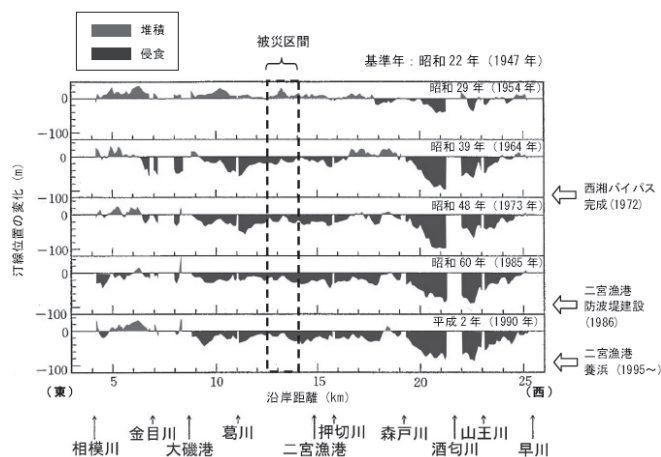


図-3.2.3.1 汀線変化解析結果

3.2.4 港湾施設に関する地盤と構造物の関係について

岸壁を形成する構造物(擁壁、ケーソン式、矢板式など)は、背面地盤の土圧を支持する重要な構造物である。しかし、その構造物を支持しているのは押さえ盛土や支持地盤であり、波浪により洗掘されれば構造物は支持を失い、崩壊が生じる。したがって、港湾構造物では、地盤の変状がコンクリート自体の劣化を引き起こすことはあまり想定されないが、それを支持する地盤の変状により構造物としての機能を果たせなくなることは事例として挙げられる。地盤の変状を設計にどのように盛り込み、施設としての耐久設計を施すかが重要となってくると考えられる。

参考：「西湘バイパス構造物崩落に関する調査検討委員会資料」(国土交通省関東地方整備局横浜国道事務所)¹⁰⁾

(東亜建設工業(株) 濱田洋志)

4. 構造性能低下の評価の現状と課題

4.1 護岸・堤防など沿岸防災施設の変状連鎖

我が国の護岸・堤防や津波防波堤などの沿岸防災施設は、昭和30年代の高潮災害を契機に整備されたものが多く、老朽化による劣化や変状が顕著となった施設が増加してきている。このような施設では、今後発生する災害に対する防護機能の低下が危惧されることから、適時適切な維持補修や更新が求められている。また近年、大きな台風被害が沿岸防災施設に発生していることに加えて、今後、海面上昇や地球温暖化に伴う災害ハザードの上昇が懸念されている。これを受けて、国土交通省港湾局では、交通政策審議会港湾分科会の中に、防災・保全部会を設置し、「地球温暖化に起因する気候変化に対する港湾政策のあり方」について検討を行っている。沿岸防災施設の防護機能を確保し長期間にわたる供用中のいずれの時点においてもこの機能を保証するためには、戦略的で効率的な維持管理が必要となる。

護岸・堤防、防波堤等の沿岸防災施設は、災害時に初めてその機能が発揮されるという性格を有している。このような待機系の施設においては、現時点における防護機能がどれだけ残存しているか、点検結果に基づいて適切に評価することで、災害時に起こりうる被害を軽減するための対策を予防保全的に実施することが不可欠となる。

沿岸防災施設の戦略的な維持管理に向けた取組みとして、まず、点検のためのマニュアル(案)^{3),11)}が整備された。現在は、これを実行に移すための方策が検討されている。しかし、沿岸防災施設に発生する様々な変状は、構造要素相互で強く関連しあっている上に、構造物に作用する外的要因が多様であるため、陸上構造物と比較してその進展は複雑となる。施設の合理的な維持管理のためには、施設に生じる変状連鎖の機構を理解し、施設の性能に及ぼす影響が大きく、かつ、点検の対象としやすい変状を主要な変状として選定し、点検診断の対象とすることが望ましい²⁾。

護岸・堤防、防波堤等などの沿岸防災施設の変状の進行には、地震等により短期間に変状が生じる突発型と地盤沈下や材料の劣化等により時間の経過とともに徐々に変状が進行する進行型、およびその複合型がある^{3),11)}。代表的な変状連鎖の例を以下に列挙する。

①消波工なしの護岸・堤防の突発型変状連鎖

- ・ 波浪によって、堤体前面から堤体下部が洗掘され、堤体や基礎工が損傷を受け、堤体土砂が吸い出され、さらに堤体が破壊されてゆくもの
- ・ 波浪によって、表法工、堤体工、天端工、裏法工などが損傷を受け、堤体土砂が吸い出され、堤体が破壊されていくもの
- ・ 波浪によって波返工が損傷を受け、天端高が低下していくもの等がある。

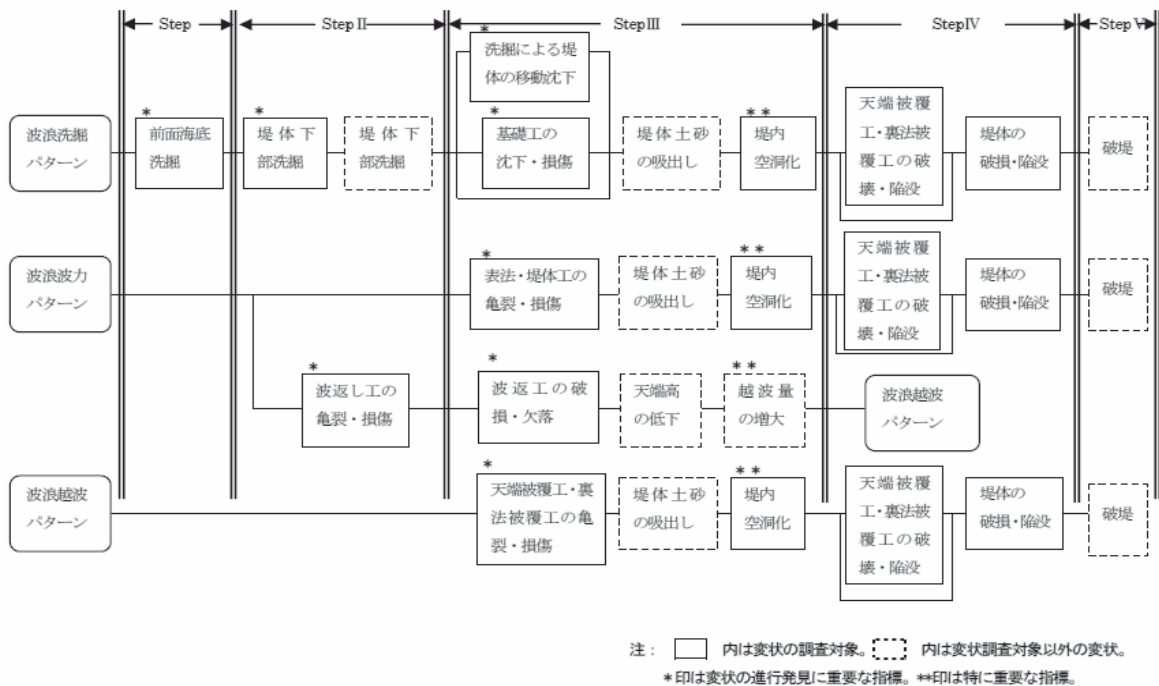


図-4.1.1 堤防(消波工なし)の主要変状連鎖¹³⁾

②消波工被覆の護岸・堤防の突発型変状連鎖

護岸・堤防が消波工で被覆されている場合、そのほとんどの変状は消波工に発生する。代表的な変状現象の進行過程としては、

- ・ 波浪によって、前面海底が洗掘され、消波工・根固め工が散乱・沈下を生じ、消波工断面が減少し、越波量波力が増大し、堤体の破損が生じるもの
- ・ 波浪によって、消波ブロックの移動が生じた後、さらに散乱・崩壊が起こり、消波工断面を減少させ、越波量波力が増大し、堤体の破損が生じるもの
- ・ 砂礫海岸では、波浪による砂礫の移動で、消波ブロックの重量減少により、移動が生じ散乱・崩壊が起こることもある。

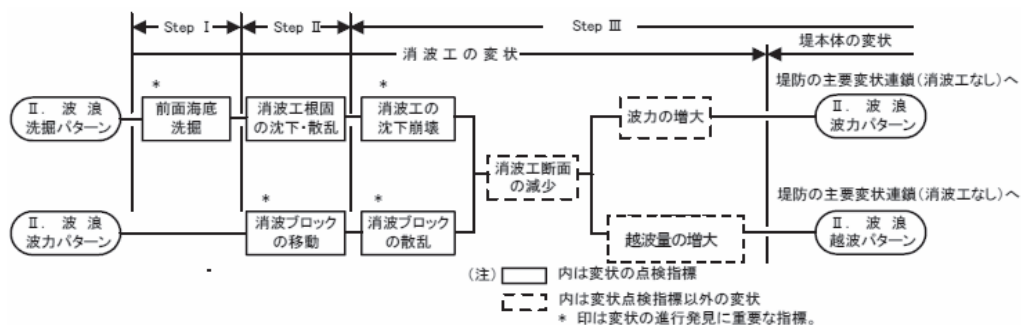


図-4.1.2 堤防(消波工被覆)の主要変状連鎖¹³⁾

③緩傾斜護岸の突発型変状連鎖

緩傾斜護岸は、堤体盛り土法面に裏込め工を設置し、その表面をコンクリートブロックで被覆した法勾配1:3より緩い護岸であり、変状現象の進行過程は、

- ・ 波浪により、前面の海底が洗掘され、護岸法先部が侵食を受け、堤体が法先部より流出し、被覆ブロックの移動散乱、堤体の崩壊へとつづくもの
- ・ 波浪により、被覆ブロックのめくれまたは移動が生じ、下層の裏込め層が侵食を受け、堤体砂を流出し、被覆ブロックの散乱、崩壊に至るもの
- ・ 遡上した波浪が、被覆ブロック下の裏込め層内を流下して堤体砂を侵食、裏込め礫が落下し、堤体内に空洞を生じ、その後被覆ブロックの移動沈下、崩壊が生じるものがある。

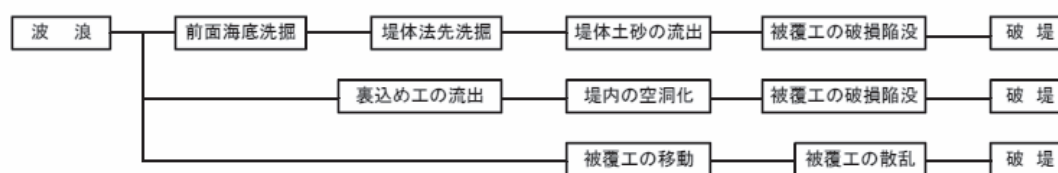
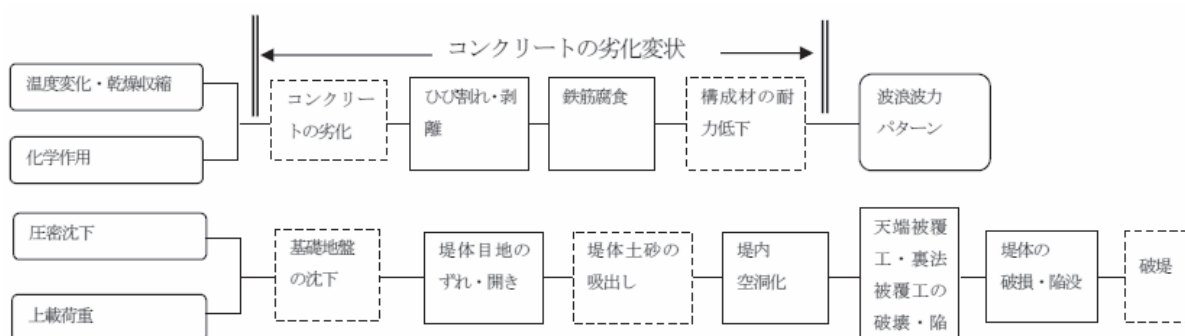


図-4.1.3 緩傾斜護岸の変状連鎖¹²⁾

④護岸・堤防の進行型変状連鎖

護岸・堤防の進行型の変状としては、コンクリートの劣化や、地盤の圧密沈下によるものがある。コンクリートの劣化により構成材(護岸・堤防の表法被覆工、堤体工、波返工など)に細かなひび割れや剥離が生じ、コンクリートの中性化(炭酸化)、塩分の部材内侵入、これらに伴う鉄筋の腐食、腐食による鋼材膨張のためコンクリートの亀裂、剥離の増大、といった順序で変状が進行して、コンクリート部材の外力に対する抵抗力を徐々に失っていく場合、あるいはコンクリート強度そのものの低下による亀裂損傷の発生に連鎖する場合などがある。基礎地盤に粘性土層を持つ施設では、築堤後、堤体の重みで圧密沈下が進行していき、堤体の目地部にずれ・開きが生じ、その部分から水の浸入、吸い出しを生じて堤体内の空洞化、堤体被覆工等の破損・陥没、さらに破堤へと連鎖していく場合がある。



注： □ 内は変状の調査対象、□□ 内は変状調査対象以外の変状。

図-4.1.4 護岸・堤防の進行型変状連鎖¹²⁾

⑤防波堤(ケーソン式混成堤)の変状連鎖

ケーソン式混成堤に発生する変状は極めて複雑な連鎖構造を有しているが、最終的には構造物の安定性に繋がる変状がほとんどである。また、港湾の施設の維持管理技術マニュアル⁹⁾によれば、防波堤に発生する変状は進行型と突発型の区別が困難なため、全て中間型として取り扱う。ケーソン式混成堤の代表的な変状の発生・進行過程としては、

- ・ 波浪によって、マウンド被覆石あるいはマウンド捨石が散乱・沈下し、ケーソンの傾斜・沈下へと進行していくもの
- ・ 波浪による上部工、胸壁のひび割れや損傷によって天端高が低下するもの
- ・ 波浪によって消波ブロックなどがケーソン側壁に衝突し、側壁が損傷して中詰め材が流出するもの等がある。

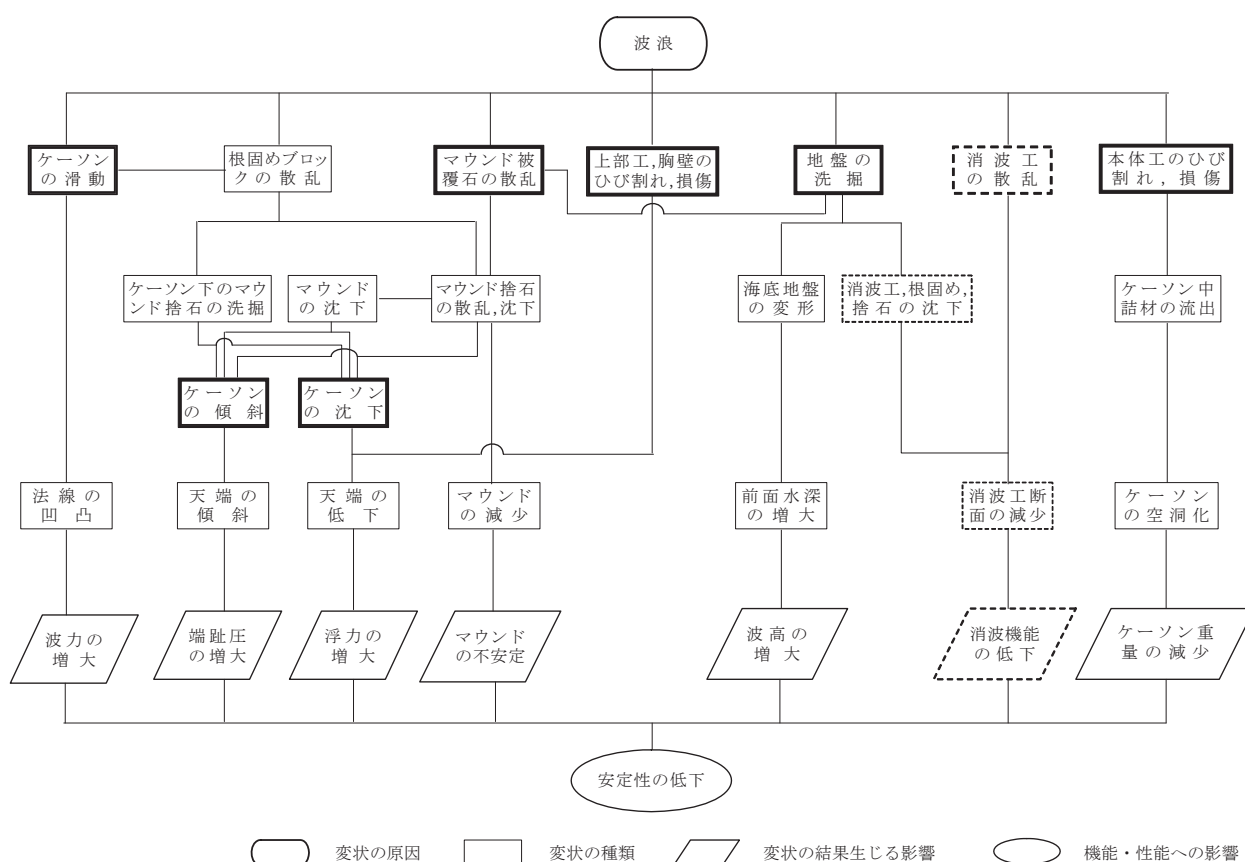


図-4.1.5 ケーソン式混成堤の変状連鎖²⁾

以上のように、護岸・堤防、防波堤等の変状連鎖事例を列挙したが、これらの施設についても、地盤の変状によりコンクリート構造要素自体の劣化を引き起こすような事象はあまり想定されていない。しかし、波浪による地盤の洗掘、基礎地盤の沈下による構造要素の安定性低下、また、コンクリート構造要素自体の劣化により背面地盤の支持力や外力に対する抵抗性が低下することにより、施設として期待された機能を果たさせなくなることは想像に難くない。前述のとおり、護岸・堤防、防波堤等の沿岸防災施設は、災害時に初めてその機能が発揮されるため、現時点における防護機能がどれだけ残存しているか、定

期的な点検に基づいて適切に評価することが不可欠である。

護岸・堤防、防波堤等の残存性能評価を確実に行うためには、施設の現状を的確に把握できる点検診断手法を構築しなければならない。しかし、沿岸防災施設の施設延長はきわめて長いことから、その全延長にわたって詳細な調査を実施することはコストや労力の面から現実的でない。そこで、定期的な点検診断時に特に着目すべき調査位置をあらかじめ設定しておくといった工夫が必要になるであろう。調査位置の設定にあたっては、過去の点検診断履歴から変状の進行が顕著である、あるいは、今後急速な進行が懸念される部位、背後地に人口や資産が集中し被災を受けた場合のリスクが大きい部位、背後地の地形などから見て、当該部位の被災が他の部位の被災を誘発する、あるいは、背後地の被害を著しく増大させる部位などを対象とするのが効率的であると考えられる。また、施設自体の機能確保にとって最も重要となる施設の天端高については、全延長にわたってのモニタリングが必要になることも考えられる。

前述のとおり、現在は、これらの施設に対する点検マニュアル案^{3), 11)}が整備され、これにしたがった点検結果が着々と収集されている状況である。点検結果の収集・分析により、様々な劣化・変状原因が存在する長大な土・コンクリート構造要素からなる施設の機能低下を、確実にかつ合理的に把握するための点検・評価手法が確立されることが期待される。

参考：沿岸防災施設の戦略的維持管理のための基本的考え方，海洋開発論文(投稿中)¹³⁾

((独)港湾空港技術研究所 加藤絵万)

5. 構造性能低下の評価の現状と課題

5.1 擁壁の性能低下の主な原因

擁壁の損傷は、以下のような現象・原因・要因が挙げられる。具体的な数値はないが、擁壁での性能低下事例では、地盤側の性能低下が起こることによってコンクリートも性能が低下する事例が多く見られた。表-5.1.1に擁壁での性能低下の例をあげる。

構造物全体の性能低下が地盤の性能劣化によって起きるため、対策も地盤に対して行われることが多い。事例では想定外の地震動による擁壁の倒壊をあげたが、擁壁の構造物としての性能低下の主な原因は、地盤の性能低下にあると考えられる。

表-5.1.1 擁壁の性能低下の例

現象	直接的原因	要因
転倒 滑動 沈下	掘削	(地盤側)
	盛土	・土圧の増大
	地盤定数の不確かさ	・地滑り
	風化	・静水圧の増加
	想定以上の地震動 (新耐震に対応していない)	・地山の粘着力の低下
	排水性の悪さ	(コンクリート側)
	地下水位の上昇	・設計以上の外力
	化学的劣化	・コンクリートの劣化による鉄筋の腐食

コンクリートが原因となる構造物の性能低下は、想定外の地震動の他は

- ・設計以上の外力
- ・施工不良による鉄筋腐食
- ・化学的劣化(アルカリ骨材反応等)

等が挙げられるが、報告事例は少ない。

5.2 擁壁設計時の地盤とコンクリートの関係

擁壁には、逆 T 型、L 型、控え壁、逆 L 型、支え壁などがある。擁壁の安定に対する検討は、

- ・転倒に対する安定
 - ・沈下に対する安定
 - ・滑動に対する安定
- が挙げられる。

いずれの場合も、地盤に対してコンクリートが関与する要因は、①自重、②形状、③断面力である。

コンクリートの設計は、土圧等からコンクリートの断面力を想定している。土圧の算定は、一般的にクーロンの土圧理論式で決定され、土の内部摩擦角(せん断抵抗角)が土圧の値に大

きく作用する。土の内部摩擦角は、三軸圧縮試験のように直接値を求める方法やボーリングによる N 値等から経験的に算出される。地盤そのものに不均質性があり、安定の検討を行う際には、N 値から経験的に算出される場合が多いため、N 値の推定誤差が大きく安全側となっていると考えられる。

また、コンクリートの設計では、構造細目等による制約などにより外力に対し耐力の大きな構造物となっていると考えられる。コンクリートの化学的な劣化、初期の施工不良などによる大幅な材料劣化以外では、コンクリートから発生した性能低下が構造物の性能低下につながるものが少ないと考えられる。また、地盤に変状が起きるようなイレギュラーな外力、例えば地すべり等以外ではコンクリートの性能低下は起こりにくいと考えられる。また設計は、断面から行っているものが大部分である。

6. まとめ

6.1 地盤とコンクリートの融合を考慮した設計及び点検・評価

6.1.1 設計における考慮

(a) コンクリート側の設計の改善点

通常の設計では、地盤側の土圧の算定を地盤のバラツキ等を考慮して、安全側に設計を行っている。しかし、構造物の性能低下には、想定以上の外力が作用することが考えられる。仮に地盤に作用する想定外の外力を補うためにコンクリート側の設計を行うと、過大設計になると考えられる。過大な設計を行えば想定以上の外力に耐えることが可能であるが、現状ではコストの面などから現実的ではないと考えられる。ただし、材料等での改善がないとは断言できない。また既存の地盤やコンクリートの設計方法は、大部分が断面で設計をおこなっている。FEM 解析などを行って詳細に解析を行った場合、想定外の外力に耐えうるような設計方法になる可能性はある。ただし、すべての設計に FEM 解析が必要ではないと考えられ、構造物の重要度やコスト的な面などについて考慮する必要があると考えられる。

(b) 経験値不足の補足

地盤の設計を行う際には、地形学的な要素、地質学的な要素、土質学的要素も必要となってくる。これらを複合的に考え、設計を行えることが必要であるが、それらの複合的な要素を、経験という技術者の裁量に頼らず行うことは現段階では難しい。また、経年的な変化による構造物の性能低下を設計の時点で全て解決することは難しいと考えられる。

6.1.2 点検・評価における考慮

大部分の構造物は、地盤側の影響を大きく受け変状するため、構造物の健全性を判断する定期的な点検や調査、モニタリングが一般的になってきている。

構造物の点検要領において、擁壁を例にすると通常の RC 構造物と同様に「ひび割れ、はく離、うき、鉄筋の露出、腐食」について着目し点検される。その他の無筋コンクリート擁壁や石積み擁壁などについては「壁面の異常、目地の異常、沈下、移動、倒れ、洗掘、排水、漏水、植生不良」などについて着目し点検されている。

このことから、一般的に無筋コンクリート構造物は地盤側の性能低下に着目した点検がされており、鉄筋コンクリート構造物については通常の RC 構造物の点検が取り入れられて

いる。しかし、特に、擁壁や護岸等の構造物の性能低下は、無筋、鉄筋コンクリートに関わらず地盤の性能低下によりもたらされることが多い。鉄筋コンクリート自体の性能低下を点検・調査することは重要であるが、地盤の性能低下と関連付けることも重要であると考えられる。よって、鉄筋コンクリート構造物の点検・調査についても、地盤との関連性を持たせた点検・調査を行ない、維持管理を効率的に行なう必要があると考えられる。このような問題を解決するために、港湾構造物で示されている様な変状連鎖を他の構造物でも作成し、経年的な維持管理方法に活かすことが望ましいと考えられる。

また、構造物に要求される性能を供用期間中確保するためには、地盤、コンクリートの両方とも目に見える変状自体が問題ではなく、変状の進行性が重要である。よって、コンクリートと地盤相互の変状の進行性を効果的に点検・調査・モニタリングし維持管理を行っていくことが重要であると考えられる。

6.1.3 点検・調査の難しい構造物

事例を調査するにあたり事例の収集を行ったが、土中部分の性能低下事例は少なかった。また、土中に埋設された、杭等についての定期点検方法はほとんどない。土中の環境は地上と比較して安定はしているが、必ずしも構造物が健全であるとは考えられない。これらの目視で確認することのできない構造物の調査、モニタリング手法の必要性も感じられる。

これらの事項から、以下のように考えられる。

- ① コンクリート及び地盤の設計を大幅に変更して、構造物の性能低下を防ぐことは難しいと考えられる。
 - ② 地盤の性能低下が構造物の性能低下の主な原因であり、地盤とコンクリートの変状連鎖を考慮して維持管理を行っていくことが現実的である。
 - ③ 目視で捉える事のできない地中構造物に対しても何らかの点検・調査、モニタリング手法が必要である。
- ②、③については次年度の課題としたい。

文献リスト

- 1) 道路橋マネジメントの手引き, (財)海洋架橋・橋梁調査会, II, pp.4-5, 2004.8
- 2) 港湾空港技術研究所編著: 港湾の施設の維持管理技術マニュアル, (財)沿岸技術研究センター, 2007
- 3) ライフサイクルマネジメントのための海岸保全施設維持管理マニュアル(案)～堤防・護岸・胸壁の点検・診断～, 農村振興局防災課・水産庁防災漁村課・河川局海岸室・港湾局海岸・防災課, http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha08/11/110222_.html, 2008.2
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 維持管理編, pp.5, 2007
- 5) 土木学会: 土木学会規準として規定が望まれる試験方法の動向 - コンクリートの性能評価を可能とする新しい基準体系とは -, pp.132, 2009.4
- 6) 日本コンクリート工学協会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針 - 2009 -, pp.3, 2009.3
- 7) 土木学会: 腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル, pp.2, 2009.3
- 8) 日本鋼構造協会: 土木鋼構造物の点検・診断・対策技術, 2006
- 9) クイズ土はなぜ崩れるのか, p83-86, 日経コンストラクション編
- 10) 西湘バイパス構造物崩落に関する調査検討委員会資料, 国土交通省関東地方整備局横浜国道事務所, http://www.ktr.mlit.go.jp/yokohama/seishou/kentou_02.htm, 2007
- 11) 海岸保全施設の老朽化調査及び老朽化対策計画策定のための実務版マニュアル(暫定版), 農林水産省水産庁防災漁村課, <http://www.jfa.maff.go.jp/gyokogyojo/sub77.pdf>, 2008
- 12) 土木学会: 海岸施設設計便覧 2000 年版, p.518-521, 2000
- 13) 岩波光保, 加藤絵万, 横田 弘: 沿岸防災施設の戦略的維持管理のための基本的考え方, 海洋開発論文, Vol.24, 2009 (投稿中)

WG2 活動報告書

地盤・土構造物等の性能評価

WG2 名簿

氏名	会社名	所属
桑野 玲子	東京大学生産技術研究所	都市基盤安全工学国際研究センター
天野 勲	(株)保全工学研究所	
小池 豊	ジオ・サーチ(株)	企画開発部
瀬良 良子	ジオ・サーチ(株)	企画開発部
杉山 長志	中央開発(株)	ソリューション本部 探査計測部
松井 義昌	(株)K&T こんさるたんと	
田口 博文	東亜建設工業(株)	技術開発センター地盤・防災技術グループ
菅野 友紀	(株)竹中土木	竹中技術研究所 建設技術研究所
◎恒国 光義	東電設計(株)	土木本部 耐震技術 保全技術グループ

(敬称略，順不同)

◎：幹事

1. 概要

1.1 WG2 の目的

本 WG では地盤・土構造物等を対象として、以下のことを目的とした活動を行う。

- ①土構造物の性能評価における計測・評価技術の整理
- ②地中埋設コンクリート構造物の性能評価の視点からの地盤計測・評価技術の整理
- ③他分野の計測・評価技術の応用の可能性の調査

(研究会主旨の抜粋)

1.2 WG2 の活動方針

地盤・土構造物等の性能評価に関する計測・評価技術を検討する上では、「地盤・土構造物等としての性能」を明らかにすることが重要であると考えられる。そこで、今年度の WG の活動として、地盤・土構造物等の性能評価を考える上で参考になる考えられる事例の調査を行い、それらに基づいて地盤の性能、あるいは性能評価における着目点(ポイント)「以下、性能評価項目」を検討した。

次年度は、これらの性能の変化を評価するための評価・計測技術について調査、とりまとめを行う計画である。

本 WG の活動の全体図 1-1 に示す。

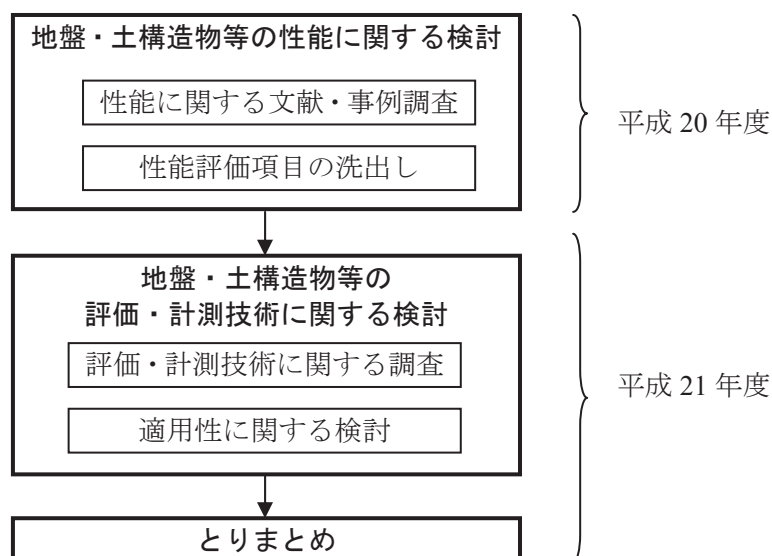


図-1-1 地盤 WG の活動計画

1.3 活動経過

今年度は，以下の日程で WG を開催した．

- ① 2008.11.6：方針について討議
- ② 12.2：文献調査について討議
- ③ 2009.1.30：性能評価について討議
- ④ 2.9：とりまとめについて討議

2. 地盤・土構造物等の性能を検討するための事例の調査

2.1 概要

地盤・土構造物等の性能評価項目を明らかにすることを目的とし、性能を検討する上で参考になると考えられる事例の調査を行った。性能を検討する上では、当初(設計あるいは施工)の想定からの性能の不足、あるいは低下も含めた、性能の変化があるものが分かりやすいと考え、それらの事象が記述されているものを対象とした。

2.2 事例収集

今年度は、地盤・土構造物等の性能の変化に関する事例として、以下のものを収集することができた。

- ・堤防の破壊・沈下，堤防内の空洞化，砂浜陥没
- ・埋立て地盤・盛土の沈下
- ・自然地盤の沈下
- ・橋脚基礎の洗掘
- ・道路の陥没，路面下の空洞，法肩の沈下
- ・斜面崩壊
- ・擁壁の崩壊
- ・トンネルの変状，送水トンネル崩落
- ・トンネル覆工コンクリートの漏水(コンクリートのカルシウムの溶出)
- ・酸性土壌中の基礎コンクリートの中性化，アルカリ骨材反応
- ・法面の崩壊(地山の膨張)
- ・セメント安定処理土の強度低下(カルシウムの溶出)

これらの事例を構造物毎に分類して概要をまとめたものを表-2.1に示す。構造物としては、盛土や地盤(改良)といった、いわゆる土構造、擁壁、あるいは護岸といった抗土圧構造や、基礎、道路、トンネルといった広範囲のものとなった。事象に着目すると、地盤沈下や斜面崩壊、基礎の洗掘といった代表的なものの他に、近年、話題となった砂浜や路面の陥没といった事象も含まれる。また、構造物全体の性能には影響しないが、当初からの変化として捉えることができるセメント安定処理土のカルシウムの溶出といったものも含まれている。さらに、コンクリートの中性化、アルカリ骨材反応、コンクリートのカルシウムの溶出といった地中の構造物への地盤の影響といった観点のものも含み、幅広い事象が収集された。

表-2-1 地盤・土構造物等の劣化事例とその概要

事 象		概 要
護岸・堤防・砂浜	・堤防の破壊・沈下 ・堤防内の空洞化 ・砂浜陥没	(堤防内の空洞化)土堤において、堤外側水位の変動により吸出しや透過により、土粒子が移動し堤防内部に空洞が発生する。土堤はコンクリート被覆されていたため、その変状の察知が遅れ、大規模な空洞に拡大し、天端道路の陥没、法面のひび割れなどが発生した。
	・ケーソン、護岸の裏込め空洞、陥没	(ケーソン護岸埋立て土の沈下：図-)ケーソン護岸では、波による圧力がケーソン下のマウンドを通して裏込め石の間の浸透流と浸透水圧(間隙水圧)を発生させ、吸出しによる埋立て土の沈下が発生する。
	杭基礎形式護岸の沈下、水平耐力の低下	波浪のような大きく連続的な水平力を受けると、杭周辺の地盤の水平反力や摩擦力等が低下し、沈下や水平耐力が低下する。地盤のクリープ変形や粒子破砕、地盤と杭体との間隙等が原因と考えられる。
	・路面陥没 ・路面下空洞 ・法肩の沈下	(路面陥没：図-2-2、写真-2-2)老朽化や突発的な自然現象(豪雨等)による地下埋設物の破損や、大型地下構造物周辺部において、埋戻し土の圧密沈下により、路面下に空洞が形成される現象
道路・路面	橋脚基礎の洗掘	(橋脚の洗掘：写真-2-3、図-エ-ラー! 指定したスタイルは使われていません。.)3)橋脚の(直接)基礎の支持層が洪水等による洗掘のって傾斜する事象。また、ケーソンや杭基礎等でも洗掘は発生し、場合によっては基礎の一部が破壊されることもある。洗掘は洪水によって生じる。1回の洪水で基礎の破壊をもたらず場合もあるが、何回かの増水履歴により洗掘が進行する。
基礎	フーチングコンクリートのアルカリ骨材反応、酸性土壌中のフーチングコンクリートの中性化	(フーチングコンクリートのアルカリ骨材反応)感潮域の橋脚基礎において、最大数 mm のひび割れが亀甲状に確認された。ひび割れ部の鉄筋は腐食が進行し、隅角部では膨張による破断も確認された。静弾性係数は著しく低下していた。フーチング内部にはひび割れの発生は確認されず、構造安定上の影響はなかった。原因は、粗骨材に反応性鉱物が確認されたこと、地下水が高くまた塩分を含んでおり、アルカリ骨材反応が促進したと考えられる。

表-2-1 地盤・土構造物等の劣化事例とその概要（つづき）

事 象		概 要
地盤・盛土， 斜面・法面・擁壁	埋立て地盤・盛土の沈下，自然地盤の沈下	(切土法面の崩壊)安定勾配が確保された切土において，施工直後に崩壊した事例．地山に膨潤性を示す粘土鉱物が含まれていたため，膨張して崩壊したと考えられる．
	斜面崩壊	
	切土法面の崩壊	
	擁壁の崩壊	
地盤改良	セメント安定処理土のカルシウムの溶出	セメント安定処理土による地盤改良において，改良地盤内部では強度が経年的に増加するが，外部環境に接した外周部の限られた範囲で Ca 溶出に伴う強度低下が生じる．ただし，改良地盤の安定性には全く影響は与えない．
トンネル	トンネルの変状，送水トンネル崩落	(送水トンネル崩落)内空が約 2m の無筋コンクリート覆工の送水トンネル(供用開始から 41 年経過)で，岩盤が崩落したことによって送水が停止した ^り ．原因は，覆工コンクリートの劣化ではいようであり，亀裂の多い非常に脆い花崗岩が長年に亘って浸食され，トンネル上部の間隙が拡大，崩落したとされている．
	トンネル覆工コンクリートのカルシウムの溶出に伴う強度低下	

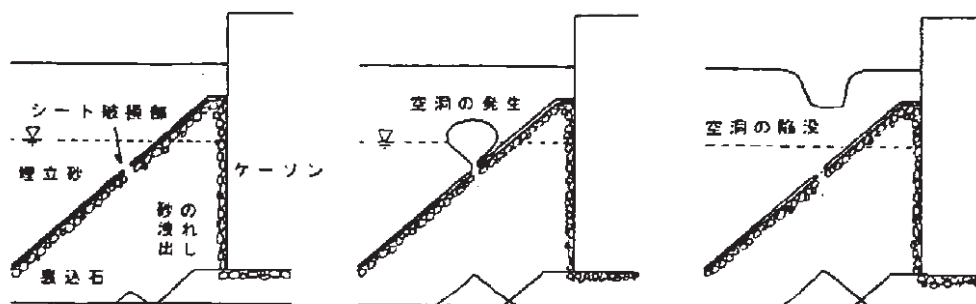


図-2-1 シートの破損部からの砂の漏れだしと陥没穴の発生²⁾



写真-2.1 陥没状況の例³⁾

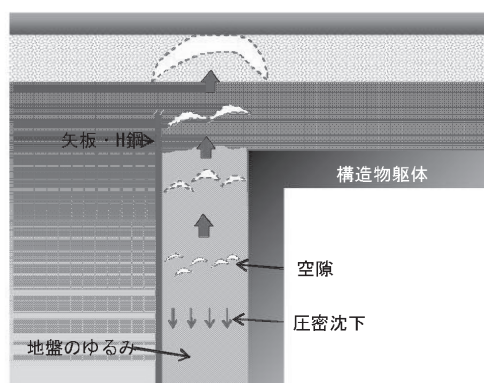


図-2-2 地下構造物の埋戻し土のゆるみによる空洞の発生⁴⁾



写真-2.2 路面下空洞の例⁴⁾

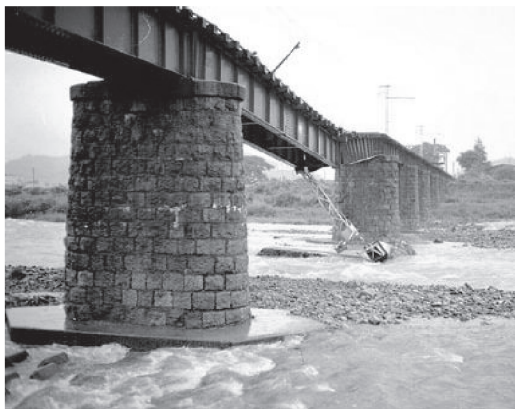


写真-2.3 洗掘で橋脚が倒壊した
河川災害の例

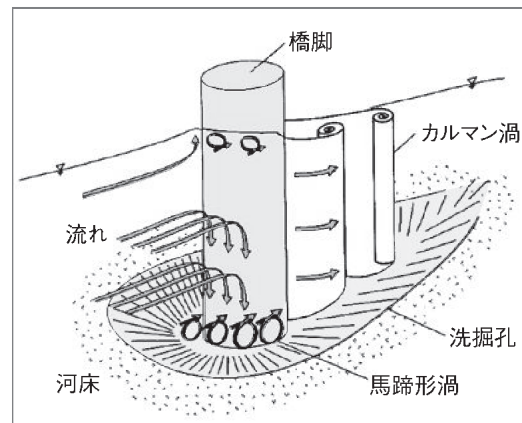


図-2-3 橋脚周りの洗掘形状と
流れのイメージ

3. 地盤・土構造物等の性能評価項目の検討

3.1 概要

上記2の事例調査では、地盤・土構造物等の性能、あるいは性能の変化に関係すると考えられる事象について整理した。ここでは、これらの事例をさらに掘り下げ、今後の維持管理で着目する地盤・土構造物等の性能評価項目、性能評価の着目点について検討を行った。次年度は、これらの項目をより具体的な工学的な指標までブレイクダウンし、評価・計測技術の検討を行うことになる。

なお、今年度は、収集した事例のうち表 3-1 中の網掛けのものに絞って検討を進めた。

表-3-1 検討で対象とした事例

対 象	性能の変化に関するキーワード
護岸・堤防・砂浜	堤防の破壊・沈下
	堤防内の空洞化
	砂浜陥没
	ケーソン、護岸の裏込め空洞、陥没
	杭基礎形式護岸の沈下、水平耐力の低下
道路・路面	路面陥没
	道路陥没、路面下空洞
	法肩の沈下
基礎	橋脚基礎の洗掘
	酸性土壌中の基礎コンクリートの中性化、アルカリ骨材反応
地盤・盛土	埋立て地盤・盛土の沈下、自然地盤の沈下
斜面・法面・擁壁	斜面崩壊
	切土法面の崩壊
	擁壁の崩壊
地盤改良	セメント安定処理土のカルシウムの溶出に伴う強度低下
トンネル	トンネルの変状、(送水)トンネル崩落
	トンネル覆工コンクリートのカルシウムの溶出に伴う強度低下

3.2 地盤・土構造物等の性能評価項目の抽出

ここでは、上記0で選定した事例について、地盤・土構造物等の性能評価項目、すなわち性能評価の着目点について検討した。各事例の性能評価項目の抽出の詳細については「資料：事例に基づく地盤・土構造物の性能評価に関する検討」に示すが、性能評価項目の抽出は、性能の変化に関する現象の経時変化に対する地盤の影響、あるいは、構造物全体の性能に対する地盤に関する要因分析といった観点から、対象構造物に適した方法で検討を行った。

検討結果をまとめたものを表 3-2 に示す。地盤・土構造物等の性能をみると、路盤や基礎といった構造物の支持力の保持といったものや、地盤自体の安定性の保持に大別されると考えられる。また、後者の地盤自体の安定性に関しては、吸出しといった透水に対する安定性と、変形に対する力学的な安定性に分類される。また、性能評価項目については、土砂の流出・浸食、あるいは風化といった水の作用に起因した項目や、あるいは膨湿性粘土

鉱物の膨張といった材料に関する項目が挙げられた。

表-3-2 地盤・土構造物等の性能とその評価項目

対 象	性 能	性能の評価項目	
護岸・堤防・砂浜 の空洞化，陥没	堤防内部の空洞化の 回避	浸潤線の分布 細粒分の流出	
	堤体の支持	天端，法面の亀裂 強度定数の低下 空洞域の分布	
道路・路面の陥没	路盤の支持力の保持	破損部への土砂流出	ゆるみの拡大，間隙比 の拡大
		空洞化	
橋脚基礎の洗掘	地盤支持力の維持	土砂流出	
地盤・盛土， 斜面・法面・擁壁 の崩壊	安定性の保持	地盤の変形	荷重の解放(切土)による膨湿性粘土鉱物の膨張
トンネル崩壊	内空の確保	地山の細粒化(風化)	
		細粒分の流出(浸食)	

(1) 堤防内の空洞化を対象とした検討

堤防内の空洞が大きくなると，堤防天端の陥没に繋がり，天端道路の交通障害を引き起こす。また，空洞が大きくなることで，堤体内部の強度定数が低下し，すべり破壊を生じ堤防破壊に至る。地盤には，①浸透に耐える機能と②道路機能が要求される。また，性能・機能の評価項目は，①浸透による堤体材料の強度の低下，②堤体内の浸潤線が短くなることによる吸い出しやボイリングの発生となる。

(2) 路面陥没を対象とした検討

地盤には車両や歩行者の交通に支障をきたさないことが求められる。具体的には変状しないこと，陥没しないこと。そのためには路盤の支持力が保持されていることが求められる。

上記「02.2 事例収集」の事例は，路面下に埋設されている下水道管が破損したことで，交通振動，雨水浸透，地下水位変動などの影響によって埋戻し土砂が管路の破損部から流出した結果，地盤の間隙比が増大し，ゆるみ・空洞が発生し，路盤の支持力が失われて路面下空洞の発生に至ったものである。

土砂の吸出し現象であるので，路面下空洞の発生を効率よく適切に評価することが有効である。

(3) 橋脚基礎の洗掘を対象とした検討

洗掘による災害は，地盤と構造物の視点からみると，構造物が構築された時点では地盤はその構造物を安定的に支持できる力を保有していたが，自然現象の川や海の浸食によって惹き起こされる洗掘現象により構造物周辺地盤の土砂が無くなったり，あるいは元来の地盤より弱い地盤に埋め戻されたりして，構造物を安定的に支持できなくなることである。

地盤の性能としては，構造物建設時の地盤支持力の維持が要求される性能であるため，地盤を構成している土砂流出の有無とその程度を把握することが性能評価になるものと考

えられる。

(4) トンネルを対象とした検討

トンネルとして水路トンネルを例として検討を行った。道路・鉄道・水路トンネルなどの機能とその評価対象としては、土木学会トンネル工学委員会で既に検討されている⁵⁾が、トンネル、あるいは覆工・躯体に関する評価が主であると考えられる。ここでは、トンネルから見た地盤・地山の性能とその評価項目について検討を行った。なお、ここでの検討は、個別の水路トンネルや調査結果を対象としたものでなく、種々の文献に示されている水路トンネル全般の事例から想定したものであることを明記しておく。

水路トンネルとしての性能としては「内空が確保されている」を考え、それに対する地盤(地山)の性能の評価項目としては、「地山の細粒化」、「細粒分の流出」を抽出した。

表-3.3 トンネルの機能と評価項目・評価指標⁵⁾

	トンネルの機能	機能の評価対象	健全度を判定するための評価指標
安全性	- トンネルが安定しており、崩壊しないこと。 - 所定の位置に定められた空間を維持できること。	【構造安定性】 - 周辺地盤および構造物の力学的安定性 - 設計時に想定できない外力が作用している場合の抵抗性	トンネルの変形・変位、地山の変形、トンネルの損傷、材料劣化・材料不良など
使用性	- 使用目的に応じた機能が発揮できること。 - 坑内での保守管理作業等に必要な空間や施設が確保されていること。 - 覆工材料等の落下により坑内での保守管理作業に危険が生じないこと。 - トンネル内の排水が適切に行われていること。	【内空断面の保持】 - 建築限界が確保されていること。 【剥落抵抗性】 - 覆工・躯体のコンクリート等の剥落に対する抵抗性 【防水・排水性】 - 防水・排水の措置が適切に行われているか。	トンネルの変形・変位、地山の変形、トンネルの損傷、漏水・凍結など トンネルの変形・変位、地山の変形、トンネルの損傷、材料劣化・材料不良、補修・補強材の劣化、表面付着物など トンネルの損傷、材料劣化・材料不良、補修・補強材の劣化、漏水・凍結、表面付着物、流入水、流入物など トンネルの変形・変位、トンネルの損傷、漏水・凍結、表面付着物、流入水など トンネルの損傷、補修・補強材の劣化、各種法令など
第三者影響度	- 地下水位低下、地表面沈下が最小限に抑えられていること。 - 地表面に陥没を起ささないこと。	【地盤・空気振動の影響】 - 振動など周辺に対する環境影響が法定限度内に抑えられているか。 【地下水位低下の影響】 - 地下水の低下による周辺地盤への影響 【地表面沈下の影響】 - 地表面の沈下による周辺地盤への影響 【臭気の影響】 - トンネル使用者に与える臭気の影響	地山の変形、材料劣化・材質不良、補修・補強材の劣化、漏水・凍結、表面付着物など トンネルの変形・変位、地山の変形、流入物など 付着物、流入水、流入物など
景観・美観	景観・美観に配慮されていること。	トンネル構造物の美観・景観	トンネルの変形・変位、地山の変形、トンネルの損傷、材料劣化・材料不良、漏水・凍結、表面付着物など
耐久性	トンネルを存続させるために各部材の長期的な機能を保持し得ること。	【部材・材料の耐久性】 - 化学的損傷に対する抵抗性や物理的損傷に対する抵抗性などの、構造物を長期間存続させるための部材・材料の抵抗性 【耐火性】 - 火災による覆工・躯体の損傷に対する抵抗性。	トンネルの変形・変位、地山の変形、トンネルの損傷、材料劣化・材料不良、補修・補強材の劣化、漏水・凍結、表面付着物など トンネルの損傷、材料劣化・材質不良、補修・補強材の劣化など
作業性	- トンネルの維持管理が容易なこと。 - 坑内でのおし管理作業等に必要な空間や施設が確保されていること。 - 災害時に容易に復旧が行えること。	【維持管理の作業性】 - 維持管理作業に必要な空間や施設が確保されていること。 【点検の容易性】 - 維持管理作業を行うにあたり、変状現象を容易に見できること。	トンネルの変形・変位、地山の変形トンネルの損傷、漏水・凍結、流入水、流入物、付帯設備の劣化など 材料劣化・材質不良、漏水・凍結、表面付着物、流入水、流入物など

4. まとめ

本 WG では、地盤・土構造物等の性能評価のための評価・計測技術のとりまとめを目的として、今年度は、地盤の性能の変化に関する事例の収集と、事例を通じた性能評価項目について検討・とりまとめを行った。事例としては、以下のものを収集することができた。

- ・堤防の破壊・沈下，堤防内の空洞化，砂浜陥没
- ・埋立て地盤・盛土の沈下
- ・自然地盤の沈下
- ・橋脚基礎の洗掘
- ・道路の陥没，路面下の空洞，法肩の沈下
- ・斜面崩壊
- ・擁壁の崩壊
- ・トンネルの変状，送水トンネル崩落
- ・トンネル覆工コンクリートの漏水(コンクリートのカルシウムの溶出)
- ・酸性土壌中の基礎コンクリートの中性化，アルカリ骨材反応
- ・法面の崩壊(地山の膨張)
- ・セメント安定処理土の強度低下(カルシウムの溶出)

また，上記の事例のうちの代表的なものを通じて，地盤・土構造物等の性能とそれを評価するための項目を以下の通りとりまとめを行った。地盤・土構造物等の性能をみると，路盤や基礎といった構造物の支持力の保持といったものや，地盤自体の安定性の保持に大別されると考えられる。また，後者の地盤自体の安定性に関しては，吸出しといった透水に対する安定性と，変形に対する力学的な安定性に分類される。また，性能評価項目については，土砂の流出・浸食，あるいは風化といった水の作用に起因した項目や，あるいはモンモリナイトの膨張といった材料に関する項目が挙げられた。

表-4-1 地盤・土構造物等の性能評価項目(再掲)

対 象	性 能	性能の評価項目	
護岸・堤防・砂浜の空洞化，陥没	堤防内部の空洞化の回避	浸潤線の分布 細粒分の流出	
	堤体の支持	天端，法面の亀裂 強度定数の低下 空洞域の分布	
道路・路面の陥没	路盤の支持力の保持	破損部への土砂流出	ゆるみの拡大，間隙比の拡大
		空洞化	
橋脚基礎の洗掘	地盤支持力の維持	土砂流出	
地盤・盛土，斜面・法面・擁壁の崩壊	安定性の保持	地盤の変形	荷重の解放(切土)による膨湿性粘土鉱物の膨張
トンネル崩壊	内空の確保	地山の細粒化(風化)	
		細粒分の流出(浸食)	

本 WG での検討・議論を通じて、地盤・土構造物としての性能を考える上では、以下の観点が必要であるとの意見もあげられた。

- ① 最近、顕在化しており、将来、着目すべき問題
 - ・ 地盤陥没等
- ② 設計と実際の乖離
 - ・ 地盤定数等の時間変化
 - ・ 設計との埋め戻しの材料・施工方法(管理)等と関係
- ③ (地下)水の影響
 - ・ 細粒分の流出
 - ・ 水みちの形成

また、性能評価については、以下の意見があった。

- ① 埋戻し土の土質や締固めの程度等、今まで無視していた(評価で明確に考慮していなかった)もの等、より現実を評価するための方法を考える必要があるのかもしれない。
- ② 将来の性能予測等、解析を行う上で足りないパラメータ(例えば、地盤の(局所的な)透水係数等)を挙げていくと、性能評価に必要な計測技術が分かり易くなるかもしれない。

来年度以降は、ここで取りまとめを行った性能評価項目や上述の意見を踏まえ、今後の維持管理に必要な評価・計測技術の検討ととりまとめを行っていく計画である。

資料：事例に基づく地盤・土構造物の性能評価に関する検討

事例 1 堤防内空洞による堤体天端の沈下，すべり破壊

(1) 状況

河川堤防や海岸堤防に見られる土堤において，堤外側水位の変動による吸出しや堤内側への透過により，基礎地盤や堤体材料の土粒子が堤体内部より外部へ流出し，堤防内部に空洞が発生する．この土粒子の移動が長年にわたり継続し，空洞がより大きくなる．

空洞が大きくなると，堤防天端の陥没に繋がり，天端道路の交通障害を引き起こす．また，空洞が大きくなることで，堤体内部の強度定数が低下し，すべり破壊を生じ堤防破壊に至る．

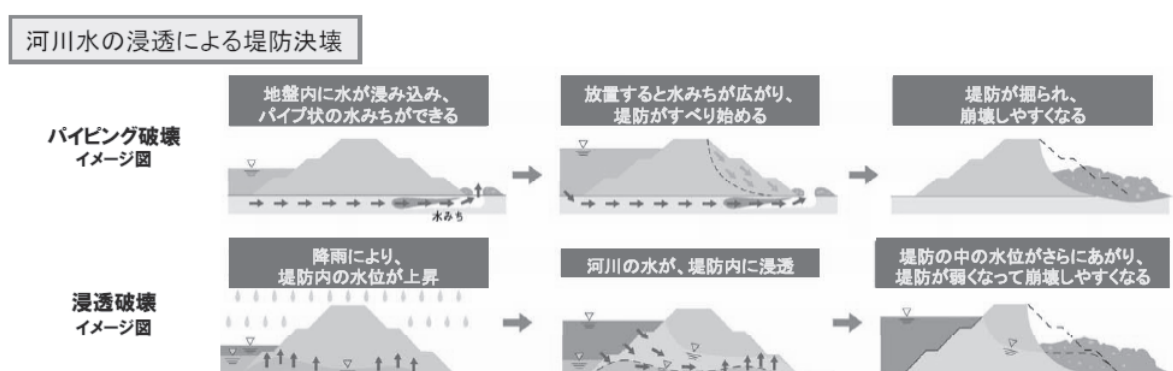


図-事例 1.1 河川水の浸透による堤防決壊⁶⁾

表面が植生や素地である場合は，天端，法面に亀裂などの発生を巡回モニタリングなどで発見することが可能であるが，コンクリート被覆されている場合などは，巡回モニタリングでの発見が困難である．

(2) 性能要求事項

①浸透に耐える機能

堤防本来の機能として，水の流入を防ぐために，洪水時や高潮時，地震時においても堤高，天端幅，のり勾配などが維持され続ける必要がある．

②道路機能

一般に堤防の天端は道路として利用されることが多く，車両や歩行者の交通に支障をきたさないことが求められる．具体的には変状しないこと，陥没しないこと．そのためには路盤の支持力が保持されていることが求められる．

(3) 性能評価の着目点

①浸透による堤体材料の強度が低下していないか

②堤体内の浸潤線が短くなり，吸い出しやボイリングを発生していないか

(株)保全工学研究所 天野

事例 2 堤防内空洞による堤体天端の沈下，すべり破壊

(1) 現象

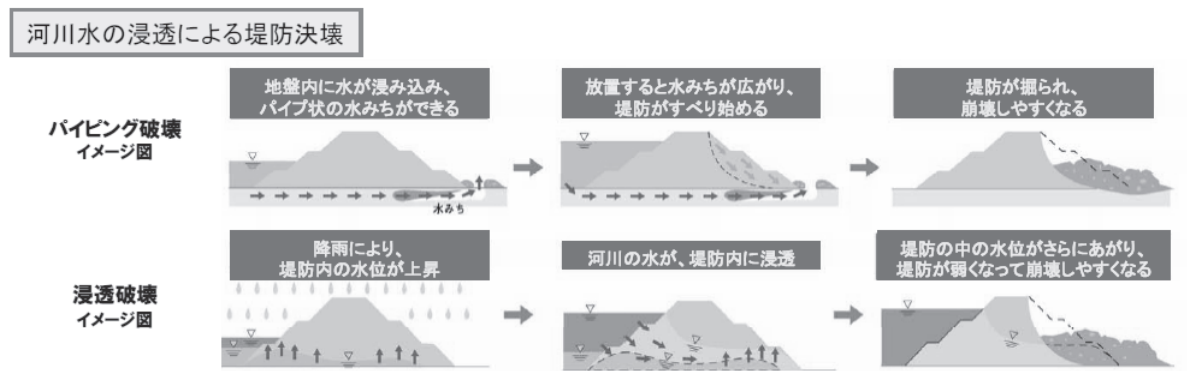


図-事例 2.1 河川水の浸透による堤防決壊(再掲)⁶⁾

(2) 性能要求事項・性能評価の着目点

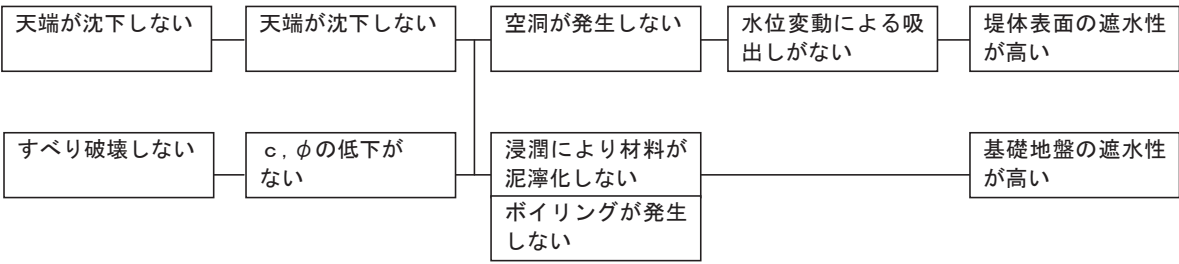


図-事例 2.2 性能要求事項・性能評価の着目点

(株)保全工学研究所 天野

事例 3 下水道取り付け管破損が原因で発生した路面下空洞の事例

(出典：ジオ・サーチ㈱社内資料)

(1) 状況

路面下空洞調査の結果、広がり が 2m・厚さが 50cm を越える大きな空洞を確認した。この空洞は交差点中心に位置しているため、陥没が発生した場合は復旧作業等により交通渋滞を発生させる可能性があり、社会的影響が大きい箇所であった。

当該箇所は陥没の危険性が高いため、調査後、早急に開削による補修が実施され、空洞下部に下水道取り付け管の破損を確認した。空洞の発生原因は下水道取り付け管の破損箇所からの土砂流出であることがわかった。



写真-事例 3.1 周辺状況



写真-事例 3.2 開削状況

(2) 性能要求事項

①道路機能

車両や歩行者の交通に支障をきたさないことが求められる。具体的には変状しないこと、陥没しないこと。そのためには路盤の支持力が保持されていることが求められる。

②下水道管等地下埋設物

埋設物の本来の機能を維持できることが求められる。設置時の不適切施工、劣化や破損などによって、埋設場所である道路や歩道、あるいは近接の埋設物などに対して機能障害となる影響を及ぼさないことが必要となる。

(3) 性能評価の着目点

この事例は路面下に埋設されている下水道管が破損したことで、交通振動、雨水浸透、地下水位変動などの影響によって埋戻し土砂が管路の破損部から流出した結果、地盤の間隙比が増大し、ゆるみ・空洞が発生し、路盤の支持力が失われて路面下空洞の発生に至ったものである。

土砂の吸出し現象であるので、現象の評価においては水の影響が大きいものの、管路内の流水、雨水浸透、地下水位変化などを評価することは現実的でない。線としての道路構造物と管路構造物に対して、ランダムに発生する点としての路面下空洞の発生を効率よく適切に評価することを考えると、線上でのスクリーニング調査手法の適用が有効である。

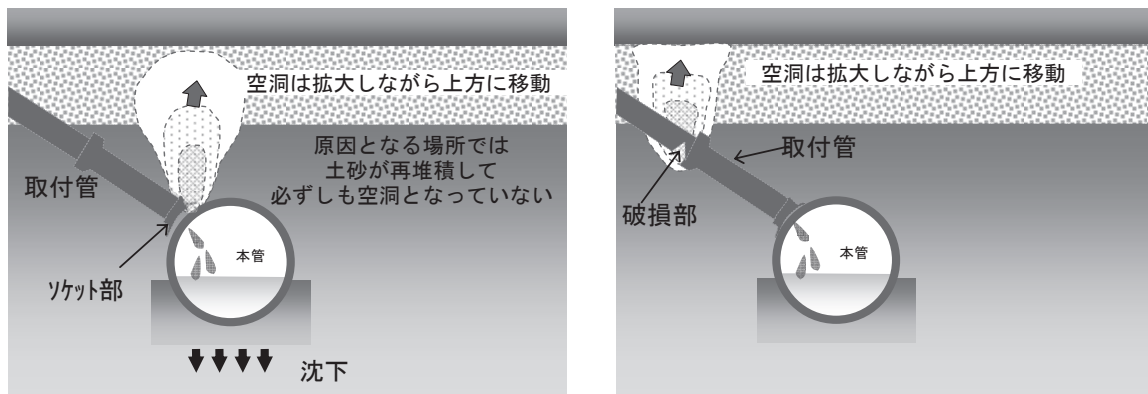


図-事例 3.1 下水管破損等が起因の空洞発生イメージ

表-事例 3.1 現象の時系列整理

現象の経時変化	性能評価の着目点
取り付け管および接続部破損	管路としてはとりあえず機能. あるいは排水の土中への溢水状況の確認
地下水変動	地下水位
交通振動による土砂崩壊と破損部への土砂流出	崩壊の進行
地下水による破損部への土砂流出	管内の土砂確認
空洞発生	ゆるみの拡大, 間隙比拡大
空洞拡大	空洞分布
異常降雨による土砂流出拡大	地点降雨量
交通荷重の負荷増大	交通量の変化
路面陥没発生可能性拡大	路盤支持力の消失
路面陥没	



写真-事例 3.3, 3.4 その他地下埋設物起因による陥没事故発生例(バス脱輪)

(ジオ・サーチ(株) 瀬良)

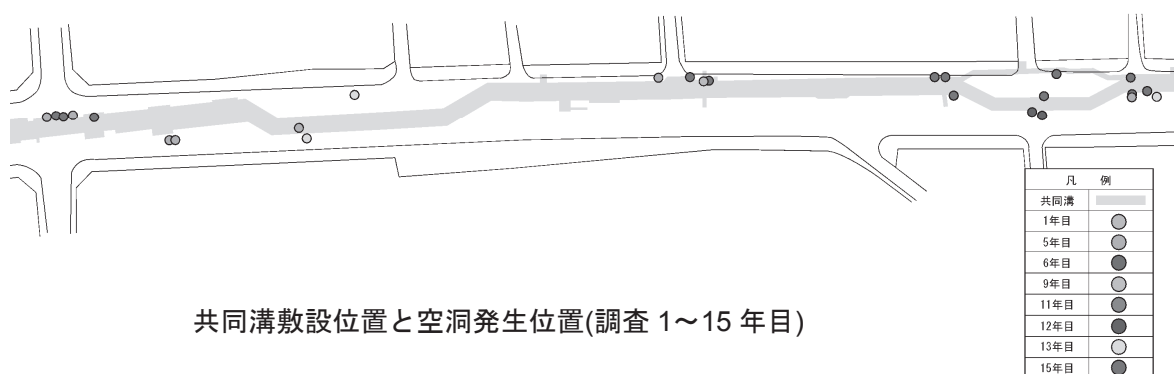
事例 4 交差点下地下道の施工不良が原因で発生した路面下空洞の事例

(出典：ジオ・サーチ(株)社内資料)

(1) 状況

大型地下構造物である共同溝の敷設路線で路面変状が発生することがある。このような敷設路線で路面下空洞調査を実施すると、躯体ラインに沿った位置に空洞が複数年で多数確認され、更に発生箇所を詳細に見てみると、換気口等により複雑な形状となっている箇所付近で多く確認されている結果が得られる。

このように空洞が確認されるとその都度補修をかけるも、10 年以上経過しても空洞発生は収束していない。埋戻し施工において、不適切材料を転圧不足の状態で行ったことで、圧密沈下が進行していることが考えられる。また地下水位の変動が影響している可能性が高い。



共同溝敷設位置と空洞発生位置(調査 1～15 年目)

図-事例 4.1 共同溝敷設位置と空洞発生位置

(2) 性能要求事項

①道路機能

車両や歩行者の交通に支障をきたさないことが求められる。具体的には変状しないこと、陥没しないこと。そのためには路盤の支持力が保持されていることが求められる。

②地下道、共同溝等の地下構造物としての本来の機能

地下構造物の本来の機能を維持できることが求められる。また設置時の不適切施工、劣化や破損などによって、埋設場所で道路や歩道、あるいは近接の埋設物などに対して機能障害となる影響を及ぼさないことが必要となる。

(3) 性能評価の着目点

掘削埋戻しの施工品質が問題になった事例である。多数の地下構造物が輻輳して施工されており、施工方法、維持管理、劣化補修のいずれにおいても難易度の高い対応策が必要となる。要求される地盤設計定数を満足するように埋戻しの施工することは困難である。結果として不適切な施工が展開されがちであり、長期的に沈下を引き起こすことで路面変状に至っている。性能評価の着目点は埋戻し土の圧密沈下特性である。地下に施工された構造物躯体周囲の埋戻し転圧不足、あるいは構造物区体内への土砂流出が原因となって、

路面下空洞が発生する事例は多い。

この事例では路面下空洞の発生が横断地下歩道の施工に起因することが明瞭なため、早急な対策で現象を終息させることが可能である。

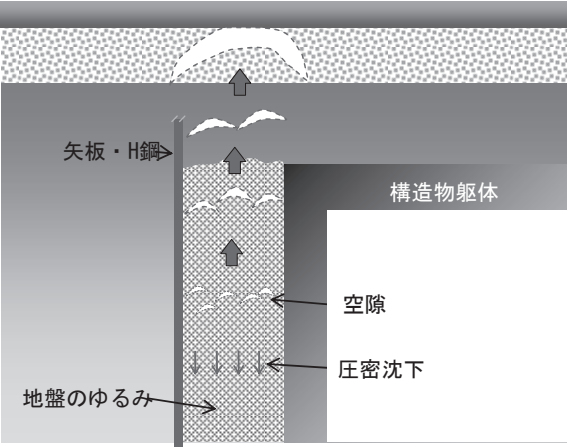


図-事例 4.2 大型地下構造物周辺の
空洞発生イメージ

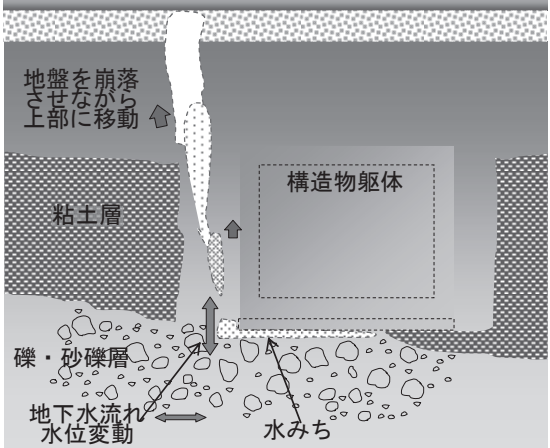


図-事例 4.3 水みちの存在

表-事例 4.1 現象の時系列整理

現象の経時変化	性能評価の着目点
輻輳する地下構造物・地下埋設物	施工時の埋戻し土の転圧不足，輻輳状況
複雑な形状の地下道施工	施工時の埋戻し土の転圧不足
構造物の沈下	不適切な支持地盤の選定・施工 構造物の形状，不等沈下の有無
埋戻し土の圧密沈下	沈下部分以浅で間隙比が増加
地下水位の変化	土粒子の流出
空洞発生	ゆるみの拡大
空洞拡大	ゆるみの拡大
異常降雨による土砂流出拡大	地点降雨量
交通荷重の負荷増大	交通量の変化
路面陥没発生	路床支持力の消失

(ジオ・サーチ㈱ 瀬良)

事例 5 鋼矢板岸壁にて裏込め土の吸出し流出が原因で発生した矢板背面の空洞の事例

(1) 状況

施工後 30 年を経過した港湾施設において、港矢板岸壁背面のエプロン部に空洞が発生し陥没が発生した。陥没地点の周辺を地中レーダー探査で調査したところ、複数の空洞の存在を確認した。また空洞確認地点でコーン貫入試験を実施したところ、岸壁最下部、満潮位面と干潮位面の間に貫入抵抗の低い部分があることを確認した。サンドコンパクション部での貫入抵抗は大きく健全な状態にある。鋼矢板に目立った損傷は無い。そのため岸壁の施工後長い時間をかけて、潮汐力の大きく作用する満潮面以深から干潮面以浅の裏込め土が徐々に吸出しを受けて流出し、間隙比が大きくなり、沈下が発生した結果、エプロン部に空洞が発生したものとする。

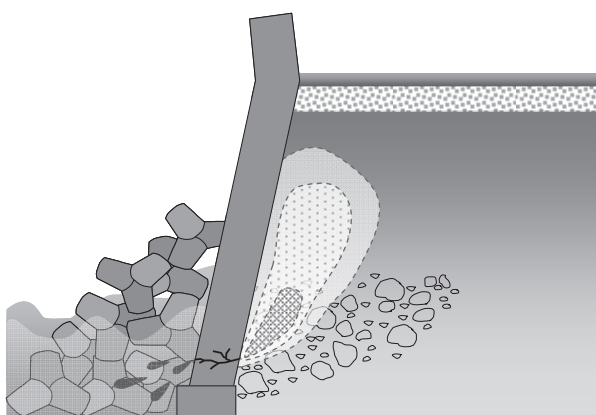


図-事例 5.1 護岸構造物の破損による
空洞発生イメージ



写真-事例 5.1 港湾施設での陥没

(2) 性能要求事項

岸壁は港湾において船舶が接岸して荷役を行うために作られた構造物であり、長期にわたり安定に存在することが求められる。潮汐、波浪、地震動などの自然外力、船舶接岸時の衝撃力、船舶係留時の引張り力、荷役作業における貨物荷重や運搬設備等の荷重に対する支持力などが求められる。

(3) 性能評価の着目点

岸壁背面での吸出しによる空洞発生はよく知られている現象である。この事例では岸壁の外観には目立った損傷は確認できないため、路面が陥没するまでは空洞の存在がわからなかった。吸出し現象自体を計測することは現実的ではなく、構造物の外観だけでは空洞の発生を予測できないため、空洞の発生原因となる矢板の損傷や護岸構造物の目地の開き状況などの評価とあわせて、路面からの空洞調査を適宜実施することになる。

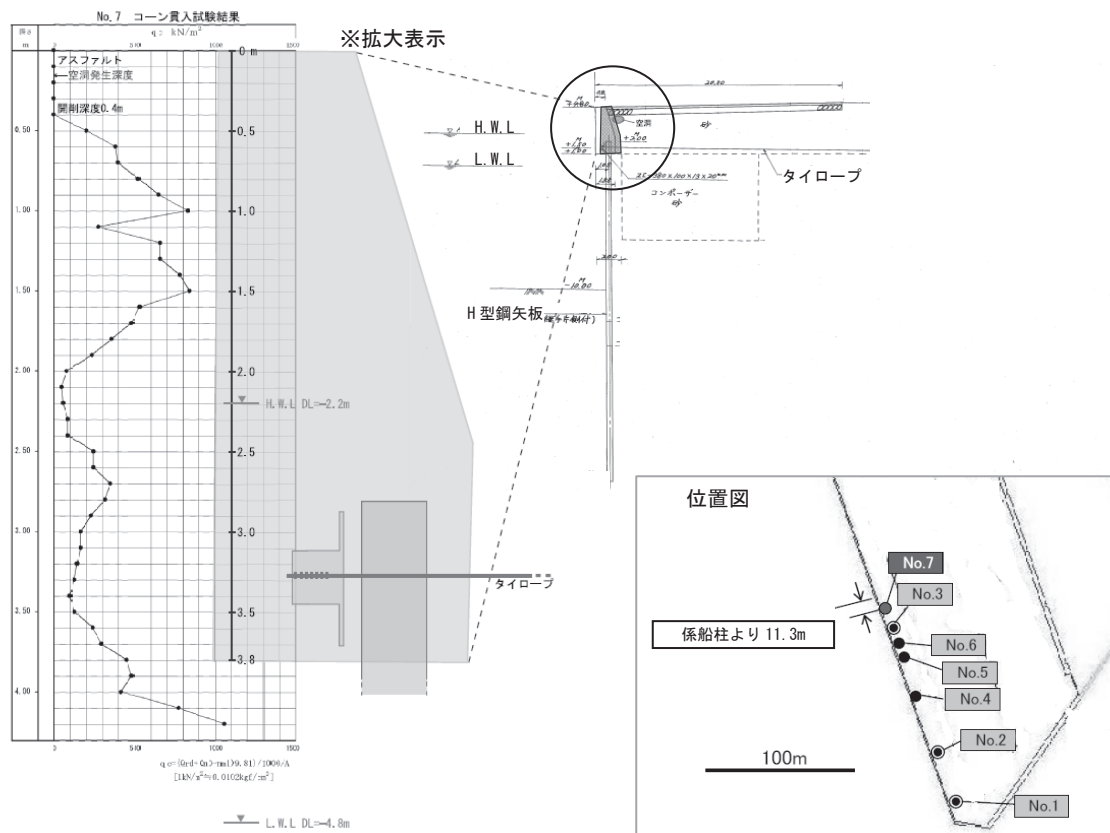


図-事例 5.2 空洞箇所でのポータブルコーン貫入試験結果

表-事例 5.1 現象の整理

現象の経時変化	性能評価の着目点
岸壁施工後、約 30 年経過	構造物全体の劣化状況
コンクリート目地や鋼矢板継目のから裏込め土の細粒分が流出	土砂の吸出し、間隙比の増大
満潮位面より上側では裏込め土はよく締まっている	ゆるみ領域の確認
裏込め土が徐々に沈下	変状確認
アスファルト舗装下に空洞が発生	空洞の有無
エプロン部陥没発生	アスファルトの耐力限界

(ジオ・サーチ(株) 小池)

事例 6 洗掘による港湾施設・河川施設、海洋構造物・橋梁、護岸構造物の損傷した事例

(1) 状況(現象)

洗掘現象は、流水や波浪によって河川でも海でも発生する現象であり、社会基盤である港湾施設・河川施設・海洋構造物・橋梁・護岸構造物を損傷から破壊に至らしめ、施設・構造物の機能を低下あるいは停止させる場合があり、人的な安全を脅かすだけでなく経済的にも大きな打撃を生じさせる。

写真-事例 6.1～6.5 に洗掘が原因の災害例を、図-事例 6.1 に橋脚の洗掘メカニムの模式図を示す。

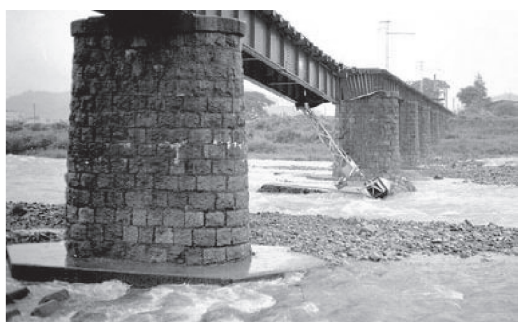


写真-事例 6.1 橋脚が倒壊した河川災害の例 写真-事例 6.2 北海道南西沖地震津波の被災例



写真-事例 6.3 橋脚の洗掘例

⑦吉野川市鴨島町中須賀 河岸洗掘状況



写真-事例 6.4 河岸の洗掘例

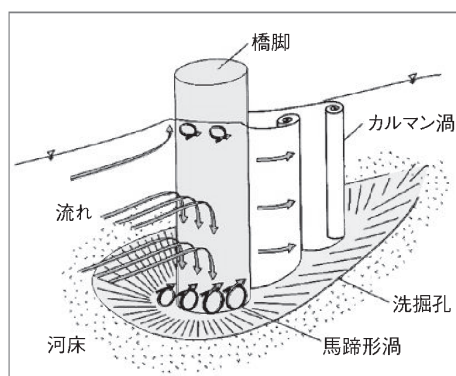


図-事例 6.1 橋脚の洗掘形状と流れ



写真-事例 6.5 消波ブロックの沈下

(2) 性能要求事項

洗掘は流水や波浪により河岸、海岸、または河床や海底の土砂が洗い流されることをさし、港湾施設を始めとする海岸構造物の基礎部やリグその他の海洋構造物の脚部は潮流や衝突した波によって生ずる流れによって海底の砂が洗掘されやすく、それが原因で構造物が損傷を受けることが多い。また、河川では、河川敷と水面が接する部分ののり面が流水の作用によって削り崩されることや(河岸洗掘)、橋脚周辺の河床が流水によって掘られ橋脚の安定が損ねること(橋梁洗掘)が多い。この洗掘による災害は、地盤と構造物の視点からみると、構造物が構築された時点では地盤はその構造物を安定的に支持できる力を保有していたが、自然現象の川や海の侵食によって惹き起こされる洗掘現象により構造物周辺地盤の土砂が無くなったり、あるいは元来の地盤より弱い地盤に埋め戻されたりして、構造物を安定的に支持できなくなることである。地盤に要求される性能としては当初支持力の維持であるが、維持するには土砂の流失を防止することであり、川や海からの侵食に強い環境が要求される。また、この侵食の過程(程度)を「地盤の劣化」と表現することもでき、侵食の過程(=劣化の程度)を把握することにより構造物の安定性との関連を評価することが可能と考えられる。

(3) 性能評価の着目点

地盤の性能としては、構造物建設時の地盤支持力の維持が要求される性能であるため、地盤を構成している土砂流出の有無とその程度を把握することが性能評価になるものと考えられる。

土砂流出の程度を把握する方法には、直接的に目視し、その規模を測量する方法が最も確実な方法であるが、直接的な把握が困難な場合も多い。間接的な方法として、構造物をセンサと考え、構造物の変状の有無やその程度を、あるいは構造物周辺の地盤状況を物理的(弾性波・電磁波・比抵抗・微重力など)に計測することにより間接的に洗掘の規模を推定する方法が考えられる。

また、洗掘による地盤の侵食には、台風時の波浪や洪水等による極めて短期的に構造物を破壊まで至らしめる場合と侵食が徐々に進行していく場合が考えられ、地盤の劣化を考える場合には後者を想定している。

現象の時系列整理

- ・ 洗掘が現象・事象の原因とみなされる。
- ・ 性能は地盤の支持力であり、洗掘が進むにつれて地盤の支持力が低下し、ある時点で構造物を支えられなくなり、構造物に変状あるいは破壊が発生する。

洗 掘		無	→	小	→	中	→	大
構造物が必要とする地盤の支持力	地盤	>		地盤	>	地盤	≒	地盤 < 性能

(中央開発㈱ 杉山)

事例 7 水路トンネルの崩壊

(1) 現象

水路トンネルで覆工背面の地山が崩落することによる崩壊。原因は、覆工コンクリートの劣化ではなく、亀裂の多い非常に脆い岩盤が浸食され、トンネル上部の間隙が拡大、崩落することと考えられる。

(2) 性能要求事項

土木学会トンネル工学委員会での検討⁵⁾を参考にして、水路トンネル全体の性能としては「内空が確保されている」に着目した。

(3) 性能評価の着目点

水路トンネルを例として、性能評価項目を検討した例を図-事例 7.1 に示す。なお、この検討は、個別の水路トンネルや調査結果を対象としたものでなく、種々の文献に示されている水路トンネル全般の事例から想定したものであることを明記しておく。構造物全体の性能である「内空が確保されている」に対して、地盤(地山)の性能の評価項目としては、「地山の細粒化」、「細粒分の流出」を抽出した。あるいは、地盤だけでなく構造物全体系として見た場合、「覆工に貫通ひび割れ(水みち)」、「天端の沈下」等が性能の評価項目となり得る。

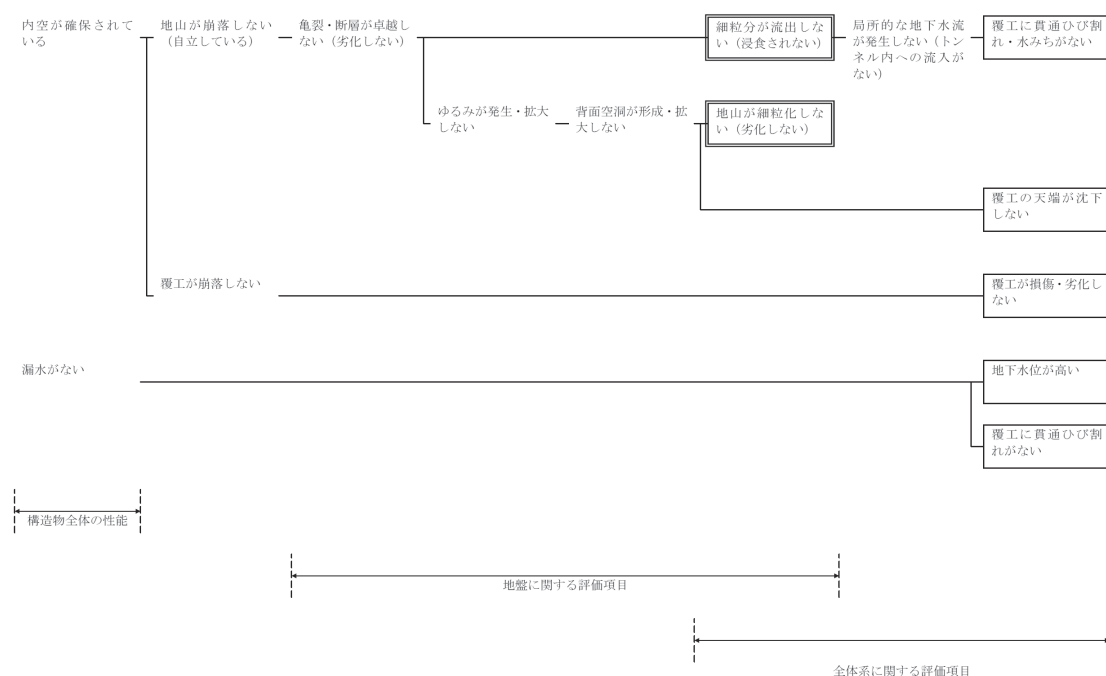


図-事例 7.1 水路トンネルに要求される性能(機能)と評価項目

(東電設計㈱ 恒国)

文献リスト

- 1) 日経コンストラクション, 日経 BP 社, pp.40～41, 2006.10,
- 2) 高橋重雄研究トピックス(波と地盤・液状化・洗掘),
http://www.pari.go.jp/bsh/syukan/base/jp/jp_project/namijiban.html
- 3) 高松恭文, 渡辺義, 石田道昭: ケーソン式護岸背後の吸出し現象に関する一考察,
http://www.hrr.mlit.go.jp/library/kenkyukai/h18/pdf/d/d_04.pdf.
- 4) ジオ・サーチ株式会社社内資料
- 5) 土木学会: トンネルの維持管理, トンネル・ライブラリー14, pp.29-30, 2005
- 6) 内閣府中央防災会議: 「大規模水害対策に関する専門調査会」第13回会合資料, 内閣府 HP(<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/suigai/index.html>), 2009.1

付 録

「コンクリート構造物の構造ヘルスマニタリング」

勝木 太(芝浦工業大学) 2008 年 12 月 2 日

「コンクリート構造物の構造ヘルスマニタリング」に関して、簡単にご紹介させていただきます。

土木学会コンクリート委員会の中にコンクリート構造物のヘルスマニタリング研究小委員会というものがあり、平成 14 年 9 月から 2 期にわたって、平成 18 年 12 月まで茨城大学の呉先生を委員長として委員会活動を行いました。この研究内容の成果については昨年 5 月に報告会を開きまして、『コンクリート技術シリーズ』にまとめています。この中の幾つかを今日ご紹介します。

第 1 期小委員会では、ヘルスマニタリングをどういう形で世に出していくか、それをどうまとめていったらいいのかという議論が大半を占めていました。

第 2 期になりますと、ある程度皆さんの意見が集約できておりますので、その設計法の取りまとめに力を入れて活動しました。ただ、「性能評価技術の取りまとめ」については、性能を評価する技術、手法というものの論文がなかなか十分に集まらず、委員会でもワーキングでもどうしたらいいのかについて具体的な案を出すことができませんでした。ある程度、方向性だけは出せたかと思っています。

土木学会コンクリート委員会

コンクリート構造物のヘルスマニタリング小委員会

- 第一期小委員会(H.14.9～H.16.8)
 - ◎構造ヘルスマニタリングの概念の整理
 - ◎センサ・センシング工法の取りまとめ
 - ◎通信技術の取りまとめ
 - ◎性能評価技術の取りまとめ
- 第二期小委員会(H.16.11～H.18.12)
 - ◎性能評価技術の取りまとめ
 - ◎設計法の取りまとめ

構造ヘルスマニタリング(Structural Health Monitoring : SHM)の定義をどうするのかということ非常に重要な経緯があります。

最終的に「構造物の健康状態と挙動(健全性)を継続的に監視する調査や検査行為と定義する」ということに落ち着きましたが、何をもちめたかということ、継続的なのか、常時なのかということ。常時ですと、センサを構造物に取り付けて、リアルタイムにデータを取得しなければいけないということになります。それだけで構造物の監視や評価が本当にできるのかということ、また従来の非破壊検査等の技術はここに入っていないのかということがありました。

非破壊検査という技術は、継続的に物を見るという重要性よりも、どちらかというと中の構造、状態がどうなっているか、欠陥部がどうなっているかということに重きを置いている検査方法がほとんどですが、その中でも構造物の変状をとらえていくような検査内容

も世に出てきております。リアルタイムではないですが、1年に1回、または10年に1回でもいいので継続的に検査し、評価するのであれば、SHMの中に入れてもいいのではないかという意見もありました。「継続的」という言葉を決めるのにも相当苦労しましたが、常時ではなくて継続的ということにさせていただきました。

構造ヘルスモニタリングの定義

- Structural Health Monitoring (SHM)
- 定義
構造物の健康状態と挙動(健全性)を継続的に(例えば、連続的あるいは能動的に)監視する調査や検査行為と定義

SHMの目的ですが、まず「構造システムの安全性や信頼性の向上」です。当然ながら構造物をモニタリング、つまり監視することですので、今までの維持管理よりも安全性や信頼性、検査精度が向上するであろうということです。

構造物の長寿命化にとってはやはりSHMの付与が重要になってきます。

また、今よく要求されているのが「突発的な災害や異変の回避」ということです。通常の維持管理にSHMを使うということでは、コストの面でなかなか自治体も動いてくれません。どちらかというと、例えば鉄道のような構造物が地震の被害を受けた場合に、早急に運行の判断をしていくといったことに将来使えるのではないのかと思っています。

「LCCの低減」ですが、維持管理という業務は人的にやられていることが多くて、何年やるかということになると思います。SHMの場合は初期投資が非常に大きくて、どうしても受け入れられないということになりますが、これを30年、50年続けていった場合にはどうなのでしょう。もしかしたら人的なものよりもトータル的には維持管理費用の低減につながるのではないかと考えております。

それと、「未知ファクタの考慮のできるもの」としています。

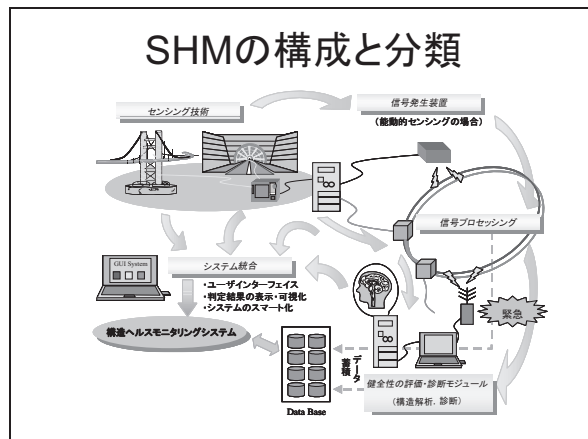
SHMのエッセンスは、やはり先端的なセンサ、センシングを使ってやることと、できれば今の通信技術を使って集中管理するということです。人間の関与を極力避けて、センシング、損傷の劣化や構造変化の検出を自動的かつ継続的なベースで実現していくことがSHMのエッセンスであろうと委員会では考えております。

SHMの目的

- 構造システムの安全性や信頼性の向上
- 長寿命化
- 突発的な災害や異変の回避
- LCCの低減
- 未知ファクタの考慮など

SHMのエッセンスは、やはり人間の関与を極力避け、構造システムのセンシング、損傷劣化や構造変化の検出及び診断評価を、自動的かつ継続的なベースで実現しようとする思想

SHM の構成と分類をご紹介します。構造物にセンサを付けてセンシングを行い、そこから得られるデータを集計し、プロセッシングして、情報をどこかで集約します。このようなデータ取得方法は最近ではよくやられていますが、健全性の評価、診断についてはどうしたらいいか悩ましいところで、これからきちんと組み立てていかなければいけないと思っています。



SHM をどうやって維持管理に結び付けていくかということです。突発的な災害の回避に關してはできると思いますが、通常の維持管理に対してどこで SHM が使われていくのかということを考えます。

まずケース 1 は、統合監視型と呼んでいます。予防維持管理を実現させるため、高度な SHM と適切なセンシング頻度により構造物を監視し、通常の維持管理に必要な定期・臨時・詳細点検作業もすべて SHM システムで実現させるというものです。非常に重要度の高い構造物に關して、予防維持管理という立場でやっていこうという思想です。

SHMによる維持管理の戦略

①ケース1(統合監視型)

予防維持管理を実現させるため、高度なSHMと適切なセンシング頻度により、構造物をモニタリング(監視)するとともに、通常の維持管理に必要な定期・臨時・詳細点検作業もすべてSHMシステムで実現させる。

ケース 2 は併用監視型です。これも予防維持管理型ですが、コストの面も当然ありますし、構造物の重要度によってもどれだけ SHM を付与したらいいかに違いがあると思います。そこで、すべて SHM でやるのではなく、通常の人による維持管理業務と SHM を併せることによって構造物を監視していくという考え方です。

②ケース2(併用監視型)

予防維持管理を実現させるため、通常の維持管理に必要な定期・臨時・詳細点検作業を実施するとともに、SHMのモニタリングシステムとの併用により、適切なセンシング頻度によりで構造物をモニタリング(監視)する。

ケース 3 は独立監視型です。これは事後維持管理や観察維持管理におけるためだとしております。通常の点検業務で管理していくのですが、やはり事後ですので、構造物が劣化したときに、その構造物がどれだけ初期から性能が低下しているのかという、ポイントで検査をしなければいけないところが出てくるので、それを SHM でやっていくということです。

それと、劣化した構造物は今後どうなっていくのだという、劣化した既設構造物に対して SHM を取り込むためにはこういう考え方でやっていくということです。

これら三つのケースに分けて SHM というものを考えていきます。

③ケース3(独立監視型)

事後維持管理や観察維持管理における構造物の調査を実施するため、適切なセンシング頻度と必要な項目と部位を定めたSHMIにより、構造物をモニタリング(監視)・評価する。

SHM で何を評価していかなければならないのかということが重要ですが、SHM の基本は、性能評価のための構造性能指標は何かということです。安全性能，使用性能，第三者影響度に関する性能，それと耐久性能。これらを対象に SHM をどう考えていったらいいかということです。

SHMの基本

・ 性能評価のための構造性能指標

表2.1.1 構造物の要求性能と性能指標

構造物の要求性能	性能指標
安全性能	断面耐力，疲労耐力，構造の安定性，部材のじん性，風，地震時応答特性
使用性能	走行性，水密性，流水性などの構造物の機能
第三者影響度に関する性能	はく離・はく落，付帯設備の落下
耐久性能	時間経過後の各性能指標

構造物の性能を評価するときに，どういう考え方で性能指標とモニタリング項目を決めていくか委員会で検討した内容について説明します。

一つは当然ながら構造物の種類によって考えます。一般に構造物に要求される性能は安全性能，使用性能，耐久性能とありますが，構造物の種類によってそれぞれの要求性能に対する性能指標が違いますので，性能を評価するためには必ず構造物の種類を先に決定して，それに対する性能指標を決める必要があります。そうしないと混乱する可能性があります。

もう一つは，構造レベルとっていますが，全体レベルで評価するのか，それとも部材レベルで評価するのか，あるいはそれ以外の特殊箇所を評価するのか区分して性能指標を決める必要があります。横軸に構造物の種類，縦軸にその構造物のどのレベルでの評価をするのかということで区分し，それぞれに何をモニタリングしたらいいかをすみ分けることをまずやりました。それによって何か見えてくるのではないかということでこういうことをやっております。

・ モニタリング項目

表 2.1.2 各種レベルと各種構造システムにおける性能指標とモニタリング項目の例

構造レベル	性能	橋梁		トンネル		ダム	
		性能指標	モニタリング項目	性能指標	モニタリング項目	性能指標	モニタリング項目
全体レベル	安全性	剛体安定 風・地震時 応答特性	変位・変形 剛性、応力 荷重	剛体安定 地震時応答 特性	変位・変形 応力、荷重	力学的安定	変位・変形 応力、荷重 流量、圧力水 頭、水質
	使用性能	構造の使用性能は部材レベルの性能とする。		走行性 流水	変位・変形 漏水	水理的安定	—
	耐久性	経年経過後の安全性		経年経過後の各性能	地山の变形 地下水位の変動	経年経過後の安全性	経年経過後の 変位・変形、 ひび割れ発生 状況
部材レベル	安全性	断面耐力 疲労耐力 じん性	荷重 材料物性 断面諸元	都市環境に おいて断面 耐力	荷重 材料物性 断面諸元	—	—
	使用性能	走行性	変位・変形 ひび割れ発生 状況、まっしほ	走行性 流水	変位・変形 漏水、摩耗	—	—
	第三者影響度に関する性能	はく離 はく落	ひび割れ、浮き の発生状況	はく離、 はく落	ひび割れ、浮き の発生状況	—	—
	耐久性	経年経過後の各性能	鋼材の腐食 ひび割れ発生 状況	経年経過後の各性能	鋼材の腐食 ひび割れ発生 状況	—	—
特殊箇所	安全性	断面耐力、 トラス破断	荷重 材料物性 断面諸元 トラス耐力	—	—	—	—
	使用性能	走行性	ひび割れ発生 状況、まっしほ	—	—	—	—
	第三者影響度に関する性能	開閉床板部のはく離、はく落	ひび割れ、浮きの発生状況	添加材の落下	コンクリートのひび割れ、浮きの発生状況	—	—
	耐久性	経年経過後の各性能	ケーブルの腐食	経年経過後の各性能	鋼材の腐食 ひび割れ発生 状況	—	—
備考	部材	桁、床版、橋脚、橋台、 アール、護岸	—	—	—	—	—
	特殊箇所	開閉床版、支床、複合構造 接合部、各種トラス、塔、ア ール	—	架線、照明、換気等	—	—	—

では、実際の SHM の設計、構築、実施をどのようにやっていけばいいかです。

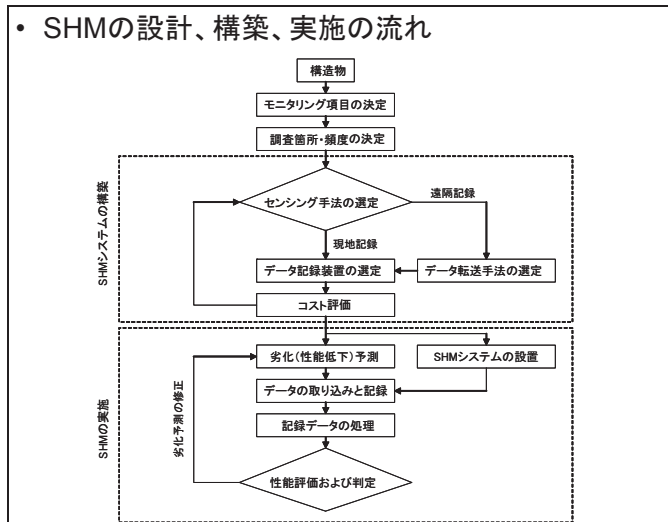
まず構造物の種類があり、それに従って何をモニタリングするのかを決めます。そして調査箇所、つまり全体レベルなのか、部材レベルなのか、または特殊箇所なのか、またデータの取得の頻度、センシングの頻度をきちんと決めます。

次に、どういう手法でセンシングするかです。通信技術を使って遠隔記録をするのか、現地でやるのかという選択をしますが、遠隔記録であればデータ転送方法も選びます。最終的にはデータ記録装置を選定し、コスト評価をします。

コストが合わなければ、もう一度センシングをどうするかに戻りますが、こういうことを繰り返し、コスト評価をしながら、どういう SHM システムを構築したらいいかということを決めていきます。

それが終わりましたら、SHM の実施です。まず性能低下を予測します。また同時に SHM システムを実際の構造物に設置します。それで、センシングを行い、データの取り込みと記録をし、記録データの処理をして、性能評価および判定をします。

最初に予測した性能低下が実際のものと合っているかどうか、劣化予測の修正をしながら構造物の管理をしていくという考え方です。



次に SHM で行う評価の対象となる要求性能について委員会で検討した内容について説明します。

構造物の要求性能と SHMによる評価

構造物に要求される性能というのは、コンクリート標準示方書の維持管理編に従って、安全性能、使用性能、第三者影響度、美観・景観、耐久性能です。

3. 1 構造物の要求性能(1)

■ コンクリート標準示方書[維持管理編]

- ① 安全性能
構造物が破壊して人命などが失われることのない性能。
- ② 使用性能
構造物の使用性および機能性に関する性能
- ③ 第三者影響度に関する性能
構造物から剥落したコンクリートなどの器物および人に与える傷害などへの影響度合。構造物の供用に伴う周辺への騒音問題についても第三者影響に含める。
- ④ 美観・景観
構造物の錆び汁やひび割れなどによる見た目による美的、または、景観的なもの。
- ⑤ 耐久性能
構造物の要求性能を、供用期間中に維持する性能。供用期間中に、構造物の要求性能が許容範囲内に維持される性能を耐久性能と定義し、この性能を維持管理の対象とすることとした。

SHM としてこの中のどこをターゲットにするかですが、SHM は基本的に構造物の性能低下をモニタリングしていく、監視していくということですので、耐久性能ということになります。したがって、安全性能、使用性能、第三者影響度が時間軸上でどう変化していくのかということを対象にしていきます。美観・景観はわれわれの専門外でもあり、そこは対象外とさせていただきました。

3. 1 構造物の要求性能 (2)

■ SHMにおける要求性能の分類

- ① 安全性能
 - 耐荷性能
 - その他の安全性能
- ② 使用性能
 - 使用性に関する性能
 - 機能性に関する性能
- ③ 第三者影響度に関する性能
- ④ 美観・景観
- ⑤ 耐久性能
 - SHMの主な対象範囲
 - 安全性能に関するもの
 - 使用性能に関するもの
 - 第三者影響度に関するもの
 - 美観・景観に関するもの

SHM における要求性能の分類ですが、安全性能であれば断面耐力、疲労耐力、構造の安定性、部材のじん性、風・地震時応答特性です。使用性能であれば応力、ひび割れ、変位・変形、振動、劣化です。第三者影響度に関する性能であれば、ひび割れ幅、ひび割れ密度、鉄筋の腐食状況というものが対象になります。

3. 1 構造物の要求性能 (3)

■ SHMにおける要求性能の分類

- ① 安全性能
 - ・ 断面耐力(曲げモーメント、軸方向力、せん断力、ねじりモーメント等)
 - ・ 疲労耐力
 - ・ 構造の安定性
 - ・ 部材のじん性
 - ・ 風、地震時応答特性
- ② 使用性能
 - ・ 応力
 - ・ ひび割れ
 - ・ 変位・変形
 - ・ 振動
 - ・ 劣化(中性化,塩害,凍害,化学的浸食,アルカリ骨材反応,疲労)
- ③ 第三者影響度に関する性能
 - ・ ひび割れ幅
 - ・ ひび割れ密度
 - ・ 鉄筋腐食状況
 - ・ 剥離・剥落状況
 - ・ 漏水
 - ・ 表面の変色

次に構造物の種類によって、どういうものを評価していくのかということをまず整理しなければいけません。

橋梁の構造性能評価では、全体評価、部材、特殊箇所と項目を分けて、それぞれの要求性能として何をやっていいのかをまとめていきます。

3. 2 橋梁(1)

■ 橋梁の構造性能評価

		安全性能 の評価	使用性能 の評価	第三者影響度 の評価	耐久性能 の評価
全体		○			
部 材	床版	○	○	○	○
	主桁	○	×	○	○
	橋脚・橋台	○			
特 殊 箇 所	間詰め床版	○	○	○	○
	支承	○	×	×	○
	複合構造接合部	○	×	×	○
	斜材ケーブル				
	外ケーブル				
	アンカーケーブル				
	塔				
アンカレイジ					

そして，例えば主桁の場合はどのように安全性を判定しようかという流れで，考えていこうということです。

3. 2 橋梁(2)

■ 主桁(安全性の判定)



安全性能，使用性能，第三者影響度について，指標となるものは何か，その指標に対してどういう検査・計測方法があるのかということを整理していきます。

3. 2 橋梁(3)

■ 主桁(指標一覧:安全性,使用性,第三者影響度)

性能	分類	指標	測定方法	
			調査・点検	モニタリング
安全性	曲げ耐力	コンクリート圧縮強度	硬度及撥法、コア強度試験、超音波法	
		コンクリート弾性係数	コア弾性係数試験、超音波法	
		鋼材量、断面積	はつり目視調査、X線法	
		鋼材位置	電磁波法、電磁誘導法、X線法	
		鋼材弾性係数	抜き取り試験	
		死荷重応力		
		外力による応力		
使用性能				
第三者影響度	コンクリートの剥離・剥落	ひび割れ		デジタルカメラ、光ファイバセンサ
		剥離・剥落		デジタルカメラ
		変形・ひずみ		光ファイバセンサ
		かぶり	電磁波法、電磁誘導法、X線法	
		鋼材腐食		鋼材腐食モニタリング

耐久性、特に化学的な劣化に対しては、劣化の分類に従って、指標は何か、それに対してどういう計測方法があるのかというふうにまとめていきます。

3. 2 橋梁(4)

■ 主桁(指標一覧:耐久性)

性能	分類	指標	測定方法	
			調査・点検	モニタリング
耐久性	中性化	中性化深さ	フェノールフタレイン法	
		鋼材腐食		鋼材腐食モニタリング
	塩害	塩化物イオン濃度	コア塩分量試験	
		鋼材腐食		鋼材腐食モニタリング
		凍害深さ	コア採取試験	
	凍害	鋼材腐食		鋼材腐食モニタリング
		膨張量		デジタルカメラ、光ファイバセンサ
		相対動弾性係数	コア弾性係数試験、超音波法	
	化学的侵食	劣化因子の浸透深さ	コア因子量試験	
		中性化深さ		
		鋼材腐食		鋼材腐食モニタリング
	アルカリ骨材反応	膨張量		デジタルカメラ、光ファイバセンサ
		ひび割れ		デジタルカメラ、光ファイバセンサ
		疲労		デジタルカメラ、光ファイバセンサ
	(床版)	たわみ	変位計測	

トンネルの方も、全体レベル、部材レベル、特殊箇所として、評価対象と評価方法をまとめていきます。

3. 3 トンネル(1)

■ トンネルにおける構造区分

構造区分	構造名称	評価対象	評価法
全体レベル	周辺地山・地盤	変状、変形	① 地山、地盤に関する評価
	コンクリート部材 支保部材		② 覆工コンクリートなど支保部材の評価
部材レベル	コンクリート部材	剥離剥落	覆工コンクリートなどコンクリート部材の評価
特殊箇所	添架材	落下	添架材周辺のコンクリートの評価

トンネルに求められている性能項目は何かと考えて、このように一つ一つ整理しています。中身については省略します。

3.3 トンネル(2)		
■ トンネルに求められる性能評価項目		
性能項目	性能	評価項目
安全性能	①覆工施工後、水圧、上載荷重等によって外力が作用する場合、これを支持する。	変状
使用性能	②トンネルの変形が収束しない状態で覆工を施工する場合には、トンネルの安定に必要な拘束力を与える。	変形
第三者影響	③地質の不均一性、支保工の品質のバラツキ、ロックボルトの腐食等の不確定要素を考慮し、構造物としての安全率を向上させる。	欠損
耐久性能	④使用開始後の外力の変化や地山・支保材料の劣化に対して、構造物としての耐久性を向上させる。 ⑤覆工コンクリートからのコンクリート片の落下を防止し、トンネル内を安全に走行できる。 ⑥地下水等の漏水の少ない、水密性のよい構造物にする。	漏水
その他の性能	②使用中の点検、保守等の作業性を高める。 ③トンネル内の架線、照明、換気等の施設を保持する。	

そして、橋梁と同じように、それぞれの要求性能に対し、何を指標として、どういうもので計測するかを整理します。

3.3 トンネル(3)					
■ 計測項目と測定方法(無筋トンネル、全体レベル)					
性能	分類	指標	測定方法		備考
			調査・点検	モニタリング	
安全性能 使用性能 第三者影響度 耐久性能	変状※	ひび割れ・変状分布	目視		
			デジタルカメラ	デジタルカメラ	
		ひび割れ幅		導電塗料	
			クラックスケール	デジタルカメラ	
	変位	内空変位	テープスケール		
			トータルステーション		光波測距儀＋角度測定機能
		ひずみ、位置		光ファイバセンサ	
	応力※	地中変位	沈下計		
			傾斜計		
		支保工		光ファイバセンサ	支保工の鋼材
			ひずみゲージ		支保工の鋼材
			軸力計		ロックボルト
			荷重計		ロックボルト座金部
		覆工	ひずみ計(埋込型)		吹付けコンクリート
			ひずみ計		二次覆工コンクリート
耐久性能	荷重※	地中応力	土圧計		掘削に伴う周辺地山内応力
		間隙水圧	間隙水圧計		

RC トンネルについても同じです。空白が多いのですが、なかなかまとめきれっていないというのが現状であったと思います。

3.3 トンネル(4)

■ 計測項目と測定方法(RCTトンネル, 部材レベル)

性能	分類	指標	測定方法		備考
			調査・点検	モニタリング	
安全性能 使用性能 第三者影響度 耐久性能	変状	ひび割れ・変状分布	目視		
			デジタルカメラ	デジタルカメラ	
				導電率計	
		ひび割れ幅	クラックスケール		
			デジタルカメラ	デジタルカメラ	
			打音検査		
		剝離・剥離・空洞	弾性波法		打音法、衝撃弾性波法、超音波法
			電磁波法(レーザ法)		
			赤外線法		
		強度	コア採取法		
耐久性能	腐食	中性化深さ	フェノールフタレイン		
			硫酸銀噴射法		
			塩分量	塩化物量の分析	
		鋼材位置	電磁波誘導法		
			電磁波法(レーザ法)		
			はかり出し		
		鋼材腐食	自然電位法等		分極抵抗法、電流抵抗法

あとはダムです。橋梁やトンネルとは性能指標が違いますので、いろいろと違う言葉が出てきます。

3.4 ダム(1)

■ 計測項目と測定方法

性能	分類	指標	測定方法		*1の計測項目	*2の計測項目
			調査・点検	モニタリング		
安全性能	力学的安定に関する量	変位	測量(三角測量、水準測量、水準測量)	ブルムライン、レーザー、光ファイバ		
		ひずみ		埋設計器(ひずみ計、ひずみゲージ)	◎	◎
		傾斜角	測量(三角測量、水準測量、水準測量)	埋設計器(ひずみ計、ひずみゲージ)		
		沈下	測量(三角測量、水準測量、水準測量)	レーザー、三次元計測		
		たわみ		埋設計器(ひずみ計、ひずみゲージ)		
		応力		埋設計器(有効応力計)	—	△
		土圧		埋設計器(土圧計)	—	△
		擁壁圧		ブルドン管	◎	◎
		間隙水圧		埋設計器(間隙水圧計)	◎	◎
		貯水位		水位計	◎	◎
	水理的安定に関する量	温度		埋設計器	—	◎
		地盤動		強震計、微震計	—	◎
		流速		間隙水圧計	—	—
		流量		間隙水圧計	—	—
		排水量		排水孔における計測、間隙水圧計	◎	◎
		圧		間隙水圧計	—	◎
		土圧		ブルドン管	—	◎
		地下水位		—	—	—
		浸透物質	排水孔における観察		—	—
		水質	排水孔における観察		—	—

*1河川管理施設等構造令(重力式コンクリートダムおよびアーチ式コンクリートダム)、*2土研資料第1834号

ダムの場合は水の管理や外力をどうやって見ていくかということになります。

3.4 ダム(2)

■ ダム構造物管理基準による測定項目の頻度の基準

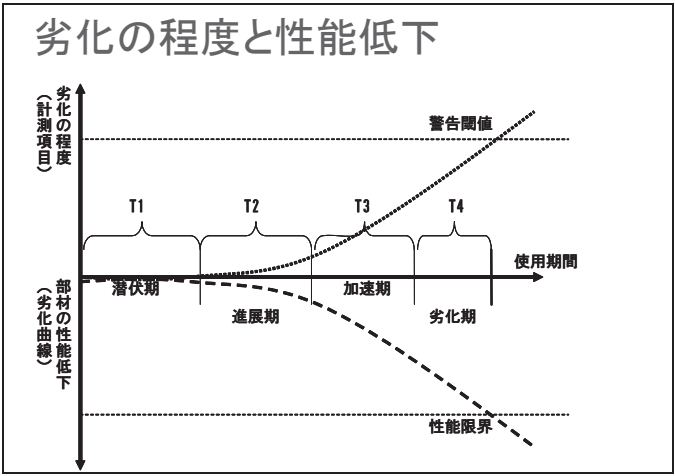
管理の期間の区分	管理区分の定義	測定項目毎の測定頻度			
		漏水量	揚圧力	浸潤線	変形
第1期	漏水開始から漏水以降所要時間を経過するまで(漏水以降最低2ヵ月)	1回/日	1回/週	1回/週	コンクリートダムのうち、高さ100m以上の重力ダムおよび高さ30m以上のアーチ式ダム:1回/月 その他のコンクリートダム:1回/週 フィルダム:1回/週
第2期	第1期経過以降ダムの挙動が定常状態に達するまで(ただし3年以上とする)	1回/週	1回/月	1回/月	コンクリートダムのうち、高さ100m以上の重力ダムおよび高さ30m以上のアーチ式ダム:1回/月 その他のコンクリートダム:1回/月 フィルダム:1回/月
第3期	第2期経過以降	1回/月	1回/3ヵ月	1回/3ヵ月	コンクリートダムのうち、高さ100m以上の重力ダムおよび高さ30m以上のアーチ式ダム:1回/月 その他のコンクリートダム:1回/3ヵ月 フィルダム:1回/3ヵ月

構造物の劣化状況のレベル別に、どのような SHM をやっていけばいいのかについて説明します。予防保全型の維持管理を行う場合には、潜伏期と進展期の境界を性能の限界と定める必要があります。したがて、耐久性能を許容範囲内に確保し、構造性能を低下させな

いような管理が必要になることから、物質移動などの進行を予測して、材料の劣化を起こさせないように監視していきます。

また、進展期以降になってきますと構造性能が低下していきますので、構造性能を許容範囲内に確保する管理が必要になります。したがって今度は劣化に応じて、モニタリングをしながら構造性能を評価して行きながら監視しなければなりません。

このようなことから、どういう目的で何を評価していくか方向性を決めなければ、構造物の種類や性能指標などによってモニタリングしなければならない項目が異なるので、本人会でも何をターゲットに評価していくかということをきちんと整理された方がいいのではないかと考えております。



センサとセンシングの工法についてご紹介します。委員会の中でどういうセンシング方法があるかということ进行调查してまとめております。

従来型のひずみゲージ等を使った計測技術はまとめると無数にありますので、比較的耐久性のある先端的なセンシング方法について整理しています。光センシングがほとんどです。一つはひずみ計測技術、もう一つは温度計測技術、それと振動計測技術について、簡単にご紹介させていただきます。

第5章 センサ・センシング工法	
項目だてと執筆者	
5. 1 センサー性能評価法	勝木幹事長、横見崎、萱野、藤橋各委員
5. 2 各種センシング工法	
5.2.1 ひずみ計測技術	
(1)BOTDRひずみ分布計測法	藤橋、松村各委員
(2)PPP-BOTDAひずみ分布計測法	呉委員長
(3)FBG方式によるひずみ計測法	藤橋、松村各委員
(4)FBG多点ひずみ計測法	呉委員長、呉委員
(5)振動式ワイヤひずみゲージ	今井道男委員
5.2.2 温度計測技術	
(1)ROTDR温度分布計測法	佐々木委員
(2)BOTDR計測	藤橋委員
(3)振動式ワイヤ温度ゲージ	今井道男委員
5.2.3 振動計測技術	岡田委員
(1)FBG加速度計	
(2)サーボ型加速度計	
※成瀬委員、前田委員が査読担当	

もう一つはコンクリートの中性化のモニタリング方法，鉄筋腐食モニタリング方法，実応力計測法，ひび割れ計測法，変位計測法，連続走査法，自己モニタリング法，ワイヤレスセンシングシステム，こういうものを紹介させていただきます。

第5章 センサ・センシング工法	
項目たとえ執筆者	
5. 2. 4 コンクリート中性化モニタリング法	呉委員
5. 2. 5 鉄筋腐食モニタリング法	呉委員、飯田委員
5. 2. 6 実応力計測法	松井委員
5. 2. 7 ひび割れ計測法	柳瀬委員
5. 2. 8 変位計測法	前田委員
5. 2. 9 連続走査画像検査法	勝木幹事長
5. 2. 10 自己モニタリング法	松井委員
5. 2. 11 ワイヤレスセンシングシステム	今井道男委員
※成瀬委員、前田委員が査読担当	

ではまず初めに，光ファイバセンサの性能評価試験方法案について説明します．一般的にはセンサの精度はメーカーによって保証されています．しかし使う側として，そのセンサが本当に必要な精度あるいは耐久性を持っているのか確認する試験方法が必要になってくるのではないかとということがありました．委員会の中できちんと議論して標準試験として整理されたものではありませんが，ここではいろいろなところで実験をやられた内容をまとめてご紹介させていただきます．

5.1 センサシステム評価法
●SHMIにおける計測は，構造物に何らかの方法でセンサを設置し，かつ継続的に長期にわたり行われるため，センサ単体および計測器に耐久性や耐環境性が特に求められる。 ●センサの定着状態や使用環境条件等を考慮したセンサシステムとしての評価が必要となる。 ●近年モニタリングセンサとして注目されている光ファイバセンサについて，代表的な性能評価試験方法の事例を紹介する。 ●ただし，ここで紹介する試験方法は，実施事例や考案中のものに基づいて整理したものであり，本小委員会で議論し標準試験として整理したものではないことを付記する。

今日，ご紹介するのは，繰り返し荷重による光ファイバセンサの引張疲労試験，クリープ試験，ひび割れ幅に対する計測精度の検証方法，BOTDRを用いた光ファイバセンサの温度特性試験，それと耐候性試験に関する事例をご紹介します。

5.1 センサシステム評価法

光ファイバセンサの評価方法(事例)

- (1) 繰返し荷重による光ファイバセンサの引張疲労試験の事例
- (2) 光ファイバセンサの引張りクリープ試験の事例
- (3) 光ファイバセンサの1本のひび割れ幅に対する計測精度の実験的検証方法の事例
- (4) BOTDRを用いた光ファイバセンサの温度特性試験の事例
- (5) 光ファイバセンサの耐候性促進試験の事例

●記載内容・・・

- 1) 試験の目的
- 2) 供試体
- 3) 試験方法
- 4) 評価方法

引張疲労試験は、10本の光ファイバを樹脂で板状に成形した試験体を製作し、両端部を引っ張ることによって疲労荷重を負荷させます。試験体の形状は、連続繊維補強材の引張試験で用いられるB型試験体に類似しています。

5.1 センサシステム評価法

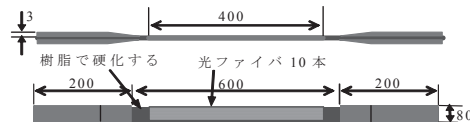


図5.1.1 光ファイバの引張疲労試験供試体の詳細寸法図(単位:mm)

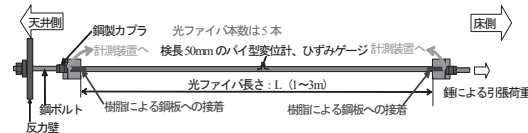


図5.1.2 クリープ引張試験状況

次に、亀裂評価ですが、供試体を二つに分けて、表面には連続繊維シートを張って、それ以外のところには光ファイバを張り付けて、両端を引っ張ります。この亀裂の幅をパイ型ゲージで測って、それと光センサから評価されるデータと比較して、亀裂の精度を測るという方法です。

5.1 センサシステム評価法

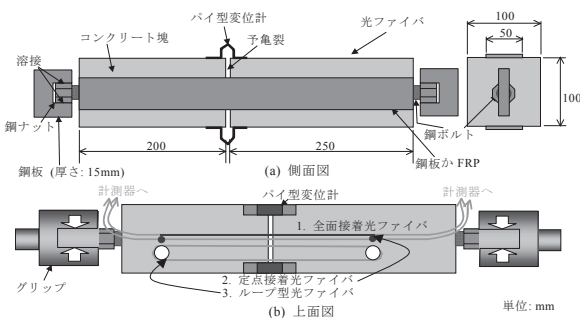
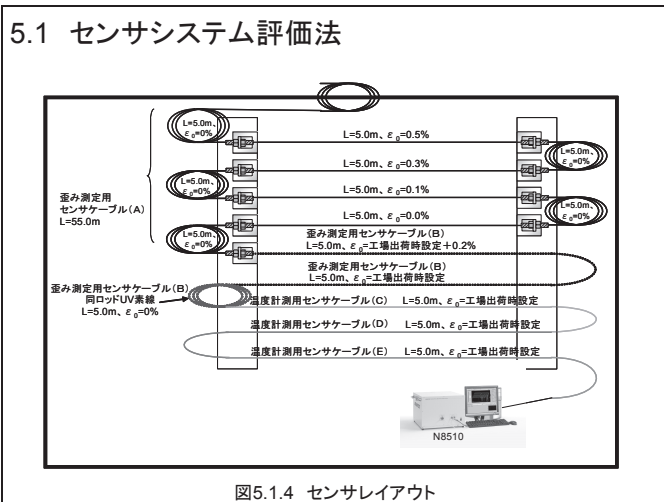


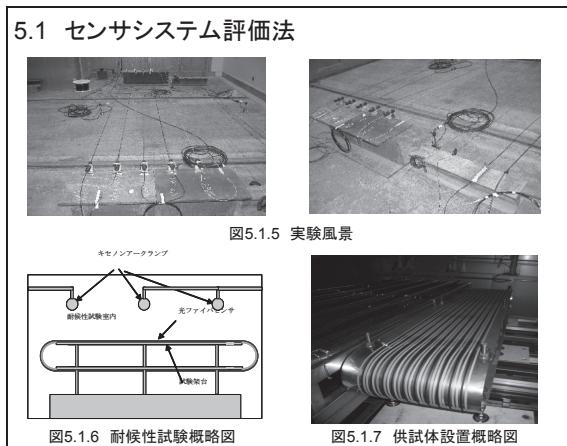
図5.1.3 ひび割れ幅計測供試体の詳細寸法図

BOTDR というのは分布センサであって、距離分解能が最低でも 1.0m です。したがって精度検証試験では、引張区間をかなりの長さ確保しなければ、正確なひずみが出ません。これは 5m 程度の長い引張区間で引っ張って、精度を確認するというものです。

もう一つは、光ファイバは温度の影響を受け誤差を生じますので、その温度誤差を評価する試験方法が必要となります。この状態で温度を変化させ、引張ひずみの温度に対する誤差を確認します。



このスライドの上の写真が引張試験の風景です。なお下の写真は耐候性試験の状況です。



それでは、センサとセンシング工法についてお話させていただきます。ここではひずみ計測技術として、いくつかの光ファイバセンシング技術と振動式ワイヤひずみゲージを紹介させていただきます。

ここに光ファイバセンサの種類をまとめたものを示します。一つは BOTDR センサといって、分布型の光ファイバセンサです。最小距離分解能が 1m 程度で、光ファイバに沿った分布のひずみを計測できるというもので、ブリルアン散乱光という後方散乱光を使ってひず

みを測るという手法です。

ROTDR はラマンの散乱光を利用しているもので、温度を計測できます。

BOTDA もブリルアン散乱光の一種の散乱光を使いますが、どちらかというとも BOTDR よりも距離分解能が狭く、BOTDR は 1m の平均ひずみですが、BOTDA はどちらかというとも 10cm 程度の平均ひずみが出てきます。

FBG センサ（多点型ひずみセンサ）は、一つの光ファイバの中に何点か紫外線で加工した計測点があり、各ポイントのひずみが分かるというようなものです。

5.2.1 ひずみ計測技術

●光ファイバセンシング技術と振動式ワイヤひずみゲージを紹介

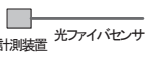
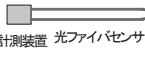
測定方法	システム構成	利用物理現象	距離計測	測定物理量
BOTDR	 計測装置 光ファイバセンサ	ブリルアン散乱	OTDR	ひずみ・温度
ROTDR		ラマン散乱	OTDR	温度
BOTDA	 計測装置 光ファイバセンサ	ブリルアン散乱	OTDR	ひずみ・温度
BOCDA		ブリルアン散乱	光相関	ひずみ・温度
FBG	 計測装置 FBGセンサ	ブラッグ反射		ひずみ・温度

図5.2.1-1 光ファイバセンサシステムの分類

まず BOTDR によるひずみの測定原理を紹介します。BOTDR というのはブリルアン散乱光を使って、ひずみの分布を測るものです。理論的には、光ファイバに光を入射して、いろいろなところで反射し戻ってくるブリルアン後方散乱光を計測するのですが、光ファイバにひずみが生じるとその部分から戻ってくるブリルアン散乱光の周期が入射光の周期とずれます。この周期のずれがひずみに比例することを利用して光ファイバに生じるひずみを計測します。

なぜ分布が分かるかという、戻ってくる光の時間を計測しており、時間と戻ってくる光の速度を用いて、どこで発生したブリルアン散乱光なの特定できるからです。

5.2.1 ひずみ計測技術

(1)BOTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectmetry)方式によるひずみ分布計測法

1)適用範囲
・コンクリート表面ひずみ、コンクリート内部ひずみ、鉄筋ひずみ、鉄骨ひずみ

2)計測原理
・ブリルアン散乱光の周波数スペクトルのピーク周波数 とひずみがリニアな関係
$$VB(\epsilon)=VB(0)+(dVB/d\epsilon)\cdot\epsilon\quad\cdots\cdots\cdots(5.2.1-2)$$

ひずみに対するVBの感度係数 $dVB/d\epsilon$ は、通常のシングルモード光ファイバの場合、約0.5GHz/(%strain)

3)測定器およびセンサの仕様(種類)
・複数のメーカーがひずみ計測用の光ファイバセンサを製造
・表面設置タイプ、コンクリート内部埋め込みタイプあり

4)コンクリート構造物へのセンサ設置方法
・表面は治具を用いた固定が一般的、内部は鉄筋に沿ってインシュロック等で固定

5)システム構築例
・東京メトロ13号線建設工事により、近接や交差する区間で通信用トンネル(とう道)が影響を受ける。この影響計測の事例を紹介

BOTDR 方式と FBG 方式の特徴を比較したものです。BOTDR 方式は 1 回の計測に数分または数十分の時間がかかりまして、基本的には静的なひずみしか計測できません。精度については $\pm 30\mu$ ですが、ただ、BOTDR の場合は分布センサですので、1 本の光ファイバで連続的に構造物のひずみ分布を計測できます。

FBG 方式については、非常に精度が高いということが特徴です。BOTDR と違って、FBG の場合は静的にも動的にも計測できます。ただ、多点型ですので、一つの光ファイバに 10 ～20 個の点しかできませんが、点でものが測れるということです。

5.2.1 ひずみ計測技術

方 式	BOTDR方式	FBG方式
センシング メカニズム	ブリルアン散乱光周波数の ひずみ依存性	回折格子点からの反射光周 波数のひずみ依存性
精度	$\pm 30\mu$	$\pm 数\mu$
距離情報	連続的 距離分解能: 1m 計測距離: 10km	離散的 距離分解能: 1cm程度 測定箇所: 10箇所程度/ライン
測定時間	数分～数十分	1/250秒～1秒

表5.2.1.1-1 BOTDR方式とFBG方式の性能比較

次に光ファイバを構造物にどう取り付けるのか説明します。光ファイバ素線の径は 1mm ぐらいしかありませんので、素線をコンクリートの中に埋め込んだり、表面に張り付けたりするのは、非常にハンドリングも悪いし、簡単に切れたりします。したがって、光ファイバ素線を何かで保護して、構造物に埋設するあるいは貼り付ける必要があります。このように、いろいろなものを被覆して構造物に埋め込むという製品があります。

5.2.1 ひずみ計測技術

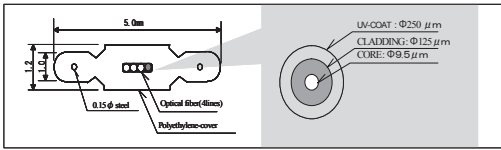


図5.2.1.1-2 薄肉センサケーブル

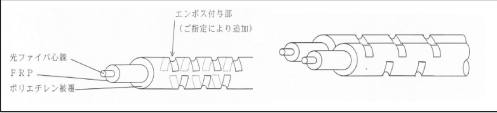


図5.2.1.1-3 エンボス付きセンサケーブル

これも光ファイバ素線をダクト管で保護したものです。ただ素線を保護するだけではダクト管から光ファイバにひずみが伝わりませんので、管を圧着してひずみを光ファイバ素線に伝えるという仕組みです。また下の写真は、機械的にコンクリート表面に素線を取り

付ける方法です。

5.2.1 ひずみ計測技術

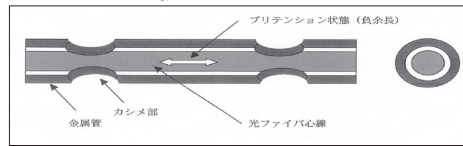


図5.2.1.1-4 金属管センサケーブルの構造

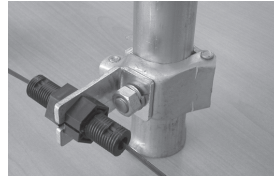


図5.2.1.1-5 薄肉センサケーブル用把持具

光ファイバセンサの適用事例についてご紹介します。これはトンネルの中の内空変位をBOTDRで測ったものです。目的は、近接施工中のトンネルによってこのトンネルにどういう影響を与えるのかモニタリングするためです。

5.2.1 ひずみ計測技術

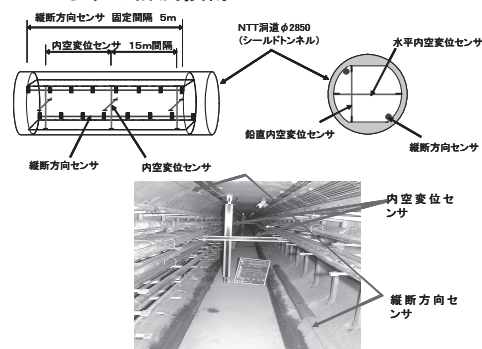
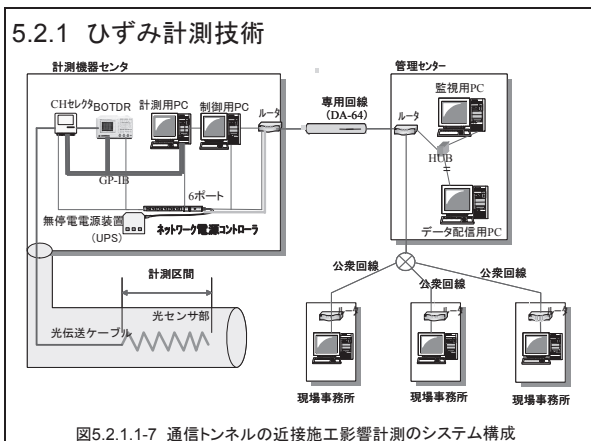


図5.2.1.1-6 通信用トンネル内での光ファイバセンサ設置概要

構造物に光ファイバを取り付けてひずみ計測を行います。光ファイバはセンサと伝送路が同じですので、直接コンピュータにつなぎながらデータ管理ができます。また、いろいろな専用回線を使って、一極の管理センターなどで集中管理をすることも可能です。



PPP-BOTDA は先ほどの BOTDR と同じようなものですが、ただ、BOTDR と違って、距離分解能が非常に狭くなっています。BOTDR の場合は 1m の平均ひずみしか出てきませんが、PPP-BOTDA は 10cm の間隔で分布ひずみを出すことができます。

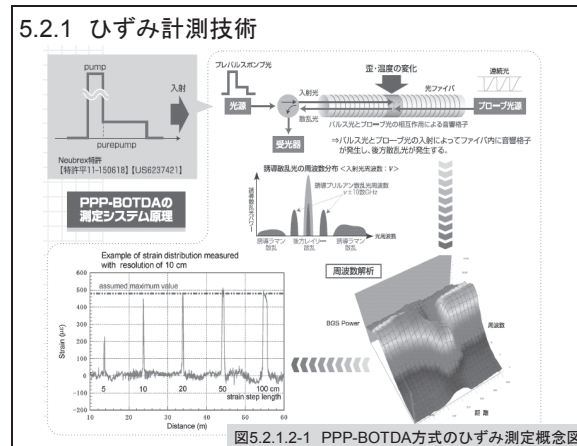
5.2.1 ひずみ計測技術

(2) PPP-BOTDA (Pulse-PrePump Brillouin Optical Time Domain Analysis)
ひずみ分布計測法

- 適用範囲
コンクリート表面ひずみ、コンクリート内部ひずみ、鉄筋ひずみ、鉄骨ひずみ
- 計測原理
誘導ブリルアン散乱光の周波数シフト量からひずみ分布を測定する方法 (BOTDA法) により高ひずみ測定精度を実現した上、パルス光に先立ってフォノンが十分に励起するように適当なパルス幅のプリ・ポンパルス (PPP) を注入することで、ひずみ測定精度に影響する誘導ブリルアン・ゲイン・スペクトル (BGS) の線幅の広がりを抑える方法により、さらに測定精度の向上を図ったひずみ分布計測法である
- 測定器およびセンサの仕様(種類)
 - ・測定器は1社のみ
 - ・光ファイバセンサはBOTDR用光ファイバセンサを流用可能
- コンクリート構造物へのセンサ設置方法
計測対象に応じて定着方法(全面接着、定点固定(接着))を選択する必要がある。
- システム構築例
 - ・実用システムの適用はなし
 - ・室内試験での事例紹介

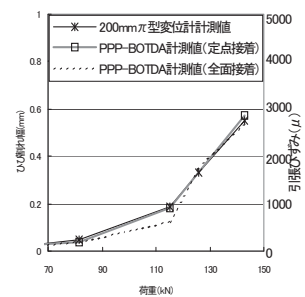
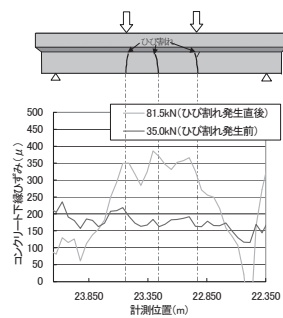
私も BOTDR をコンクリート構造物に付けていろいろな実験をしましたが、やはり 1m の分解能は、コンクリート構造物の局所的なひずみを計測しようとするときに非常に使いづらいということがあり、もし局所的なひずみを計測する、またはクラックを計測するというものでしたら、PPP-BOTDA の方がいいのではないかと考えております。

5.2.1 ひずみ計測技術



PPP-BOTDA を RC 梁の表面にセンサを取り付けて曲げ試験を行った事例です． 载荷をしますと，载荷に応じて，このようにコンクリート表面の分布ひずみがモニタリングできます． またひび割れ幅も比較的精度よくモニタリングすることができます．

5.2.1 ひずみ計測技術



もう一つは， PC 構造物において PC 鋼材が切れた場合にコンクリート表面に生じる急激なひずみの変動を PPP-BOTDA で監視する目的で実験を行った事例です． この部分の PC 鋼材を腐食させて表面にどのようなひずみが生じるかということをやられたものだと思います． 腐食が進行して，張力が徐々に開放されるにしたがい，表面ひずみが大きくなっていくのがモニタリングできているかと思います．

5.2.1 ひずみ計測技術

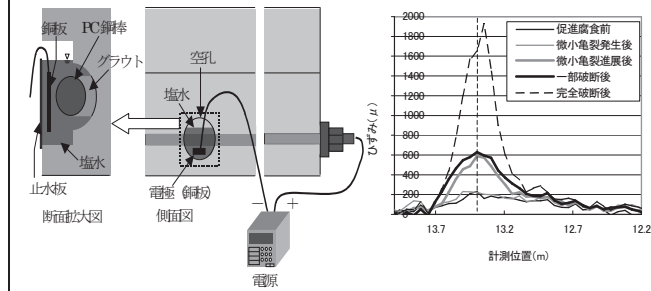


図5.2.1.2-5 PC鋼棒の促進腐食方法 図5.2.1.2-6 促進腐食前後のコンクリート下縁ひずみの計測結果

ひずみ測定として利用されるFBG(Fiber Bragg Grating)センサには、光ファイバのコア部に屈折率が周期的に変化するスリット（ブラック格子）が設けられており、このスリットで特定の波長（ブラック波長）の光波が反射します。この特定波長はスリットの間隔に依存するため、光ファイバにひずみが生じると、この波長が変化します。そこで、この波長の変化や検出時間を検出し、スリット部に生じるひずみの大きさを測定します。なお、スリットは1本の光ファイバに数十箇所設けることができるため、1本の光ファイバで測定対象物の多点位置のひずみ量を計測することができます。

5.2.1 ひずみ計測技術

(3) FBG(Fiber Bragg Grating)方式によるひずみ計測法

1) 適用範囲

コンクリートの表面ひずみ、鉄骨ひずみ、鉄筋ひずみ、傾斜計などの各種センサ

2) 計測原理

FBGに軸方向のひずみ $\Delta \epsilon$ が加わると、ブラッグ波長 λ_B は変化し、その変化 $\Delta \lambda_B$ は次式で与えられる。

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (1 - Pa) \Delta \epsilon \quad \dots \dots \dots (5.2.1-6)$$

Pa はポアソン比、ひずみセンサの成分で定まる定数である。

3) 測定器およびセンサの仕様(種類)

- ・各メーカーは複数の機種を製品化している。近年益々小型化、サンプリング周波数アップの傾向である。国内メーカーもここ数年で参入してきており、マルチベンダ化による低価格化、高性能化が今後期待できる。
- ・FBGセンサを用いたひずみ計、傾斜計、沈下計、亀裂計、荷重計、加速度計などの各種センサが開発、実用化されている。

4) コンクリート構造物へのセンサ設置方法

FBGセンサを鉄筋やコンクリート表面に設置・養生する方法は、電気抵抗式ひずみゲージを設置・養生する方法と基本的に同じ

5) システム構築例

- ・RCセグメントのひずみ計測事例
- ・変位計によるビル計測事例

先ほどもご説明しましたが、光ファイバ素線は径が1mmと細い線ですので、どうやって光ファイバ素線を構造物に取り付けるかということがやはり重要になってきます。センサのひずみ測定原理に応じてその取り付け方法も異なります。したがってFBGの測定原理に応じたセンサが各企業で開発されております。

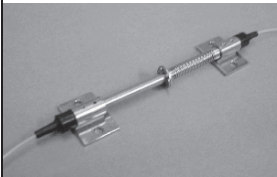
5.2.1 ひずみ計測技術

メーカー名 及び型式	測定 CH数	波長帯	波長帯域	精度	ゲインレンジ	サンプリング 周波数
M社 si720	2	1520-1570nm	50nm	1pm	60dB	5, 0.5Hz
M社 si425-500	4	1520-1570nm	50nm	1pm	25dB	250Hz
M社 si425-300	2	1520-1570nm	50nm	1pm	15dB	100Hz
M社 si425-200	1	1520-1570nm	50nm	1pm	15dB	50Hz
M社 sm125-500	4	1510-1590nm	80nm	1pm	60dB	1Hz
M社 sm125-300	2	1520-1570nm	50nm	5pm	40dB	1Hz
M社 sm125-200	1	1520-1570nm	50nm	10pm	40dB	1Hz
F社SpectralEye	1	1530-1570nm	40nm	35pm	19dB	1Hz
F社 SCAN-C	1	1530-1565nm	35nm	25pm	65, 20dB	5Hz
N社 FSS-8700	2	1520-1630nm	110nm	0.2pm	60dB	1Hz
Y社 FB200	1	1527-1567nm	40nm	1pm	35, 65dB	100Hz

表5.2.1.3-1 各種FBGアナライザの仕様(2006.6現在)

これは RC セグメントに生じるひずみを計測するために開発された FBG センサです。

5.2.1 ひずみ計測技術



周波数特性: 0 ~ 30Hz 測定範囲:
±2000 μ Strain 分解能: 1 μ Strain

図5.2.1.3-2 FBG式動ひずみ計
(東京測振 SPS-50)

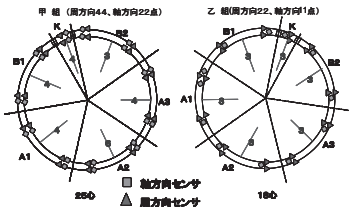


図5.2.1.3-2 RCセグメントひずみ計測のFBGセンサ配置

これは RC セグメントのひずみ計測システムで、常時モニタリング形式です。

5.2.1 ひずみ計測技術

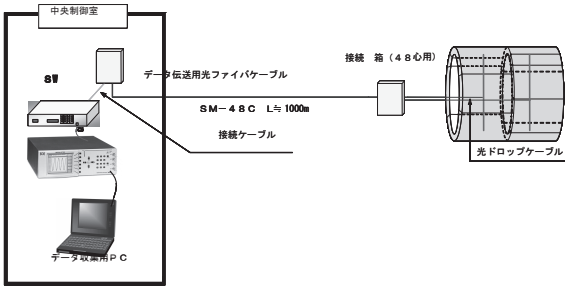
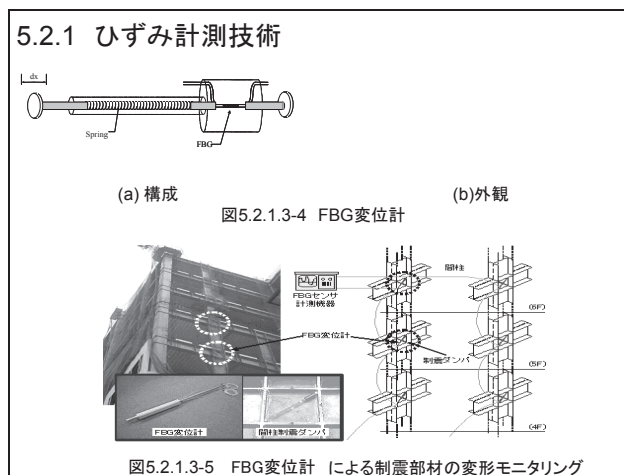


図5.2.1.3-3 RCセグメントひずみの計測のシステム構成

これは建築の鋼部材に生じる変位を計測するために開発された FBG センサです。



また FBG センサは多点位置のひずみを 1 本のセンサで計測できるセンサですので、その特性を利用して構造物のひずみをモニタリングした事例を紹介します。

5.2.1 ひずみ計測技術

(4) FBG多点ひずみ計測法(分布式Long-gage FBGセンサシステム)

- 1) 適用範囲
コンクリートの表面及び内部ひずみ, 鉄骨ひずみ, 鉄筋ひずみ
- 2) 計測原理及び測定器
・FBG方式ひずみ計測法と同じ
- 3) センサの仕様(種類)
・CFRPに埋め込んだLong-gage FBGセンサ
- 4) コンクリート構造物へのセンサ設置方法
FBGセンサを鉄筋やコンクリート表面に設置・養生する方法は, 電気抵抗式ひずみゲージを設置・養生する方法と基本的に同じ
- 5) システム構築例
・室内試験のみ

これは CFRP の中に FBG センサを入れて、中の CFRP に生じるひずみをモニタリングする手法です。これを構造物の中に埋設し、構造物を監視します。

5.2.1 ひずみ計測技術

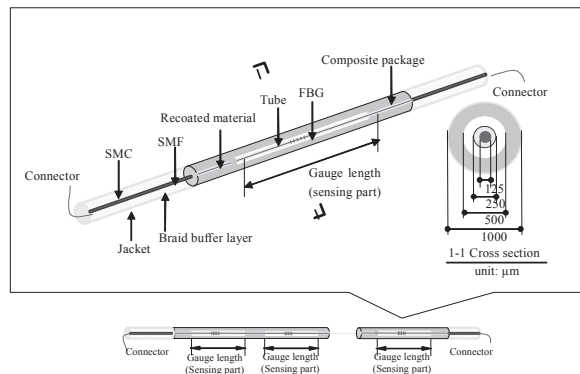


図5.2.1.4-1 分布式Long-gage FBGセンサの構成

では振動式ワイヤひずみゲージについて紹介します。ここで紹介するのは振動式ワイヤひずみゲージは、センサに張力が作用すると中のばねが振動しますが、その振動数が張力の平方根に比例することを利用してひずみを計測しようというものです。

5.2.1 ひずみ計測技術

(5) 振動式ワイヤひずみゲージ

1) 適用範囲

ダム堤体の間隙水圧計や大規模地下空間における地圧計などに利用されている

2) 計測原理

フレームに支持された弦の振動周波数が張力の平方根に比例することに着目したものの

●弦の張力 T と、弦の振動周波数 f の関係 $\rightarrow f = \frac{1}{nl} \sqrt{\frac{Tg}{\rho}} = a\sqrt{T}$

●弦のばね定数 k_1 、フレームのばね定数 k_2 と張力の初期値 T_0 、外力 F の関係

$$\frac{T_0 - T}{k_1} = \frac{F}{k_1 - k_2}$$

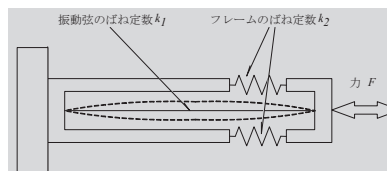


図5.2.1.5-1 振動ワイヤとフレーム4)

日本にはあまりなくて、ほとんどアメリカやヨーロッパで開発されているものです。

5.2.1 ひずみ計測技術

3) 測定器およびセンサの仕様(種類)

・メーカーは欧米中心

4) コンクリート構造物へのセンサ設置方法

計測位置付近の鉄筋を用いて、センサ支持用の鉄筋をインシュロックなどで結束

5) システム構築例

・プレキャスト床版パネル接続部のひずみを計測した例

ここに埋め込み型振動式ワイヤひずみゲージを紹介します。

5.2.1 ひずみ計測技術



図5.2.1.5-2 測定器外觀例¹⁾

メーカー	GEOKON社 (アメリカ)
モデル	Model GK-401
励起周波数	400～6, 000Hz
分解能	0.1μs
動作温度	-10～+50℃

表5.2.1.5-1 測定器仕様例¹⁾



図5.2.1.5-3 センサ外觀例¹⁾

メーカー	GEOKON社 (アメリカ)
モデル	4200 series
計測範囲	3, 000με
分解能	0.4～1.0με
精度	±0.5%F.S.
動作温度	-20～+80℃

表5.2.1.5-2 センサ仕様例¹⁾

5.2.1 ひずみ計測技術



図5.2.1.5-4 測定器外觀例²⁾

メーカー	ROCTEST社 (カナダ)
モデル	Model MB-6T
励起周波数	435～5, 600Hz
分解能	0.01μs
動作温度	-5～+45℃

表5.2.1.5-3 測定器仕様例²⁾



図5.2.1.5-5 センサ外觀例²⁾

メーカー	ROCTEST社 (カナダ)
モデル	EM Series
計測範囲	3, 000με
分解能	0.4～1.0με
温度範囲	-20～+80℃

表5.2.1.5-4 センサ仕様例²⁾

これらセンサをこのようにコンクリート内部に埋め込んで使用します。

5.2.1 ひずみ計測技術

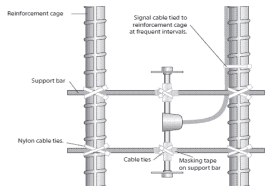


図5.2.1.5-6 設置方法⁴⁾



図5.2.1.5-7 設置状況⁴⁾

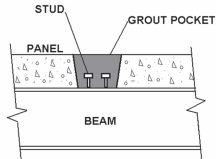


図5.2.1.5-8 接続部の構造¹²⁾

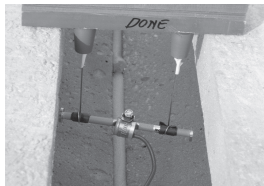


図5.2.1.5-9 振動式ワイヤひずみゲージの設置状況¹²⁾

次に ROTDR 方式による温度分布計測技術についてご紹介します。

5.2.2 温度計測技術

(1) ROTDR方式による温度分布計測法

1) 適用範囲

広範囲かつ大規模な土木構造物全体の温度管理に適しており、光ファイバに発生する温度とその位置を特定することができる。

2) 測定原理

ROTDRは、光ファイバにレーザーを入射した時に発生する後方散乱光のひとつであるラマン散乱光の温度依存性を利用し、測定対象物の温度分布を検出する

3) 測定器およびセンサの仕様(種類)

- ・測定器は複数社製造(国内、国外):GIとSMに大別される
- ・光ファイバセンサも数種類あり:GIとSMに大別される

4) コンクリート構造物へのセンサ設置方法

コンクリート内部埋め込み用と表面設置の両方に対応可能

5) システム構築例

- ・マスコンクリートの温度管理
- ・LNG地下式貯槽

光ファイバセンサによる温度計測には、ラマン散乱光という後方散乱光を利用します。温度によって変化するラマン散乱光の周波数を解析し、温度をモニタリングします。

5.2.2 温度計測技術

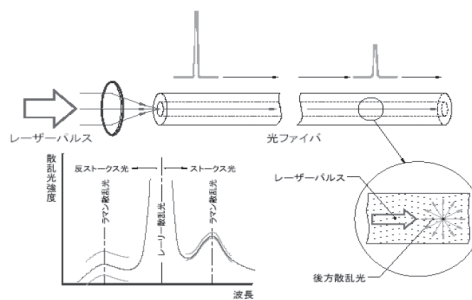


図5.2.2.1-1 ラマン散乱光の発生原理

温度計測の場合もこのように常時モニタリングすることでできます。

5.2.2 温度計測技術

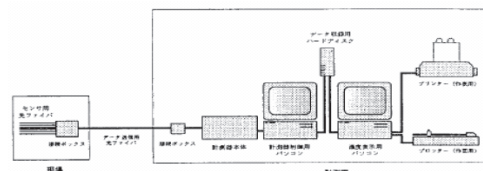


図5.2.2.1-2 ROTDR方式による計測システムの構成

最大測定距離	2km
距離分解能	1.0m
使用温度範囲	-10～75℃
温度精度	±1.0℃
温度分解能	0.1℃

表5.2.2.1-1 温度測定器の仕様

[illegible]

5.2.2 温度計測技術

図5.2.2.2.1-4 LNG地下式貯槽の断面

図5.2.2.2.1-5 温度センサ敷設詳細

また、加速度計を用いて常時モニタリングするケースには、地震が起こったときに構造物が受けた慣性力をモニタリングする目的があります。ただ、常時モニタリングする場合、電気式加速度計は一つのセンサに 1 対のコードが付帯していること、雷などによって耐久性が長期確保できません。光ファイバ利用の加速度計は高耐久性かつスマートな計測ができるセンサです。

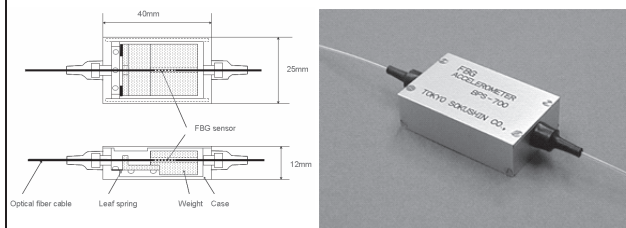
5.2.3 振動計測技術

(1) FBG式加速度計

- 1) 適用範囲
土木構造物などの大規模な橋梁、トンネル、ダムなどへの利用が挙げられる。また、斜面崩壊などの検知用センサとしての利用も考えらる
- 2) 計測原理及び測定器
・FBG方式ひずみ計測法と同じ
- 3) 測定器およびセンサの仕様(種類)
・FBG式加速度計
- 4) コンクリート構造物へのセンサ設置方法
加速度計の本体が接着剤やボルトなどを用いてしっかりと測定位置に固定を行うようにする
- 5) システム構築例
・記載なし

FBG を使った加速度センサですが、海の底の地震波形をモニタリングするシステムがすでに構築され実際に常時モニタリングされていると聞いております。すべてここで紹介した SHM の考え方に即して計測がやられているそうです。

5.2.3 振動計測技術



周波数特性: 0 ~ 40Hz 測定範囲: $\pm 2000g$ 分解能: 0.01% of F.S.

図5.2.3-1 FBG式加速度計(BPS-700)

FBG センサは多点型ですので、連続して加速度計が幾つも付けられること、また加速度計部分とデータの転送路が一本の光ファイバでつながれているため、計測がこのようにスマートになっています。

5.2.3 振動計測技術



- 【仕様】
- ・光チャンネル数 1～4
 - ・1チャンネル当りの最大FBG数 128
 - ・スキャン周波数 1～250Hz
 - ・FBG波長範囲 1520～1570nm
 - ・外部インターフェース Ethernet

図5.2.3-2 FBGセンサひずみ計測装置 (si425)

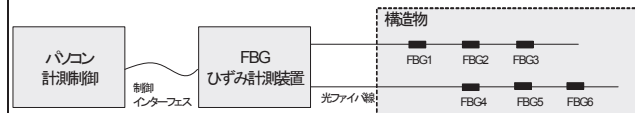


図5.2.3-3 FBGセンサによる計測システムの構成例

サーボ式の加速度計も開発されています。

5.2.3 振動計測技術

(2) サーボ型加速度計

- 測定器およびセンサの仕様(種類)
 - ・測定器: 増幅器、ローパスフィルタ、ロガーから構成
 - ・センサ: 設置箇所、精度によって様々なタイプあり
- コンクリート構造物へのセンサ設置方法

加速度計の本体が接着剤やボルトなどを用いてしっかりと測定位置に固定を行うようにする
- システム構築例
 - ・州四国連絡橋の多々羅大橋に設置された加速度計 の事例

5.2.3 振動計測技術

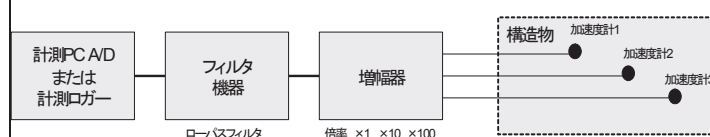


図5.2.3-8 計測システムの構成例

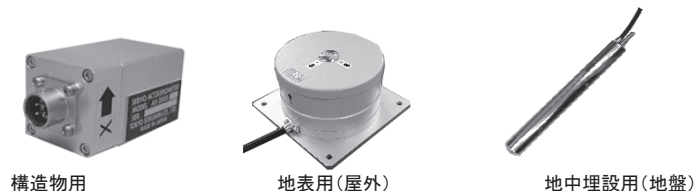
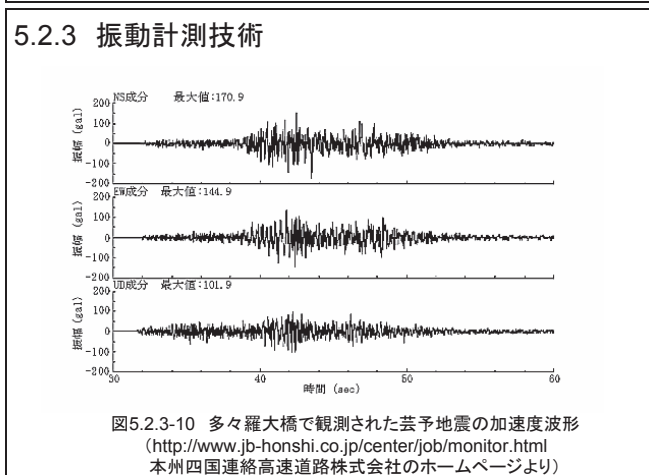
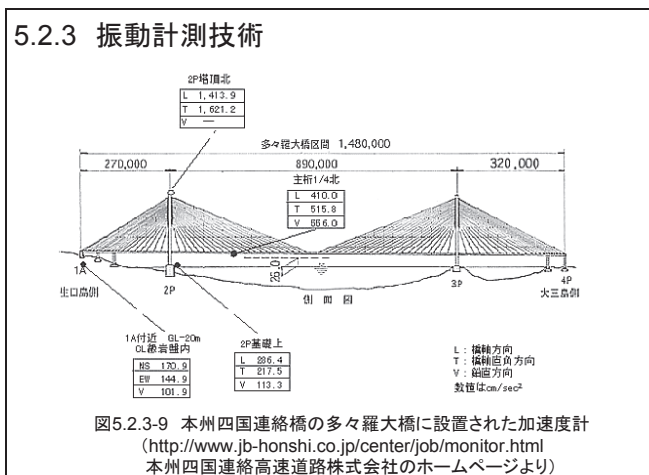


写真5.2.3-1 用途別のサーボ型加速度計

これは斜張橋の主桁および主塔に加速度計を付けて振動計測された事例です。



次に化学的な劣化要因をどのようにモニタリングするかということですが、ここではコンクリートの塩分浸透や中性化をモニタリングする技術についてご紹介しています。塩分浸透も中性化も鉄筋が錆びる現象を引き起こすことはご承知のことですが、鉄筋がさびることによって、腐食電池ができ電圧が変わることを利用してモニタリングします。

5.2.4 コンクリートの塩分浸透・中性化進行モニタリング法

1) 適用範囲

コンクリート構造物のかぶりの部分に埋設された電極の腐食を連続的にモニタリングすることにより、コンクリート補強材(鋼材)の腐食要因に挙げられる塩分浸透や中性化の進行を経時的に監視する

2) 計測原理及び測定器

コンクリートのかぶりの部分にアノード(陽極)電極として普通鋼を、その近傍にカソード(陰極)電極としてチタン鋼(貴金属)を設置する。普通鋼が発錆に対して健全であれば電極に流れる電流は無視できるほど小さい。しかし、塩化物イオンの浸入、中性化の進行などに伴い不働態皮膜が破壊されると局部電池が形成されるため腐食電流が観測されるようになる。

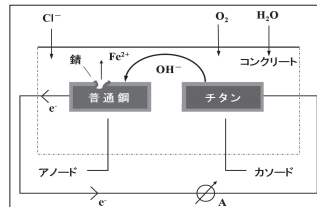


図5.2.4-1 測定原理

そこで紹介するのが、アノード・ラダーと、エクспанションリングです。アノード・ラダーは新設構造物向けに開発されたもので、コンクリートのかぶり部分に設置します。表面から塩分や中性化が進行すると、その位置のラダーがさびます。そうすると、錆びたラダーの電圧が変わるので、どの位置まで中性化、塩分が進行しているのか段階的にモニタリングすることができます。

またエクспанション・リングは、既設構造物向けに開発されたもので、既設構造物を削孔してこのリングを埋め込みます。リングには電極が付いておりまして、それぞれの電極が腐食して電圧が変わることによって、どこまで進行したか段階的にモニタリングすることができます。

5.2.4 コンクリートの塩分浸透・中性化進行モニタリング法

3) 測定器およびセンサの仕様(種類)

- ・センサには、アノード・ラダーおよびエクспанション・リングの2種類ある。
- ・測定器: CANIN-LTM, 電圧, 電流, 抵抗および温度を測定

4) コンクリート構造物へのセンサ設置方法

- ・アノード・ラダーの設置位置: 新設のコンクリート構造物のかぶり部分に埋設される。
- ・エクспанション・リングの設置: 既設構造物のコンクリート表面に削孔して挿入・設置

5) システム構築例

- ・具体的な事例紹介は記載なし

5.2.4 コンクリートの塩分浸透・中性化進行モニタリング法

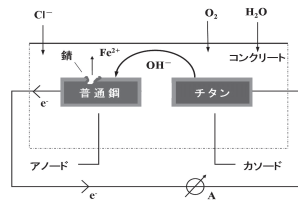


図5.2.4-1 測定原理

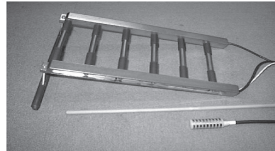


図5.2.4-2 アノード・ラダー

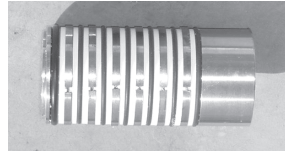


図5.2.4-3 エクспанション・リング

ここにはアノード・ラダーとエクспанションリングの具体的な設置図が紹介されています。

5.2.4 コンクリートの塩分浸透・中性化進行モニタリング法

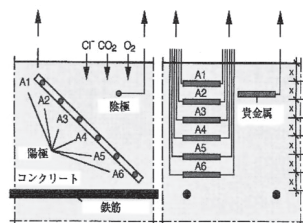


図5.2.4-4 アノード・ラダーの設置位置

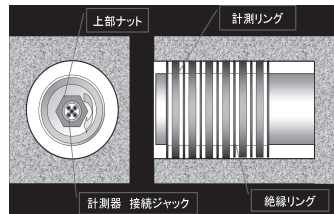


図5.2.4-5 エクспанション・リングの設置状況

次に鉄筋腐食モニタリング技術について、ここではミニセンサをご紹介します。

5.2.5 鉄筋腐食モニタリング法

- 1) 適用範囲
コンクリート内部の鉄筋に直接センサを設置して連続的に鉄筋の腐食状況を監視
- 2) 計測原理及び測定器
腐食モニタリング法における自然電位は、その電位勾配（自然電位）を鉄筋近傍に埋設されたミニセンサによって計測する。また、電流を鉄筋に印加することによって計測される鉄筋の分極抵抗とコンクリートの電気的抵抗をミニセンサによって計測する。
- 3) 測定器およびセンサの仕様（種類）
腐食モニタおよびミニセンサ
- 4) コンクリート構造物へのセンサ設置方法
ミニセンサは鉄筋の表面にプラスチックベルトで強固に結束する。
- 5) システム構築例
・具体的な実事例の紹介は記載されていない

ミニセンサの使用を紹介しますが、鉄筋の表面に好みにセンサを取り付けて、鉄筋が腐食することによって生ずる電圧の変化をとらえて腐食をモニタリングします。

5.2.5 鉄筋腐食モニタリング法

名 称	構 成
腐食モニタ (7670-24型)	交流矩形波電流分極法による重畳式二重パルス方式
ミニセンサ	参照電極と対極から構成

表5.2.5-1 腐食モニタとミニセンサの仕様

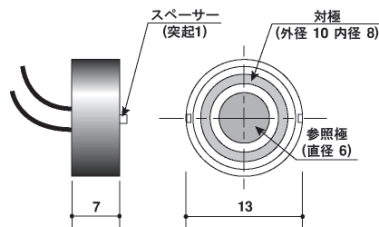


図5.2.5-1 ミニセンサの概要

ここに事例がありますが、鉄筋にミニセンサを取り付けて、データロガーで制御し、パソコンでデータを取得します。これは北九州のリニアモーターカーの橋梁で、もう実際に使われております。

5.2.5 鉄筋腐食モニタリング法

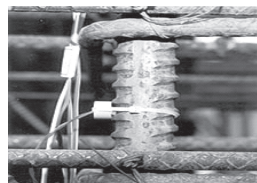


図5.2.5-2 ミニセンサ設置状況

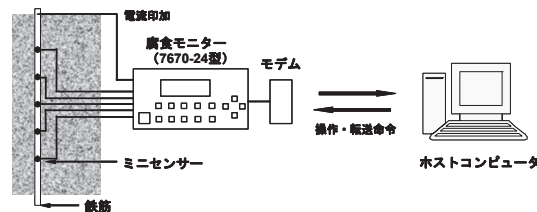


図5.2.5-3 腐食モニタリングシステムの概要

次に実応力計測法として、EM センサをご紹介します。実際のケーブルや鋼棒にどれぐらい応力がかかっているかということの評価するのに、昔は鋼材を切ることによって解放される応力をモニタリングすることによって評価をしていましたが、鉄筋を切らずに EM センサを使って、ケーブルや鋼棒の張力を測ることができます。

5.2.6 実応力測定法

- 1) 適用範囲
PC橋、斜張橋、吊橋におけるケーブル等の応力モニタリング、鉄筋コンクリート構造における鉄筋応力、グラウンドアンカーの張力モニタリング
- 2) 計測原理及び測定器
実応力測定法(EMセンサ)の測定原理は、鋼材の磁歪現象を利用したものである。応力と透磁率、および温度との関係を事前に捉えることにより、ケーブル、鋼棒、鋼より線などの実応力を測定することが可能となる。
- 3) 測定器およびセンサの仕様(種類)
EMセンサは、1次および2次コイルと温度センサを含んだ円筒型コイルである。
- 4) コンクリート構造物へのセンサ設置方法
センサの設置方法には、次に示す2種類がある。
・プレインストール型EMセンサ
・既設構造物に対応したものをポストインストール型EMセンサ
- 5) システム構築例
・斜張橋ケーブルの応力モニタリング
・グラウンドアンカーの張力管理およびモニタリング
・建築構造物のアトリウム張力モニタリング

ここにご紹介していますが、鋼材に1次・2次コイルで構成されたEMセンサを取り付けて、磁界を生じさせ、その磁界の変化率から鋼材に生じている応力を測るというものです。例えばつり橋や斜張橋などのケーブルの張力測定などに、利用されております。

5.2.6 実応力計測法

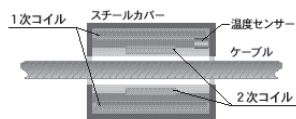


図5.2.6-3 EMセンサの構造概略図



図5.2.6-4 EMセンサ専用測定器(写真)

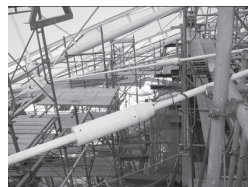


図5.2.6-5 プレインストール型EMセンサ設置事例(写真)

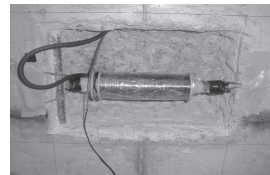


図5.2.6-6 ポストインストール型EMセンサ設置事例(写真)

5.2.6 実応力計測法

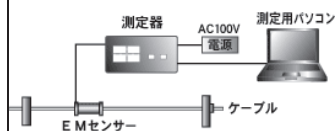


図5.2.6-7計測システム構成概要図



図5.2.6-8実施例(写真)

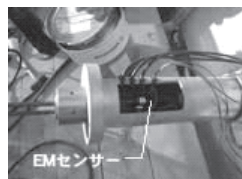


図5.2.6-9実施例(写真)

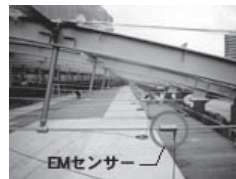


図5.2.6-10実施例(写真)

次はひび割れ計測法です。デジタルカメラなどによってひび割れを計測する手法につい

ては、従来の非破壊検査手法として取り上げられておりますので、ここではお話しはしません。ここでは導電塗料を使ったり、AE を使ったり、あとはまだお話をしていない OSMOS センサとか、SOFO センサのようなロングセンサを使ってひび割れ幅をモニタリングする技術についてご紹介させていただきます。

5.2.7 ひび割れ計測法		
項目	定期計測	連続計測
計測方法	数ヶ月に1回程度の間隔で、定期的に検査員が現地に行き、計測を行う。 計測の方法としては、以下の方法がある。 ①目視によりひび割れの状況を記録する。 また、部分的にクラックゲージなどによりひび割れ幅を測定し記録する。 ②デジタルカメラやサーモグラフィで画像を撮影し、ひび割れの発生状況およびひび割れ幅を画像処理により測定。	計測機器を設置し連続的に計測を行う。計測を行う物理量としては以下のものがあり、遠隔地から計測値をモニタリングすることが可能である。 ①変位：ひび割れを挟むように設置した変位計によりひび割れ幅を測定。 ②AE：ひび割れの発生および進展により生ずる超音波（AE）を測定し、ひび割れ発生および進展を検知する。 ③導電塗料：コンクリート表面に導電性のある塗料を塗り、導通を監視する。塗料を跨いで発生するひび割れを検知する。
検知する情報	①ひび割れの発生状況、ひび割れ幅 ②ひび割れの発生状況、ひび割れ幅	①ひび割れの幅 ②ひび割れの発生・進展 ③ひび割れの発生
使用する機器	①クラックスケールなど ②デジタルカメラ、サーモグラフィ	①変位計、光ファイバセンサ、パイゲージ、レーザ変位計など ②AEセンサ ③導電塗料

表5.2.7-1 ひび割れの計測方法

AE センサは、すでに非破壊検査手法として研究が進んでおりますが、ここではスマートセンサとして注目を浴びているコードレス型の AE センサを紹介します。AE センサ内部にはこのように回路が組み込まれており、自動制御が可能になっています。このセンサは比較的小さな AE センサで、コンクリート表面に付けて計測します。

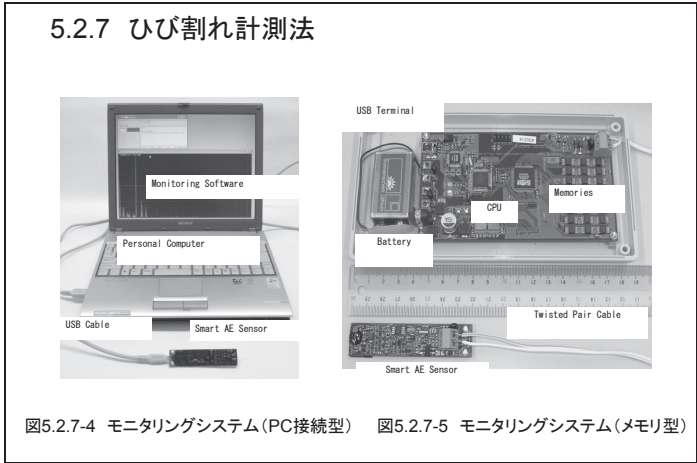


図5.2.7-4 モニタリングシステム(PC接続型) 図5.2.7-5 モニタリングシステム(メモリ型)

もう一つはコンクリート表面に導電塗料によるひび割れ検知方法で、JR 総研で精力的に研究されています。

5.2.7 ひびわれ測定法

(3) 導電塗料によりひび割れの発生を検知する方法

1) 適用範囲

1) 構造物の表面に導電塗料を線状(回路)に塗布した導電塗料の電気抵抗値を測定することによりひび割れの発生を判断する方法。1つの回路の長さは100mまで延長できる。

2) 計測原理及び測定器

計測原理は、構造物の表面に導電塗料を線状に塗布し、そこに通電し、ひび割れ幅が大きくなり導電塗料が切断されると電気抵抗値が急激に上昇することによりひび割れの発生を判断する方法である。

3) 測定器およびセンサの仕様(種類)

センサ部: 導電塗料

4) コンクリート構造物へのセンサ設置方法

構造物の壁面や天井面に導電塗料を回路状に塗装し、1つの回路の長さは100mまで延長できる。形状や回路パターンは構造物の状態に応じて自在に変更が可能である。

5) システム構築例

・研究開発段階

トンネルの表面に導電塗料をこのように塗布し、クラックが入ることによって導電塗料が切断され、通電できなくなることを利用してひび割れを検知するシステムです。

5.2.7 ひび割れ計測法



図5.2.7-6 導電塗料の塗布状況のイメージ

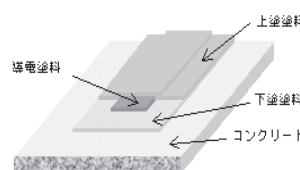


図5.2.7-7 導電塗料の被服状況

次に光ファイバセンサのなかでもロングセンサといわれる OSMOS や SOFO について紹介させていただきます。両方ともセンサを固定した 2 区間の平均ひずみをモニタリングすることができます。精度が高く、動的・静的なひずみを計測することができます。

5.2.8 変位計測法

(1) OSMOSTMIによる変位計測法

1) 適用範囲

対象構造物: 橋梁(コンクリート橋、鋼橋)、斜面、トンネル、各種建築物など

2) 計測原理及び測定器

マイクロベンディング現象を利用して、赤外線が減衰率から光学ストランド部で生じた変位(2点間の相対変位)を計測する

3) 測定器およびセンサの仕様(種類)

本システムの基本構成は、下記の通りである。

センサ部: 光ファイバの撚り線(光学ストランド)、光学伸縮計(エクステンソメータ)

オプトボックス: 赤外線を発光し、センサから戻る赤外線の強度変化を電圧出力する。

データ収集パソコン: オプトボックスと接続し、測定結果を保存する。

常設して静的な計測、及び、20Hz程度で動的に測定を行う。

4) コンクリート構造物へのセンサ設置方法

光学ストランドの両端の固定部は、固定用のプレートにネジで取り付ける構造となっている。その固定プレートは、ホールインアンカーなどでコンクリートの表面に固定する。

5) システム構築例

道路の高架橋における車両の通行時の桁の変形(底面の伸び)のモニタリングシステムの紹介

5.2.8 変位計測法

(2) SOFOによる変位計測法

1) 適用範囲

SOFOセンサシステムは構造物表面への設置はもとより、コンクリート中への設置、水中での設置等が可能である。

2) 計測原理及び測定器

固定された2点間の変位量を光ファイバにて計測する手法である。センサは、テンションをかけた計測用光ファイバと、テンションをかけていない参照用光ファイバの2本で構成されている。測定は、センサ部に発射された光(出力0.2mW, 波長1.3 μ m)がファイバの端部に置かれた反射器とで反射して戻ってくる時間をもって行います。

3) 測定器およびセンサの仕様(種類)

センサ: SOFOセンサ(0.25~10m(特別仕様 50m))
アナライザ: SOFOセンサ専用アナライザ

4) コンクリート構造物へのセンサ設置方法

専用の取付金具を測定対象物に使用センサ長に合わせて固定用ボルト等で強固に取り付ける。次に、センサの両端に取り付けられた金具を取付治具により固定する。

5) システム構築例

一般的なシステム構成を紹介

これは OSMOS センサで、光学ストランドセンサが張力を受けて生じる光の強度のロス(マイクロベンディング現象)からひずみ評価するシステムです。

5.2.8 変位計測法

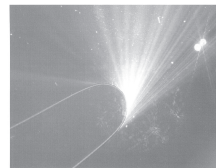
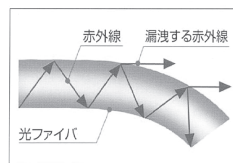


図5.2.8.1-1 マイクロベンディング現象



図5.2.8.1-2 光学ストランドの構造

いろいろな形のセンサがありますので、目的に応じて使われます。

5.2.8 変位計測法

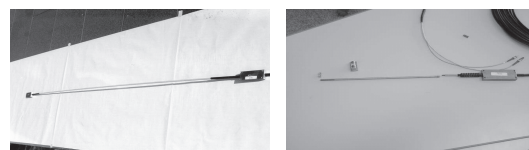
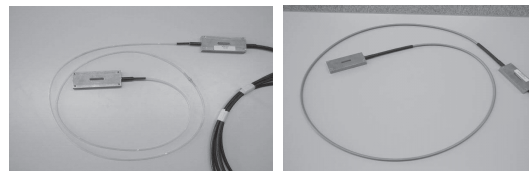


図5.2.8.1-4 光学ストランドの種類

次にもう一つの SOFO センサについてご説明します。これは OSMOS センサとほとんど同じような性能で、ひずみ、変位を計測できるというのですが、一つ特徴があるとしたら、SOFO センサについては温度の補正をデータ取得と同時に行うことができます。光ファイバは温度の影響を受けて誤差を生じやすいといわれておりますが、SOFO はすべて計測時に温度の補正をやれるということです。原理は計測用センサと張力が作用しない参照センサが組み込まれていて、参照用センサで温度を補正します。

5.2.8 変位計測法

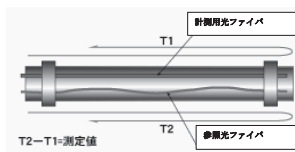


図5.2.8.2-1 センサ概要図

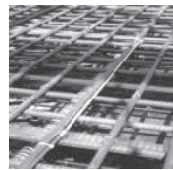


図5.2.8.2-2 設置状況図(写真)

項目	仕様
ゲージ長	0.25～10m (特別仕様 50m)
分解能	ゲージ長によらず2μm
測定限界	伸長: +1.0%, 圧縮: -0.5%
精度	測定された変形の0.2%以下
測定時間	7秒/センサー1本
耐用年数	5年以上
計測機器	可搬性・バッテリー使用
設置仕様	表面設置式、内部

表5.2.8.2-1 SOFOセンサ仕様一覧表

次に連続走査画像検査法について紹介します。ひとつはアルゴンレーザを使って、トンネル表面の変状を連続的に計測するシステムです。もうひとつは CCD カメラを搭載して、連続的にひび割れの計測をするシステムです。

5.2.9 連続走査画像検査法

- 連続走査画像検査方法は、計測ユニットを車両に搭載し、コンクリート表面の情報を連続的に記録して映像化する画像計測手法である。
- この検査方法は、特にトンネル覆工コンクリート表面のひび割れ等の変状や傾向を、画像データから作成された連続展開画像により迅速かつ全体的に評価することができる

- (1)アルゴンレーザ計測
- (2)CCDデジタルビデオカメラ計測
- (3)アクティブ赤外線法計測

5.2.9 連続走査画像検査法

(1) アルゴンレーザ計測

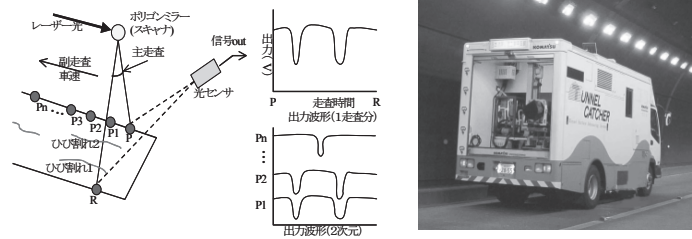


図5.2.9.1-1 フライングスポット法の原理

写真5.2.9.1-1 計測車両

5.2.9 連続走査画像検査法

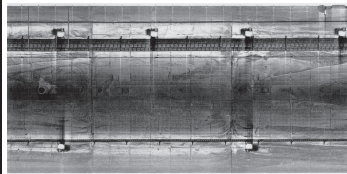


図5.2.9.1-4 連続展開画像

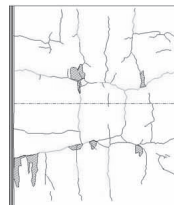


図5.2.9.1-5 ひび割れ展開図

(2) CCDデジタルビデオカメラ計測

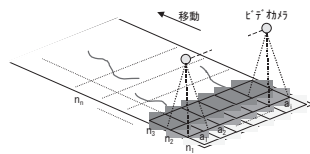


図5.2.9.2-1 計測原理



写真5.2.9.2-2 計測車両

次に自己モニタリング法ですが、カーボンセンサを使って、1回受けたひずみを記憶するようなセンサです。たとえば、地震慣性力を構造物がどの程度受けたのか記憶できるセンサです。

5.2.10 自己モニタリング法

●自己モニタリング法で採り上げたセンサは、外力によって与えられた現象を記憶する特性を持った材料を用いたモニタリング方法である。

(1) カーボンセンサ

1) 適用範囲

構造物のひずみを低応力域から高応力域までの最大ひずみの測定が可能である。鋼材およびコンクリート構造物に対応可能である。

2) 計測原理

ガラス繊維強化プラスチックに炭素繊維を混入し、その電気抵抗が過去に受けた最大ひずみと相関を持つことを利用したセンサである。

3) 測定器およびセンサの仕様(種類)

センサはカーボン繊維の異なるタイプのもので構成されている。ここに示すモデルにおいては、3種類のカーボン繊維を使用している。

4) コンクリート構造物へのセンサ設置方法

コンクリートへの浸透性の高いペーストで下地を作成し、HCFRPセンサをエポキシ樹脂で貼付する。

5) システム構築例

PCボックス橋への適用例

5.2.10 自己モニタリング法

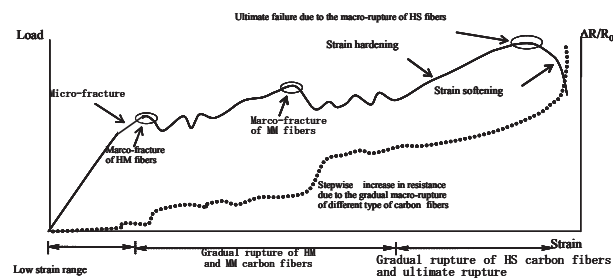


図5.2.10.1-1 HFCセンサの特性

これがセンサの概要です。

5.2.10 自己モニタリング法

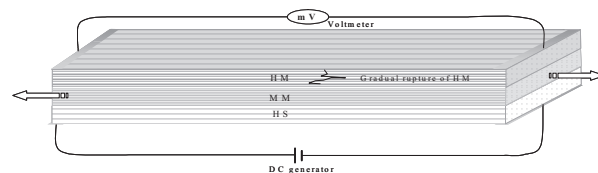


図5.2.10.1-2 Composition and structure of one type HCFRP sensor and electrical resistance measuring assembly.



図5.2.10.1-3 鋼材への設置例

次にワイヤレスセンシングシステムについて紹介します。特に加速度計においてはワイヤレスタイプのものが多く出ております。

5.2.11 ワイヤレスセンシングシステム

1) 適用範囲

ワイヤレスセンサはその構成によって、加速度や温度、ひずみなど任意の物理量をセンシングすることが可能であるため、適用範囲が限定されることは少ない。なかでも大規模構造物においては、そのケーブル数量を削減することができるため、導入の効果が高いと思われる

2) 計測原理

ワイヤレスセンサはプロセッサ(制御)部と無線通信部を有するプラットフォームであり、ほとんどの場合はセンサ部を計測対象に応じて取り替えることができる。そのため、計測原理は取り付けのセンサ種類による。

3) 測定器およびセンサの仕様(種類)

代表的な端末を紹介

4) コンクリート構造物へのセンサ設置方法

センサ種類を任意に選ぶことができるため、その設置方法は搭載したセンサ種類による

5) システム構築例

現時点での実用化システムの実績はないが、道路橋の損傷・変状検知へワイヤレスセンシングシステムを導入した場合のイメージを紹介

5.2.11 ワイヤレスセンシングシステム

図5.2.11-1 ワイヤレスセンシングシステムの構成例1)

名称	微弱無線	特定小電力	ZigBee	Bluetooth	UWB
規格	独自	独自	IEEE802. 15. 4	IEEE802. 15. 1	IEEE802. 15. 3a※
伝送速度 (bps)	2k	2k	250k	3M	480M
周波数帯域	307. 74MHz 316. 74MHz	429MHz	2. 4GHz 868MHz 915MHz	2. 4GHz	3. 1GHz ～10. 6GHz
伝送距離	30m	30～300m	10～75m	10～100m	10m(110Mbps)
消費電力 (通信／待機)	66mW /3. 3mW	50mW /0. 3mW	< 60mW (通信)	120mW /4. 2mW	< 100mW (通信)

表5.2.11-1 通信規格の比較1)

ワイヤレス型加速度計の内部にはこのような回路が設置されており、電波でデータのやり取りをします。

5.2.11 ワイヤレスセンシングシステム



図5.2.11-3 端末外観例19)

メーカー	XBOW社 (アメリカ)
モデル	MICA2
マイクロプロセッサ	Atmega128
変調方式	FSK
R F周波数	915, 433, 315 MHz
R F伝送速度	38.4k bps
A/D変換	10 bit
寸法	30 x 50 mm
消費電力	40 mA

表5.2.11-2 端末仕様例11)



図5.2.11-4 端末外観例210)

メーカー	M電機
モデル	—
マイクロプロセッサ	—
変調方式	—
R F周波数	2.4 GHz
R F伝送速度	250k bps
A/D変換	16 bit
寸法	54 x 44 mm
消費電力	700 μ W

表5.2.11-3 端末仕様例210)

そういうことで、いろいろなセンサをわれわれの委員会の中でまとめて、『コンクリート技術シリーズ』でご紹介させていただいております。

また、本委員会では具体的な性能評価方法を取りまとめることができませんでしたが、性能を評価する場合にどのような点に気をつけて評価しなければならない課整理しております。最初にお話ししたように、構造物の種類とか、あるいは構造物の全体レベル・部材レベルで評価するのかなど、また、どういう性能を評価していくか、そのためにはどういうセンサを使ってやっていったらいいのかということを最初に整理して、話を進めていく必要があると思います。この委員会ではある程度の絞って、何を評価したらいいのかということをやっていただくといいかなと思っています。

センサについてはたくさん今世に出ておりますので、いろいろなものを使いながら評価をしていただければいいのではないかと思います。

非常にうわべだけで、あまり中身は話しておりませんが、ぜひ参考にしていただければと思います。SHM についてのアンケートや、どういう文献を調査して、どういう内容でその文献を整理したかということも、『コンクリート技術シリーズ』の方にはまとめておりますので、ぜひ参考にしていただければと思います。簡単ではありますが、私の発表を終わります。

5. 質疑応答

(司会) ありがとうございました。何かご質問等、皆さまの方からありますでしょうか。

(Q1) 例えばモニタリングは予防保全型の維持管理に利用されますが、予防保全型の維持管理やると、LCC を考えたときに安くすむかもしれないという話があったと思うのですが、実際にひずみとか、予防保全であれば、劣化が顕在化する前に対策をするものであって、そんな状況のときにひずみを測ったって何も変わらないのではないかなと思うのですが、それはそういう話とは違うのですか。

(勝木) ここでもちょっとお話ししたのですが、予防保全型の維持管理を行うのであれば、構造物の劣化過程における潜伏期内で対処しなければいけないと思います。ということは、劣化が顕在化する前に対処する必要がありますので、構造性能の低下があってはならないのです。ですから、構造性能低下に伴って生じるひずみをモニタリングする必要はないと思います。どちらかというと、塩分の浸透や中性化の浸透、濃度などを計測していつ、耐久性上、要求性能が満足されている構造物なのかということをモニタリングあるいは評価しなければいけないと思っています。

ただ、表面のひずみを測ることによって、例えば化学的な劣化以外の付加的なものが作用して何か起こったときの異常を検知するためのシステムとしての役割であれば、表面にひずみセンサなどを張って、特に重要な構造物だと思いますが、化学的な劣化以外の付加的なものがかかってひずみを測るということは考えられると思っています。すなわち、地震などによる突発的な災害によってどのような損傷を受けたのか即時に判断できるシステムとして利用されることになります。

モニタリングというのは予防保全以外に、事後保全型の維持管理において、進展期、加速期における構造性能の照査に必要な情報を取得するために必要になってきます。

予防・維持管理はかなり重要な限られた構造物に対して行われるという認識ですので、維持管理で SHM が本当に利用していただけるのか不安はあります。SHM の中でも、突発的な災害をクリアしてみようというところでは活躍できるのかなと思っています。

もう一つは、劣化した構造物の性能を評価しなければいけないというときには、こういう考え方でそれ以降の性能評価ができるのではないかと考えております。

(Q2) 私は横田ですが、非常に良くまとめていただいております。それで、実際の構造物に最近では予防保全の観点からセンサを取り付けてモニタリングしておりますが、構造物の設計共用期間に比べてセンサの耐用年数が短いというのが非常に問題で、これは勝木先生のお話される SHM では、10 年後、20 年後にセンサを交換するのか、ほとんど交換しないのか。そういった観点から何か。

(勝木) この委員会の中でも、構造物の耐久性を見ているのか、センサの耐久性を見ているのか、どちらなのかということに最終的にはなりました。ですから、センサそのものの耐久性がどうなのかという試験方法を確立することが重要であるということは委員会の中で話し合いがありましたが、では具体的にどのようにしたらいいのかというところまでは出てきませんでした。

センサそのものの耐久性はメーカーで保障されているので良いのですが、構造物に取り付けたときにどうなのかということが非常に問題です。例えば、センサと構造物をつないでいる接着剤とか金具とか、そういうものの方が駄目になる可能性があります。したがって、計測システム全体の耐久性を評価するための試験方法を確立してあげないと、使う側としては信用できないという問題が当然あります。

(司会) 勝木先生、どうもありがとうございました。

「港湾 RC 構造物の劣化と構造性能に関する研究」

加藤 絵万(独立行政法人港湾空港技術研究所) 2009 年 3 月 17 日

(司会) それでは話題提供ということで、港湾空港技術研究所の加藤様、よろしくお願いします。

(加藤) 今日は「港湾 RC 構造物の劣化と構造性能に関する研究」と題して、港湾空港技術研究所で取り組んでいる研究についてお話します。

発表の内容ですが、港湾施設の維持管理の現状、また、鉄筋コンクリート部材の構造性能の評価に向けた私たちの取り組みについてお話しします。その前に、委員会で土構造物の変状という話題がでましたので、まず、そちらの方からお話したいと思います。

最近、沖縄県の護岸の調査に同行しました。本土復帰前に造られた護岸の変状を点検して、最終的には県全土の台風・高潮に対するハザードマップを作るという目的で設置された委員会の活動の一環です。

私が行きましたのは、非常にきれいな海にあり、前方に砂州がある石積み護岸です。この写真は護岸の天端部分ですが、ところどころ陥没が見られるという状況でした。背後地は国定公園になっているのですが、ここが崩れている状況でした。



この背面側には、大きいものと高さ 50cm 程度の土団子が多数みられました。また、周囲の地面には直径 10cm 大ぐらいの穴が無数にみられる状況でした。

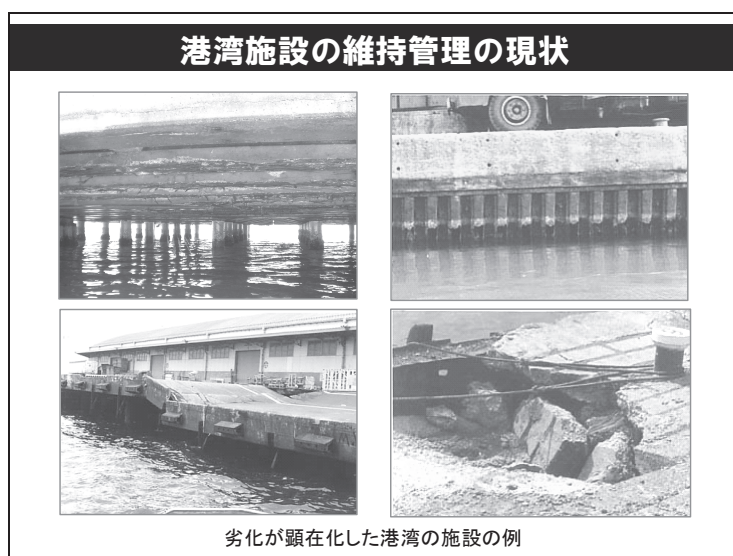
初めてこのようなものを見たので、沖縄県のコンサルタントの方に「これは何ですか」と聞いてみたところ、ヤシガニの一種がここ生息しており、その巣穴ではないかということでした。ですから、石積み部分は健全であるのに対してその裏側が崩れているのは、カニが無数にトンネルを掘り、そのせいで空洞化が起こったためではないかとのことでした。この非常に沖縄らしい変状がみられる護岸はどうやって修復したらよいか、またどうやって変化をモニタリングしたらいいのかと、県の方々も手をこまねている状態でした。

まずは、構造物の珍しい変状事例の紹介からさせていただきましたが、ここから本題に移りたいと思います。最初に、港湾施設の維持管理の現状について説明させていただきます

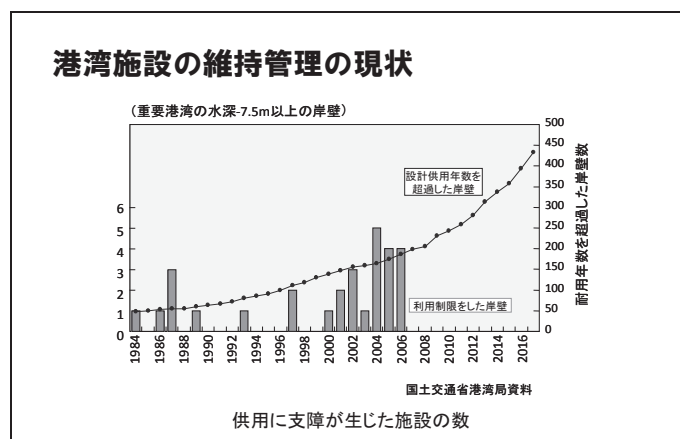
す。

こちらはこれまでに見られました港湾施設の劣化事例です。左上の写真は栈橋の下面側の状況、コンクリートのかぶりも落ちて、鉄筋も腐食が著しいものです。こちらは、鋼管杭が腐食により折れてしまい上部工の荷重が支えられなくなってしまった栈橋です。こちらは、腐食により鋼矢板に穴が空いて、中詰めが吸い出され、エプロンが陥没してしまったという事例です。

このように港湾は非常に厳しい腐食環境下にありますので、こういった劣化事例が多々見られます。



こちらは供用に支障が生じた施設の数です。青い線が設計供用年数を超過した岸壁数です。現在、2009 年ですが、高度成長期に建造した施設が徐々に供用年数が達しています。その増加に伴い、劣化・変状によって供用を停止してしまった岸壁が実際に出てきていることが分かります。このようなことから、ライフサイクル評価に基づいて施設整備をする重要性が認識されています。



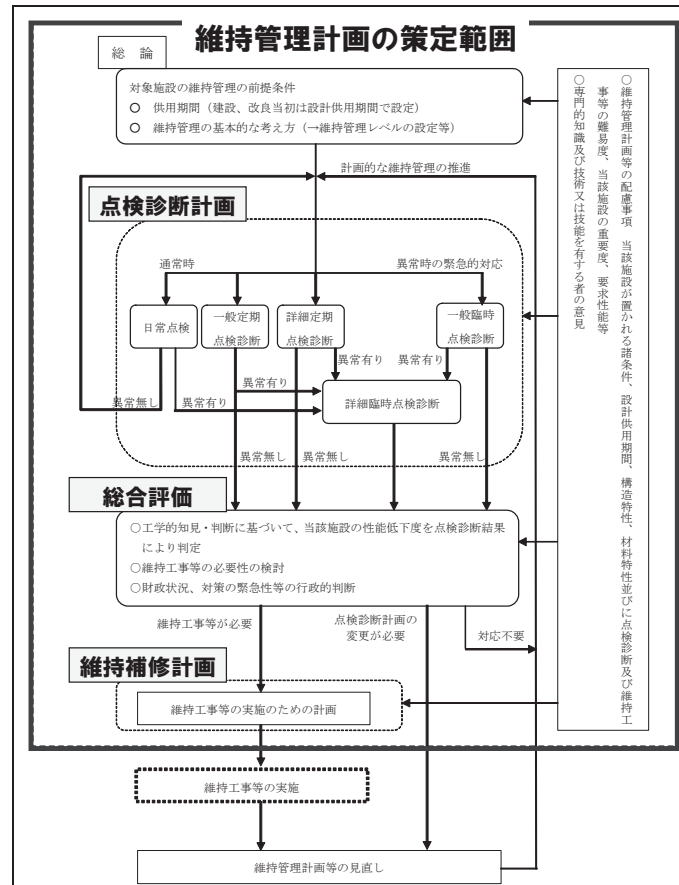
ここで、国有港湾施設の規定ですが、国有港湾施設は技術基準に則って、適切に建設、

改良また維持しなければならないということが定められております。平成19年4月から技術基準が改正され、技術基準の性能規定化が進んだとともに維持管理に関する事項が充実されました。

どのようなになったかといいますと、省令の発令によって、港湾施設を供用期間にわたって要求性能を満足するよう維持管理計画に基づいて適切に維持しなさいということになり、維持管理の方法が明文化されたのがポイントとなっています。

詳細については「技術基準対象施設の維持に関し必要な事項を定める告示」に載っております。ここで、維持管理計画等は次の事項について定めることを標準とするということになっています。次の事項というのは、維持管理についての基本的な考え方、また点検診断、計画的かつ適切な維持工事、そのほか施設の機能を保つのに必要な維持管理の方法などをあらかじめ決めておくことになりました。

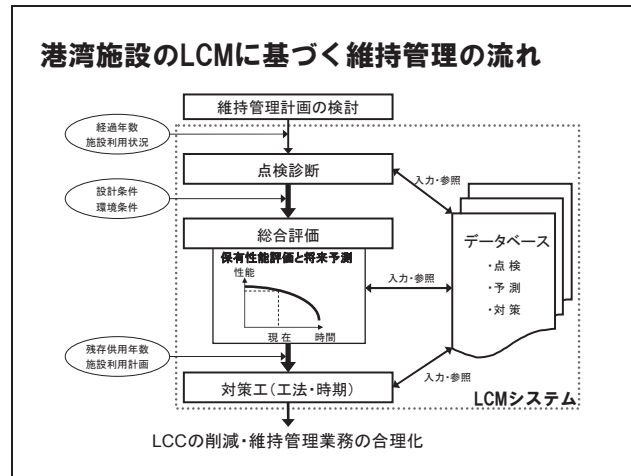
このスライドでは、どのような維持管理計画を作るかということをフローで示しています。基本的な維持管理の考え方、日常行う点検、目視等による一般点検、機器等を用いた詳細点検、台風時などに行う臨時点検などに点検診断の種類が分類されていますが、それぞれの点検についてそのメニューを定めておくことや、点検診断に基づいてどのように施設を総合的に評価をするか。さらにこれらに基づいて将来の維持補修計画をどのように立てるかという一連の流れを、計画として定めておくことになりました。しかし、やりましょう、といっても急にはできませんので、維持管理に関する技術資料のようなものが幾つか刊行されました。それが「港湾施設の維持管理計画書の手引き」と「港湾の施設の維持管理技術マニュアル」となります。



維持告示では、維持管理計画を立てるに当たっては、専門的知識および技術、または技能を有する者の意見を聞くことを標準とするとされており、専門知識および技術の習得のため、今年度、第一回港湾構造物維持管理講習会が開かれました。また、海洋・港湾構造物維持管理資格認定試験ができて、現在、100名強の方が海洋・港湾構造維持管理士の資格を取得されています。このように徐々に制度面が充実してきているというのが維持管理の現状です。

それでは、技術面はどうかということになりますが、今日は維持管理技術に関する港湾空港技術研究所の取り組みについてお話をさせていただきます。

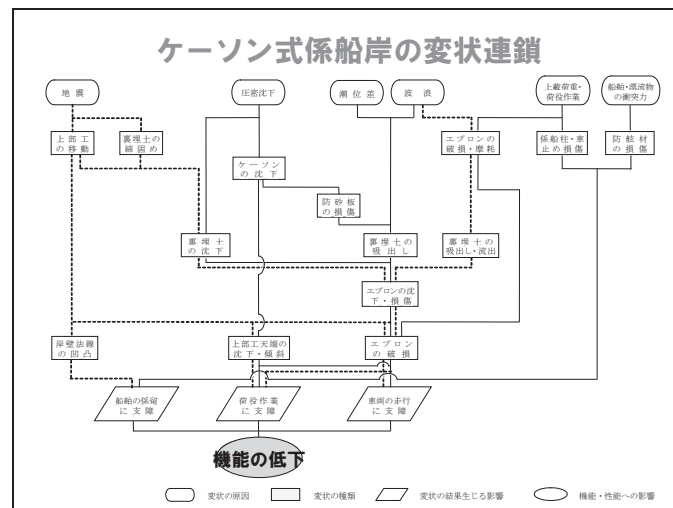
こちらに示したのは、港湾空港技術研究所で提案している港湾構造物のライフサイクルマネジメントに基づく維持管理の流れです。これはまず、点検診断に基づいて保有性能評価と施設の将来予測を行い、それをもとに総合評価を行って、対策工を選定します。システムが最終的に目指しているのは、ライフサイクルコストの最小化や、維持管理業務の合理化です。

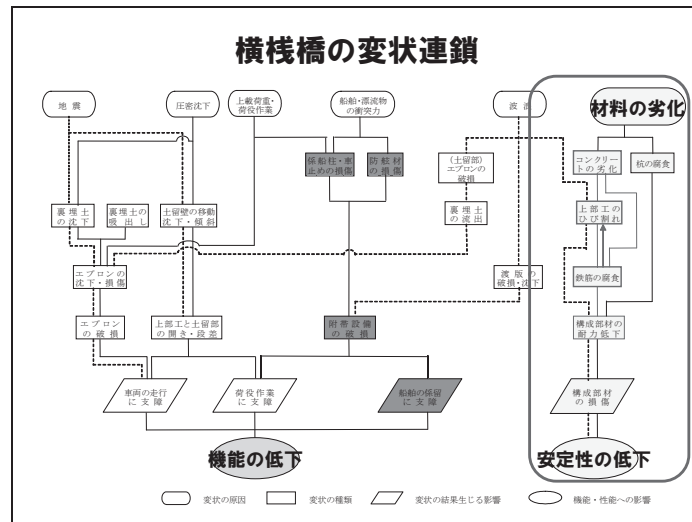


現在、私共は各種港湾施設の中で、特に係留施設に対してライフサイクルマネジメントシステムを構築することを目標としています。係留施設の主な構造形式は栈橋、矢板式、重力式の三つになりますが、この中で特に橋を対象として研究を行ってきました。

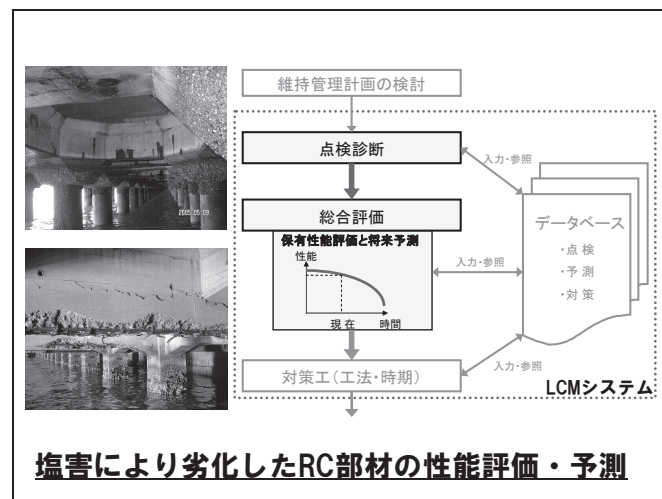
栈橋を研究対象とした理由についてお話しします。こちらは重力式の係船岸の変状連鎖図です。重力式係船岸の変状連鎖では、変状原因は地震、圧密沈下、潮位差といろいろあります。しかし、最終的にどのような変状が起こるかといいますと、岸壁法線が崩れたり、エプロンが破損したりと、これらの返上は荷役作業に支障をきたすため、施設として大事な性能である使用性の低下に結びつくものです。

一方、栈橋の場合、栈橋の鋼管杭とコンクリート部分に着目しますと、材料の劣化に伴って安定性が低下するというフローがみられ、重力式では見られなかった種類の性能の低下がみられます。まずはこの部分を基本として、ライフサイクルマネジメントシステムの構築に取り組みました。

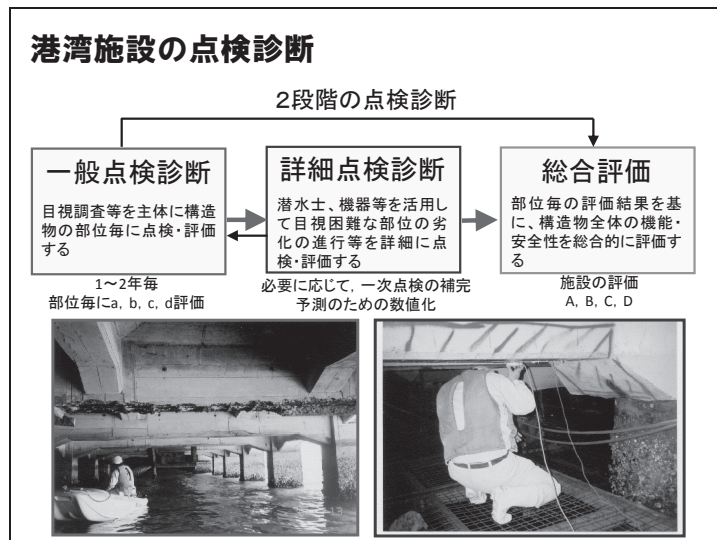




今日は、鉄筋コンクリート部材の劣化に起因する構造性能低下についてお話ししたいと思います。こちらは桟橋の上部工の下面の写真です。左側は供用 30 年が、右側は供用 40 年が経過しているものです。陸上構造物と違って、港湾構造物は環境が厳しいことと、容易に点検ができないことなどで、定期的な点検や補修などの対策はこれまで為されていませんでした。まずは、鉄筋コンクリート部材の性能低下を簡易な方法で数値的に表すための取り組みについてご紹介したいと思います。



これは、港湾施設の点検診断をどのようにやっているかという流れです。1～2 年ごとに目視点検を行い、それに基づいて劣化・返上を性能低下度という形で評価することとしています。目視点検から判断される劣化度は a, b, c, d で表されます。私共は、これらの劣化度をできる限り「性能」を表す指標に近づけるための取り組みとして、既存構造物の劣化度と部材の耐荷性の関係についてデータを集めています。

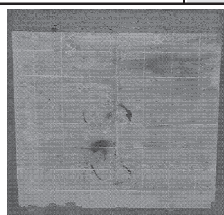


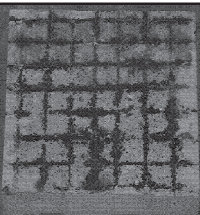
実験方法ですが、まずは撤去する栈橋上部工から床版部分を採取して、「港湾の施設の維持管理技術マニュアル」に記載されている判定基準に基づいて、目視により劣化度を判定します。床版の下面に錆汁が見られるものは劣化度 c, ひび割れが見られるものが劣化度 b, かぶりが落ちてしまっているものは劣化度 a と判定されます。

栈橋上部工の一般点検診断の判定基準

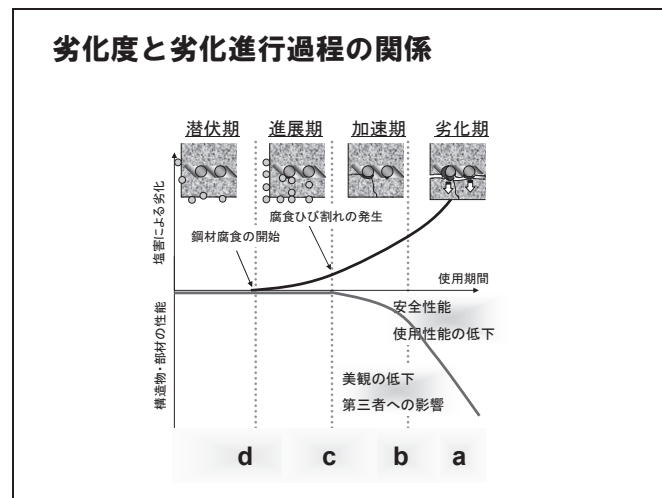
港湾構造物の維持管理技術マニュアル (財)沿岸技術研究センター, 2007

点 検 方 法	判 定 基 準 案
目視 (栈橋上部工床版下面) ・ひび割れの発生方向 ・ひび割れの本数、長さ、幅 ・かぶりの剥落状況 ・錆汁の発生状況 ・鉄筋の腐食状況	a ☐ 網目状のひび割れが部材表面の50%以上ある。 ☐ かぶりの剥落がある。 ☐ 錆汁が広範囲に発生している。
	b ☐ 網目状のひび割れが部材表面の50%未満である。 ☐ 錆汁が部分的に発生している。
	c ☐ 一方向のひび割れ若しくは帯状又は線状のゲル吐出析出物がある。 ☐ 錆汁が点状に発生している。
	d ☐ 変状なし。



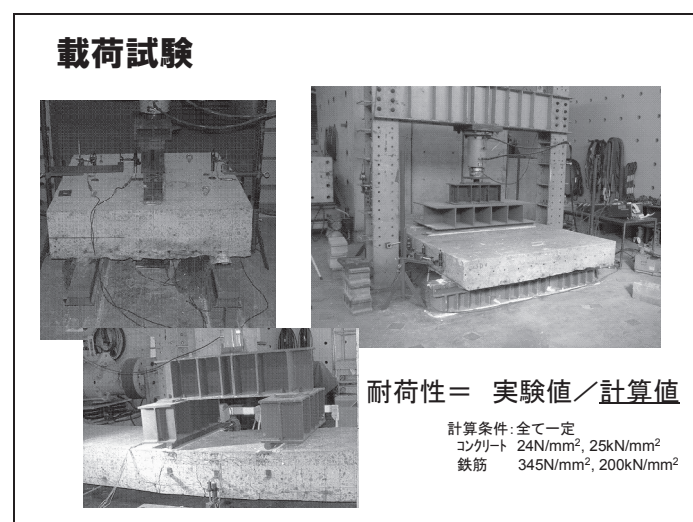


土木学会のコンクリート標準示方書に掲載されている塩害による部材の劣化進行過程と劣化度の関係を示しますとこのようになります。外観上に変状が見られるまでが劣化度 d, 進行過程中的の劣化期の状態が劣化度 a となります。



これまで、既存の栈橋上部工から 30 部材を収集しました。全国から部材を収集したのですが、撤去されるべき栈橋上部工から収集しているため、現段階では、自然と劣化度 a の部材が多くなっています。

収集した部材はそれぞれ形も大きさも異なるので、それぞれの形状・寸法に応じて載荷点を 1 点あるいは 2 点とした曲げ載荷試験を行い、部材の構造性能を評価しました。

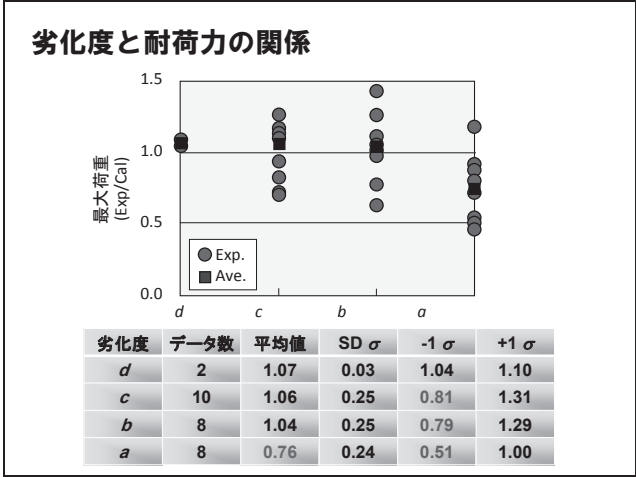


こちらは、実験から得られた最大荷重を計算値から得られる最大荷重で割って耐荷性という形で評価したグラフです。

横軸が劣化度 d～a，縦軸が最大荷重の実験値に対する計算値の割合です。データはばらついてはいますが、劣化度 c～a においては最大荷重が計算値を下回るものが存在します。つまり、外観に何か変状が認められる RC 部材の耐荷性は、設計時の耐荷性を下回る可能性があるといえます。

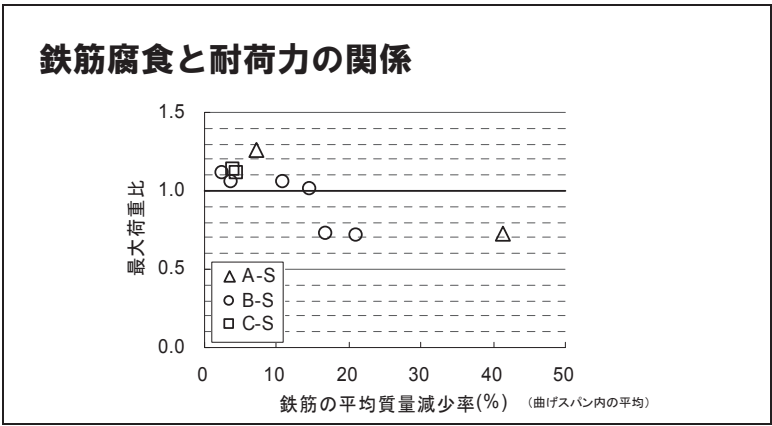
全データの平均値をみると、劣化度 b までは耐荷性は 1.0 程度、劣化度 a になると低下するといった想像通りの結果となります。しかし、平均±標準偏差を考えると、劣化度 c1 か

ら 1.0 以下になっています。これについてはさらにデータを収集し、修正・検証していかなくてはなりません。安全側の評価をするためには、劣化度 c に至る以前に何らかの対策を施した方がよいと言えます。



なお、この中の幾つかについて、載荷した後に鉄筋を取り出して、実際に鉄筋がどれくらい腐食していたのかを調べました。このグラフは横軸が腐食による鉄筋の質量減少率、縦軸が最大荷重です。腐食による鉄筋の質量減少率が増加するほど耐荷力は低下します。しかし、正確には部材の諸元によって異なりますが、大まかな計算値ですと、質量減少率が 10% 増加すると耐荷力は 10% 程度低下することになります。そのような傾向が成り立つとすれば、耐荷性が想定以上に低下しているものも見られました。これらについては、鉄筋の腐食によって部材の変形や破壊の局所化が生じ、予測値以上に部材の耐荷性が損なわれた可能性があることが考えられます。

しかし、部材の耐荷性を精度良く評価したい場合、鉄筋腐食がコンクリート部材にどんな影響をするのかを、正確に表さなければ評価はできません。



鉄筋腐食がコンクリート部材にどのような影響を及ぼすかを簡単にまとめると、鉄筋が腐食することにより断面が減少すること、設計時に期待される鉄筋とコンクリート間の付

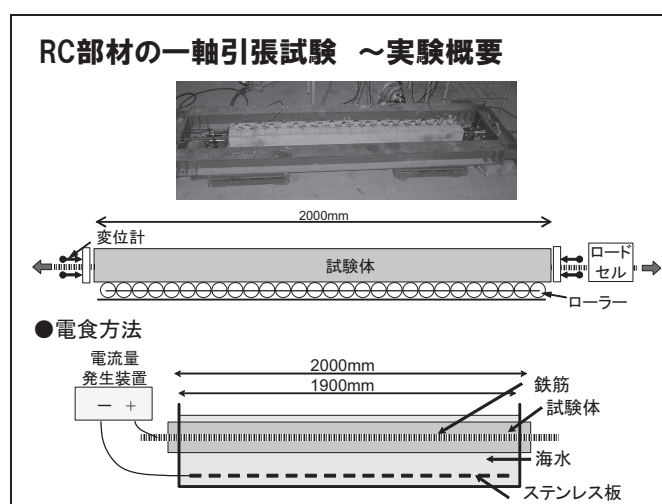
着が腐食により失われてしまうこと、この二つになると思います。

次に、この二つの要因についてどのように評価したらよいかを実験的に検討した事例を紹介します。

まず、鉄筋腐食が付着劣化に及ぼす影響についての検討について説明します。

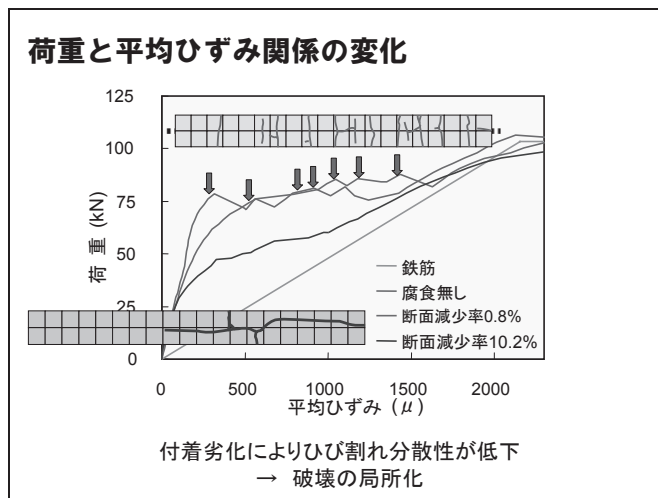
こちらは 2.0 m のはりの中に鉄筋 1 本が貫通した試験体を作り、両側から鉄筋を引張る一軸引張試験を行いました。

本来であれば、塩分による劣化を対象としている関係で、試験体に海水をかけたり乾燥させたりして鉄筋腐食を生じさせるのが良いのですが、それには 3 年程度時間がかかります。通常は、鉄筋に電流を印加して人工的に腐食を発生させる方法、電食を用いています。



こちらは試験体に適用した荷重と試験体全体の平均ひずみの関係です。図中の直線は、鉄筋単体を引張った場合の荷重－変位関係です。これに対して、赤線が鉄筋腐食が生じていない場合の鉄筋コンクリート部材の荷重－変位関係です。鉄筋周囲のコンクリートが鉄筋の伸びを拘束しているので、鉄筋単体のように直線ではなく、テンション・スティフニング効果分が入った荷重－変位関係となります。その効果は腐食が進んでいくと低下していき、腐食の程度が大きくなるにつれてほぼ元の鉄筋の荷重－変位関係に近づいていきます。

健全な鉄筋コンクリートの場合、鉄筋とコンクリートの応力の伝達がうまくいっていますので、ひび割れ散性がよく、試験体の全域にわたって引張りひび割れが生じることになります。しかし、鉄筋が腐食している場合、ひび割れは 1 本しか入りませんでした。これは、付着によって応力の伝達がうまくいかず、コンクリート中のひび割れ分散性が低下する。つまり鉄筋腐食が生じている部材に対しては、破壊の局所化が起こるということが考えられます。

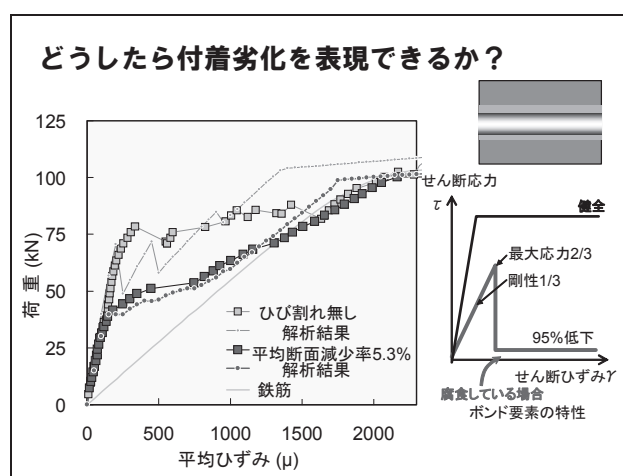


どうしたら付着劣化を解析的に表現できるかについて、簡単な解析で検討を行ってみました。解析中では、鉄筋の腐食による断面減少を鉄筋要素の断面を減少をさせることにより表現し、鉄筋要素とコンクリート要素の間にボンド要素を埋め込み応力伝達を考えることにしました。

これはボンド要素の条件の設定ですが、健全なコンクリートの場合のせん断応力とせん断ひずみ関係に対して、鉄筋が腐食している場合、それらの関係をどのように変化させれば実験結果を再現できるかについて検討しました。

これによれば、平均断面減少率、腐食量が5.3%あった鉄筋コンクリート部材の場合、最大せん断応力を2/3、剛性を1/3にし、最大せん断応力に達した後にせん断応力を95%低下させると、解析値は実験値を再現することができました。

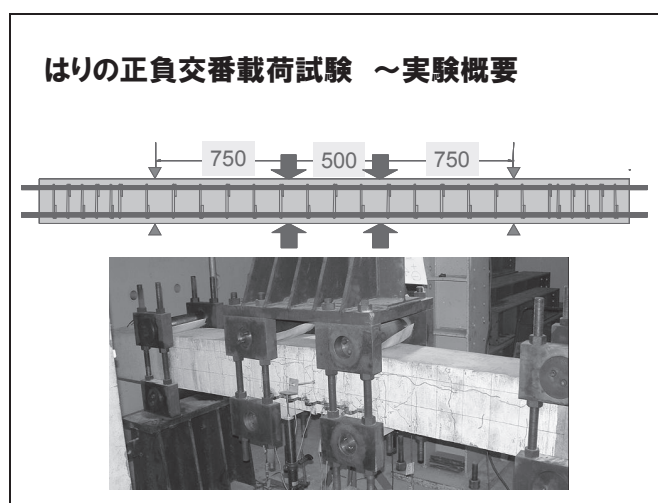
これは非常に簡単な解析ですので、鉄筋の腐食の程度や最大せん断応力および剛性の低下程度については、まだ数値的な検討はできておりません。しかし、このようにすれば解析で腐食による鉄筋－コンクリート間の付着劣化が表現できるのではないかということが考えられました。



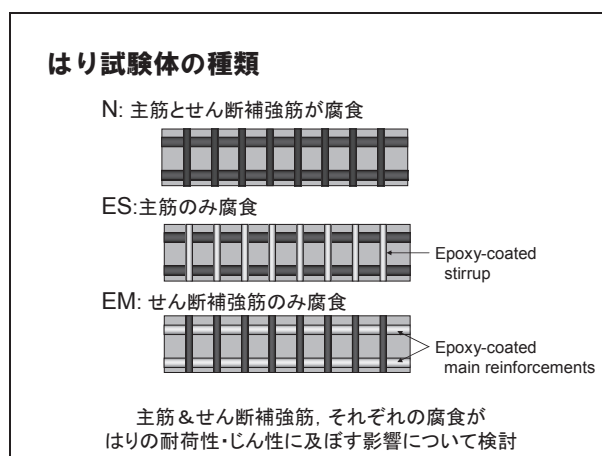
腐食した RC 試験体の一軸引張試験の結果についてご紹介しましたが、実際そのように荷重がかかるような部材はあまりありません。次に、RC 部材の曲げ載荷試験から鉄筋腐食が部材の耐荷性、変形性といった構造性能に及ぼす影響について検討を行った事例をご紹介します。

まず、最初に鉄筋が腐食した RC はりの正負交番載荷試験についてご報告します。

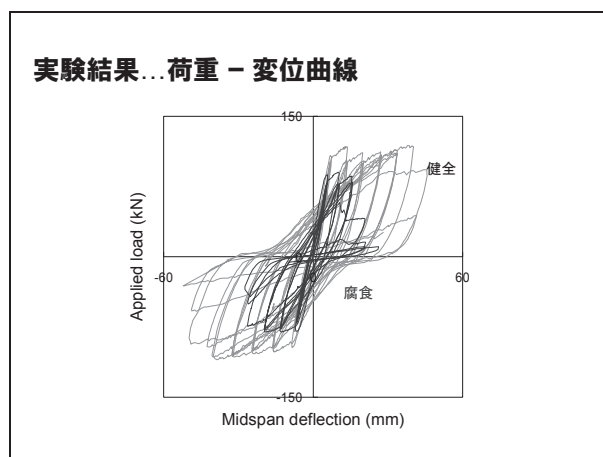
実験方法ですが、まず試験体中の鉄筋を電食により腐食させた後、正負交番載荷試験を実施しました。試験終了後、鉄筋を取り出して 10cm ピッチ程度に切断し、腐食による鉄筋の質量減少を測定しました。



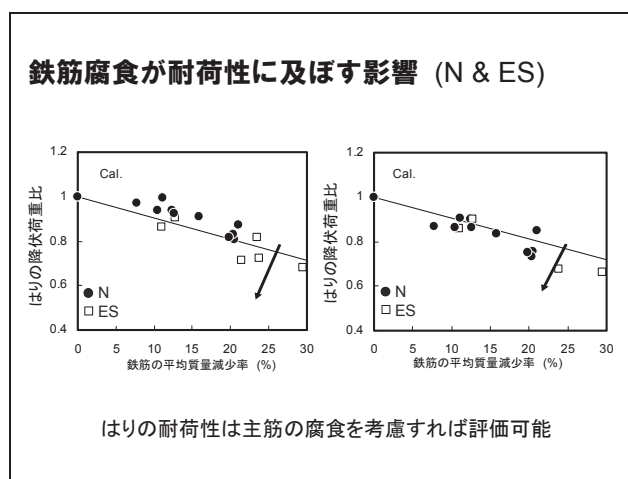
ここで、実際の栈橋のはりですと、せん断補強筋の方が主筋よりもかぶりが薄いので、先行して腐食しやすいことが考えられます。このため、主筋とせん断補強筋が腐食した試験体、せん断補強筋にエポキシ塗装鉄筋を使い主筋だけを腐食させた試験体、せん断補強筋だけを腐食させた試験体を用意して、それぞれのせん断補強筋、あるいは主筋の腐食がはり自体の耐荷性、また靱性(変形性)に及ぼす影響について検討をしました。



RC はりの荷重と中央変位関係の試験結果の一例を示します。健全な RC はりはこのような荷重－変位関係になるのに対して、鉄筋が腐食しているはりではこの関係が全体的に小さくなるのが分かります。

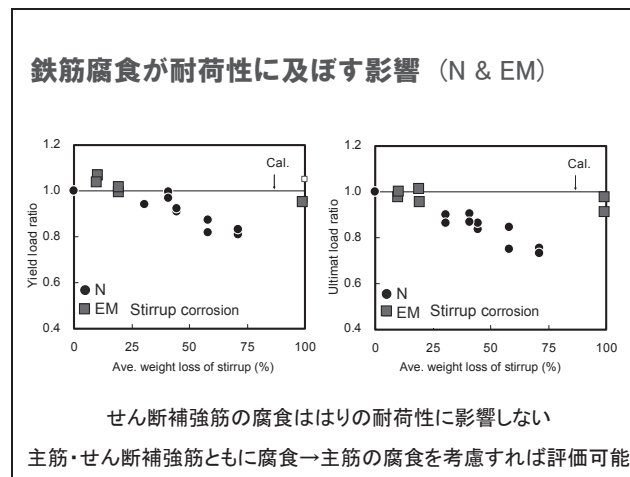


こちらは、RC はりの主筋の腐食量と降伏荷重、最大荷重の関係です。黒いプロットはせん断補強筋と主筋の両方が腐食している試験体、白いプロットは主筋のみが腐食している試験体の結果です。計算値と試験結果のプロットが大体一致しておりますので、RC はりの耐荷性は主筋の腐食を考慮すれば表現することが可能であるといえます。

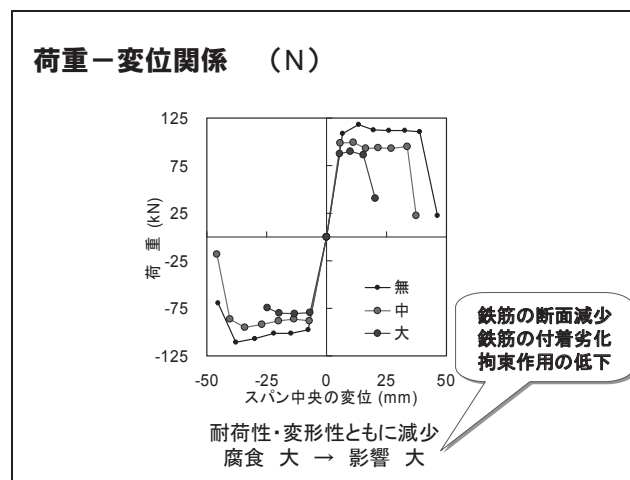


こちらは、RC はりのせん断補強筋の腐食量と降伏荷重、最大荷重の関係です。せん断補強筋と主筋の両方が腐食している試験体、またせん断補強筋のみが腐食している試験体の結果をプロットしました。この場合、はりの単純な曲げ耐力の計算値には、せん断補強筋の影響は入らないので、計算結果は常に 1.0 になります。実験結果においても、せん断補強筋の腐食ははりの耐荷性に全く影響しないことが分かります。

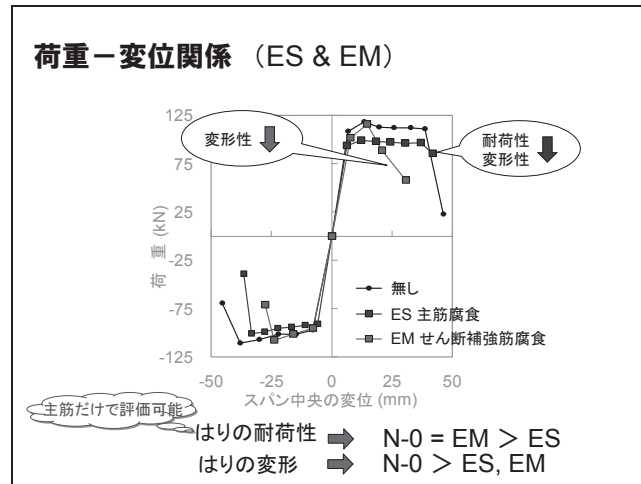
したがって、通常、主筋とせん断補強筋の両方が腐食する部材に対しては、主筋の腐食だけを考慮すれば、部材の耐荷性が評価できるということが考えられます。



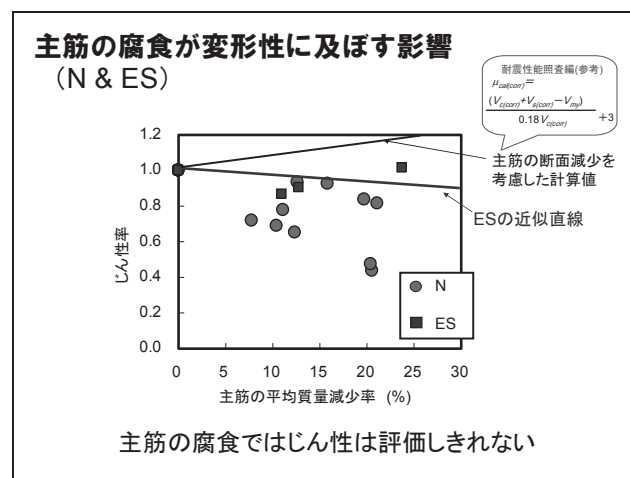
では、次に変形性についての検討です。こちらは先ほどの荷重－中央変位関係の包絡線を示しています。主筋、せん断補強筋ともに腐食が進行すると、耐力性、変形性ともに低下していくことが分かります。これは、鉄筋の断面減少、鉄筋の付着による応力伝達の低下、またせん断補強筋の腐食によりコアコンクリートの拘束効果が低下するという機構が働いたのではないかと考えられます。



では、主筋かせん断補強筋のどちらか一方がさびている試験体ではどのようなになったかをこちらに示します。健全なはりと比較すると、せん断補強筋が腐食しているはりの耐力性は同程度でしたが、変形性は小さくなりました。一方、主筋が腐食しているはりでは耐力性、変形性ともに小さくなりました。これより、はりの耐力性については、主筋の腐食を考慮することによって評価できるということになると思いますが、変形性はどうなのだろうという課題が残ります。

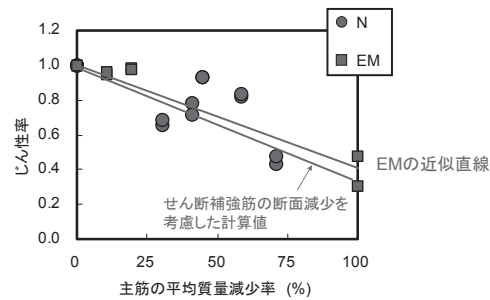


変形性と腐食量の関係についてデータを整理したものがこちらのグラフです。これは横軸が主筋の腐食量です。主筋の腐食程度が大きくなるにつれ変形性も低下する傾向が見られます。コンクリート標準示方書の耐震性能照査を参考に算定した計算値では、主筋の腐食が進行するほど、靱性(変形性)は向上してしまいます。これより明らかに、主筋の腐食だけでははりの靱性は評価できないということが分かります。



一方、せん断補強筋の腐食量と変形性の関係を示したのがこちらのグラフです。せん断補強筋についても、腐食が進行するとはりの変形性は低下する傾向になりました。計算値を見ると、主筋の腐食を考慮した場合よりも、せん断補強筋の腐食を考慮した計算値の方が実験値と一致します。またせん断補強筋が腐食したはりの腐食量と変形性の実験結果に近似線を引きますと、計算値と大体一致することが分かりました。したがって腐食した RC はりの変形性を評価するには、せん断補強筋の腐食を把握すれよいことが考えられます。

せん断補強筋の腐食が変形性に及ぼす影響 (N & ES)



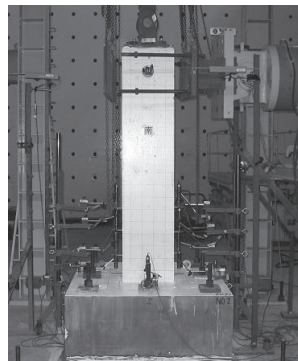
じん性を評価するには、せん断補強筋の腐食を把握する必要がある

次に、RC 柱の正負交番載荷試験について報告いたします。

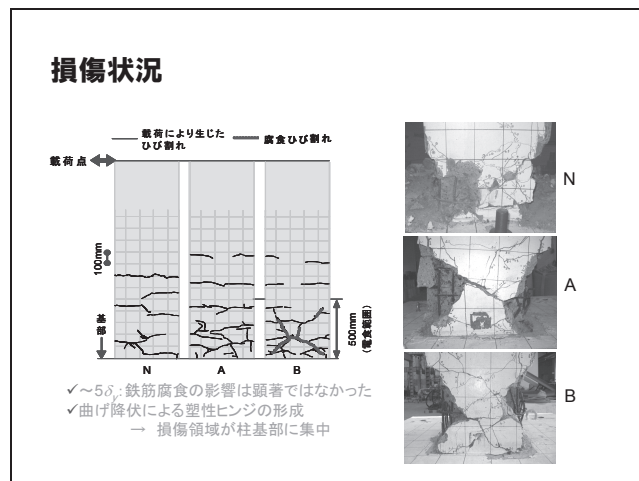
実験に用いたのは、断面が 450 mm×450 mm、柱部分が 1700mm の試験体です。柱基部の鉄筋を電食で腐食させました。載荷試験時には、柱断面に 1.0 N/mm² の軸力をかけました。

柱の正負交番載荷試験 ～実験概要

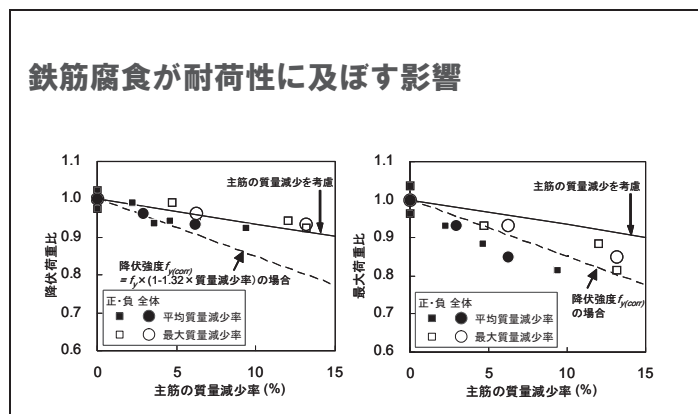
- 軸力 1.0N/mm²
- 柱頂部に正負交番水平荷重
作用位置:柱基部から高さ 1700mm
- 見かけの降伏変位を基本とし、水平変位が整数倍に達した後に除荷する水平荷重を3サイクルずつ繰返し作用
- 水平荷重が低下して降伏荷重に達するまで載荷し、この時点を終局状態と定義
- 計測項目:水平荷重・鉛直荷重・水平変位・柱部曲率



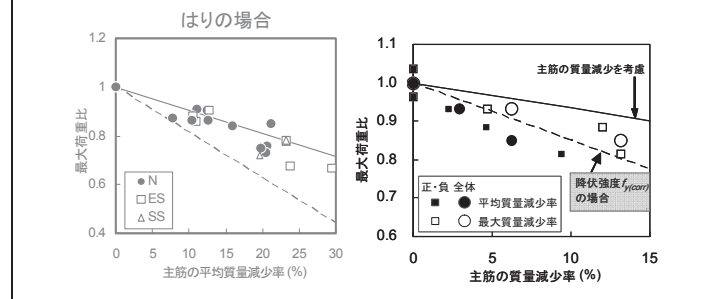
こちらに柱の損傷状況を示します。試験体 No. A, B が鉄筋が腐食している試験体ですが、鉄筋腐食の影響は外観からは観察されませんでした。また、全体的に基部に変形が集中しており、塑性ヒンジが形成されたことが考えられました。



RC はりの試験と同様、RC 柱について主筋の腐食量と降伏荷重、最大荷重の関係をまとめました。グラフには、正側載荷、負側載荷、全体の平均値をプロットしています。RC 柱も主筋の腐食程度に応じて耐荷性が低下することが分かります。グラフ中の実線は、主筋の質量減少率を断面減少率に変換して求めた耐荷性の計算値です。点線は、平均質量減少では表現しきれない孔食を考慮した鉄筋の降伏強度計算値を用いて求めた耐荷性です。実線と点線を比較しますと、特に、最大荷重は点線で示す計算値とよく合っています。先ほどお見せした RC はりの鉄筋腐食と耐荷性の関係では、実験値は実線と点線のどちらに乗っているかというと、実線の方が実験値をよく評価していました。この結果から、柱の場合、つまり軸力が作用する部材の場合、耐荷性は孔食などの局所的な鉄筋の断面減少に支配されやすいことが考えられます。



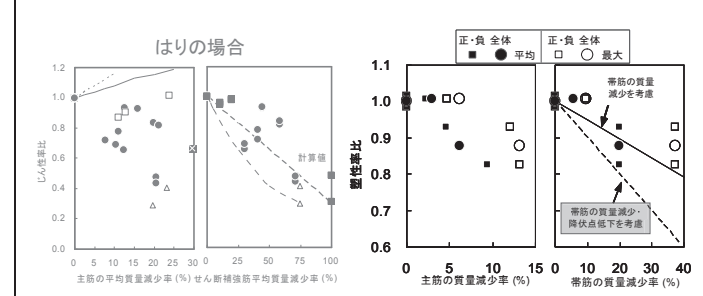
軸力の有無の比較 その1



次に、変形性について比較したいと思います。左図では主筋の質量減少率を、右図では帯筋の質量減少率を横軸にして、塑性率(変形性)を縦軸として実験結果をプロットしました。主筋、帯筋の腐食が進行するにつれて、変形性が低下することが分かります。また、実験値は点線(孔食を考慮した鉄筋の降伏強度計算値を用いて求めた変形性)を上回っていますが、実線よりも小さくなっているものも見られます。このため、RC 柱の変形性は、主筋の平均的な腐食量ではなく、局所的な腐食量、最大腐食量を用いて評価の方が安全側に評価できることが考えられます。

また、先ほどと同じように、RC はりと RC 柱の変形性を比較しました。これより、RC はりの変形性はせん断補強筋の平均腐食量を考慮すれば評価できるのに対して、RC 柱の変形性は腐食による降伏強度の低下を考えないと安全側に評価できないことが分かります。よって、軸力が作用する部材の変形性は、帯筋(せん断補強筋)の局所的な腐食にも支配されやすいことが考えられます。

軸力の有無の比較 その2



以上、劣化度と実構造部材の耐荷性の関係と、鉄筋腐食が生じた RC 部材の構造性能評価に関する取組みについて紹介させていただきました。これらは、冒頭で申しましたとおり、ライフサイクルマネジメントに基づく要素技術の開発の一環として取り組んでいるものです。今後もライフサイクルマネジメントシステムの要素技術の充実を図り、港湾施設の維持管理業務の合理化を目指して研究していきたいと思っております。

以上で、発表を終わらせていただきます。ご清聴ありがとうございました(拍手)。

東京大学 生産技術研究所
都市基盤安全工学国際研究センター
〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1
<http://icus.iis.u-tokyo.ac.jp/>
E-mail: icus@iis.u-tokyo.ac.jp

Tel: (+81-3)5452-6472

Fax: (+81-3)5452-6476