

一般社団法人日本コンクリート診断士会

第2回業務体験発表会 報告集

平成26年11月28日

一般社団法人日本コンクリート診断士会

目 次

		頁
01. 砂防堰堤の老朽化対策	松村 英彰（福井）-----	1
02. 堤防増厚コン表面剥離発生事例	望月 元一（静岡）-----	5
3. 音響探査法による RC 建造物の欠陥探査	歌川 紀之（東京）-----	9
	杉本 恒美	
04. 地下建造物の劣化状況と健全性の維持・保全対策	佐野 正樹（東京）-----	13
	佐藤 亘	
05. 変状調査並びに変状図作成についての体験報告	米村由起穂（鳥取）-----	17
	奥田 隆幸（鳥取）	
06. 出雲大社大鳥居「その歴史と構造」	松浦 寛司（島根）-----	25
07. 東京湾第二海堡のコンクリート建造物調査 ー過去の建造物に学ぶー	内藤 輝（東京）-----	29
	佐野 慎哉	
	野口 孝俊	
	峰松 敏和（東京）	
	片山 哲哉	
08. 凍結防止剤で塩害劣化した鋼橋 RC 床板の上面補修 に対するコンクリート材料の開発	石川 裕一（石川）-----	39
09. 上・下水道関連施設における中性化の文献調査と事例研究	山崎 尚彦（京滋）-----	45
10. インフラ保全におけるデジタル画像診断支援システム 技術の現状と展開	衣笠 貢司（東海）-----	49

※本業務発表会は、技術部会（部会長：奥田由法，副部会長：奥村智洋）が担当しました。

注) 01. ～10. は報告あり。

氏名の後の（ ）内は所属する地区診断士会名である。

砂防堰堤の老朽化対策について (20P)

福井 福井県丹南土木事務所 ○松村 英彰

(要旨)

福井県越前市文室町において、文室川砂防堰堤の老朽化対策を行いました。

文室川砂防堰堤は、昭和16年度に完成し、建設後71年が経過し、ひび割れ、スケーリング、漏水といった変状が堰堤全面に確認されます。

発注者としての立場において、調査、設計、補修、補強対策といった計画設計と実際の施工も含めた一連の説明をします。

調査では、既設砂防堰堤の健全度を確認したく、中性化、比重試験、一軸圧縮試験を実施しました。

設計では、地元住民への聞き取りを実施し、既設砂防堰堤建設当時のことを考慮し、安定計算が満足するような補修、補強対策を含めた設計を実施しました。

施工では、施工順序が分かるように説明図や写真を使用し説明します。

また、対策を行った予算の砂防設備等緊急改築事業がどのようなものか、事務所内に数多くある砂防堰堤の中で文室川砂防堰堤の対策をなぜ行ったかについて説明します。

本年8月20日には、広島市において土石流による多大な被害が発生し、改めて砂防堰堤の重要性、既設砂防堰堤の健全性を維持することが極めて重要と再認識をしました。

砂防堰堤の老朽化対策について

文室川 越前市文室町 文室川堰堤

福井県コンクリート診断士会
福井県丹南土木事務所
主任 松村 英彰

目次

- 1 砂防設備等緊急改築事業とは
- 2 砂防設備等緊急改築事業の事例(文室川砂防堰堤)
- 3 文室川砂防堰堤の変状
- 4 文室川砂防堰堤の損傷状況(調査結果)
- 5 文室川砂防堰堤の補修計画

1 砂防設備等緊急改築事業

平成22年度に石川県の浅野川水系において、歴史的土木構造物の砂防堰堤水通し下の堤体が中抜けしたことにより、下流の金沢市内において多大な被害が発生した。このため、砂防設備等緊急改築事業が創設された。



丹南土木事務所では、施工年度が古く(昭和52年以前)、人家直上流の最下流堰堤を中心に調査し、老朽化が著しい堰堤の緊急改築事業に平成24年度から着手(文室川、大仏川)

2 砂防設備等緊急改築事業の事例紹介

・事業概要

事業名：総合流域防災事業(地域自主戦略交付金)
総合流域防災事業(防災・安全交付金)

溪流名：文室川(ふむろがわ)
地係：越前市文室町

流域面積：2.7km²
溪床勾配：1/20
堤高：8.0m
堤長：77.0m
堤幅(堤体厚)：2.0m

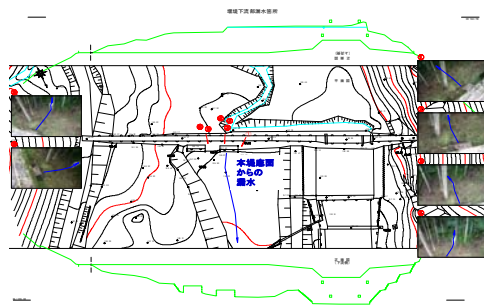


既設堰堤の竣工年度：昭和16年度
(建設後71年経過)

3 文室川砂防堰堤の全景・変状1



3 文室川砂防堰堤の変状2(漏水)



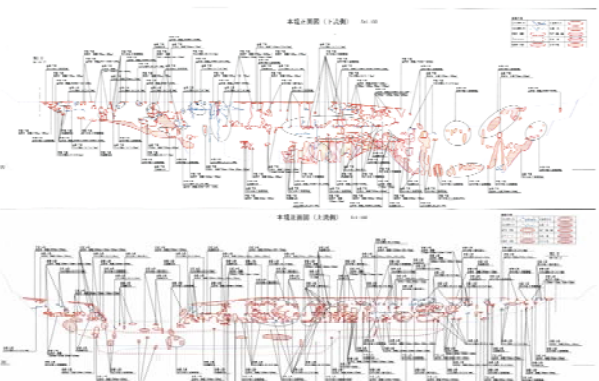
文室川砂防堰堤は大丈夫か

- 安定計算
 - 転倒・滑動・支持を満足するか？
 - ⇒文室川砂防堰堤は重力式堰堤のため、重量が必要
 - 重要事項
 - 堰堤内部が空洞化していないか。
 - 支持地盤を満足しているか。
 - 地元住民間取り
 - ・文室堰堤施工に住民の方も参加。
 - ・昭和16年度はセメントが高価
 - ・コンクリート打設方法が確立していない

4 文室川砂防堰堤の損傷状況

- 目視調査
 - (ひび割れ、スケーリング、漏水等の劣化確認)
- トモグラフィ解析方法による弾性波探査
 - (堤体の面的劣化状況把握のため)
- ボーリングによる堤体内部調査
 - (漏水の原因究明のため)
- ボーリングコアを用いた中性化、比重、一軸圧縮試験
 - (既設堤体の老朽化具合)

4 文室川砂防堰堤の損傷状況



4 文室川砂防堰堤の損傷状況

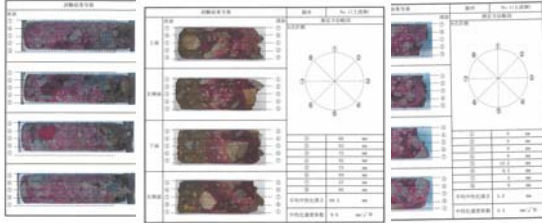


4 文室川砂防堰堤の損傷状況

調査結果

・中性化

2.6mm(No.2)、3.0mm(No.3)⇒問題なし
68.3mm(No.1)⇒ジャンカや亀裂で中性化進行



4 文室川砂防堰堤の損傷状況

調査結果

・比重(一般的2.3)

自然状態2.27~2.46
湿潤状態2.29~2.46
⇒問題なし

・一軸圧縮強度(旧設計基準強度16N/mm²)

16.8N/mm²(No.2)、20.1N/mm²(No.3)⇒問題なし
6.22N/mm²(No.1)

⇒設計基準強度の39%と小さいが、コア確認すると流動性の悪いコンクリート使用による締固め不足が原因。グラウチングすることで、コンクリート躯体としての一体性、止水性を高めることで対策。

5 文室川砂防堰堤の補修計画

堤体本体・・・内部空洞化(水密性、単位体積重量不足)

安定計算上断面不足、スケーリング

⇒空洞箇所は充填(グラウチング)

脆弱部を取り除く、コンクリート増厚

水通し・・・ひび割れ(貫通型ではない)

水通し断面不足

⇒貫通型ひび割れでないため、コンクリート増厚

空洞化対策(グラウト)

基礎工・・・パイピングによる漏水、空洞

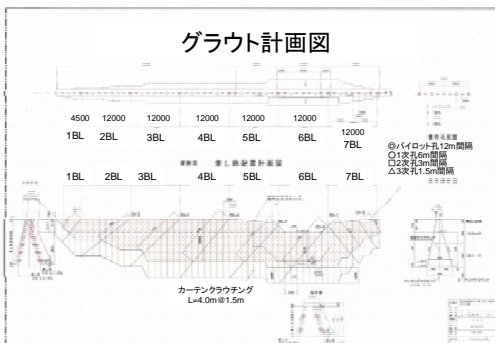
⇒カーテンングラウチング

5 文室川砂防堰堤の補修計画

グラウト材の検討

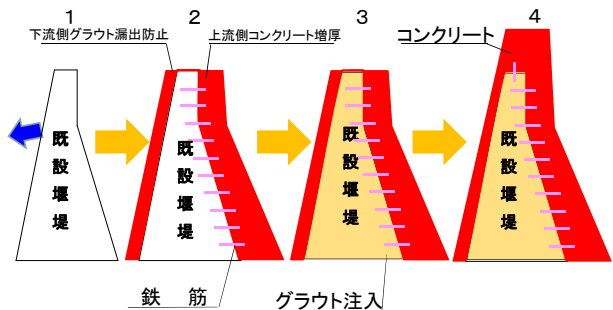
区分	セメント系充填材	シリカ系	セメント系(可塑充填材は適性)またはアクリル系
使用材料	セメント、遅凝剤	セメント、遅凝剤	セメント、砂、遅凝剤、可塑材
主な用途	ダムグラウチング	基礎地盤	セメント工、ダム基礎の充填、対策
利点	流動性が比較的大きい	流動性シリカと清浄シリカからなる骨材グラウト	流動性の大きいセメントと導入口で可塑材を混入して充填にする
注意	30~50	1~1.2	1~1.3
最終強度	数週間	数週間	数週間(凍害まで遅くはズル)
強度	40N/mm ² 以上	10N/mm ²	5~20N/mm ²
浸透性	比重が重いので下方から充填すれば分離しない	安定	セメント系による材料の注入を制御できるが凍害あり
製造	普通アクリルにてセメントと遅凝剤と水の混合のみ	普通アクリルにて特殊シリカと遅凝剤と水の混合のみ	セメント系内にて可塑材を混入したA環と可塑剤のみを混合し注入
日数	30~40(3)日	3~4(3)日	30~40(3)日(30~40(3)日(30~40(3)日(凍害に注意))
コスト	2,000~10,000円/m ³	100,000~150,000円/m ³	50,000~200,000円/m ³
経費実績	一般的	200万円以上	セメント工で作業費多い
総合判定	◎	△	△

5 文室川砂防堰堤の補修計画



5 文室川砂防堰堤の補修計画

施工順序



5 文室川砂防堰堤補修計画



黒色：既設堰堤
赤色：今回施工

6 文室川砂防堰堤補修工事の施工



6 文室川砂防堰堤補修工事の施工



6 文室川砂防堰堤補修工事の施工



6 文室川砂防堰堤補修工事の施工



心残りが...



堤防コンクリート表面の剥離発生事例 表面剥離対策/調査による原因推定と課題

静岡 静和工業株式会社 ○望月 元一

1. はじめに

今回の施工は、既設海岸堤防の老朽化対策事業としてコンクリート厚20cmを増し厚した工事である。既設堤防は昭和40年代に築造され建設後45年が経過している。堤防勾配は1割5分の法勾配より鉛直した波返し構造に勾配が変化している。増し厚コンクリート勾配が1割5分とならぬであり、当初から内部気泡の表面発生が予測され、この表面気泡の抑制が課題であった。そのため、表面気泡の発生を抑制する目的で型枠表面に透水性シートを貼り付けて使用した。その結果、型枠寸法の検討によりコンクリート表面の気泡の発生は抑制できたが、内部気泡は発散することができず細粒気泡群となりコンクリート表面背部に残留し表面剥離が発生した。

本文は、表面剥離の発生原因を調査推定し、補修工事を行い、補修後のコンクリート表面を再調査し原因と課題についてまとめたものである。

2. 施工調査・コンクリート増し厚工法の施工方法

増し厚型枠の組立のため、既設堤防に型枠固定用のセパレータの打ち込みと固定を行った。次に木製型枠表面に透水性シートを貼り付けて型枠を組み立てた。堤防法面勾配が1割5分でコンクリート打設幅が20cmと狭隘な状況であるため締固めは、内部振動バイブレーターと外部振動バイブレーター、木槌により入念に実施した。使用した透水性型枠は、コンクリート中の余剰水と気泡を通過させる透水性シートと、透過したものを速やかに型枠外に排出させる排水シート（不織布）を接着工程により貼り合せた一枚構造である。増し厚コンクリートの横断面図を図-1に、透水性型枠の概要を図-2に示す。

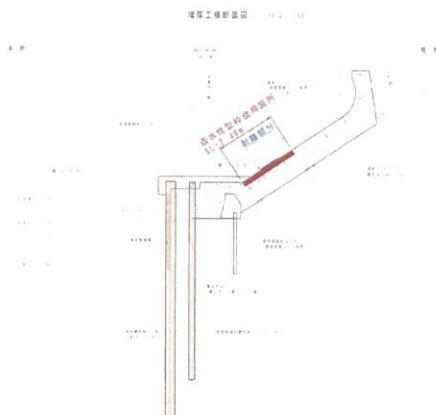


図-1 コンクリート増し厚工法の横断面図

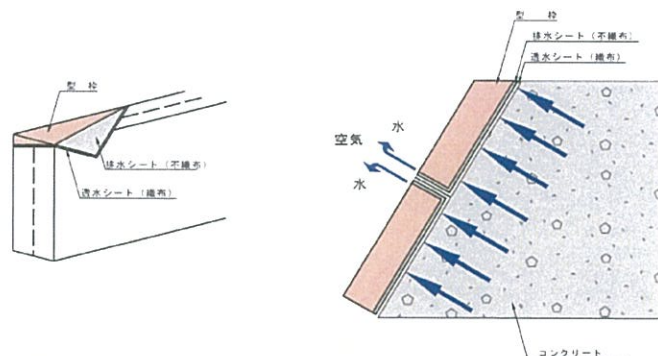


図-2 透水性型枠の概要図

3. 目視調査・表面剥離 発生率及び発生状況（透水性型枠使用時）

増し厚コンクリートの打設時期は、平成25年7月から8月であり、最初にコンクリート表面剥離の発生が確認されたのは打設から7日後の脱型日7月18日である。透水性型枠の使用と締固めにより、モルタル分がコンクリート表面に集められた状態で脱型直後の写真-1からは表面部分背面に単位水量が多くなったことが観察された。コンクリート表面の剥離状態は、剥離厚さ3mmから5mmと比較的均一で非常に薄層である。コンクリート骨材が凍害により剥離するポップアウト状の剥離ではなく、剥離片裏側界面には小さな気泡跡が無数にあることが写真-2から確認された。

剥離片裏側界面

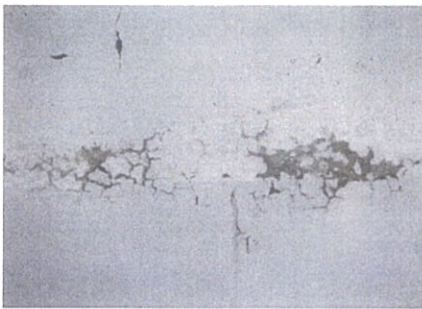


写真-1 脱型直後の剥離箇所状況

写真-2 コンクリート剥離片裏界面写真

当初は、コンクリートの打設時期が外気温度25℃以上の時期に施工したため、外気温度の上昇と材料受け入れ待機時間及びポンプ打設の圧送負荷によってスランプが大幅に低下し、それに伴って締固め作業を要したことが悪循環となって表面剥離の発生を助長したと考えられた。しかしコンクリートの打ち込み時間を確認したところ所定の時間内で行われたことが打設記録から確認することができた。

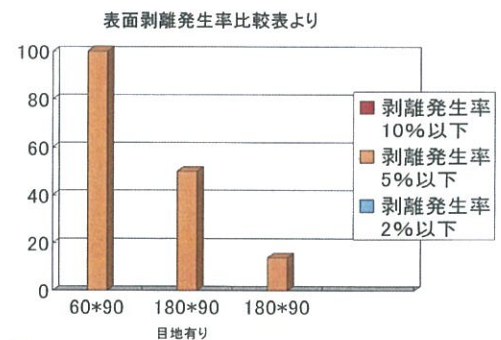
コンクリートの締固めは、内部振動バイブレーターと外部振動バイブレーターを同時に使用して作業を行った。コンクリート表面には沈下クラックやコールドジョイントの発生がないことから締固め方法には問題がないと考えられた。写真-2 剥離片裏界面写真にある小さな気泡群は、透水性型枠を使用して締固めを行ったことにより、コンクリート内部より集められた水分と空気が透水性型枠表面部分（コンクリート側）に排出できずに剥離した裏界面に集まったと推察される。使用した透水性型枠寸法が縦1800mm×横900mmの場合、剥離発生率5%以下が10%程度と少なく、縦1800mm×横900mmで10mmの目地有りの場合は剥離発生率5%以下が50%と上昇した。さらに、寸法を変更して縦600mm×横900mmの3分割に小割して透水性型枠の間に10mmの目地を設け排水性能を向上させて施工した結果、表面剥離部位の発生率を5%以下が100%に改善することができた。しかし、剥離発生を完全に防止することはできなかった。表面剥離発生率比較表 表-1 と型枠形状（寸法及び目地設置）による剥離発生率グラフ表-2 を下記に示す。

表-1 表面剥離部位の発生率比較表

表-2 剥離発生率グラフ

(2) 表面剥離部位の発生率比較表

コンクリート打設箇所	平均気温	平均湿度	剥離発生率	型枠形状区分
2013.7.11 コンクリート打設(5スパン)	27.7℃	79%	18.20%	化粧型枠(縦1800*横900)
2013.7.11 コンクリート打設(7スパン)			25.10%	化粧型枠(縦1800*横900)
2013.7.11 コンクリート打設(9スパン)			10.60%	化粧型枠(縦1800*横900)
2013.7.11 コンクリート打設(11スパン)			1.30%	化粧型枠(縦1800*横900)
2013.7.16 コンクリート打設(3スパン)	26.0℃	68%	8.60%	化粧型枠(縦1800*横900)
2013.7.16 コンクリート打設(13スパン)			9.60%	化粧型枠(縦1800*横900)
2013.7.16 コンクリート打設(15スパン)			6.30%	化粧型枠(縦1800*横900)
2013.7.30 コンクリート打設(10スパン)	27.4℃	79%	1.30%	化粧型枠(縦600*横900)
2013.7.30 コンクリート打設(14スパン)			3.40%	E型枠(縦1800*横900)+5mm目地
2013.7.30 コンクリート打設(16スパン)			7.00%	E型枠(縦1800*横900)+5mm目地
2013.8.02 コンクリート打設(8スパン)			1.50%	木製型枠(縦600*横900)
2013.8.02 コンクリート打設(12スパン)	26.9℃	81%	4.20%	E型枠(縦600*横900)+5mm目地
2013.8.07 コンクリート打設(4スパン)			0%	化粧型枠(縦900*横900)
2013.8.07 コンクリート打設(6スパン)			0%	木製型枠(縦900*横900)
平均値			6.93%	



4. 目視調査・コンクリート表面（法面）の調査（普通型枠使用時）

普通型枠を使用した1割5分勾配の法面では、コンクリート表面の気泡発生率は1.57%で気泡の平均深さは5mm程度であった。また、細粒で検出できない表面気泡は多数確認された。この結果から、構造物の法面勾配がゆるやかであるため、使用する型枠に関係なく内部気泡が抜けにくく表面気泡が顕著に表れたものと推察される。これは、表面気泡が生じて美観を損なうばかりか中性化などの耐久性の低下を早める要因とも考えられる。

5. 目視調査による表面剥離原因の推定

目視調査により剥離片裏界面にある小さな気泡群は、透水性型枠を使用して締固めを行ったことにより、内在する水分と空気が透水性型枠表面部分（コンクリート側）に排出できずに剥離した裏側界面に集まったと考

えられる。普通型枠使用時のコンクリート法面調査結果からも確認された通り、型枠法勾配が1割5分となだらかであり気泡が多数発生したにも関わらずコンクリート内部から表面外部に気泡を発散できなかったことが原因と考えられる。

これらの複合的な理由により、剥離の裏側界面に空気が集まり発散することなく細かな気泡層を形成したことが薄層の表面剥離が発生した原因と推察される。

6. 詳細調査による表面剥離原因の推定

6. 1 表面剥離発生箇所の叩き打音調査確認

ハンマーによるコンクリート表面の叩き打音確認を全面に実施した。剥離箇所は薄層で簡単に剥落した。

6. 2 表面剥離発生箇所の温度予測

コンクリートの温度上昇予測から外気温度27度でのコンクリート内部温度は30度以上と推定され、コンクリート内部の水分が時間の経過とともに早期に蒸発し、コンクリート成分の水和反応が促進することで硬化速度が進んだと推察される。また、増し厚寸法20cmの薄層では既設堤防コンクリートの温度により硬化の促進が考えられる。

6. 3 サーモグラフィー測定によるコンクリート内部欠陥調査

コンクリート増し厚工の施工範囲は、14スパン延長約194m、法長2.4mと長大であるため、打音確認では内部空隙箇所の見落としも考えられた。そのため確実にコンクリート内部空隙範囲を測定する方法として、剥離部分空隙内部の温度が健全部分より高温になり温度差を生じる性質を利用してコンクリート表面から放射される赤外線を映像として表示することができるサーモグラフィー測定方法を使用してコンクリート内部欠陥調査を行って健全性の確認を実施した。ハンマーによる叩き打音確認実施した部分以外で温度分布が高温となっている箇所をデジタルカメラによる可視画像と比較して7スパンで11箇所を表面剥離箇所と推定し、再度叩き打音調査を実施した。その結果、表面剥離箇所を確認し特定することができた。

6. 4 シュミットハンマーによる強度測定

コンクリート表面の健全な部位と表面剥離箇所の剥離表面を除去した後の部位について強度の確認を実施した。比較した試験体数も同等でなく剥離除去箇所の表面は研磨を行わずに測定をした。健全部で31.8 N/mm²、テストピース圧縮強度試験体で30.8 N/mm²、表面剥離箇所で26.1 N/mm²であり、表面剥離部位は健全部の15%程度強度の低下を確認したが設計強度は満足した。

6. 5 原因推定

ハンマーによる叩き打音調査の資料により、表層部分のコンクリート表面から5mm程度では排水に伴う内部水分の移動により、単位水量が普通型枠を使用した場合に比べて増大したことにより貧配合で割れやすい剥離界面を形成したことが原因と考えられる。また、コンクリートの温度上昇予測からも外気温度27度でのコンクリート打ち込み温度は推定30度以上であり、増し厚20cmの薄層では既設堤防コンクリート温度による硬化が促進されたと考えられる。そして、サーモグラフィー測定結果からも型枠外部へ排出、排水できなくなった多くの内在空気と水分が締固めによる移動によってコンクリート表面部分の背面に集中集積し空気気泡群が誕生し剥離部位を形成したことが原因と考えられる。

7. 補修工・断面修復材料及び工法の選定

次に補修工法について述べる。材料は断面修復材料の要求性能から、①既存コンクリートと一体性がよいこと。②コンクリートと同等以上の強度を有すること。③コンクリートと同等の弾性係数や熱膨張係数を有すること。④寸法安定性がよく乾燥収縮等による長さ変化が小さく、長期接着性に優れていること。⑤安価であること等を検討して繊維補強型超速硬性ポリマーセメントモルタルを採用した。

8. 表面剥離補修工

断面修復工法は断面修復箇所の補修厚さが10mm以下で小規模に点在しているため、左官工法の採用を決

定した。剥離箇所に応じた断面修復工法の補修手順は、以下に示すとおりである。

- ステップ①：グラインダーによる研磨
- ステップ②：高圧洗浄機による剥離除去箇所の清掃
- ステップ③：表面補修用接着剤塗布
- ステップ④：繊維補強型超速硬性ポリマーセメントモルタルのコテ圧充填

9. 剥離補修後の表面剥離発生付近のひび割れ調査・確認状況

剥離補修後の表面ひび割れ原因の推定

表面剥離発生付近のひび割れ調査・確認
 ・表面剥離部位補修完了後(6か月経過後)のひび割れ発生状況



表-3 表面剥離部位補修完了後の周辺ひび割れ発生状況

表面剥離部位のひび割れ発生状況		
コンクリート打設箇所	型枠形状区分	表面ひび割れ発生状況
2013.7.11 コンクリート打設(5スパン)	化粧型枠(縦1800*横900)	少ない
2013.7.11 コンクリート打設(7スパン)	化粧型枠(縦1800*横900)	少ない
2013.7.11 コンクリート打設(9スパン)	化粧型枠(縦1800*横900)	少ない
2013.7.11 コンクリート打設(11スパン)	化粧型枠(縦1800*横900)	少ない
2013.7.16 コンクリート打設(3スパン)	化粧型枠(縦1800*横900)	多い
2013.7.16 コンクリート打設(13スパン)	化粧型枠(縦1800*横900)	少ない
2013.7.16 コンクリート打設(15スパン)	化粧型枠(縦1800*横900)	少ない
2013.7.30 コンクリート打設(10スパン)	化粧型枠(縦600*横900)	多い
2013.7.30 コンクリート打設(14スパン)	化粧型枠(縦1800*横900)+5mm目地	多い
2013.7.30 コンクリート打設(16スパン)	化粧型枠(縦1800*横900)+5mm目地	多い
2013.8.02 コンクリート打設(8スパン)	木製型枠(縦600*横900)	多い
2013.8.02 コンクリート打設(12スパン)	化粧型枠(縦600*横900)+5mm目地	多い
2013.8.07 コンクリート打設(4スパン)	化粧型枠(縦900*横900)	多い
2013.8.07 コンクリート打設(6スパン)	木製型枠(縦900*横900)	多い

写真-3 表面剥離部位補修完了後のひび割れ状況

透水性型枠の使用により、モルタル分が表面に集められ内部の水分が型枠外部に排水できずにコンクリート表面部裏面の水量が多くなったと考えられる。これにより、写真-3に示すように乾燥収縮によるひび割れが発生し易くなったと推察される。また、水セメント比が普通型枠を使用した場合に比べて増大したことで単位水量と単位セメント量のバランスの変化により乾燥収縮によるひび割れが発生しやすくなったと考えられる。そして、既設コンクリート表面の増し厚コンクリートをそれよりも収縮量の少ない既設コンクリートが拘束したことによる拘束ひび割れが発生したと考えられる。ただし、この拘束はマスコンクリートの温度応力による外部拘束とは異なるものだと考える。補修完了後の周辺ひび割れ発生状況を表-3に示す。

10. まとめ

今回の施工では、堤防勾配が1割5分となだらかで内部気泡の表面発生が予測されたため表面気泡排除を目的に排水性能と透水性能を兼ね備えた透水性型枠を使用した。表面剥離を確認した後、不具合を発生させないためには透水性型枠の排水、排出処理を確実にできる細かな目地間隔寸法と組立寸法の計画を検討し実施することが大切であると考えた。そこでこれを抑制するために透水性型枠寸法を小分割にして目地を設けることで内部水と内在空気の排水排出を増加させ表面剥離の発生率を抑制した。しかし、透水性型枠はコンクリート表面に気泡を発生させないことが特徴であるため、長大で勾配のゆるい法面では内部気泡群がコンクリート表面裏側に保留することを写真-2剥離片裏界面写真より確認した。今後このような事例を発生させないためには、外気温度、既設構造物の影響などの環境要因や法勾配、構造物の寸法等を検討して透水性型枠を採用することが重要である。

剥離補修後、微細なひび割れが表面剥離周辺に確認される新たな問題が発生した。表面剥離には至らなかったが表面剥離の発生に起因する型枠外部へ排出、排水できなかつた内在空気と水分等がひび割れ発生に関係していると推察される。今回、補修後にこのような結果を経験したことから施工方法の検討、計画及び工夫が今後ますます重要な課題であると再認識している。

キーワード：サーモグラフィー検査技術・

連絡先：埼玉県さいたま市中央区大戸3-6-11 (ケイプラス株式会社) TEL: FAX: 048-638-0084

《参考文献》：セメント系補修・補強材料の基礎知識 第2版 セメント協会発行

音響探査法によるRC構造物の欠陥探査

佐藤工業㈱ 歌川 紀之
桐蔭横浜大学 杉本 恒美

(

(要旨) 書叩き点検を合理化する技術である、音響探査法の技術開発を進めている。本報告では音響探査法の概要と実構造物へ適用した事例を示す。音響探査法とは叩き点検と同様な原理で、ハンマー打撃に代わりにスピーカーからの音波を用い、耳で聞いて判断する代わりにレーザードプラ測定機による振動速度結果、分析を用いることとなる。本技術により、10m離れた場所からの探査が可能となり、例えばトンネルの点検では、高所作業車を使わず、路面上からの測定も可能となる。

音響探査法による RC構造物の欠陥探査

日本診断士会業務体験報告会 H26.11.28
佐藤工業㈱ 歌川紀之 黒田千歳
桐蔭横浜大学 杉本恒美
明彦技研 片倉景彦

今日、話をする内容

- 1. 音響探査法とは
- 2. 円形空洞試験体を用いた性能評価
- 3. 現地構造物への適用

1. 音響探査法とは

- 叩き点検を代替する技術
- 音響探査法のメリット
- 音響探査法の仕組み

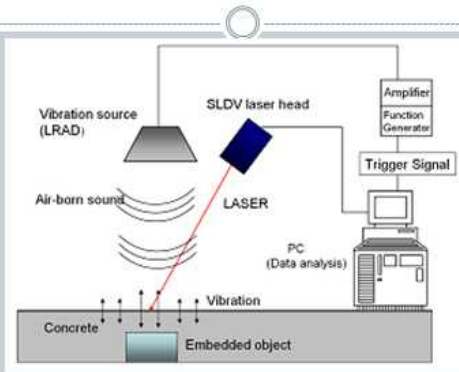
コンクリートの点検を自動化・高速化する技術

- 目視点検について
光学的技術(CCDカメラ他)の利用、ひび割れの自動認識技術・・・
<完成の域に近づいている>
- 叩き点検について
赤外線技術の利用、打音自動化技術・・・
<未だ、完成されていない>
- その他
変形測定技術の利用(トンネルの変形)、電磁波技術の利用(コンクリート内部欠陥、背面空洞)・・・
<はかり、浮きなどの欠陥(叩き点検の対象)への対応は難しい>

キーワード：叩き点検，浮き・剥離

連絡先：神奈川県厚木市森の里青山14-10 [TEL:046-270-3091](tel:046-270-3091) FAX:046-270-3092 E-mail:utagawa@satokogyo.co.jp

音響探査法とは

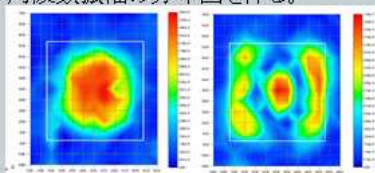


測定風景(橋梁桁部)



欠陥の探査アルゴリズム

- 自動的に、効率よく、精度高く、欠陥位置を見つけるためのアルゴリズムを開発する。
- 「欠陥位置を見つける」=「板の固有振動を見つける」
ピーク周波数振幅の分布図を作る。



試験体の欠陥の形状が単純なケースでは有効であるが、複雑な形状の場合は難しい。

2. 円形空洞試験体を用いた性能検討と欠陥の有無の探査法

- 円形空洞試験体⇒平面規模と深さ(空洞までの)を変化させた。
- 叩き点検で、どこまで分かる？
- 音響探査法によりどこまで分かる？
 - ①ピーク周波数・ピーク音圧を用いた評価
 - ②振動エネルギー比を用いた評価

円形欠陥試験体の概要



- 厚さ2.5cmの発泡スチロールで欠陥を表現。
- 平面規模は直径5cm~30cm、深さ(表面から発泡スチロールまでの距離)は、1cm~10cm、20種類。

探査目標の設定(叩き点検の結果)

表-2 叩き点検の結果

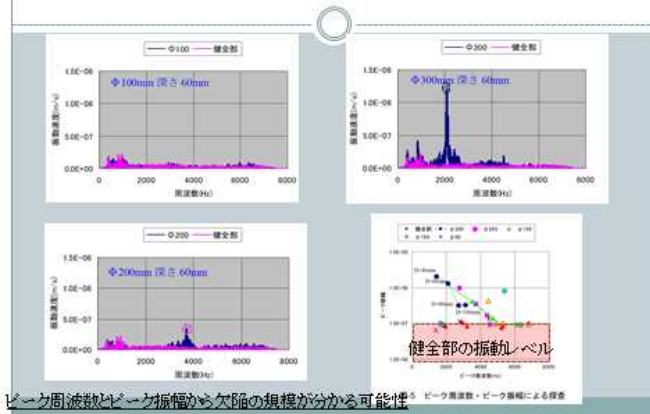
	径さ 100	径さ 80	径さ 60	径さ 40	径さ 20	径さ 10
φ 50	-	-	f150-60 △× 66406Hz	f50-40 △× 44271Hz	f50-20 ×△ 22145Hz	f50-10 △△ 11063Hz
φ 100	-	f100-80 ×× 22135Hz	f100-60 ×△ 16602Hz	f100-40 ×○ 11063Hz	f100-20 △○ 5534Hz	-
φ 150	f150-100 ×× 12297Hz	f150-80 ×△ 9838Hz	f150-60 △△ 7279Hz	f150-40 △○ 5534Hz	f150-20 △○ 2767Hz	-
φ 200	f200-100 ×○ 6913Hz	f200-80 ×○ 5534Hz	f200-60 ○○ 4150Hz	f200-40 ○○ 2767Hz	f200-20 ○○ 1383Hz	-
φ 300	f300-100 ○○ 3074Hz	f300-80 ○○ 2459Hz	f300-60 ○○ 1845Hz	f300-40 ○○ 1383Hz	f300-20 ○○ 888Hz	-

ハンマー1の結果
ハンマー2の結果
1次の固有周波数(厳密解)



3名の被験者が欠陥と判定:○、2名ないし1名が欠陥と判定:△、3名とも健全と判定:×

ピーク周波数・ピーク振幅



振動エネルギー比を用いた探査アルゴリズム

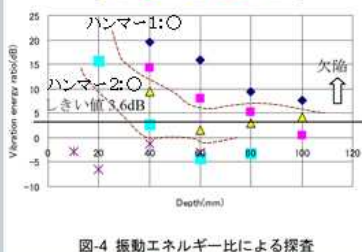
- 最小振動エネルギーの点を調べる。(健全部)
- 各点の振動エネルギーを計算する。
- 振動エネルギー比を求める。(周波数範囲の決定)

$$VER(VibrationEnergyRatio) = 10 \text{Log}_{10} \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} (X_{defective_part}(\omega))^2 d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} (X_{healthy_part}(\omega))^2 d\omega}$$

- しきい値と比較する。(しきい値の決定方法)

振動エネルギー比による探査

- しきい値を3.6とするとハンマー1と2の間ぐらいの探査性能



3. 実構造物への適用

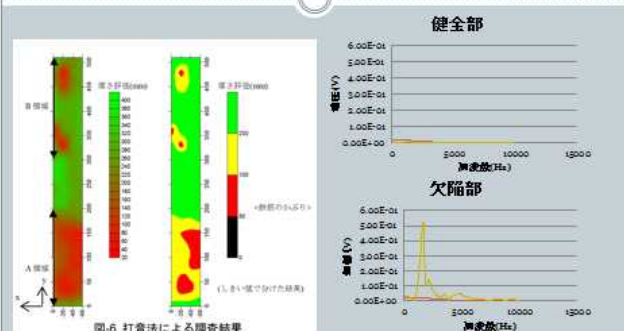
- 高速道路のRC床版の探査
- 高速道路下のボックスカルバートの探査

事例1 対象としたRC床版

- 日本海側の海岸に近い高速道路の片側2車線のRC床版(支間長15m)で、建設から30年経過している。
- 海岸からの距離は200mである。
- 塩害による浮き・はく離の欠陥が生じており、表面被覆工事の施工がなされている。



打音法による調査結果



音響探査法による測定

パルス持続時間	3ms
周波数変調インターバル	200Hz
開始-終了周波数	500-5100Hz
パルス間インターバル	50ms
加算平均回数	10回

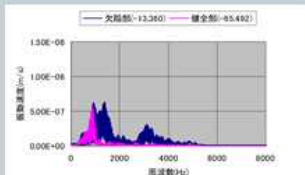


図-7 音響探査法による振動測定結果



写真-4 音響探査による測定

振動エネルギー比による探査

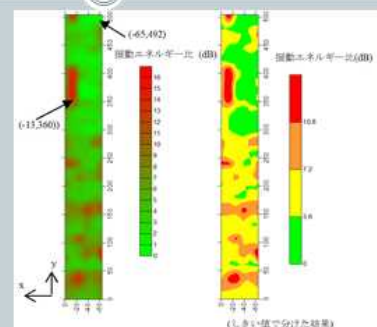


図-8 振動エネルギー比による探査結果

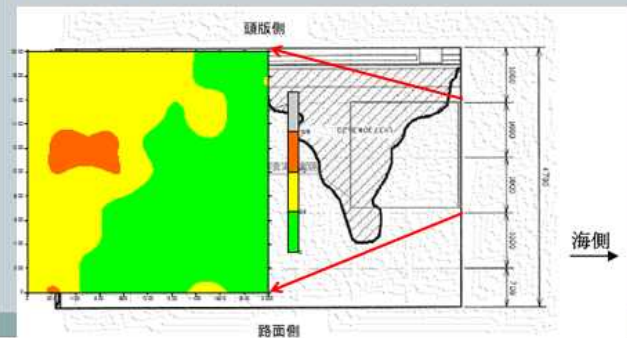
対象としたボックスカルバート

- ・高速道路構造物で、建設後30年経過、海岸から200m離れた位置にあり塩害を受けた後に表面被覆などの補修がなされている。
- ・ボックスカルバートの大きさは、延長30m、高さ4.7m、幅6mである。
- ・ボックスカルバートの壁面および天井面の探査を実施した。



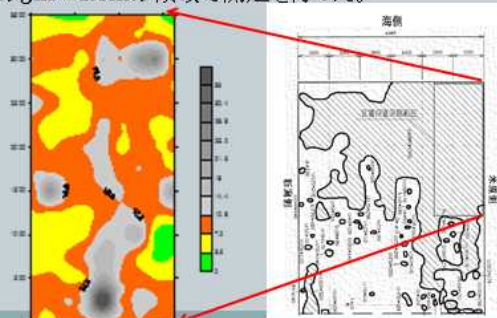
壁面部の探査結果

- ・海側の2m*2mの領域の探査結果



天井部の測定結果

- ・海側の3m x 1.6mの領域で測定を行った。



まとめ

- NCAI法を現地構造物へ適用した。
- ・NCAI法は、遠隔地からのコンクリート表層の浮き、はく離探査に用いることができる。
- ・供用中の高速道路における橋梁床版下面、ボックスカルバート(壁面、天井面)に対し、NCAI法によりコンクリート表層の欠陥探査ができる。得られた結果は、叩き点検や打音法の結果と同様であった。
- ・今後の課題
騒音、振動測定におけるノイズ対策、測定角度の影響

地下構造物の劣化状況と健全性の維持・保全対策

法人 東京電設サービス㈱ ○佐野 正樹
 法人 東京電設サービス㈱ 佐藤 亘

鉄筋コンクリート地下構造物の劣化は、地下水の漏水の影響により促進されることが知られている。
 本稿では、漏水に起因した地下構造物の劣化状況を報告するとともに、地下構造物の漏水補修に長期耐久性を目指した新たな漏水補修工法（STTG 工法）を東京電力㈱と共同で開発したため、この工法についての特長ならびに現場適用例について紹介する。
 本工法は、硬化後の伸びや付着性に優れる石油樹脂・アクリル系注入材を主材とするため、一旦注入すれば温度変化や地震等でコンクリートの目地が開いてもその挙動に追随し、永く止水性能を維持することを特長とする。

1. 地下構造物の特性と課題

- 地下の大型ライフラインは、強固な鉄筋コンクリートで構築され、地下水位より深い位置に埋設されている例が多い。
- 施工面から一度に大量のコンクリートを打設することが出来ないため構造物には打継ぎが生じる。
- この打継ぎは、洞道内温度の変化（コンクリートの伸縮）や地震等の地盤変位に目開きが発生し洞道内へ地下水が流入する場合がある。
- 長い年月に亘る漏水は、コンクリートや鉄筋の劣化を促進し、補修費用の増加につながる。また構造物内への漏水とともに土砂が流入した場合、道路陥没等にもつながる。

各ライフライン設備の埋設事例

2. 鉄筋コンクリート構造物の主な劣化原因

- (1) 中性化**
 大気中の二酸化炭素がコンクリート内に進入し炭酸塩化反応を起こすことにより、PHが低下しコンクリート内部の鉄筋を錆びさせる現象。コンクリートのひび割れ等を促進する。
- (2) 塩害**
 鉄筋等が塩化物イオンの存在により腐食が促進し、腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れや剥離を引き起こしたり、鉄筋の減肉を引き起こす現象。
- (3) アルカリシリカ反応**
 セメントのアルカリは水和反応の過程で、コンクリートに内在する水溶液に溶け出して水酸化アルカリを主成分とする強アルカリ性を呈する。アルカリシリカ反応生成物を含む骨材は、コンクリート中の強アルカリ水溶液と反応して、コンクリートに異常な膨張やひび割れが発生させる。骨材産地由来し、西日本で多くの被害が報告されている。

2. 鉄筋コンクリート構造物の主な劣化原因

- (4) 凍害**
 コンクリート中の水分が0℃以下になったときの凍結膨張により発生するものであり長年の凍結融解作用によりコンクリートが徐々に劣化する現象。
- (5) 化学的腐食**
 化学的作用を受け、セメント硬化体を構成する水和生成物が結合能力を失っていく現象を総称して化学的腐食という。この要因は酸類、アルカリ類、油類、腐食性ガスなど多岐にわたるが、土壌に含まれる硫酸イオンによる劣化が多く報告されている。
- (6) その他**
 火災、疲労（繰り返し荷重）、風化・老老化など

2. 鉄筋コンクリート構造物の主な劣化原因

- 地下構造物では、地下水に内在する腐食促進成分が漏水と共に構造物内へ流入することによる**塩害**や**化学的腐食**が劣化の原因である場合が多い。
- また、**中性化**によりひび割れが生じた構造物では、地下水の浸入により更に鉄筋の腐食が進展する。
- この他、地盤沈下や地下水位の変動による上載荷重の増加と、**塩害等による劣化**により、軸方向のひび割れと内空変形が発生しているケースもある。
- これらの劣化を放置すれば、やがて構造物の耐力を低下させ、大規模補修や設備の更新を余儀なくされるケースがある。
- このため、地下構造物を健全に保つためには、**漏水を止める**ことが最も重要であるといえる。

3. 地下構造物の異常例

セグメントの腐食

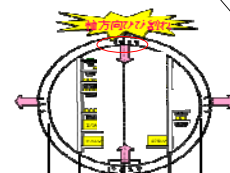
ダクタイル鉄製	構造体のダクタイルセグメントの腐食(最大4.8mm減少)
鉄筋コンクリート製	構造体の一部であるセグメント間連結用ボルトの腐食
劣化原因	セグメントの継手から塩化物イオンを含む地下水が構造物内浸入し錆が発生し、腐食が進行。

5

3. 地下構造物の異常例

荷重増加と部材劣化の複合

- > 鉄筋コンクリート製
- > 荷重増加と鉄筋等腐食によるコンクリートのひび割れ、内空変形



中性化も進展はあまり見られない
鉄筋、フラットバー(構造部材)の腐食
軸方向ひび割れの集中

【劣化原因】
軟弱地盤の沈下、地下水の変動による上載荷重の増加と、塩化物イオンを含む地下水の浸入により鉄筋等の構造部材が腐食したことが複合的に作用し、ひび割れと内空変形が進展。

6

3. 地下構造物の異常例

その他、地下構造物内面の顕著な劣化状況

左側壁 コンクリート剥離・頂版 骨材露出状況
鉄筋腐食状況

右側壁 コンクリート剥離・鉄筋腐食状況

> 側壁部被りコンクリートの浮き・剥離・剥落及び鉄筋腐食が発生。
> コンクリート表面のモルタルが流出、骨材露出。
これらの殆んどは建設時の鉄筋被り不足等に加え、地下水の浸入による腐食進展が原因

7

4. 漏水補修の現状と課題

現状

- > 現在広く使用されている工法は“ウレタン系注入工法”である。
- > ウレタン材を使った工法は、即効性に優れている等の利便性から、漏水補修工法の主流として採用されてきた。



現注入工法（ドリル削孔） 現注入工法（注入） 硬化様態

課題

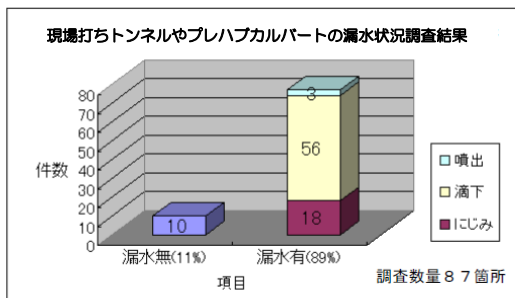
- > ウレタン材は、大量の漏水の対して即効性はあるが、付着性・伸びが殆ど無く、継ぎ目等の変位に追随できないため、条件によっては補修後に再漏水しているケースがある。

8

4. 漏水補修の現状と課題

漏水補修後の実態調査1

■現場打ちトンネルやプレハブカルバートの継ぎ目の約90%で漏水が発生

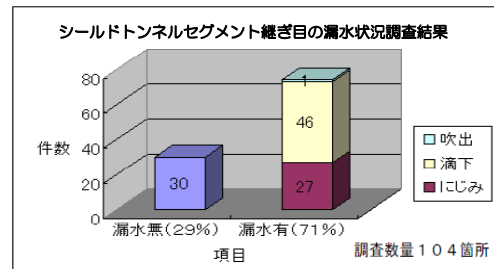


9

4. 漏水補修の現状と課題

漏水補修後の実態調査2

■シールドトンネルのセグメント継ぎ目では、約70%で漏水が発生

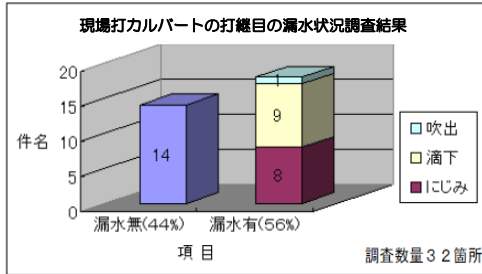


10

4. 漏水補修の現状と課題

漏水補修後の実態調査3

■現場打カルバートの打継目からも、約60%で漏水が発生



11

5. 新しい漏水補修工法の開発 (STTG工法)

開発の経緯

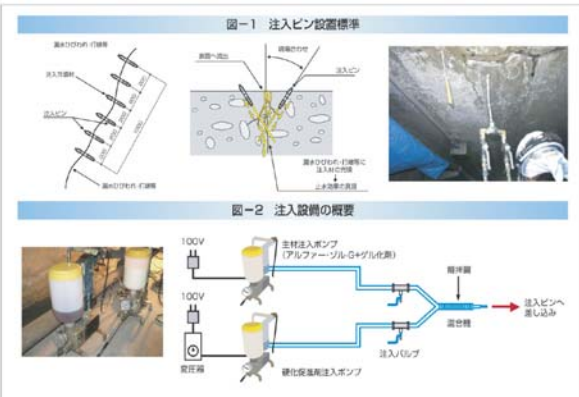
- ウレタン注入工法は安価なため、最もポピュラーな漏水補修工法であるが、材料の脆弱性から補修後の再漏水が顕在化。
- 長期耐久性に優れたアクリル樹脂系注入工法は、材料コストが高価。
- 石油樹脂・アクリル系注入工法は、硬化速度が遅いため漏水量の多い箇所の補修には不適。硬化後の性能はアクリル樹脂系注入工法と同等。材料は安価に入手可。



STTG工法は硬化促進剤を同時注入し、石油樹脂・アクリル系材料の硬化速度を適度に速め、多量漏水部の補修に特化して開発。

12

5. 新しい漏水補修工法の開発 (STTG工法)



13

6. STTG工法の特長

【性能確認試験方法】

○引張り特性試験例

試験機：オートグラフAG-Xplus (株式会社島津製作所)

○付着強度試験例

試験機：建研式引張試験器 (丸東製作所)

ロードセル容量：1kN

試験速度：50mm/min

標線間距離：25mm



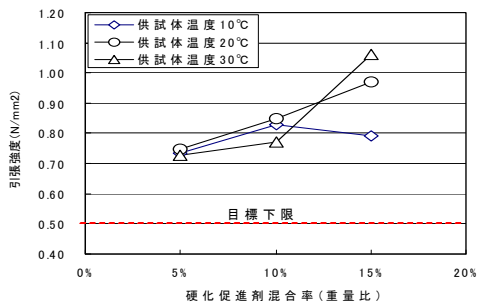
14

6. STTG工法の特長

【要求性能】

◆引張強度：0.5N/mm²以上 (水深50mの水圧に耐える)

【試験結果】



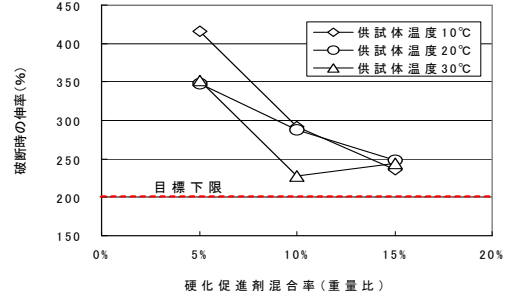
15

6. STTG工法の特長

【要求性能】

◆破壊ひずみ：200%以上 (1mmの隙間が3mmになっても追従)

【試験結果】



16

6. STTG工法の特長

【要求性能】

◆付着性能：付着強度 \geq 引張強度（材料が破断しても付着している）

【試験結果】

付着強度と引張強度の関係

混合率	試験体温度	(A)付着強度	(B)引張強度	要求性能
		N/mm ² (n=5 平均) 除く最大・最小	N/mm ² (n=5 平均)	
15%	30℃	1.26	1.06	OK
	20℃	1.09	0.97	OK
	10℃	0.93	0.79	OK
10%	30℃	1.07	0.77	OK
	20℃	0.89	0.85	OK
	10℃	1.03	0.83	OK
5%	30℃	0.90	0.73	OK
	20℃	0.84	0.75	OK
	10℃	0.82	0.73	OK

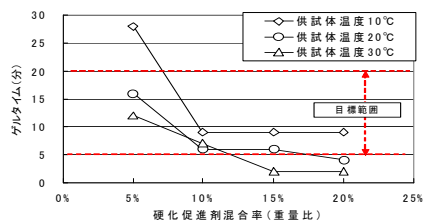
17

6. STTG工法の特長

【要求性能】

クラックに行きわたるまでに必要な時間と、作業の効率性（材料ロス減少）の両方を勘案し、ゲルタイムは5分以上20分以内

【試験結果】



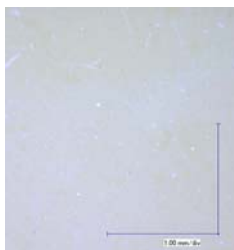
硬化促進剤は、主材に対して重量比で5%~10%の範囲で施工

18

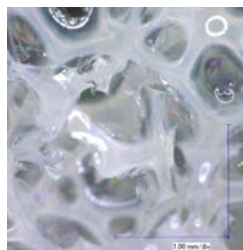
6. STTG工法の特長

【顕微鏡写真】

メーカー：株式会社キーエンス
定機器名：デジタルマイクロスコープ
型 式：VHX-100F
倍 率：×100



STTG



疎水性ウレタン

19

7. 施工実績

46件の漏水補修を本工法により実施（H26年9月現在）

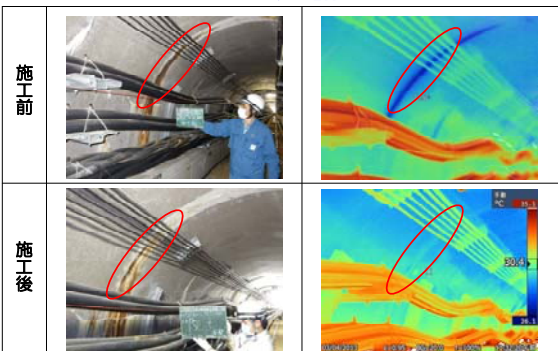
- 地中送電用洞道の現場打コンクリート打継目他、シールドセグメント継目、NATM覆工打継目、発電用ダム の 監 査 廊 打 継 目 等 に 適 用。
- 実績最大地下水圧は約0.2N/mm²。
- 補修前の漏水量は最大約12ℓ/min。
- 最も早い施工からは約1年半経過しているが再漏水なし。



20

7. 施工実績

サーモグラフィックによる止水効果の確認



21

8. おわりに

- 前述の通り地下構造物の劣化の原因は、地下水の構造物内への浸入に起因するケースが多い。
- 止水材として優れた特性がある石油樹脂アクリル系注入材を主材とし、更にゲルタイムを早め、多量漏水箇所にも適用可能な新たな漏水補修工法を開発。
- 従来使用していたウレタン系止水材は、条件によっては数年で再漏水するため、10年以上の長期の止水効果をこの工法に期待するもの。
- 今後は、補修箇所の止水状況調査を継続的に行い長期耐久性に関する定量的な評価を実施していく予定。
- 本工法は、「止水材料、止水工法、及び注入装置」について特許を取得（特許第5300162号）、広く普及することを目的とし、「一般社団法人STTG工法協会」を設立。

22

変状調査並びに変状図作成についての体験報告

鳥取県コンクリート診断士会
株式会社ジェネシス 米村 由起穂
同 上 奥田 隆幸

1. はじめに

コンクリート構造物の補修設計において、変状調査並びに変状図の作成は必要不可欠な項目である。これらを基に、ひび割れ、剥離・剥落、鉄筋露出などの変状調査から数量を求め、補修設計数量を算出することが補修設計の基本である。しかし、工事発注後に施工業者が照査し設計数量と異なりトラブルとなるケースが見受けられる。

劣化変状調査は、ひび割れなどの変状が多い構造物に対し、限られた予算と時間の中で正確にこれらの延長、幅、位置などを調査することが求められ困窮をきわめる。

一方、より正確な変状図を作成することは、着工時のトラブル解消のためだけではなく、経過観察・追跡調査という維持管理上の観点からも重要な課題である。

本報文では、これらの課題に対し、これまでの体験から得た各調査手法における留意点また、今後の取組について記述する。

2. 調査手法

2.1 変状調査(現地調査)

変状調査には、調査方法別に

- ・赤外線カメラによる浮き調査
- ・クラックスケール付トータルステーションによるひび割れ調査
- ・望遠カメラなどにより撮影した画像による変状調査
- ・無人ヘリコプターにより撮影した画像による変状調査



がある。

これらを①作業の安全性・効率性を考慮し、特殊計測器を用いた調査手法とすると②比較的原始的ではあるが、近接目視により変状箇所にチョーキングを行い、それをスケッチ等により図面化する調査手法に大別される。

平成26年6月に国土交通省 道路局 国道・防災課より施行された「橋梁定期点検要領」において定期点検は近接目視により行うことを基本とすると明記されている。我社は従前より②の人の視覚・聴覚に頼る調査方法を採択してきたが、構造物の形状・周辺状況などによっては、容易に近接目視ができない場合もあるため、①の手法を取り入れることによって効率的で安全な調査が可能となることが考えられる。

よって、表2.1.1に私どもがこれまで活用してきた近接目視手法のうち、代表的な2手法(橋梁点検車、ロープアクセス)についてその特徴等を示し、②の短所を整理することによって、①の長所を検討し今後の方向性を考察する。

表2.1.1 近接目視手法

近接目視手法	橋梁点検車	ロープアクセス
概要	文字通り橋梁点検車を用いて近接目視を行う手法で、橋梁上部工下面に対しての近接目視には最も一般的で有効である。	ロープ並びに特殊装備を用い近接目視を行う手法で、橋梁点検車では近接目視困難な箇所等で近接目視が可能である。
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・短時間で多くの範囲を的確に目視できる。 ・比較的特殊な技術を要さないため、短期間で操作可能である(特別教育等の講習は必要)。 	<ul style="list-style-type: none"> ・あらゆる高所、難所の構造物に対し近接目視が可能である。 ・この技術を安全対策(転落防止措置)として活用できる。 *ロープを容易に伸縮することが可能なため安全帯で作業するより、作業性に優れ、より安全である。
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・車両が乗入れできない箇所(歩道橋、堰堤など)並びに点検車が届かない箇所(ハイピュアなど)では、適用できない。 ・交通規制を伴うため申請、交通整理員の調整などに手間を要す。 ・歩道を有す橋梁などでは、特殊な点検車が必要となり手配に難を要す。 ・架空線、植生などが障害となる場合がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・橋梁点検車に比較すると作業効率が悪い。 ・装備品の使用用途、操作方法など特殊な知識を要する(専門機関での講習が必要)。 ・慣れないうちは、肉体的負荷が大きく長時間作業するのが困難である。 ・水平移動は熟練を要す。
<p>ロープアクセス状況写真</p> <p>*橋梁点検車による手法は一般的であるため、写真は省略</p>	 <p>急傾斜地調査状況</p>	 <p>橋梁下面調査状況</p>
	 <p>転落防止措置としてロープを活用</p>	 <p>同左拡大</p>

以上のような手法を現場状況に応じて採択し、近接目視による躯体変状のチョーキングを行ってきた(チョーキングは変状種別に応じ色分けを行う)。

チョーキング後は、変状図作成のための写真撮影を行うこととなるが、以下の点に留意が必要である。

- ・チョーキングが画像で判明できる範囲で分割して撮影する(目安：橋面などの明るい箇所=4~6mの画角、床版下面の暗所=1~3mの画角)。
- ・写真はできるだけ正対して撮影する(正対が困難な橋面などは、遠隔カメラをスタッフ等に取り付け撮影する写真2.1.1~写真2.1.2)。
- ・各写真は後にCAD図に貼り付けるため、より正確な変状図となるよう、躯体に既知寸法のマーキングを行うなどの作業を行い撮影する(写真2.1.2)。

市販の遠隔操作カメラ(Wi-Fi リモート制御)



写真2.1.1 遠隔カメラによる橋面撮影状況

4m×2m で舗装にマーキング

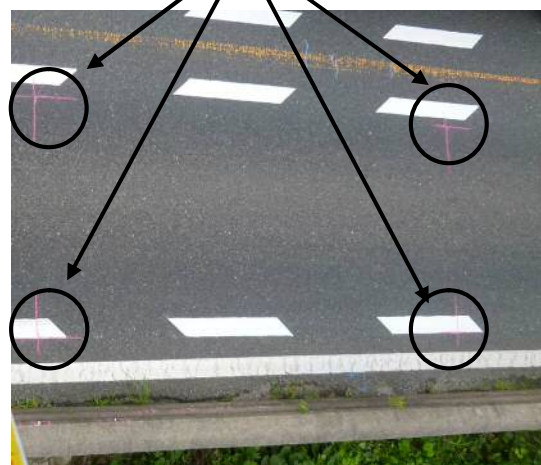


写真2.1.2 同左撮影画像

2.2 変状図作成

変状調査完了後は、分割撮影した画像を写真合成ソフトなどでCAD図に貼り付け、変状をトレースする。この時、写真合成の方法は各ソフトに委ねられるが、主に以下の方法で合成する。

1) 矩形補正による合成

任意の寸法でマーキングした長方形(型枠の目地が見える場合はそれを利用)の4隅を指定し、その寸法であおり補正を行った各々の写真を接合する方法(表2.2.1)。

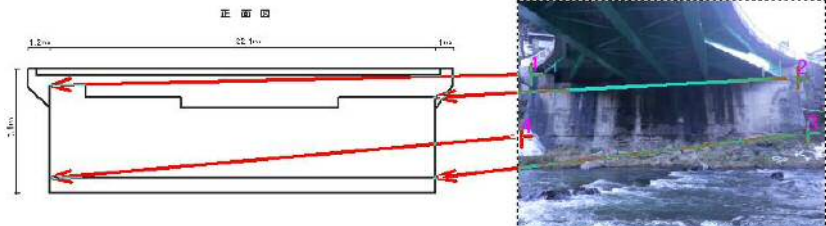
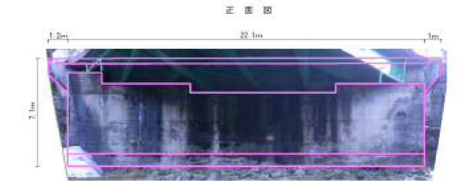
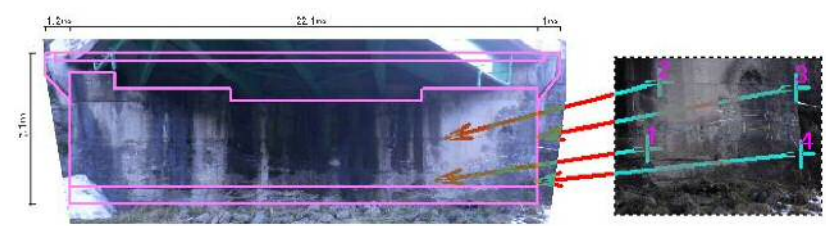
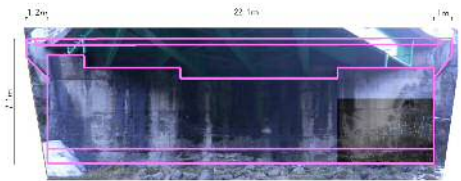
表2.2.1 矩形補正による合成

<p>(1) ○印4m×2mでマーキング</p>	<p>(2) 4隅を指定し寸法記入</p>	<p>(3) あおり補正完了</p> <p>この作業を繰り返し行い、各写真を接合する。</p>
--------------------------	-----------------------	---

2) 4点接合による合成

予めCAD図により形状が描画されておりかつ、橋台などのように1枚の写真で全面を撮影できる場合、先ず1枚の写真の4隅の4点を指定し、CAD図に貼り付ける。そのままでは画角が大きすぎチョーキングが不鮮明であるため、更に分割写真を4点接合により重ね合わせて貼り付ける方法(表2.2.2)。

表2.2.2 4点接合による合成

<p>(1) CAD図に1枚の写真の4点を指定し貼り付け</p> 	<p>(2) 貼り付け完了</p> <p>この状態でチョーキングが分かればよいが、見えないときは、(3)以降の作業を行う。</p> 
<p>(3) 分割拡大写真をさらに4点接合により重ね合わせて貼り付け</p> 	<p>(4) 分割写真貼り付け完了</p> <p>この作業を繰り返し行い、各分割写真を接合する。</p> 

以上のようにCAD図に写真を貼り付け、その後は各変状をトレースし、最後は写真を削除し変状図成果となるが、この手法はひび割れなどの変状が多い構造物でも比較的正確に作成することが可能である。

ある栈橋の調査では、スラブ上面のひび割れをチョーキングしているときは気付くことができなかったが、変状図を作成した後に、そのひび割れが梁に沿って発生していることが判明した体験もある(図2.2.1)。また、橋梁を例にとれば、橋面と床版下面の変状図を並べることで各々の変状に相関性がある場合、説明資料として有効なものとなる(図2.2.2)。

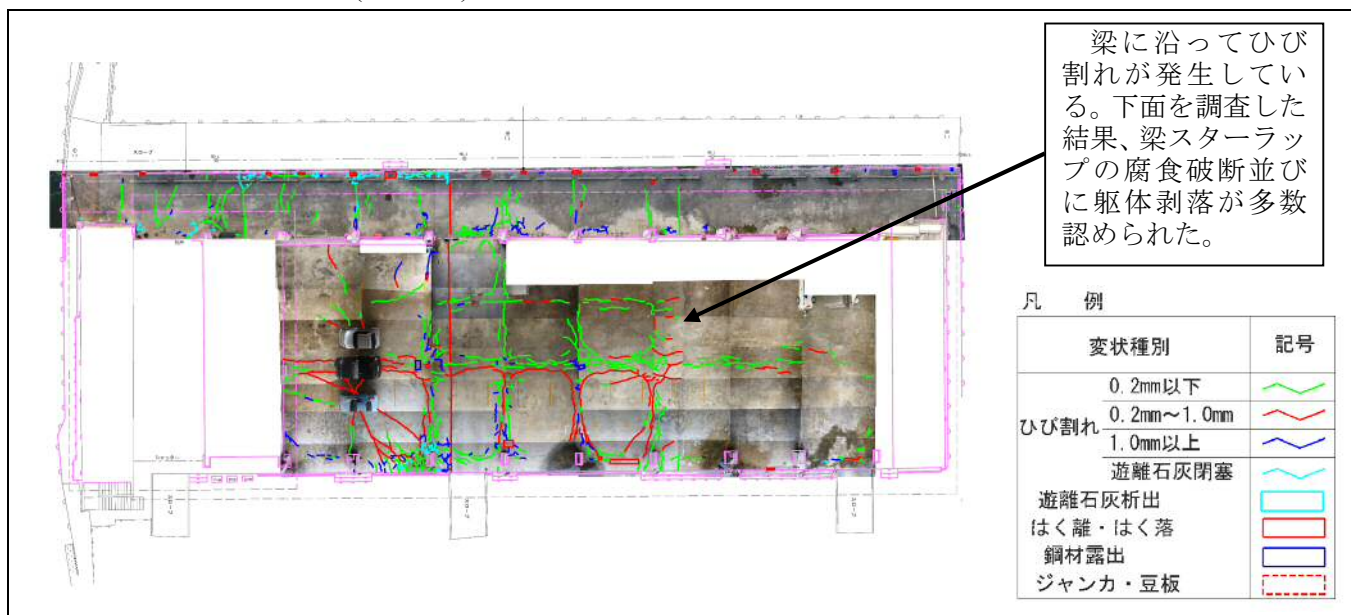
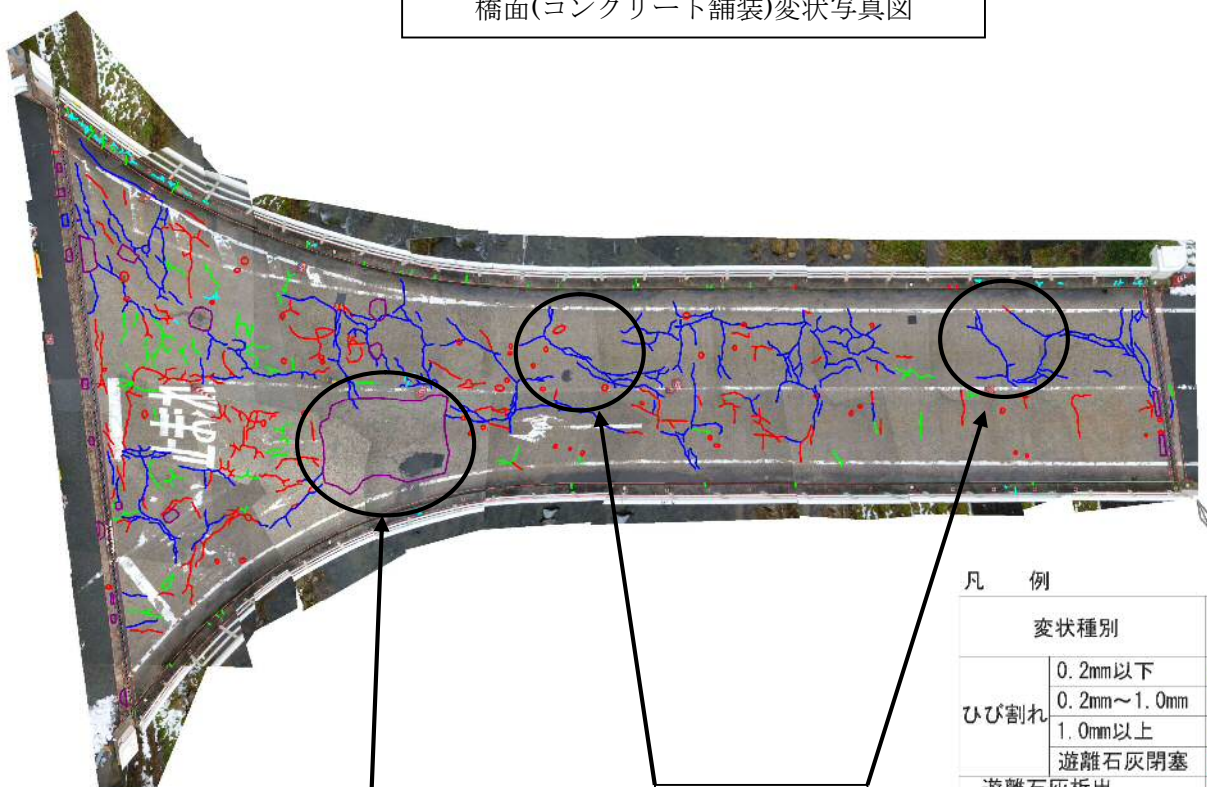


図2.2.1 栈橋スラブ上面接合写真(変状写真図)

橋面(コンクリート舗装)変状写真図

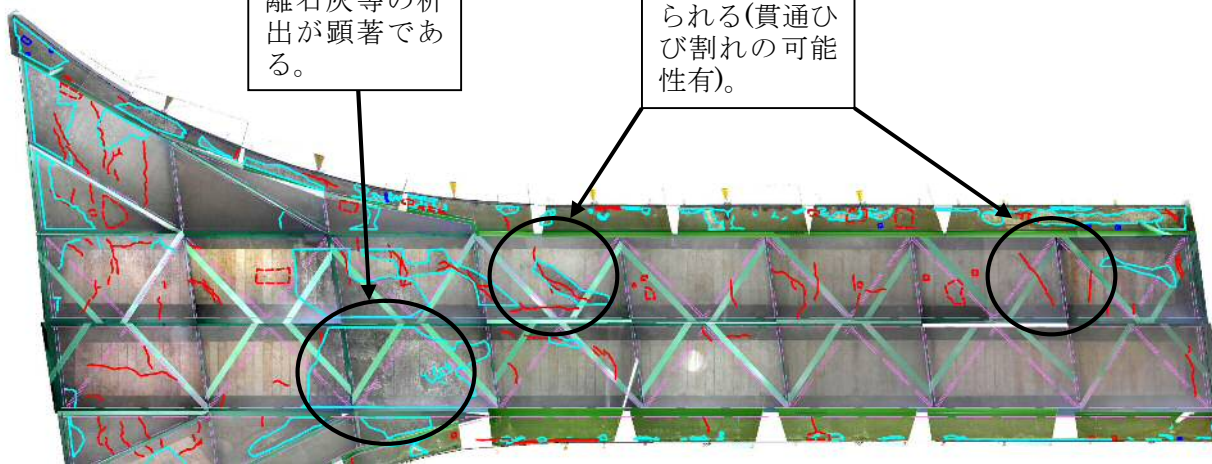


凡 例

変状種別		記号
ひび割れ	0.2mm以下	
	0.2mm~1.0mm	
	1.0mm以上	
遊離石灰閉塞		
遊離石灰析出		
はく離・はく落		
鋼材露出		
ポットホール		

コンクリート舗装の剥離・剥落箇所の床版には遊離石灰等の析出が顕著である。

部分的にコンクリート舗装と床版のひび割れ形状に相関性が認められる(貫通ひび割れの可能性有)。



凡 例

変状種別		記号
ひび割れ	0.2mm以下	
	0.2mm~1.0mm	
	1.0mm以上	
遊離石灰閉塞		
遊離石灰析出		
はく離・はく落		
鋼材露出		
ジャンカ・豆板		

床版下面変状写真図(上面からの透視)

図2.2.2 橋梁上面・下面の変状比較

3. 今後の取組について

3.1 現状の課題

現状、前項で記述したように変状図の作成を行っているが、この一連の作業の中で、CAD図への写真の貼り付け(以下 写真合成と称す)が最も時間と労力を要す。その作業に費やすおおよその時間を経験値から表

3.1.1に示す。この表からも分かるように、写真合成は労力を要するだけではなく、1日に可能な写真合成作業量は、写真

表 3.1.1 写真合成の1日当り作業量(経験値)

1人が1日で接合できる 写真の枚数 (変状トレース等は除く)	写真1枚 当りの画角 (例)	写真1枚 当りの面積	1人が1日で 接合できる 写真の面積
100枚程度	2m×1m の場合	2㎡	200㎡程度
	4m×2m の場合	8㎡	800㎡程度

1枚当りの画角に左右され同じ面積の構造物であっても撮影条件、部材形状などにより、1日の作業量が大きく変わってくることとなる。このことは、調査費用にも直接反映されるため、調査費用に十分な説明と根拠が必要となる。

このような課題を解決する目的で調査手法①に大別される3Dレーザースキャナーを活用した。

3.2 3Dレーザースキャナーの活用

1) 3Dレーザースキャナーの概要

3Dレーザースキャナーとは、ノンプリズムタイプの計測器であり、測定対象物に触れることなく、レーザーによって地形や構造物などを瞬時に3次元座標の情報をもった点群データとして復元することができる。また、同時に写真を機器内部で撮影し、写真画像と点群データを合成することで、点群に色彩を付与する(カラーマッピング)。以下に自社保有の3Dレーザースキャナーの仕様等を示す(写真3.2.1、表3.2.1、図3.2.1～図3.2.2)。



写真 3.2.1
3Dレーザースキャナー

表 3.2.1 3Dレーザースキャナー仕様

製造会社	株式会社トプコン
型式・名称	GLS-2000
測距方式	パルス方式
測角方式	インクリメタル方式
本体寸法	293(W)×152(D)×411.5(H)mm
本体質量	10kg(バッテリー含む)
使用温度範囲	-5℃～+45℃
防塵防滴性	IP54(JIS C0920:2003)

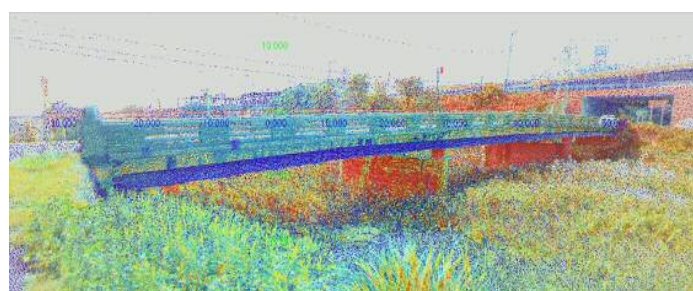


図 3.2.1 スキャナー画像例(点群と写真)

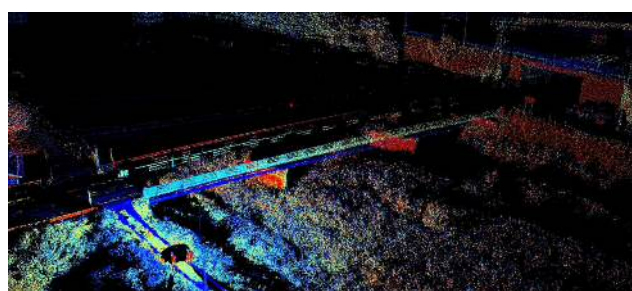


図 3.2.2 スキャナー画像例(点群のみ)

2) 3Dレーザースキャナーによる計測

本計測器の特性を踏まえ、ある橋梁の床版下面において、各色(赤・黄色・白・青・緑並びに参考として蛍光チョーク)のチョーキングを施し、3Dレーザースキャナーで計測した。なお計測は時間的制約により、床版下面の局所のみ、計測器と測定対象の距離は1パターン(水平距離並びに鉛直距離はともに約5m)とした(写真3.2.2~写真3.2.4)。

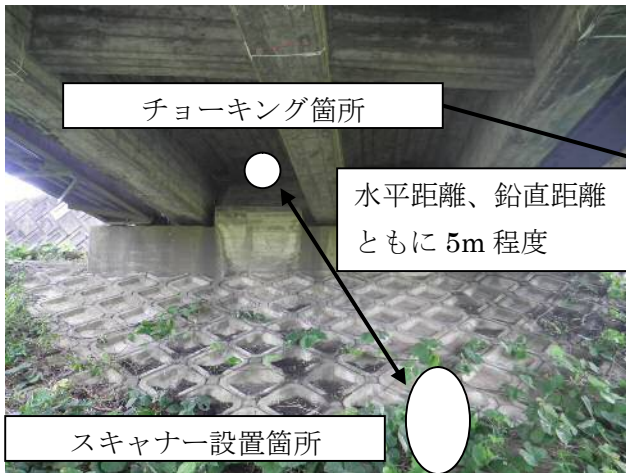


写真3.2.2 計測対象橋梁

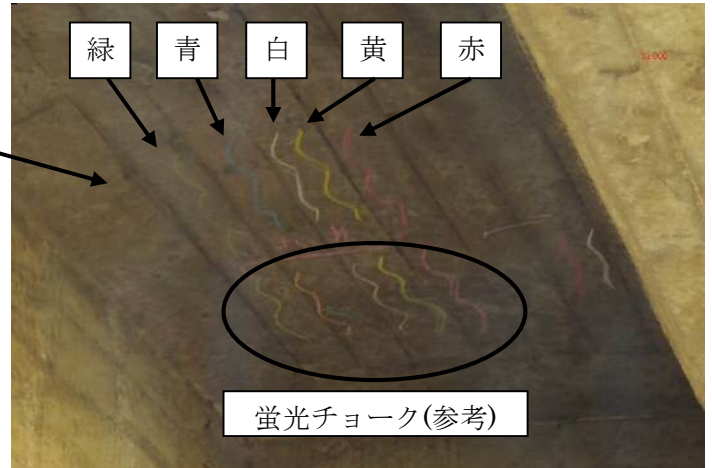


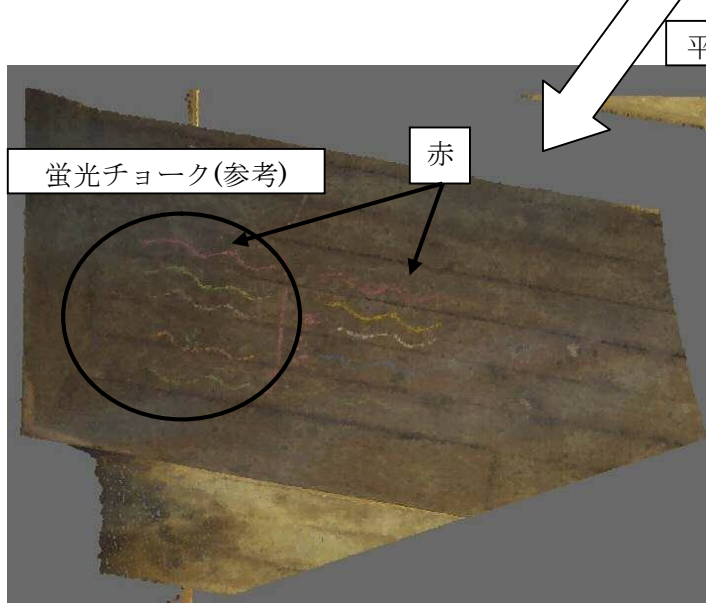
写真3.2.3 チョーキング箇所拡大



写真3.2.4 計測状況



図3.2.3 同上スキャナー画像(点群と写真)



平面配置

チョーキングは黄色と白色が比較的鮮明に見える。蛍光チョークに関しては、汎用型チョークと大きな差異は感じられないが、赤色に関しては、若干見えやすいものと思われる。

図3.2.4
図3.2.3 スキャナー画像(点群と写真)を平面配置(上面からの透視)

調査結果より、測定距離が5m程度であれば、床版下面のような比較的暗い環境下でも、スキャン画像によりチョーキングが判明でき変状図を作成できる(図3.2.3~図3.2.4)。また、チョーキングの色彩に関しては、白と黄色は汎用タイプを、赤は蛍光チョークを、青と緑は暗所では使用を避けることが賢明である(図3.2.3~図3.2.4)。

本調査手法において難点を挙げるとすれば、例えば構造物全体の床版を対象とした場合、桁などがレーザー照射の障害となるため、スパンごとに計測器を移動しなければならないことである。しかしながら、これまで実施してきた、躯体に任意の寸法(長方形)でマーキングを行い、1枚ずつ写真を正対して撮影することに比べれば、現場作業の効率は大幅に改善されるものと考えられる。更に写真合成の面では、かなりの接合枚数の削減が図られることは明らかであり、作業時間上、調査費用において、これまでのように大きなウエイトを占めさないものと推察される。

その他にも一般図等が存在しない既存構造物に対して、同時に形状測量が可能となるなどのメリットがある。

今後は、更に様々な環境下での構造物、部材に対して測定距離、範囲、計測器設定などを変え検証することで、本調査手法の効率化に向け取り組む所存である。

4. おわりに

今日、コンクリート構造物の維持管理に関わる調査技術は、日進月歩で変わりつつあり、それに伴い調査手法も様々なものが存在する。しかしながら、それらの調査手法は各々特性を有しているため、一概にこの調査手法が最良であるとはいえない。むしろコンクリート診断士という一技術者として肝要なことは、種々の調査手法を各現場環境、状況などに応じ、臨機応変に採択、遂行していく力であると考えられる。そのためには、積極的に新技術などを学び実践していくことが大切である。

無論、今回紹介させて頂いた調査手法も決して最良ではなく、条件によっては不効率の場合もある。よって本報文は、皆様方が今後変状調査をしていくうえで、数ある調査手法のうちの一例として参考にいただければ幸いである。

出雲大社大鳥居「その歴史と構造」

株式会社エイト日本技術開発

松浦 寛司

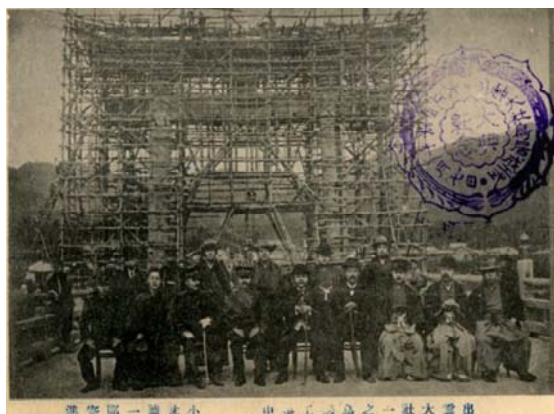
「出雲大社の大鳥居」は、大正4年（1915）に「小林徳一朗翁」により建造されて以来、99年の長きに渡り出雲大社の参道に敢然とそびえる鉄筋コンクリート製の構造物である。しかしながら、その構造資料を示した文献はなく、大正初期の構造技術の検証や今後の供用を図る上での判断材料は乏しい。この研究では、当時の構造技術の整理と補修記録からの耐久性を考察した。

1. まえがき

島根県の「出雲大社」は、年間観光客が200万人に及ぶ県内最大の観光地であり、神話の国「出雲」を象徴する施設であることは言うまでもない。この出雲大社の参道の南側県道上空には、大正4年に造営された「出雲大社大鳥居」が聳え、来訪者を迎える出雲大社の象徴として、多くの参拝者を見守っている。

この大鳥居の造営については、鳥居脇の案内板に「寄進者小林徳一郎、高さ23m、幅26mの日本一の鉄筋コンクリート製鳥居」と紹介されている。しかしながら、この鳥居が造営された背景や鳥居の細部構造を示した文献の紹介はなく、その建造技術や巨大な荷重を支持する構造、ほぼ100年の耐久・耐震性は“神がかり”的な要素と考えられていた。

本研究では、既往資料調査から鳥居の復元図を作成し、類似資料を集め構造について研究を行った。また、過去の補修記録から将来の耐久性を予測し、今後の供用性についての提言を行っている。



絵葉書 1-1 出雲大社大鳥居（大正4年11月）

2. 既存資料の収集

資料収集に当たっては、直接的に出雲大社大鳥居に関するものは勿論であるが、同時代のコンクリート構造物に関する間接的資料や、寄進者小林徳一郎に関する資料にも目を向け、大鳥居が造営された時代の背景の理解に努めた。下表に代表的資料を示す。

表 2-1 既往資料一覧表

	資料名称
出雲大社	出雲大社大鳥居構造図（4枚）
	1974年（S.49）補修時図面（森本組）
	1990年（H.2）出雲大社大鳥居調査結果及び補修工事計画（松江高専，森本組）
	出雲大社大鳥居追跡調査について（案）（森本組）
島根県コンクリート診断士会	第8回コンクリート技術研修会報告“健全！76年経た大社の大鳥居”他
奥出雲町役場	聞書 小林徳一朗翁傳
青森県立図書館	平安神宮大鳥居造営誌（昭和4年造営）
森本組	1991年（H.3）出雲大社大鳥居修復工事 工事報告書，施工計画書（森本組）
邑南町役場	小林翁の生涯
平安神宮	登録有形文化財（建造物）平安神宮大鳥居保存修理工事報告書
豊国神社	大鳥居建設の経緯（A4版2枚）
森本組	出雲大社大鳥居試験結果報告書
	出雲大社大鳥居調査計画書
	出雲大社大鳥居調査報告書

キーワード：鉄筋コンクリート製大鳥居、大正初期の構造技術、小林徳一郎

連絡先：島根県松江市東朝日町151番地34 TEL：0852-21-3375 FAX：0852-27-6065

3. 大鳥居図面（出雲大社より提供）

出雲大社のご協力により、蔵書資料の中から大鳥居に関する図面を4枚借り受けた。（建設当時の資料として保存）

以下にその図面と構造についての概説を示す。

1) 柱脚部の基礎構造

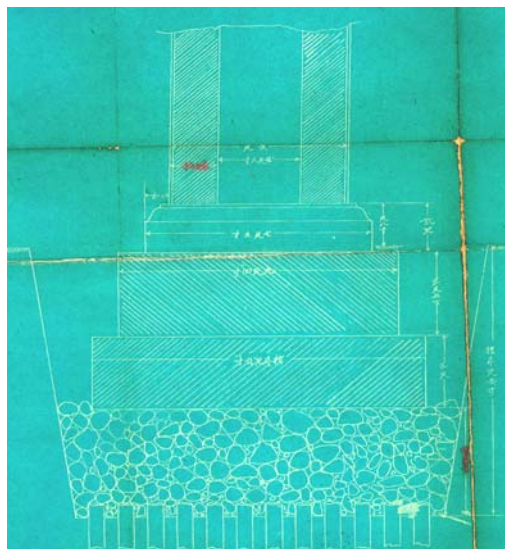


図 3-1 柱脚基礎構造

柱脚部の基礎構造を図 3-1 に示す。図によれば、柱脚下端は六尺（1,818mm）の柱径が、七尺六寸（2,303mm）九尺四寸（2,848mm）、十一尺二寸（3,394mm）と約三尺（900mm）ずつの高さで階段状に拡がり、玉砂利層を挟んで松杭（と思われる）がこれ以上打ち込めないくらい密に打設されている（12行×12列）。

脚柱と基礎杭は玉砂利で縁切られていることから、基礎杭の打設は支持地盤をより強固にすることを目的としたように思われる。強固な地盤は押し込み力に対して変位が小さく高い支持力が得られる。基礎杭は、柱脚下端の固定度を直接高めるものではないが、複合的に地盤支持力を高めており、柱脚と杭との結合方法が明かにされていない時代の知恵であったものと推定できる。

2) 柱脚断面の鋼材

柱脚断面図を図 3-2、その鋼材復元図を図 3-3 に、柱脚下端部の鋼材配置図を図 3-4 に示す。これらの図面より、コンクリートの補強鋼材は丸鋼などの鉄筋ではなく、八角の出隅・入隅（outer& inner corner）に、それぞれ配置した L 形鋼（図 3-3 の

ハッチング部参照）によっているものと思われる。あらかじめ工場で組み上げた鋼材（鉄骨）を現地で建て上げたものと考えれば、大鳥居の現場施工工期が二ヶ月余りの急速施工だったという文献の記録にもうなずける。

また、図 3-4 の鋼材配置図からは、高さ方向に五尺（1,515mm）の間隔で軸方向鋼材を横つなぎし、その間をブレースングとして腹材が配置されていたと考えられる。最下段の脚柱太径部は無筋断面かも知れない。

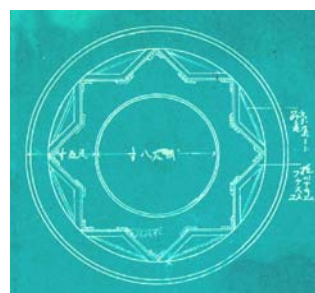


図 3-2 柱脚断面図

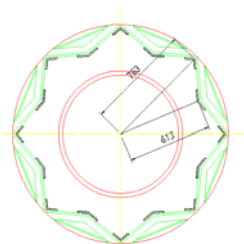


図 3-3 鋼材復元図

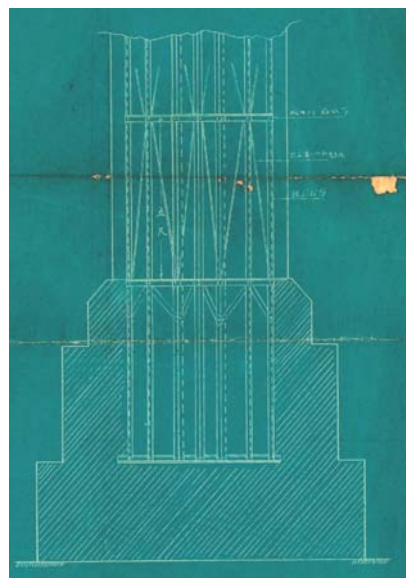


図 3-4 柱脚下端部の鋼材配置図

研究成果においては、復元図を作成し保存資料としてまとめている。

4. 大鳥居の構築

1) 大鳥居施工に関する基礎データ

出雲大社大鳥居の施工について、その構築に要した時間と手法を考察した。前出の建造時の設計図面が入手できたものの、後の補修時（S49年、H2年）の記録との整合性がとれない部分があり、今後とも調査や資料の収集・精査が必要と考えられる。

ここでの構造数量に関する基礎データは、造営時の新聞資料（T4.11.7、8 山陰新聞）の記事を引用した数値をメートル法に換算して施工の記録を検証した。

表4-1に新聞記事による施工日数を、同じく施工数量を表4-2に示す。

表4-1 施工日数（山陰新聞より）

起工	工期	人工	工事費
T4.9.8	57日	5,000人	15,280円

2) 施工法及び工程

当時の施工法については、具体的な資料が乏しく今後の考察が必要と考えられるが、仮定条件に基づき工期57日（上記の新聞記事）の施工が可能であったかどうかの検証を行った。

表4-3から類推すると、1日100人程度の作業員により突貫工事を行ったとした場合に、順調に施工が行われたとして考えると、新聞記事にあるとおり、57日間で完成したというのも不可能な話ではないと推定できる。

3) 施工検討に関する今後の課題

- ・基礎杭工におけるモンケン（型枠）の施工法について、全て人力により滑車を使用して施工されたものなのか否か
- ・型枠は全て事前に製作を完了させてあるものとして一回使いとし、柱に関しては鉄骨（アングル）組立・型枠組立・コンクリート打設といった一連の作業を1日で完了させることとしたが、実際に可能な工程であるか否か
- ・鉄骨（アングル）組立はリベット施工であったか、ボルト組立されたものか
- ・また、貫や笠木に確認されている鉄筋が、補修時および調査時に、柱には確認されていないが実際はどのように施工されたものか
- ・貫・笠木の膨大な支保重量とその支持方法は如何に

表4-2 施工数量

項目	尺貫法				メートル法			
	長さ(尺)	幅(尺)	深さ(尺)	重量(貫)	長さ(m)	幅(m)	重量(kg)	体積(m3)
笠木	16間	9尺6寸	—	81,288	28.8	2.88	304,830	133
貫		6	—	34,560		1.8	129,600	56
扁額	12	9	—	1,168	3.6	2.7	4,380	2
柱(本)	77	—	—	39,798	23.1	径1.8	149,243	65
計				196,612			737,295	321
工種	長さ(間・尺)	幅(尺・寸)	深さ(尺)	体積	長さ(m)	幅(m)	深さ(m)	体積(m3)
掘削(カ所)	21	18	15	—	6.3	5.4	4.5	153
杭(カ所)	18	末口5寸	—	192本	5.4	末口0.15	—	192本
栗石(カ所)	21	18	5	—	6.3	5.4	1.5	51
基礎コン(カ所)	21	18	11	—	6.3	5.4	3.3	112

表4-3 施工日数の類推

工種	数量	単位	規格	日数	人(カ所)	人(計)	備考
掘削(カ所)	153	m3	人力掘削30m3/日	5	250	500	50人/日*5日/カ所
杭(カ所)	192	本	20本/日	10	300	600	30人/日*10日/カ所
栗石(カ所)	51	m3	人力敷均し20m3/日	3	150	300	50人/日*3日/カ所
基礎コン(カ所)	112	m3	人力打設20m3/日	6	300	600	50人/日*6日/カ所
柱(m3/本)	65	m3	8ステップ:1ステップ/日	8	600	1200	75人/日*8日
貫	56m3	m3	10m3/日	6	450	450	75人/日*6日
笠木	133m3	m3	10m3/日	14	1050	1050	75人/日*14日
扁額	2m3	m3	10m3/日	1	75	75	75人/日*1日
足場支保工	1式	式		2	100	100	50人/日*2日
解体片付け	1式	式		2	100	100	50人/日*2日
				57		4975	

5. 耐久性の診断

1) 目視による外観調査

神額・柱・笠木・貫についての遠望外観調査では、微小なひび割れと若干の汚れ程度が見られる程度であり、際立った変状は見受けられない。

2) 中性化の予測

平成 2 年調査補修報告の中で、「コンクリートコアの中性化はほとんど進行が見られず大きくて 3mm くらいである」に基づき、中性化速度係数を求める。

$$A = \frac{C}{\sqrt{t}} = \frac{3}{\sqrt{75}} = 0.35 \text{ (mm}/\sqrt{\text{年}})$$

大鳥居の建造は 1915 年(大正 4 年)であり、平成 2 年調査まで 75 年の経過である。当時の中性化深さは最大 3mm として中性化深さを求めると図 5-1 の通りとなる。

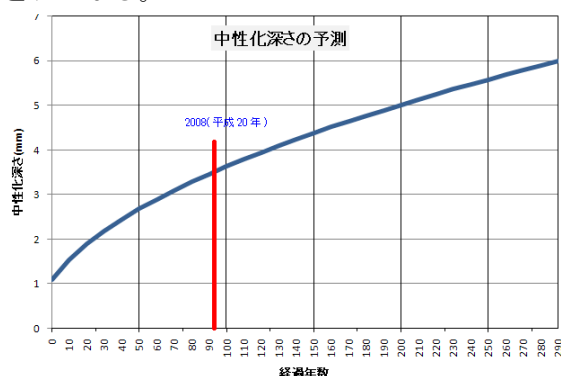


表 5 - 1 中性化予測図

上図での 300 年経過後の中性化深は 6mm の予測であり、通常の鉄筋かぶり厚の場合は鉄筋位置までの中性化の可能性はないと判断できる。

3) 塩害の予測

平成 2 年の調査報告を基に、Fick の第 2 法則に基づく拡散予測を行った。

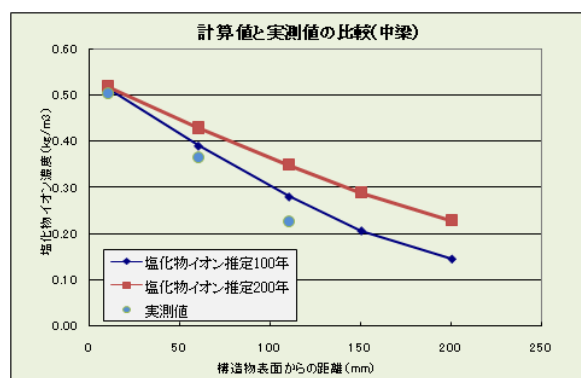


図 5 - 2 塩化物イオン濃度予測図

塩化物の拡散の予測からは、塩化物イオン濃度分布の高い貫(図 5-2 で中梁と明示)の表面から深さ 60mm 位置でも、塩化物イオン濃度は 0.40kg/m³ 程度であり、拡散予測からは鋼材の発錆の可能性は小さい。

4) 補修による劣化防止効果

平成 3 年の補修工事は下図に示す各所について行われており、これらが鳥居の劣化防止に大きく寄与していることは明白である。

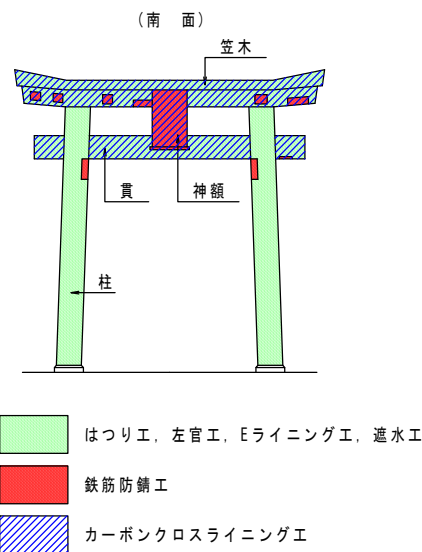


表 5 - 3 補修部位

6. 今後の施設供用を図るために

平成 3 年の補修工事において、水分の遮断・遮塩・中性化対策が実施されているが、補修後 23 年が経過し部分的にひび割れの発生や錆汁と推定される茶褐色の汚れも見えて来ている。

今後も長期耐久性を確保するためには、定期的な診断による現状の把握と最新データによる劣化予測と適宜の補修工事が重要である。

提案内容

- ・圧縮強度試験
 - ・中性化試験
 - ・塩分含有量試験
 - ・EPMA 試験
- など

東京湾第二海堡のコンクリート構造物調査 —過去の構造物に学ぶ—

東京 ポートコンサルタント株式会社 内藤 輝
 同 上 佐野慎哉
 関東地方整備局 東京湾口航路事務所 野口孝俊
 東京 診断士会事務局 峰松敏和
 東京 株式会社 太平洋コンサルタント 片山哲哉

1. はじめに

東京湾第二海堡は、1899(明治 32)年に建設された軍事要塞であり(砲台部は 1905 年竣工), 建設後 100 年以上が経過している(図 1 参照)。1923 年には、関東大震災によって被害を受け、その後、長い間の風浪等によって、護岸の劣化・損傷・崩壊が進行している。近接には海上物流を支える東京湾中央航路があり、大規模地震時には、第二海堡の護岸や法面が崩壊して、その土砂が流出することにより、船舶の航行に悪影響を及ぼす可能性がある。そのため、平成 18 年度より外周護岸の改修工事を実施しているが、その一部は、当時の護岸を復旧させる、いわゆる“歴史的土木構造物の保全”について検討しているところである。本報告は、100 年以上経過した第二海堡のコンクリートの目視調査を行い、当時のコンクリート技術の特徴・工夫について取りまとめたものである。



図 1 第二海堡と航路の位置関係

2. 第二海堡の建設経緯

東京湾海堡計画は、幕末の江川太郎左衛門による江戸湾口海中台場計画に始まった。しかし、これが具体的に動き出したのは、明治政府が日本列島の要塞化の一環として東京湾海防に取り組んでからである。1871(明治 4)年、山形有朋は、「軍備意見書」を提出して日本列島の要所に海岸砲台を築くことを提案した。明治政府は、この計画の実施にあたって、当初、外国人の軍人や技師を雇って欧米先進技術を導入したが、日本人の土木技術者も、このお雇い外国人から欧米の軍事・海防技術を忠実に学び、それらを自ら工夫・実践していくようになる。

1881(明治 14)年、富津市の先端の海中において、第一海堡の建設が着工した。その工事は 9 年の歳月がかかり、1890(明治 23)年に竣工して、その前年の 1889(明治 22)年に第二海堡の建設が着工することになる。さらに、その 3 年後の 1892(明治 25)年に第三海堡の建設に着工し、第二海堡の人工島部分は 1899(明治 32)年、第三海堡は 1907(明治 40)年に竣工している。

第二海堡の外周護岸の標準断面図を図 2 に示す。護岸の築堤順序は、①海底に(柔らかい)割栗石を投入して海面近くまで積み上げる、②堤体の沈降を待ち、堤体の外側を潮流面上 2.0m まで(堅い)割栗石を積み重ねる、③波浪が捨石に影響を及ぼす範囲については間知石を設置し、④その上部をコンクリートで被覆する、というものである。また、裏法の間知石の空隙には、間詰めコンクリートを施して、背後の中詰砂の流出防止の措置がなされている。このような防波機能を有した人工島の築造は日本では初めてであり、この経験は、その後の海洋構造物築造技術に大いに反映されている。

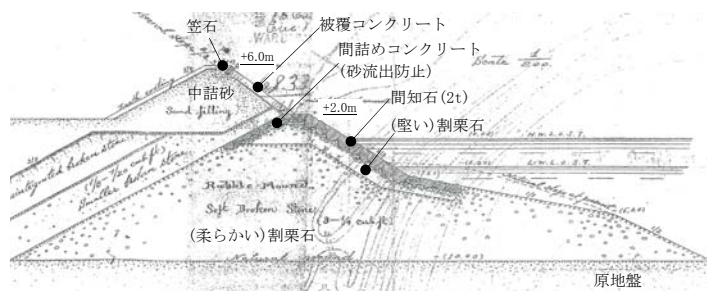


図 2 第二海堡の標準断面図

3. 明治期のコンクリート技術の変遷

3.1 コンクリート技術の変遷と東京湾海堡の関係

明治初期(1870年代)から関東大震災(1923年)までの約50年間のコンクリート技術の変遷と、東京湾海堡の関係について整理する。表1にコンクリート技術の変遷と東京湾海堡の変遷の関係を示す。なお、表中の摘要には、その年の特筆すべき事項を記載している。以下に、この期間のコンクリート技術の変遷の視点をいくつか挙げ、東京湾海堡(特に、第二海堡)との関係について整理した。

表1 コンクリート技術の変遷と東京湾海堡の変遷

	コンクリート技術の変遷	東京湾海堡の変遷	摘要
1824 (文政7)	・アズプデン英国でポルトランドセメントの特許取得		・ポルトランドセメント誕生
1874 (明治7)	・横須賀製鉄所第2ドックは仏からの輸入セメントを使用		・輸入セメントは高価なため、国産化の機運が高まる。
1875 (明治8)	・深川で日本初のセメントを焼成(湿式焼成法)		・国内初のセメント製造
1881 (明治14)	・日本初の民間セメント会社を小野田市に設立	・第一海堡(人工島)の着工 1890(明治23)竣工	
1886 (明治19)	・米国初の回転窯を建設	・セメント需要のため深川工場拡大(徳利窯6基増設:生産高3倍へ)	・米国回転窯:セメント製造量増加 ・国内セメント量産体制
1889 (明治22)	・横浜港第一期工事着工(英技術者:パーマー指導)	・第二海堡(人工島)の着工	
1892 (明治25)	・横浜港北水堤ブロック亀裂発見	・第三海堡(人工島)の着工	・原因は締固不足、養生不足? ・締固、養生方法の改善
1894 (明治27)	・「砲台建築仕様通則(明治27年改正)」、陸軍築城部本部(編)		・必要な機能に応じた配合 ・仕様規定の先駆け
1896 (明治29)	・小樽港で百年耐久性試験の開始		・劣化、水和反応が長期耐久性に及ぼす影響の把握
1899 (明治32)		・第二海堡(人工島)の竣工 砲台等の竣工:1905(明治38)年	・砲台にRC使用?、日本初RCの琵琶湖疎水と同時期?
1902 (明治35)	・小樽港防波堤ブロックに火山灰の使用開始		・高価なセメント量減によるコスト削減 ・耐海水性の向上
1903 (明治36)	・深川工場:日本初の回転窯を導入 ・日本初RC橋梁(琵琶湖疎水運河)		・日本初の回転窯:国内のセメント製造量増加
1905 (明治38)	・日本初セメント規格「日本ポルトランド試験方法」		・セメントの粉末度、凝結時間、安定性、化学成分等を規定
1907 (明治40)		・第三海堡(人工島)の竣工 砲台等の竣工:1921(大正10)年	
1918 (大正7)	・Abrams(エイブラムス)の水セメント比則を提唱		・配合より安定したコンクリート強度実現 ・早期強度発現を前提とした設計・施工
1923 (大正12)	・関東大震災(M=7.9)	・第一海堡:被害少、第二海堡:被害中、第三海堡:被害大(水没)	・佐野利器が提案する「震度法」が土木・建築の耐震設計法として採用
1931 (昭和6)	・土木学会初の示方書制定「鉄筋コンクリート標準示方書」		

(1) 使用セメントの変遷と第二海堡の建設期間

1880年代の半ば以降は輸入セメントから国産セメントへ、1903年以降はセメントの焼成方法が徳利窯から回転窯へと移行する時期である。1889(明治22)年に第二海堡の人工島が着工、1899(明治32)年に竣工していることから、人工島に使用したコンクリートは国産セメントに移行している時期、焼成方法は徳利窯の時期にあたる。ただし、第二海堡の砲台や兵舎等のコンクリート構造物の竣工は1905(明治38)年となっているため、回転窯で焼成したセメントを使用している可能性も考えられる。

(2) 横浜港コンクリートブロック亀裂事件の影響

当時のコンクリート技術は経験的要素が多く、現場で生じた不具合をその都度改善して技術を発展させてきたという特徴がある。その一例として、1892年に横浜港北水堤コンクリートブロックの亀裂事件が挙げられる。亀裂原因は、セメント量が少なすぎたこと、締固め・養生不足とされ、その改善策としてセメント量を増やす、中割栗石の使用の中止、突固め人夫数の増加・杵(きね)を大きくする等の措置がとられた。第二海堡の着工は、この亀裂事件の3年前であるため、上記の改善策が採用された可能性も考えられる。

(3) 日本で最初の鉄筋コンクリートの可能性

わが国では、鉄筋コンクリートは1903(明治36)年に琵琶湖疎水運河日岡山トンネル東口の橋梁に初めて使われた。後述に示すとおり、第二海堡の15cmカノン砲の砲台に鉄筋コンクリートが使用されている。第二海堡の砲台の竣工が1905(明治38)年であることから、琵琶湖疎水と同時期に施工された可能性がある。ただし、1942(昭和17)年に、15cmカノン砲は8cm高角砲(防空砲)に据替えられたため、この砲台が当時のものであるかは不明である。

(4) 火山灰の使用の背景

明治初期の段階ではコンクリートの耐海水性には不安があった。現在ではセメントの製造技術の進歩に伴ってC₃Aが少ないセメントが利用できるが、その当時は、“ポズラン反応が期待できる良質な火山灰がコンクリートの耐海水性の向上につながる”という考えであった。さらに、当時はセメントは高価であり、その使用量を少なくすることがコスト面で有利であった。このような時代背景の中で、1896年に廣井勇博士が、小樽港で百年耐久性試験を開始して、1902年には実際に小樽港防波堤のコンクリートブロックに火山灰を使用している。第二海堡の人工島の竣工は1899年であるため、火山灰の使用の可能性は小さいが、砲台等の竣工は1905年であるため、火山灰を使用している可能性がある。

(5) セメントの粉末度の変遷

1905(明治38)年には、わが国初のセメント規格が農商務省告示第35号「日本ポルトランド試験方法」として官報で発表された。この規格は、粉末度・凝結時間・安定性・強度・化学成分などについて規定している。表2にセメントの粉末度の変遷を示す。粉末度は明治末期は4900孔ふるい残分が20%程度と粗く、大正時代に入り10%程度前後、昭和に入り数%程度となった。その後、さらに粉末度は細くなり、1985年以降は0.6%になっている。なお、セメントの粉末度の表示については、1950年にブレーン値となってからは、ほとんど一定の値となっている。第二海堡は1905年に砲台等が竣工しているため、上記のセメント規定に準じていないと考えられるため、セメントの粒度は大きいものと考えられる。

表2 セメントの粉末度の変遷

年度	比表面積	900孔ふるい 210 μ m残分(%)	4900孔ふるい 88 μ m残分(%)
1905(明治38)		0.9	29
1908(明治41)		0.3	
1911(大正元)		0.5	9.2
1916(大正5)		0.3	6.7
1921(大正10)		0.2	12.6
1926(昭和元)		0.2	7
1935(昭和10)			2.1
1945(昭和20)			4.6
1955(昭和30)	3340		2.8
1965(昭和40)	3300		1.5
1975(昭和50)	3210		1.4
1985(昭和60)	3310		0.7
1991(平成3)	3390		0.6

※参考) 小樽港(1900年頃)のブレーン値は1400程度

3.2 砲台建築仕法通則（明治 27 年 5 月改正）

前述したとおり、明治初期に、欧米からコンクリート技術が導入されてから、日本のコンクリート技術は、要素技術の進展や現場での不具合・改善策に伴って発展してきた。しかし、これらの知識を集積して、それを規定するまでには至らなかった。すなわち、当時のコンクリート技術は経験的な要素が強く、設計と施工が一体のものであって、技術者が各自の経験と判断で対応していたものと考えられる。ただし、これらの経験則を規定するものが何もなかったわけではない。軍事資料ということもあり、これまで土木の世界ではあまり着目されていなかったが、1894(明治 27)年 5 月、陸軍省工兵方面本署から「砲台建築仕法通則」が改正・通告されている。この中で、砲台建築の工法や材料について細かく指示している。コンクリートに関する事項は、第五条「モルタル」の配合及用法(表 3 参照)、第六条「ベトン」の配合及用法(表 4 参照)、第八条「粗石」の配合及用法(表 5 参照)に記載している(ベトンとは、フランス語でコンクリートを意味する)。なお、第七条では、“「モルタル」及「ベトン」の製練用水海水澱其に使用するを得”との記載があり、海水の利用を認めている。第五条と第六条を整理すると表 6 のように表すことができる。ここで、特筆すべきことは、その部位に必要な機能に応じて、モルタル・コンクリートの配合を変えているということである。すなわち、1 号「ベトン」のように特に超大な圧力を受ける場所では、セメント量が多く、そうでない 4 号「ベトン」のような床面や送軍路面ではセメント量が非常に少ない、という具合である。このように、“その部位に必要な機能に応じて配合を変えていること”は“当時のセメントが高価であり、これを有効に使用するためであった”といえると同時に、“先駆的な仕様規定の示方書”と位置付けることができる。古来から現代まで、最先端の技術は軍事技術から発達する場合が多く、本通則も陸軍工兵方面本署の高い技術力の成果とも思われる。なお、この規定から 37 年後の 1931(昭和 6)年に、土木学会で初の「鉄筋コンクリート標準示方書」が制定され、制定・改訂を繰り返しつつ現在に至ってる。

表 3 第五条 「モルタル」の配合及用法

名称	セメント	砂	石灰	粘土
1号「モルタル」	1.0	1.0	—	—
2号「モルタル」	1.0	2.0	—	—
3号「モルタル」	1.0	3.0	—	—
4号「モルタル」	0.5	3.0	1.0	—
5号「モルタル」	0.25	4.0	1.0	—
粘土「モルタル」	—	—	3.0	7.0

- 1号「モルタル」は、防水塗料及び金物の取付に用ゆ
- 2号「モルタル」は、弾薬庫床面の湿気あらかじめ防塗に用ゆ
- 3号「モルタル」は、笠石階段石等総て截石材の接合煉瓦穹窿積及一般室内の床面に用ゆ
- 4号「モルタル」は、煉瓦積及び土管の接合に用ゆ
- 5号「モルタル」は軟石積に用ゆ
- 粘土「モルタル」は3号粗石積に用ゆ

表 4 第六条 「ベトン」の配合及用法

名称	モルタル	砂利
1号「ベトン」	1号「モルタル」 1	2
2号「ベトン」	2号「モルタル」 1	2
3号「ベトン」	3号「モルタル」 1	2.5
4号「ベトン」	4号「モルタル」 1	2.5

- 1号「ベトン」は、特に著大の圧力を受ける場所及び水に触るべき緊要なる建築に用ゆ
- 2号「ベトン」は、特に堅牢を要する穹窿に用ゆ
- 3号「ベトン」は、通常の穹窿（丸天井のこと）及壁礎に用ゆ
- 4号「ベトン」は、床面及送軍路面に用ゆ

表 5 第八条 粗石の配合及び用法

名称	「モルタル」	粗石
1号粗石	3号「モルタル」 0.35	1.0
2号粗石	4号「モルタル」 0.35	1.0
3号粗石	粘土「モルタル」 0.35	1.0
軟石積	5号「モルタル」 0.10	1.0
乾粗石	—	—

- 1号粗石は、穹窿（丸天井のこと）脚壁に用ゆ
- 2号粗石は、通常被覆及階段に用ゆ
- 3号粗石は、塁道下水溝の構造に用ゆ
- 軟石積は、下水溝の暗溝被覆壁等の構造に用ゆ
- 乾粗石は、交通路の下水溝に用い、又時宜に依り被覆壁にも之を用ゆ

表 6 ベトンの配合条件

名称	セメント	砂	石灰	砂利
1号「ベトン」	1	1	—	4
2号「ベトン」	1	2	—	6
3号「ベトン」	1	4	—	10
4号「ベトン」	1	6	2	22.7

※第五条, 第六条より算定

4. 目視調査

4.1 調査目的

前述したとおり、現在、第二海堡の一部は、“歴史的土木建造物の保全”について検討しているところである。本調査では、第二海堡に使用されているコンクリート及びモルタルについて、目視調査を行い、当時のコンクリート技術の特徴・工夫を把握するとともに、第二海堡のコンクリート構造物について、歴史的価値の把握のための詳細調査の提案を行うことを目的としている。

4.2 第二海堡に存在するコンクリート構造物

第二海堡に存在するコンクリート構造物(モルタルも含む)を表7に示す。表に示すとおり、第二海堡に存在するコンクリート構造物は、大きく、(1)外周護岸、(2)北側地下掩蔽壕、(3)砲台、(4)煉瓦壁(構造物)等に分類される。図3に外周護岸の標準断面図、図4に目視調査の対象とするコンクリート構造物の位置関係、写真1に外周護岸及び煉瓦壁等の現況を示す。写真に示すように、被覆コンクリート、パラペットは、長い間の風浪等によって、部分的に、損傷・崩壊が進行していることがわかる。

表7 第二海堡コンクリートの目視調査

構造物	部位	種類
(1)外周護岸	被覆コンクリート	コンクリート
	間詰めコンクリート	コンクリート
	パラペット	コンクリート
	石積擁壁	被覆モルタル
(2)北側地下掩蔽壕	穹窿(丸天井のこと)	コンクリート
(3)砲台	砲台コンクリート	RC,コンクリート
(4)煉瓦壁(構造物)	目地モルタル	モルタル
	煉瓦の亀裂補修	モルタル

※掩蔽壕(えんぺいごう): 装甲をもった地下や山を掘りぬいて作られた軍事建造物

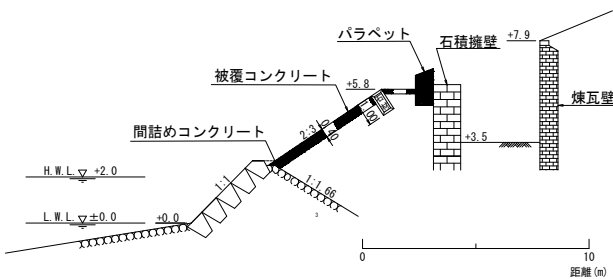


図3 外周護岸の標準断面図

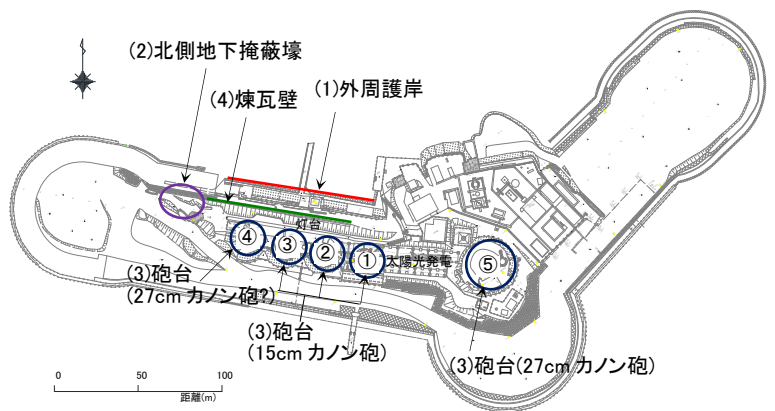


図4 対象とするコンクリート構造物の位置関係



写真1 外周護岸及び煉瓦壁の現況

4.3 目視調査

(1) 外周護岸

外周護岸を構成するコンクリート構造物、①被覆コンクリート、②間詰めコンクリート、③パラペット、④石積擁壁について、その特徴を以下に示す。

①被覆コンクリート

海岸堤防の表のり被覆工と同様に、盛土部を保護する機能を有する。写真2に被覆コンクリートの状況を示す。使用している粗骨材はほとんどが川砂利で、粗骨材の粒径は大きく、細骨材の粒径は単一粒径のように見受けられる。



写真2 被覆コンクリートの現況

②間詰めコンクリート

護岸の裏法の間知石の空隙には、中詰め砂の流出を防ぐために、間詰めコンクリートを施してある。写真3に間詰めコンクリートの状況を示す。詳細は不明であるが、前述の「砲台建築仕法通則(明治27年5月)」の表5に示した粗石のいずれかの配合をもとにしていることが考えられる。



写真3 間詰めコンクリートの現況

③パラペット

写真4にパラペットの現況を示す。被覆コンクリートと同様に、使用している粗骨材はほとんどが川砂利で、粗骨材の粒径は大きく(60mm程度)、細骨材の粒径は単一粒径のように見受けられる。この粗骨材の多いコンクリートでパラペットを構築した後、天端面にRをつけたモルタル(厚さ5~10cm)仕上げが実施されている。用いられている細骨材は比較的微粒なようである。



写真4 パラペットの現況



写真5 石積擁壁の現況

(2) 北側地下掩蔽壕（えんぺいごう）

掩蔽壕は、平成4年の段階では**写真6**に示すように外部からの侵入が可能であったが、現在では、**写真7**に示すように土砂で埋め立てられており、内部に侵入する通路が限られている。**写真8,9**に掩蔽壕内部の状況を示す。掩蔽壕内部の構造は、壁面がアーチ形式とイギリス積の煉瓦構造で、天井面はコンクリートアーチ造となっている。この構造形式は、これまで建設されてきた観音崎砲台等が天井アーチ部を含め全て煉瓦造であったことから、大きな技術的な進歩と考えられる。また、構造物内部のアーチ部コンクリートの状況は、建設後100年以上が経過しているにも関わらず、非常に健全な状態に維持されている、これは、建屋内部であるため、雨かかりがないことおよびコンクリートを貫通するひび割れの発生がなかったため、ひび割れからの雨水の浸透などがなかったためと推察される。



写真6 掩蔽壕の埋立前の状況 (H4. 6)



写真7 掩蔽壕の現況 (H26. 2)



写真8 掩蔽壕内部の状況①



写真9 掩蔽壕内部の状況②

(3) 砲台

第二海堡の現存する砲台は、**図4**に示したとおり、15cmカノン砲塔砲台（図中の①～③）、27cmカノン砲塔砲台（図中の⑤、④は確実ではない）である。**写真10,11**に砲台①の箱状構造体及び側面の状況を示す。**写真11**に示すように、この箱状構造体側面に鉄筋と思われる鋼材を確認することができる。また、本構造体の観察から、砲台基礎を建設後、箱状構造体を設けてすり鉢状の構造体を構築しているものと推察される。同様の箱型構造体は、砲台④にも見受けられる。



写真10 砲台①の箱状構造体



写真11 砲台①の箱状構造体側面

使用されている鉄筋は、径 10mm 程度の丸鋼であり、その配筋は水平・鉛直とも 25cm 程度と推定される。なお、鉄筋の端部には、フックが施されており、現在の丸鋼の設置基準と同様な施工がなされている。第二海堡の砲台の竣工が 1905(明治 38)年であることから、日本初とされる琵琶湖疎水 RC 橋梁(1903)と同時期に施工された可能性がある。ただし、1942(昭和 17)年に、15cm カノン砲は 8cm 高角砲(防空砲)に据替えられており、この砲台が当時のものであるかは不明であるため、鉄筋の詳細調査が必要である。また、この箱状(壁状)構造体コンクリートの粗骨材最大寸法は、海岸付近の無筋コンクリートと比較して、小さい(Gmax ; 20mm 程度)粗骨材が使用されており、構造体に応じたコンクリートが適用されていたことが推察できる。さらに、写真 12 に示すように、砲台④にひび割れに沿って白色の物質が浸出しているのが見受けられた。これは、アルカリシリカゲルが浸出後、炭酸化したものに似ている。そうであれば、わが国で確認されたアルカリシリカ反応の浸出物で最も古い事例ということになる。原因物質として、砂利や砂のなかのチャートや安山岩が考えられる。

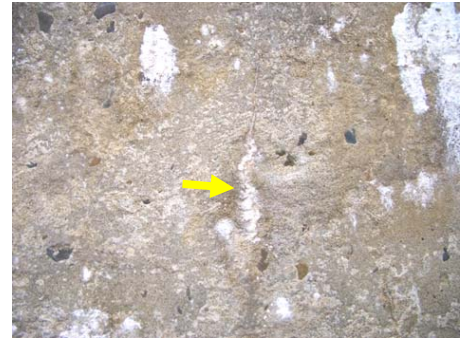


写真 12 砲台④ ひび割れに浸出したアルカリシリカゲル？

(4) 煉瓦壁(構造物)

第二海堡の煉瓦壁(構造物)はイギリス積が採用されており、写真 13 に示すように、その目地材としてモルタルが使用されている。また、一部には、写真 14 に示すように、比較的古い時代に補修されたと推察される亀裂補修材としてモルタルが使用されている。これらのモルタルについて、建設後 100 年以上が経過しているにも関わらず、極めてめて接着力が高く、破片となっても煉瓦とよく付着しており、非常に優れたモルタルと評価できる。



写真 13 目地材としてモルタル使用

(5) 目視調査のまとめ

第二海堡のコンクリート構造物の目視調査結果から以下のことが伺える。

- ・粗骨材は川砂利を使用している。砕石等の使用は確認できない。
- ・粗骨材最大寸法は、構造体で異なっており、計画的に調整された可能性が伺える。被覆、砲台コンクリート等は大きく、砲台躯体コンクリート(箱状構造体)などは小さい。
- ・細骨材は、少なくとも 2 種類以上が使用されている。1 種類は、比較的微粒・単一粒度であり、豊浦標準砂のような砂である。他の 1 種類は、現在、標準的使用されている粒度分布を有する砂のようなものである。また、細骨材中の貝殻の有無は、明らかに混入しているものと目視では判定不可能なものがある。
- ・掩蔽壕(えんぺいごう)内部のアーチ部コンクリートの状況は、建設後 100 年以上が経過しているにも関わらず、非常に健全な状態が維持されている。
- ・第二海堡の 15cm カノン砲の砲台に鉄筋コンクリートが使用されている。第二海堡の砲台の竣工が 1905(明治 38)年であることから、琵琶湖疎水と同時期に施工された可能性がある。
- ・煉瓦壁(構造物)に使用されているモルタルは、建設後 100 年以上が経過しているにも関わらず、極めてめて接着力が高く、破片となっても煉瓦とよく付着しており、非常に優れたモルタルと評価できる。

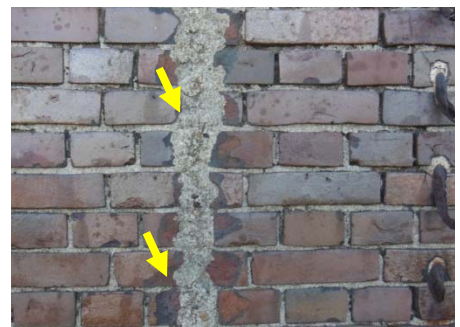


写真 14 補修材としてモルタル使用

5. 今後の課題

歴史的土木建造物の保全には、一般的に3つのテーマ、(1)なぜ残すか(保全の意義)、(2)何を残すか(保全の対象)、(3)どう残すか(保全の手法)、に大別することができる。第二海堡のコンクリート建造物を歴史的土木建造物として保全するためには、まず、“なぜ残すのか”、すなわち、その価値を把握・評価することが重要である。ここでは、歴史的土木建造物の価値を、①技術的に優秀なもの、②歴史的価値の高いものに分類して、現地調査で得られた知見を踏まえ、第二海堡コンクリート建造物における価値把握のための詳細調査(案)を抽出した(表8参照)。

表8 第二海堡コンクリート建造物における価値把握のための詳細調査(案)

価値の視点	建造物	現地調査で得られた知見	必要な情報	詳細調査(案)
① 技術的に優秀なもの	コンクリート	・構造体による計画的な配合調整	・配合条件	・配合推定
		・細骨材、水の供給が困難、現地調達の可能性あり	・海砂、海水使用の確認	・塩化物イオン濃度測定
		・掩蔽壕内部のアーチ部は、100年以上が経過しているにも関わらず、非常に健全な状態に維持	・配合条件 ・中性化深さ ・海水使用の確認	・配合推定 ・中性化深さ測定 ・塩化物イオン濃度測定
	煉瓦建造物	・目地モルタルの付着性が高い(煉瓦の中には焼成時にガラスを生じるものがあり、セメントに反応?)	・付着状態の観察	・偏光顕微鏡観察, SEM 観察, EDS 分析
石積建造物	・砂流出防止のために間詰めコンクリートを使用	・配合条件	・配合推定	
② 歴史的な価値の高いもの	コンクリート	・第二海堡の築造時期は、セメント焼成方法の転換期(徳利窯→回転窯)	・セメント種類の同定、クリンカの熱履歴、未水和セメント確認等	・偏光顕微鏡観察, SEM 観察, EDS 分析
		・第二海堡の15cmカノン砲の砲台に鉄筋コンクリートを使用	・コンクリートの配合、骨材分析、配筋・鋼材の種類確認	・配合推定、電磁波レーダー、鋼材の成分分析による製造年代の特定
		・砲台コンクリートにASRの痕跡が見られる。これがASRなら日本で最も古い事例となる。	・ASR反応性骨材の確認	・偏光顕微鏡観察, X線回折分析, SEM 観察, EDS 定量分析
	煉瓦建造物	・補修モルタルは、100年以上が経過しているにも関わらず、非常に健全な状態に維持	・付着状態の観察	・偏光顕微鏡観察, SEM 観察, EDS 分析

6. まとめ

本報告は、明治期のコンクリート技術の変遷と東京湾海堡との関係を整理するとともに、第二海堡の100年以上経過したコンクリート建造物に対して目視調査を行い、その技術的特徴・工夫等を整理したものである。東京湾海堡の建設期間には、コンクリートの要素技術の転換期が含まれている。第二海堡のコンクリート建造物がこれらの要素技術をどのように取り入れているかを知ることは、過去の建造物、しいては当時の技術者の工夫・アイデアを学ぶことにつながり、そのことは、我々、現代の技術者の糧となり、今後のコンクリート技術の発展に寄与するものと考えている。

参考文献

- 1) 関東地方整備局 東京湾口航路事務所：東京湾第三海堡建設史, 2005. 3
- 2) 野口ら：近代土木遺構「東京湾第二海堡」の建設技術—国内で初めての海上人工島の建設—, 土木学会論文集D2(土木史), Vol. 70, No. 1, 2014
- 3) 関東地方整備局 東京湾口航路事務所：富津市第二海堡跡調査報告書, 2014. 7
- 4) 長滝重義監修：コンクリートの長期耐久性[小樽百年耐久性試験に学ぶ], 1995. 11
- 5) 土木学会 歴史建造物保全技術連合小委員会：歴史土木建造物の保全, 2010. 9
- 6) 陸軍築城部本部(編)：砲台建築仕法通則(明治27年5月改正), 1894. 5

凍結防止剤で塩害劣化した鋼橋RC床版の上面補修に対するコンクリート材料の開発

石川 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋㈱ ○石川 裕一

1. はじめに

わが国のコンクリートは現場プラントで製造されるか、またレディーミクストコンクリート工場（以下、工場）で製造される。図-1にコンクリートの製造方法とその区分を示す。現場プラントによるコンクリート製造は、超速硬セメント、細骨材ならびに粗骨材、水を現場プラントで練混ぜ、超速硬コンクリートを材料供給するシステムを指す。超速硬コンクリートは凝結時間が短い特徴を持ち、練上げから約3時間でコンクリートの圧縮強度が 24N/mm^2 以上となる¹⁾。超速硬コンクリートは凝結時間が短いため特殊車両を用いて材料の練混ぜが必要であり、高いコストでコンクリートが製造される材料供給のシステムが形成されている。一方、工場によるレディーミクストコンクリートの製造は、1965年以降から高速道路の建設段階で主流となる。工場は日本全国で5000箇所以上あり、安く安定して普通ならびに早強コンクリートを材料供給するシステムが確立されている。本論文は道路橋の維持管理の効率化を図ることを目的に、工場で製造するレディーミクストコンクリートに速硬性混和材を混入する製造方法を提案し、製造方法の実用性を評価する。

2. 北陸道における鋼橋 RC 床版の補修

供用が30年以上経過した北陸自動車道（以下、北陸道）の橋梁の補修工事では、現場プラントによるコンクリート製造が一般的に用いられており、コンクリートの練り混ぜから約3時間で 24N/mm^2 以上の圧縮強度が発現される超速硬コンクリートを多く使用している。現場プラントによる超速硬コンクリートの製造は工場によるコンクリートの製造に比べコストが高く、超速硬コンクリートの 1m^3 の単価はレディーミクストコンクリートに比べ約10倍と高価である。また現場プラントによる超速硬コンクリートの製造は、超速硬セメント、細骨材、粗骨材を予め現場に準備することが必要であり、コンクリートの容量を正確に見積る必要がある。

図-2は北陸道で使用する凍結防止剤の散布量の推移を示す。北陸道における凍結防止剤の散布量は各年の降雪状況により変動するが、2002年に塩が完全自由化され価格が正常になると凍結防止剤の散布量は増加している。凍結防止剤の散布量を多くすることは、ドライバーに対して冬期間の安全かつ安心な道路環境を提供する上で重要となるが、一方で、近年では北陸道において凍結防止剤の塩害により劣化した鋼橋 RC 床版が多く見られるようになっている。図-3は凍結防止剤による塩害を受けた RC 床版の変状のイメージを示している。凍結防止剤で塩害した鋼橋 RC 床版の劣化は、鉄筋の腐食により床版上面に浮きが生じる特徴がある。凍結防止剤で塩害した RC 床版の点検は、図-4のように舗装面を重さ900gの石頭ハンマで叩き、



図-1 コンクリートの製造の種類

キーワード：補修材料，レディーミクストコンクリート，速硬性混和材
連絡先：石川県金沢市駅西本町3-7-1 TEL：076-264-7872 FAX：076-264-7878

点検員の聴覚により打撃音を清音や濁音で区別することを実務とする。舗装面を介してのたたき点検では床版上面の浮きを正確に診断することに限界があり、凍結防止剤で塩害劣化した RC 床版の補修に用いるコンクリート（以下、補修コンクリート）の使用容量を精度よく推定できず、**図-5**に示す実務上の問題が生じやすい。この背景から補修コンクリートの材料供給が柔軟で、安価かつ凝結時間が短い新材料の実用化が切望されている。

3. 速硬コンクリートの概要と物性試験

(1) 速硬コンクリートの概要

新しいコンセプトの補修コンクリートの製造システムは、工場から出荷したまだ硬らないコンクリートに対し、現場でオキシカルボン酸塩を主とする遅延剤の水溶液と、カルシウムアルミネートならびに硫酸塩の混和材を添加するものである。速硬コンクリートの 1m^3 の単価は、超速硬コンクリートに比べ約 1/2 倍となり、補修コンクリートの材料費を大きく縮減できる。**表-1**に速硬コンクリートの配合例を示す。

(2) まだ硬らないコンクリートの物性試験

図-6に JIS A 1101「スランプ試験法」に準じて行った速硬コンクリートの自重による変形の状況を示す。練上った速硬コンクリートは水結合材比（W/P）が 37.1%であり、粉体が多いことから粘性があるフレッシュ

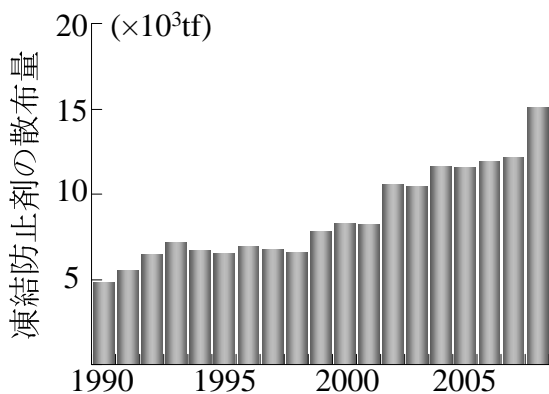


図-2 北陸道（木之本～朝日間）の凍結防止剤の散布量の推移

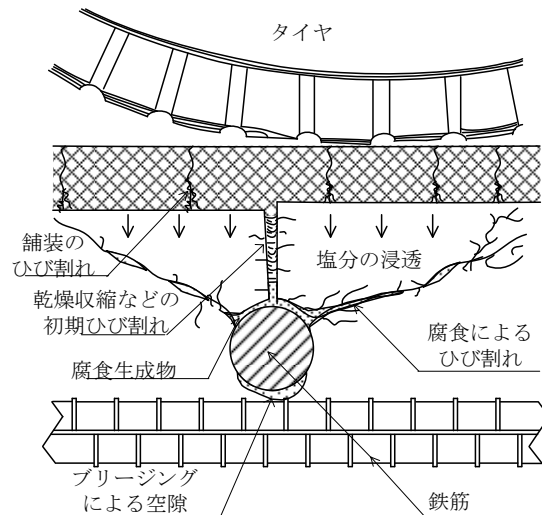


図-3 凍結防止剤で塩害した RC 床版の変状



図-4 たたき点検による床版上面の浮き推定

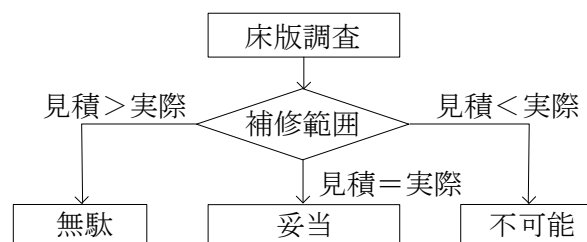


図-5 補修コンクリートの材料供給に関する実務上の問題点

表-1 速硬コンクリートの配合例 (単位: kg/m³)

単位水量 W	単位セメント量 C	細骨材 S	粗骨材 G	遅延剤	外割り水	速硬性 混和材
168	350	744	1018	3.5	10	150

コンクリートの性状となる。図-7は遅延剤の添加量と、試験温度によるコンクリートの凝結時間を調べるため、ASTM C 403の「プロクター貫入抵抗試験」により凝結遅延硬化を調べた結果例を示す。試験温度が同じ環境である場合は、速硬コンクリートの遅延剤の添加量を多くすると凝結時間は遅くなり、コンクリートの打込み時間を長く確保することができる。また所定の凝結時間を確保する場合、試験温度により遅延剤の添加量を変化させる必要がある。このため速硬コンクリートの製造においては現場でコンクリート材料を測し遅延剤の添加量を調整する必要がある。

(3) 硬化コンクリートの物性試験

図-8は速硬コンクリートと、わが国で使用されている代表的なコンクリートの材齢と圧縮強度を示す。速硬コンクリートは練上げから6時間で約24 N/mm²、24時間以内に40N/mm²の圧縮強度が発現する。普通ポルトランドセメントを速硬性あるコンクリートに変化させる技術は、NATM工法などの吹付けコンクリートの例がありカルシウムアルミネートを主成分とする急結性に優れた混和材を添加する方法が1960年代から活用されている。普通コンクリートに硫酸塩(K₂SO₄)を添加して凝縮時間を短縮している。図-9は普通セメントに硫酸塩を添加した時のコンクリートのブリーディング率を示す。ブリーディング率とは析出し



図-6 速硬コンクリートのスランプ試験

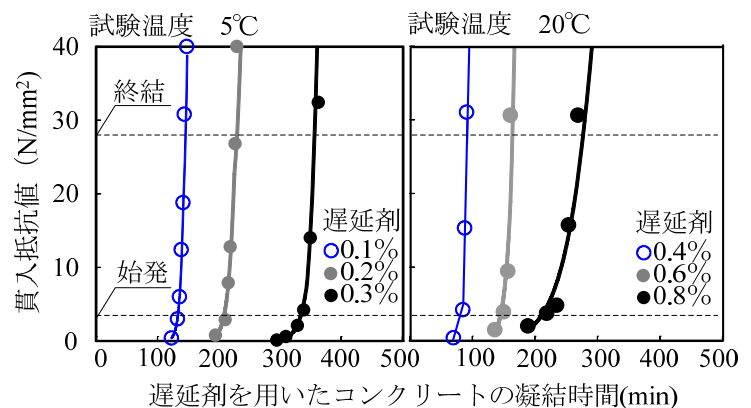


図-7 速硬コンクリートの遅延剤の添加量と温度の影響

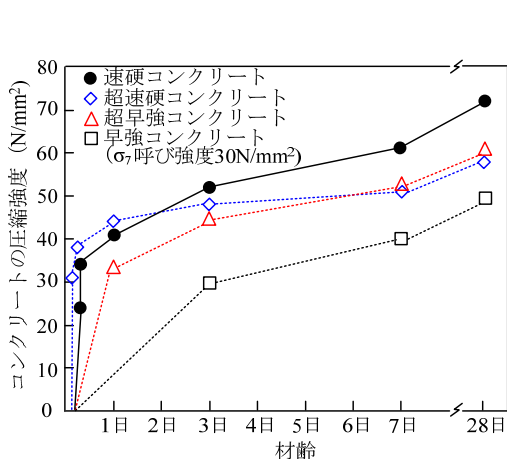


図-8 各種コンクリートの材齢と圧縮強度

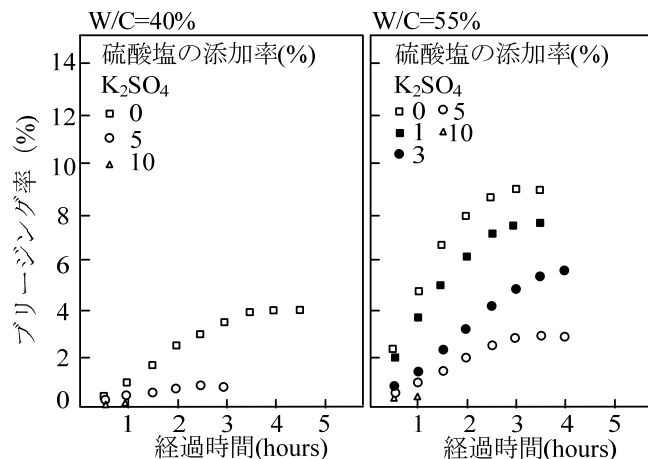


図-9 硫酸塩添加によるブリーディング²⁾

たブリーディング水量をコンクリート中の水分量に対して百分率で示すものである。硫酸塩を添加すると速硬コンクリートのブリーディング率は少なくなり、添加率を10%程度にするとほとんどブリーディングしていない。また速硬コンクリートは遅延剤の添加量を調整することでコンクリートの凝結開始のタイミングをコントロールでき、ブリーディングが少なく、コンクリートの圧縮強度に早期に発現できる。図-10はJSCE-G572-2007に準拠し、材齢26週の塩分浸透試験のEPMA測定結果を示している。普通コンクリートと比べて、速硬コンクリートへの塩分浸透はほとんど見られない。塩分の見かけの拡散係数は普通コンクリートで $1.03\text{cm}^2/\text{year}$ 、速硬コンクリートで $0.05\text{cm}^2/\text{year}$ となり、速硬コンクリートはコンクリート中に塩分が浸透しにくい特性がある。

4. 速硬コンクリートの試験施工

(1) 試験施工の状況

北陸道の凍結防止剤の塩害を受けたRC床版の補修として、コンクリート量が約 1000m^2 の試験的な施工を行っている。工場から出荷したまだ硬らないコンクリートに対する速硬コンクリートの製造方法は、図-11に示すようにアジティタ車に遅延剤を添加し15秒間の高速攪拌を行ったあと、速硬混和材を添加し180秒間の高速で攪拌する。その後、劣化したRC床版のコンクリート材料をウォータージェットで除去して速硬コンクリートを打設する。速硬コンクリートの表面にブリーディングは生じず、良好なコンクリートの打設作業が行えることを確認している。

(2) 初期ひび割れの発生状況

速硬コンクリートを用いたRC床版の補修は、平成24年度からの2年間で約 1000m^2 で試験施工され、うち約 70m^2 についてコンクリートに平均ひび割れ幅 0.2mm の初期ひび割れが見られている。初期ひび割れの発生形態は方向性がなく、図-12のように格子密度法によりひび割れ長さの測長によりひび割れ密度は橋軸方向で $3.3\text{m}/\text{m}^2$ 、橋直方向で $4.4\text{m}/\text{m}^2$ となる。なお格子密度法とは、 125mm 間隔で引かれた格子線とひび

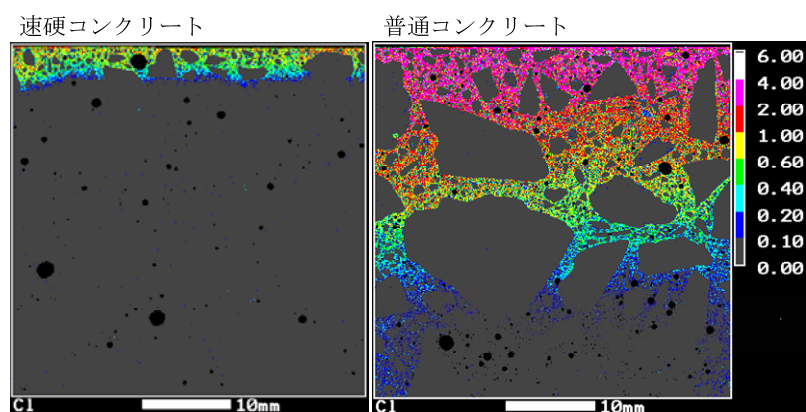


図-10 EPMAによる塩分浸透深さの分析



図-11 遅延剤および速硬混和材の添加

割れの交点数を数え、格子線の総延長で除してひび割れ密度を数値化するものである。図-13はコンクリート表面からの水分の蒸発を模式で示している。RC床版のように外気と接する表面積が大きい部材は、凝結前の水分蒸発により初期ひび割れが生じやすい。このため速硬コンクリートの表面は急激な温度変化が生じ、初期ひび割れが生じたものと推定する。

5. 施工品質の向上に関する取組み

(1) コンクリートの養生方法と温度

図-14はコンクリートの表面の養生方法と、コンクリートの温度履歴を示す。外気温が約5度と低温の場合、露天養生するとコンクリートの水和熱が奪われ速硬性混和材の機能が適切に発揮されずコンクリートの圧縮強度は図-15のように緩やかな強度発現となる。またコンクリート表面をブルーシートで覆うと露天養生と比べ温度変化が少なくなり、圧縮強度の発現は断熱材で養生したものに近くなる。速硬コンクリートの養生方法の違いは、練上りから6時間未満のコンクリート圧縮強度に影響を与えるが、24時間後の圧縮強度は養生の違いは少ない。

(2) ひび割れ防止対策に関する実験

速硬コンクリートの表面に発生する初期ひび割れを防止するため、まだ硬らないコンクリートの養生やコ

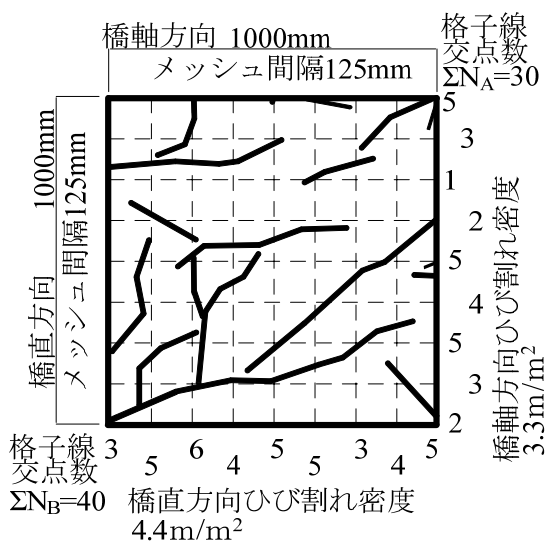


図-12 速硬コンクリートの初期ひび割れ

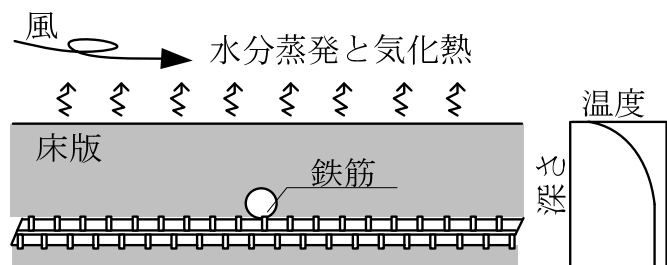


図-13 水分蒸発による水和熱分布

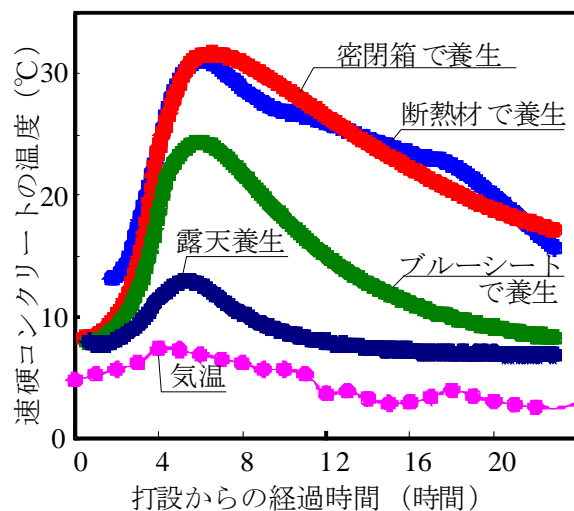


図-14 養生方法による温度変化の違い

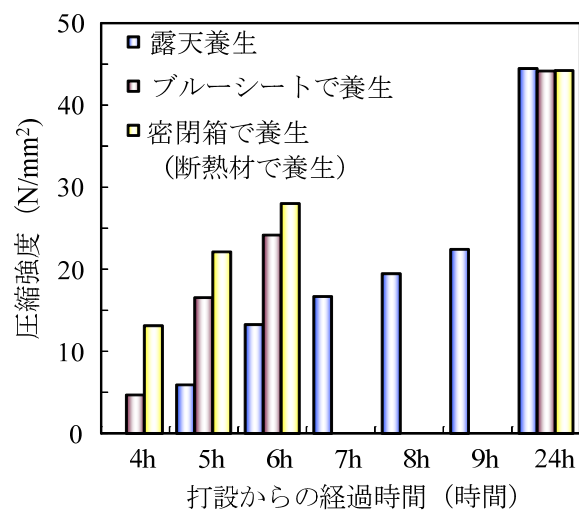


図-15 温度変化による圧縮強度の推移

テ仕上げのタイミングを変化させた実験を行っている。図-16は代表的な実験条件における速硬コンクリートの表面ひび割れのスケッチを示している。なお実験で用いた供試体は、厚さ 100mm のコンクリート版を寸法 1320×840mm, 560×350mm の二種類としている。また硬らないコンクリートの表面に被膜養生剤を塗布する場合、コンクリートの表面に初期ひび割れは生じない。一方、コンクリート表面に被膜養生剤を塗布しない場合はコンクリートの表面に無数の細かいひび割れが確認され、被膜養生剤によりコンクリート表面の水分蒸発を防ぐことが重要であることがわかる。また被膜養生剤を塗布しない場合の比較として、コンクリート表面のコテ仕上げのタイミングにより初期ひび割れの発生を抑制することができる。コンクリート表面の仕上げは速硬コンクリートの練上がりから 60~90 分程度で行うと初期ひび割れを除去することができる傾向にある。

このことから、速硬コンクリートを RC 床版の補修に用いる場合は、コンクリート表面に被膜養生剤を塗布しトロウエルを使用してコンクリートの表面をタッピングして初期ひび割れを除去した後に、コンクリートの水分蒸発による気化熱により急激に水和熱を放出させないためコンクリート表面をブルーシートで覆う養生方法を行うことが望ましいと提案する。

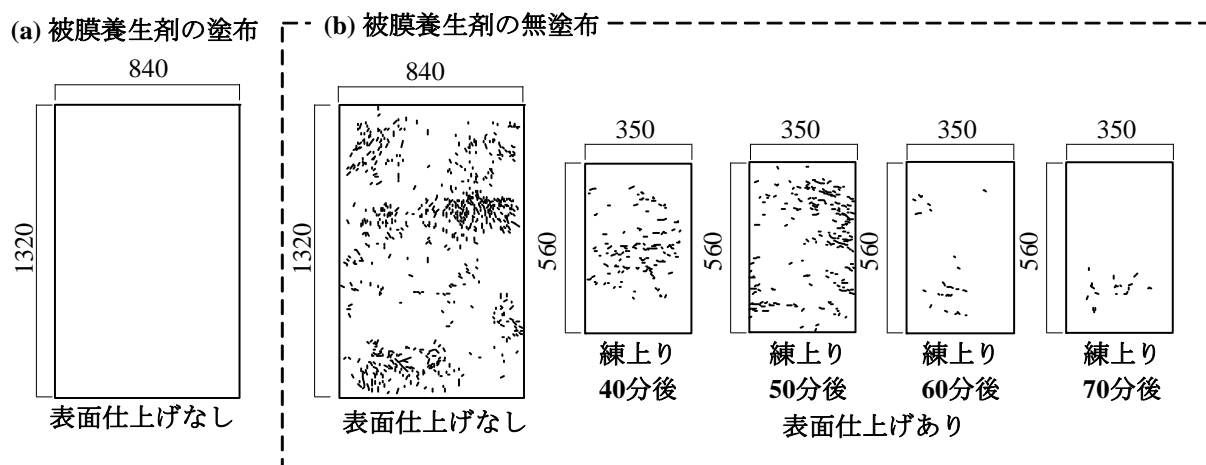


図-16 被膜養生剤の有無や仕上げタイミングの違いによる初期ひび割れの発生状況

6. まとめ

本研究はレディーミクストコンクリートに遅延剤と速硬性混和材を添加することで、材料単価が従来の超速硬コンクリートの約 1/2 倍となる新しいコンセプトの補修コンクリートの製造方法の実用化を検証した。北陸道の凍結防止剤で塩害劣化した RC 床版の補修工事で実施した約 1000m² の試験施工の結果から、速硬コンクリートの製造方法は RC 床版の補修について良好な施工できることが確認できた。

この研究成果として補修コンクリートの材料費を大幅に縮減でき、工場によるレディーミクストコンクリートを補修コンクリートに活用する材料供給の基盤作りを整備できた。また速硬コンクリートはブリーディングが少ない特徴がありコンクリート表面の水分蒸発の影響を受けやすいため、コンクリート表面には被膜養生剤を塗布し、練上りから 60~90 分で表面仕上げして初期ひび割れを除去することや、水和熱を急激に放出させないためブルーシートなどでコンクリート表面を覆うことが望ましいと提案した。

参考文献

- 1) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧（第二版），pp.165-175，1996.2
- 2) 小林一輔：コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断，pp.118-123，森北出版，1991

上下水道・汚水関連施設における中性化の文献調査と事例研究

京滋コンクリート診断士会 山崎 尚彦

1. はじめに

上下水道関連施設における水理構造物「コンクリート製」に生じる変状・劣化において、その現象は様々であり、変状が生じた原因についての適切な判断が行われているかどうかを疑問視することも少なくない。この原因として「**中性化による強度の変化**」が劣化と判断されていることがある。

厳密に言うと「**中性化と炭酸化**」は異なった現象である。ここで言う中性化とは、炭酸化の事であり、真の中性化は溶脱「溶出」によってカルシウムが溶け出した場合に生じる現象であるといえる。

色々な参考文献では種々の炭酸化現象を“中性化”という言葉に集約しているが、少なくとも上水施設・汚水・汚泥施設、排水・廃水等の雑排水処理の関連施設においては、構造物を取り巻く

「腐食環境」によって中性化の形態が異なっていることに注目し、更に現地調査で判明した劣化の形態「劣化機構」を把握した上で、中性化の実態をわかりやすく説明することに努めた。

2. 中性化研究の履歴

コンクリート工学においてコンクリートの炭酸化を中性化と呼んでいたが、これは調べた炭酸化の程度をもって鉄筋コンクリート構造物の「**余寿命推定**」の指標としてきたからである。

コンクリートの炭酸化は、コンクリート技術「**材料**」が先行しており、「**セメント化学**」の研究は行われてこなかった。中性化の研究では、浜田博士が考案した中性化速度式を岸谷博士が修正し、我が国ではコンクリートの中性化速度式として岸谷式が一般的に使われるようになってきている。

既往の研究のほとんどが、中性化速度に影響を与える各種要因を定量的に把握しようとするものであり、これは耐久性を中性化によって生じる鉄筋腐食の観点からのみ捉え、主に鉄筋被りと連動させて建物の余寿命を予測する指標の他に、耐久性設計のパラメーターとして位置付けたためである。

3. 中性化・炭酸化の種類と定義

上下水道施設は特殊な環境下にあり、一般的な考え方や基準値の取扱いとは大きく異なるケース「**環境による変動**」があることをよく理解しておく必要がある。上水道施設のコンクリートは、築造後既に50年以上を経過するものもあり、特殊な環境下で長期間に渡って供用されて来ており、下水道施設コンクリート構造物においても、近年耐久性や長寿命化に関する問題が出始めて来ている。

3.1 種別と定義

コンクリートにおける中性化（炭酸化）の影響は避けることが出来ないが、問題はその中性化の速さにあると言える。中性化はコンクリートの耐久性を考えた場合、コンクリートの寿命を短縮するような影響を与えることは少ない事を意味しているが、少なくともそれが低いpHで生じたものか、あるいは酸（無機酸・有機酸）によって生じたものかの区別は必要となってくる。

キーワード：化学的浸食、中性化、浸食性炭酸、劣化予測、劣化診断、

連絡先：大阪府高槻市南松原町7-4 TEL072-671-6340、FAX072-671-6340、

- 1) **中性化とは**、コンクリート中の水酸化カルシウムが、大気中の二酸化炭素のコンクリート内部への拡散・浸透により、炭酸カルシウムが生成されてアルカリ性が喪失する現象を“**中性化反応**”と呼んでいる。中性化が耐久性上重要視されるのはコンクリート自体でなく、コンクリート中の鉄筋が発錆するからであり、 $\text{pH} < 9$ で発錆（さび）が始まる。***アルカリ性が低下する現象**
- 2) **炭酸化とは**、セメント水和物が大気中の二酸化炭素の作用で炭酸カルシウムと他の物質に変化する現象を“**炭酸化反応**”と呼んでおり、炭酸化はコンクリートの「**変質**」と位置付けされる。
- 3) **溶脱とは**、コンクリート中の成分が溶け出してくることを表す現象である。水路、ダム、用水ピット等、コンクリートを化学的に“**浸食させる物質を含まない水**”と接触する場合に生じる現象で主にコンクリート中のカルシウム分が接触する水に溶け出して、人間で言う「**骨粗しょう症**」のように変質が生じるもので、劣化速度は極めて遅いものの、幅広い構造物において様々な課題を引き起こすのが、溶脱による劣化と呼ばれている。
- 4) **浸食性遊離炭酸ガス**「水中の CO_2 」による腐食とは、二酸化炭素（炭酸ガス）は水中に溶解して各種の形態をとる場合があり、水中の炭酸ガス濃度が微生物等による有機物の分解により生成される二酸化炭素によって高められると、過剰な遊離型炭酸が存在する。この過剰な遊離型炭酸はコンクリートを表面から浸食させ、水が流動・攪拌されるような場所においてはこの浸食性遊離型炭酸の作用と摩耗作用で浸食性が高まる。
- 5) **嫌気性細菌「硫黄酸化細菌」**による腐食とは、嫌気条件下の接液部において嫌気態（硫化物等）の硫黄が多く存在する。この硫黄において下水道施設で問題となるのは、下水中の還元態の硫黄化合物（硫化物）であり、無機酸と硫黄を含むたんぱく質やアミノ酸等の有機物質が含まれ、硫酸塩還元細菌と呼ばれ、有機物を食料として硫化物「アミノ酸、炭水化物、有機酸」を生成する。

3.2 炭酸化腐食の表面観察

写真-1 槽内の底床面（嫌気汚泥固着）



真-3 水路側部（低い pH 呈色反応）



写真-2 槽内の柱面（曝気の影響）



写真-4 貯留槽側部の溶脱（脆弱化）



4. 中性化に関する変質と問題点

4.1 炭酸化による組織の脆弱化

脆弱な組織体とは、骨材と炭酸カルシウムとシリカとの混合体から成る土石材料に変質することを指し、炭酸化領域と非炭酸化領域で炭酸イオンと水酸化イオンの濃度勾配が生じる。

もう一つは温・湿度による細孔溶液の移動が考えられる。炭酸化によって健全なコンクリートが持っている靱性（ねばり）が失われると岩石のように脆い組織になる。

コンクリート構造物が炭酸化によって生じる脆弱化現象は以下である。

- 1) 硬くて脆くなる。2) 炭酸化収縮が生じやすくなる。
- 3) 表面に細菌が住みやすくなる。4) 水や硫酸イオンが浸透しやすくなる。
- 5) 耐久性が低下する。

4.2 中性化とコンクリートの強度について

中性化を受けたコンクリートは内部空隙率が低下する（炭酸化によって内部隙間が減少する）

- 1) 表面硬度の上昇、2) 表層強度「圧縮力」の上昇、3) イオンの透過性の低下、
- 4) 水分子の透過性の低下、5) 鉄筋腐食が生じやすくなる。

つまり鉄筋腐食を除けば、炭酸化による劣化作用に対する抵抗力が向上するので、中性化を受けることは、コンクリートの炭酸化を除けば“有益な変化”である。*表-1 参照

- 1) コンクリート強度が $25\sim 30\text{N/mm}^2$ の場合、中性化のスピードは速くなるので、中性化の進行に併せて鉄筋腐食が生じやすくなる。
- 2) 炭酸カルシウムは十分に湿潤した環境「湿潤」では、pH10（アルカリ領域）程度を示すために、鉄筋への発錆にまでは至らないものと考えられる。しかし炭酸化が急速に進んだ場合、コンクリート中では物質移動や濃縮が生じやすくなり、炭酸化により糊の役目をするセメント分が流失・減少してしまい、付着性が大きく低下していくものと考えられる。つまり強度（強さ・硬さ）はあるものの、脆いコンクリートになっている。特に水の流動による物理的浸食と、浸食性炭酸ガスの高濃度化によってコンクリートが表面から侵食されている現象が生じているものと考えられる。

表-1

測定系列	浄化センター水処理施設「反応槽/標準活性汚泥処理」				備考欄
	2.9mm	5.8mm	60.8mm	30.4mm	
中性化の平均深さ	2.9mm	5.8mm	60.8mm	30.4mm	速度式 30～40 mm
鉄筋被り（初錆有無）	49.8 mm	24.8 mm	49. mm (錆有)	42. mm (錆有)	≥ 40 mm (鉄筋断面)
単位密度 (g/cm ³)	2.28	2.29	2.43	2.44	2.35(基準値)
引張り強度 (N/mm ²)	2.05	1.90	2.91	2.43	2.58(基準値)
圧縮強度 (E _c 静弾性)	33.4(24.6)	28.9(28.7)	35.2(30.8)	36.8(27.7)	設強 20.6N/mm ²
E _c 標準値 (kN/mm ²)	28.0	28.0	29.0	30.0	土学会標準示方書
μ (ポアソン比)	0.187	0.181	0.221	0.214	縦ひずみ/横ひずみ
ポアソン比基準値	0.2	0.2	0.2	0.2	RC 構造基準
脆度度 (σ _c /σ _t)	16.3(12.3)	15.2(12.0)	12.1(12.4)	15.1(12.5)	()内は基準値

3) 炭酸化によるコンクリートの脆弱化現象について

普通接液部には炭酸ガスが溶解し、炭酸あるいは炭酸ガスの状態で含まれているので、炭酸化はゆっくりとした速さで進行する。しかし炭酸カルシウムは十分に湿潤した状態ではpH10程度を示すので、鉄筋の発錆はそれほど懸念する必要はない。これが従来から言われてきた水中では中性化が進行しないとされている理由である。

しかし長期間水と接していたり、曝気の影響や水位変動による乾湿繰り返しを受ける部位にある場合には水中の構造物においても炭酸化の進行速度を考慮する必要がある。

- 水中に含まれる遊離腐食性炭酸ガス「水中における二酸化炭素」がコンクリート（水和物）と反応して、炭酸化合物及びその他の化合物に分解される。
- 水中における二酸化炭素の拡散速度は空気中よりも4桁程遅延するために、拡散は非常に緩慢である。また空隙中に水が無ければ二酸化炭素は気体のままであり、セメントとの化学反応（溶け出す）は生じない。
- 表面の靱性（ねばり）が次第に失われて、岩石のように硬くて脆くなっていく。

5. まとめ

上・下水道施設のコンクリート構造物で生じる中性化が鉄筋腐食としてのものなのか、あるいは腐食（劣化）に結び付くような炭酸化による劣化なのかを調べる際には、中性化や劣化としての“炭酸化”の知見だけでなく、老化・風化といったコンクリート構造物の経年劣化にも注目することは劣化調査・診断を行う過程で重要な指標といえる。

同時に経年に伴って生じるひび割れや、漏水（エフロ）・鉄筋の錆汚れと言った外観変状等においても、劣化を促進させる**外観異常**と言う観点から目視観察を行なうことが必要である。

中性化の進行を調べることは、構造物の耐久性評価の観点から重要な事項であるが、上・下水道施設の構造物の場合、一般的な中性化と炭酸化の違いをよく理解して調査を進めることが必要であり、中性化という現象を調べる段階においてはどのようなデータを採取し、それをどう活用するのかを考えないで、コンクリートの一部を壊すようなコア採取による構造強度を調べる試験方法が長く漠然と続いていることには疑問を持たざるを得ない。

中性化を調べる際には廻りの情報として、中性化が生じている環境要因・条件・環境、及び構造物の履歴、強度・pHの低下、中性化速さ（理論値との比較）等、中性化が促進される環境要因・促進因子を見過ごす事なく、中性化が進行している周辺情報の収集・分析にまで想像（想定予測）を巡らすことにも留意する必要がある。

今後増加が予測される上・下水道・汚水処理関連施設の老朽インフラにおける健全性の把握や、長寿命化に向けた技術開発の中で、**中性化の指標**は常時点検・調査が行えない施設においては重要な健全度指標「耐久性評価」となるために、中性化の本質をよく理解して調査に臨むことが必要となってくる。現地で採取されたデータ資料としての中性化評価は、コンクリート構造物を今後長期に渡って長く使い続けられるそのような構造物の改築・更新補修計画の重要な基礎資料となるものと考えられる。

参考資料：ネビルのコンクリートバイブル「英訳：三浦尚（東北大学教授）」技報堂出版

インフラ保全におけるデジタル画像診断支援システム技術の現状と展開

株式会社 中部EEN 代表取締役 衣笠貢司

1. はじめに

平成24年5月21日、国土交通省：インフラ長寿命化計画(行動計画：平成26年度～平成32年度)が決定され、国民生活やあらゆる社会経済活動を支える各種施設をインフラとして持続可能なメンテナンスサイクルの構築に向けた取り組みを進めることになった。今後の人口減少、少子高齢化の進展等といった社会構造の変化によって厳しい財政状況での安心、安全の確保、中長期的な維持管理・更新等に係るトータルコストの削減や予算の平準化、メンテナンス産業の競争力確保の実現を目指すことになる。例えば橋梁(約70万橋)、トンネル(約1万本)等については、5年に1回近接目視による点検を省令にて規定された。以下に20年後に建設後50年以上経過する施設を一部第1図に示す。

分野	施設	建設後50年以上経過する施設の割合 ^{※1}			管理者 ^{※2}	施設数
		平成25年3月現在	10年後	20年後		
道路	橋梁 (橋長2m以上)	16%	40%	65%	国	27,222 橋
				高速道路会社	16,438 橋	
				都道府県	129,916 橋	
				政令市	47,593 橋	
				市区町村	478,068 橋	
				国	1,299 本	
トンネル	18%	32%	48%	高速道路会社	1,583 本	
			都道府県	4,790 本		
			政令市	335 本		
			市区町村	2,369 本		

第1表 (行動計画 50年以上経過する施設)

社会資本の『アセットマネジメント』については工学関係等だけではなく経済学的、経営学的な知見を取り入れ総合的な視点から、国民・企業の受益向上のため、長期的な視野で実践する体系的な活動であるべきと考える。

各種インフラを資産として捉え、損傷、劣化などを把握、評価、予測するとともに、いつどのような対策をどこに行うのが、さも費用対効果が高いかを検討し計画的かつ効果的な維持管理、減災を行うか、それらをいかに安く、安全、正確に行い長寿命化に対応するかを考えるなか

で従来の目視や打音検査に頼らず、センサー、過去の点検履歴やインフラの利用者から得た大量なデータを分析し、効率的な補修計画を立てる「スマートメンテナンス」(賢い維持管理)の時代が到来しつつある。またインフラの健全性評価(ヘルスマonitoring)の為にセンシング技術も進んでいる。

現状の問題点

材料	損傷の種類	標準的な点検方法	必要に応じて採用できる方法の例
鋼	腐食	目視、ノギス	超音波板厚計による板厚計測
	亀裂	目視、テストハンマー	渦流探傷試験、磁粉探傷試験、超音波探傷試験、浸透探傷試験
	ゆるみ、脱落	目視	ボルトヘッドマークの確認、たたき試験、超音波探傷、軸力計を使用した調査
	破断	目視	—
	防食機能の劣化	目視	写真撮影(画像解析による調査)、インピーダンス測定、膜厚測定、付着性試験
コンクリート	ひび割れ	目視、クラックゲージ、写真	写真撮影(画像解析による調査)
	剝離、鉄筋露出	目視、写真	—
	漏水、遊離石灰	目視、写真	—
	抜け落ち	目視	—
	コンクリート補強材の損傷	目視	たたき試験、赤外線調査
その他	床版ひび割れ	目視、クラックゲージ	写真撮影(画像解析による調査)
	浮き	目視	たたき試験、赤外線調査
	遊間の異常	目視、コンベックス	—
	路面の凹凸	目視、コンベックス、ボール	—
	舗装の異常	目視	—
共通	支承の機能障害	目視	移動量測定
	その他	—	—
	定着部の異常	目視	たたき試験、赤外線調査
	変色、劣化	目視	—
	漏水、滞水	目視	—
	異常な音、振動	聴覚、目視	—
	異常なたわみ	目視	—
	変形、欠損	目視、水系、コンベックス	—
	土砂詰まり	目視	—
	沈下、移動、傾斜	目視、水系、コンベックス	—
洗掘	目視、水系、ボール	カラーイメージングソナー	

国土交通省が2004年3月に制定した「橋梁定期点検要領(案)」から抜粋

第2表 国土交通省による橋の定期点検項目と方法

■ 徒歩で簡易に目視点検した場合の判定結果のバラツキ

	スパン	判定結果									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
簡易法の判定結果	点検者A	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A
	点検者B	B	B	B	S	B	A	S	S	S	A
	点検者C	A	A	B	B	B	A	B	B	B	A
	点検者D	B	B	B	S	S	A	S	B	B	A
	点検者E	A	A	S	A	A	A	A	A	A	A
	点検者F	B	A	B	B	A	A	A	A	A	B
	点検者G	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
従来法の判定結果		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

大分工業高等専門学校の工藤宗治准教授が、九建設など3社と共同で、自治体向けの簡易なトンネル点検手法を研究した際のデータをもとに本誌が作成。表中のアルファベットは、トンネル変状の判定結果。A、B、Sの順に変状が大きいき。ここでは国土交通省の定期点検要領(案)における打音と近接目視を主とする初回点検を従来法と設定した。

第3表 徒歩で簡易に目視点検した場合の判定結果のバラツキ

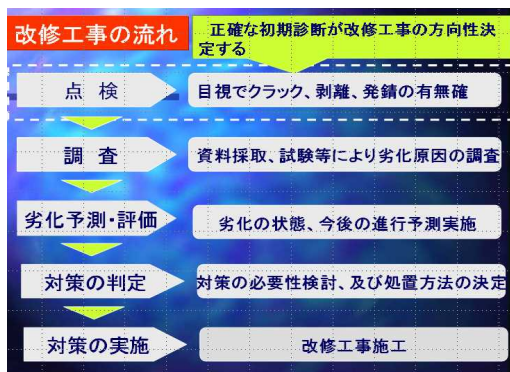
目視や打音による検査の問題は第3表より「点検者によってバラツキが生じる」、これは点検者の経験や技量が点検結果に大きな影響をもたらしている。当システムでは多くの技術者が正射影画像により任意の位置の0.2mm以上のクラック幅や長さを確認でき経時変化を定量的に評価することを容易にした。

昨年は名古屋市より「次世代IT技術開発にかかる産業人材育成事業」を受託した、これはデジタル画像処理技術とIT機器を用いたリモート撮影装置による人が容易には入れないプラント施設の診断技術開発及び実稼働を目指す事業を実施し事業化になったもので後程紹介する。

また平成26年度はあいち創造研究開発事業「トンネル壁面変状の走行自動撮影システムに関する研究開発」を進めておりトンネルの劣化「ひびわれ等」をカメラ・照明を搭載したトラックを走行させ、従来にくらべて、データの正確性や保存性に優れ時間やコストが低減でき経年監視機能を有することを目指している。トンネルでの点検事例も後程紹介する。まずは一般的な構造物でシステムの説明をする。

2. 構造物の維持・改修工事の流れ

まず一般的構造物の維持・改修工事の流れを概略説明をする。初期診断により、劣化に関する情報を得ることは①損傷原因の推定②損傷原因を確定する為の調査の必要性③以降の補修・補強の必要性および方法を判断する重要な手掛かりとなる。



第1図 構造物の維持・改修工事の流れ

本システムは、第1図の点検と調査の部分、遠隔・簡便化・経年観察比較を図り、省力化を図る。

3 構造物のひび割れ・劣化画像診断

(1) 初期診断について

一般的構造物を診断する場合の対象である構造物の表面変状は、以下のものが考えられる。

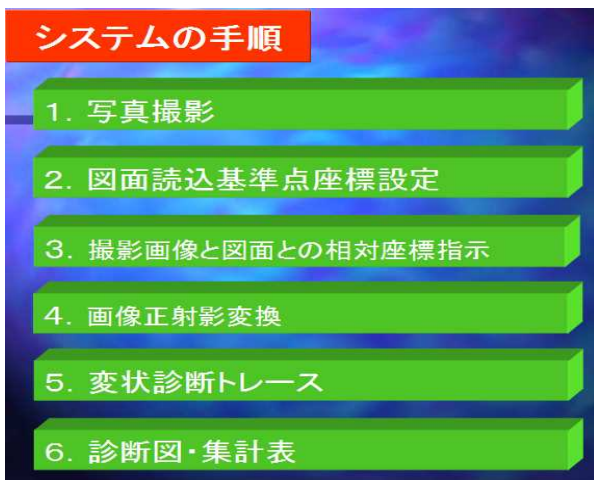
- ①ひびわれ0.2mm以下(コンクリート部)、溶接部
- ②剥落
- ③錆汁・鉄筋露出
- ④金属部の腐食、疲労劣化
- ⑤浮き(赤外線画像)・剥離
- ⑥遊離石灰・漏水等

以上のひびわれ、腐食、剥離、浮き等の調査を、デジタル画像と専用の画像診断ソフトの組み合わせにより行うシステムを開発・実用化している。本システムの実用化により、従来の手書きによる表面変状測定作業の高精度化、効率化及び安全化が図れたがその他にも、作成した劣化状況図がCADデータとして利用できることから、膨大な長さや面積の表示図面化及びその集計が容易である。また、ひび割れ幅等(0.2mm以上)を容易に求める等の優れた機能を有しており、過去のデータとの経年変化監視など今後工場設備での応用にも期待できると考える。

(2) 画像診断システムの概要

構造物の0.2mm以上ひびわれ、長さ、劣化面積等の測定を実施するには、従来現場でのクラックスケール等によるひび割れ幅計測と図面への手書きトレース方法がほとんどである。また、道路舗装の場合は高価な自動計測車で、路面の写真を真上から撮影できる装置による方法に限られていた。

しかしながら、近年のデジタルカメラ（以後デジカメ）とパソコン（以後PC）の高性能化と画像処理技術の進歩により、これを組み合わせることで100m以上離れた構造物でも画像を精度良く得ることが可能となった。そこで、筆者は、2003年より市販のデジカメで撮影した任意の方向からの画像を専用の画像処理ソフトにより、真上から見た画像に変換（以後正射影変換）して、構造物のひび割れ等の表面変状計測を効率的に行うために蓄積したひび割れデータと照合し、画像を適正に処理するシステムを実用化



第2図 画像診断システムの手順

した。

(3) 画像診断システムの機能

本画像システムを用いた診断手順は、第2図の通り、現場での作業はデジカメで写真撮影を行うのみで、後は事務所でのPC作業となる。

従来の診断方法と比較すると、現場作業では、調査時間の削減と足場などが不要になるため、仮設費が大幅に低減される。また、事務処理作業では記録がデジタル化されているため、診断精度の向上と事務量の削減となる。

① 写真撮影

構造物撮影に用いるデジカメの性能は、1500万画素以上、光学レンズの機能をもつ機種（一眼レフ）を使用する。

撮影に際しては、予め基準となる型枠跡、目地などを設定して、撮影範囲の中に四隅の位置が識別できる状態で撮影する。

この際、正射影変換後の画質の低下を防ぐために可能な限り正射面に近い方向から望んだ撮影をする。

写真1に、マンションを対象とした撮影の事例を示す。

写真1 マンションの撮影事例

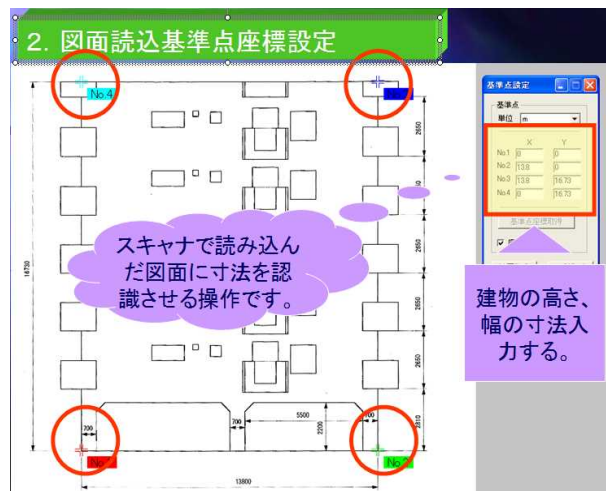


撮影範囲はデジカメの性能により多少異なるが、一般に、1600万画素程度のデジカメを使用する場合には長辺方向4.5m以下程度を推奨範囲とする。なお、一般的に撮影距離は30m程度が多いが、光学35倍で撮影距離100m程度までの摘要が確認されている。

② 図面読込基準点座標設定

JPEGの電子データに構造物の高さ、幅の基準点及び寸法を入力する。この時点で図面データ上での寸法認識が可能となる（第3図）。

第3図 基準点座標設定



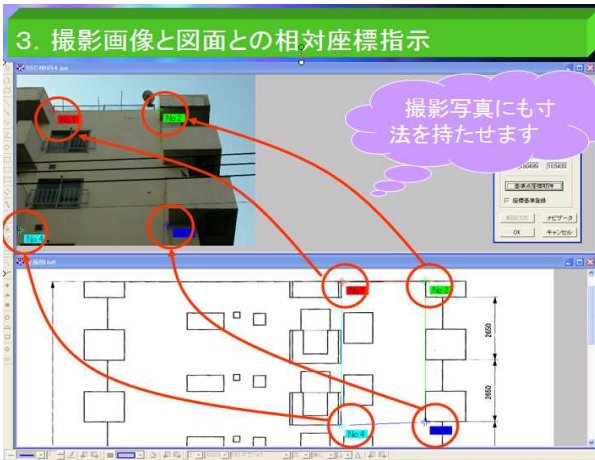
条件に合った図を選択して使用できる。

③ 撮影画像と図面との相対座標指示

寸法が認識された図面上のポイントと同じ位

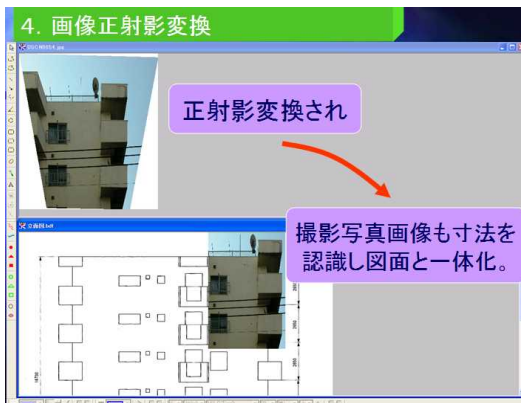
置を撮影写真にも入力し写真にも高さ、幅の寸法情報を認識させデータ化する（第4図）。

第4図 撮影画像と図面との相対座標指示



④ 画像正射影変換

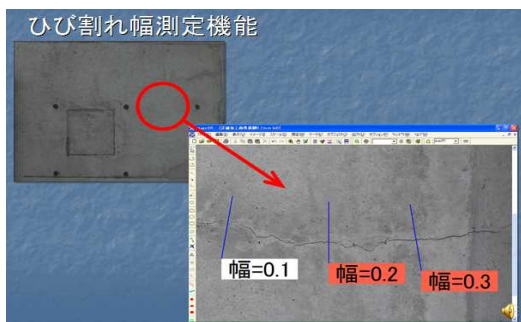
画像に寸法を入力したことにより写真は正射影変換されるとともに、図面上に位置や長さが真正面から見た写真レイヤーを作成した状態になる（第5図）。 第5図 正射影変換



⑤ 変状診断トレース

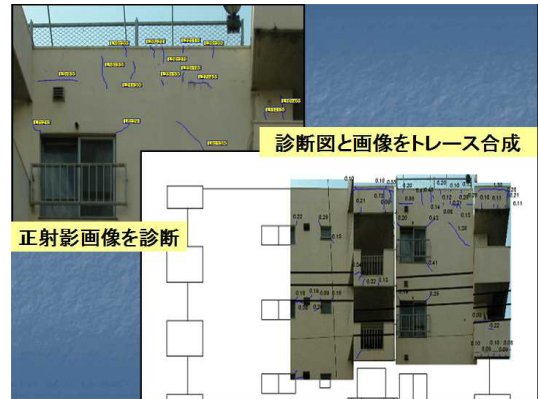
ひび割れ幅測定機能により、正射影後の画像から任意のひび割れ幅を安定的に測定し、ひび割れ幅を区分する。（第6図）。

第6図 ひび割れ幅測定



ひび割れ幅の区分ごとに画面上でクラック部のトレース、または範囲を指定しエフロ、鉄筋錆、タイルの欠落、塗膜剥離等の、診断情報を入力すると、長さ面積などを自動計測され表示される。また計測情報は図面及びエクセル帳票に連動している（第7図）。

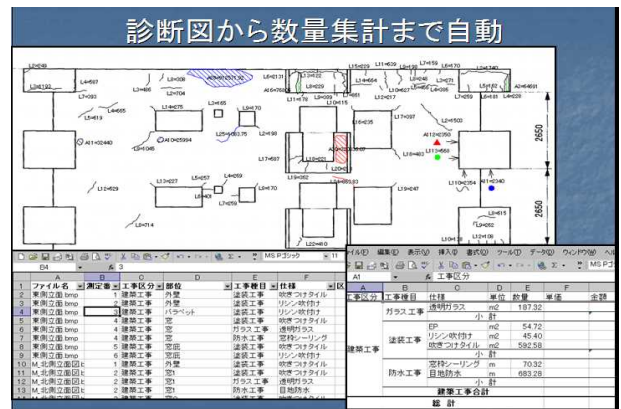
第7図 診断図とトレースの合成



⑥ 診断図・集計表

同様の手順を繰り返してトレース作業完了すると、診断図が出力される。同時に各診断項目ごとの集計表がエクセルに出力される（第8図）。

第8図 診断図と集計表



従来の測定資料やスケッチ図を見ながらの診断図、数量作成方法と比較すると、記録のデジタル化、診断精度の向上、診断図・数量表作成時間の短縮となる。ひび割れ幅・面積測定機能等により、幅・長さ・面積を検出できるので、変状・劣化の原因推定、緊急対策の必要性、補修・補強の要否の判断、補修・補強方法の選定時の判断資料となる。

(4) 道路舗装の事例

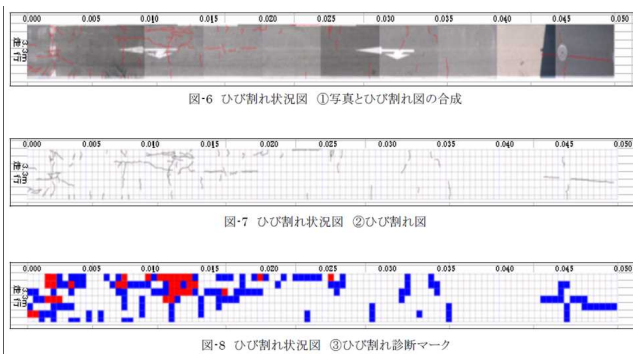
道路舗装の診断に使用する平面図（以後メッ

シュ図と称す)は『一般道路』および『高速道路』用に予め舗装幅員の異なる各種の図面が用意されており、条件に合ったメッシュ図を選択して使用できる(第9図・第10図)。

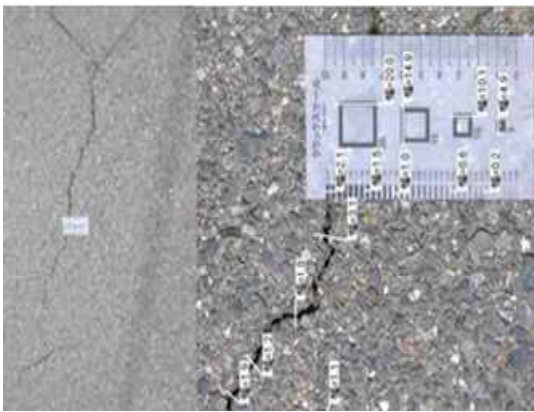
第9図 集計表

測定番号/内 容	方 法	測 点	レベル	対象距離	係 数
111	舗装診断	LHアスフひび割れ	2本以上	330	1
110	舗装診断	LHアスフひび割れ	1本	330	0.3
109	舗装診断	LHアスフひび割れ	2本以上	330	1
108	舗装診断	LHアスフひび割れ	2本以上	330	1
107	舗装診断	LHアスフ			
106	舗装診断	LHアスフ			
104	舗装診断	LHアスフ			
103	舗装診断	LHアスフ			
102	舗装診断	LHアスフ			

測点番号	測点距離	ひび割れ幅	ひび割れ長さ	ひび割れ面積	ひび割れ率
00001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00002	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000
00003	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000
00004	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000
00005	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000
00006	0.025	0.000	0.000	0.000	0.000
00007	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000
00008	0.035	0.000	0.000	0.000	0.000
00009	0.040	0.000	0.000	0.000	0.000
00010	0.045	0.000	0.000	0.000	0.000
00011	0.050	0.000	0.000	0.000	0.000
00012	0.055	0.000	0.000	0.000	0.000
00013	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000
00014	0.065	0.000	0.000	0.000	0.000
00015	0.070	0.000	0.000	0.000	0.000
00016	0.075	0.000	0.000	0.000	0.000
00017	0.080	0.000	0.000	0.000	0.000
00018	0.085	0.000	0.000	0.000	0.000
00019	0.090	0.000	0.000	0.000	0.000
00020	0.095	0.000	0.000	0.000	0.000
00021	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000
00022	0.105	0.000	0.000	0.000	0.000
00023	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000
00024	0.115	0.000	0.000	0.000	0.000
00025	0.120	0.000	0.000	0.000	0.000
00026	0.125	0.000	0.000	0.000	0.000
00027	0.130	0.000	0.000	0.000	0.000
00028	0.135	0.000	0.000	0.000	0.000
00029	0.140	0.000	0.000	0.000	0.000
00030	0.145	0.000	0.000	0.000	0.000
00031	0.150	0.000	0.000	0.000	0.000
00032	0.155	0.000	0.000	0.000	0.000
00033	0.160	0.000	0.000	0.000	0.000
00034	0.165	0.000	0.000	0.000	0.000
00035	0.170	0.000	0.000	0.000	0.000
00036	0.175	0.000	0.000	0.000	0.000
00037	0.180	0.000	0.000	0.000	0.000
00038	0.185	0.000	0.000	0.000	0.000
00039	0.190	0.000	0.000	0.000	0.000
00040	0.195	0.000	0.000	0.000	0.000
00041	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000
00042	0.205	0.000	0.000	0.000	0.000
00043	0.210	0.000	0.000	0.000	0.000
00044	0.215	0.000	0.000	0.000	0.000
00045	0.220	0.000	0.000	0.000	0.000
00046	0.225	0.000	0.000	0.000	0.000
00047	0.230	0.000	0.000	0.000	0.000
00048	0.235	0.000	0.000	0.000	0.000
00049	0.240	0.000	0.000	0.000	0.000
00050	0.245	0.000	0.000	0.000	0.000
00051	0.250	0.000	0.000	0.000	0.000
00052	0.255	0.000	0.000	0.000	0.000
00053	0.260	0.000	0.000	0.000	0.000
00054	0.265	0.000	0.000	0.000	0.000
00055	0.270	0.000	0.000	0.000	0.000
00056	0.275	0.000	0.000	0.000	0.000
00057	0.280	0.000	0.000	0.000	0.000
00058	0.285	0.000	0.000	0.000	0.000
00059	0.290	0.000	0.000	0.000	0.000
00060	0.295	0.000	0.000	0.000	0.000
00061	0.300	0.000	0.000	0.000	0.000
00062	0.305	0.000	0.000	0.000	0.000
00063	0.310	0.000	0.000	0.000	0.000
00064	0.315	0.000	0.000	0.000	0.000
00065	0.320	0.000	0.000	0.000	0.000
00066	0.325	0.000	0.000	0.000	0.000
00067	0.330	0.000	0.000	0.000	0.000
00068	0.335	0.000	0.000	0.000	0.000
00069	0.340	0.000	0.000	0.000	0.000
00070	0.345	0.000	0.000	0.000	0.000
00071	0.350	0.000	0.000	0.000	0.000
00072	0.355	0.000	0.000	0.000	0.000
00073	0.360	0.000	0.000	0.000	0.000
00074	0.365	0.000	0.000	0.000	0.000
00075	0.370	0.000	0.000	0.000	0.000
00076	0.375	0.000	0.000	0.000	0.000
00077	0.380	0.000	0.000	0.000	0.000
00078	0.385	0.000	0.000	0.000	0.000
00079	0.390	0.000	0.000	0.000	0.000
00080	0.395	0.000	0.000	0.000	0.000
00081	0.400	0.000	0.000	0.000	0.000
00082	0.405	0.000	0.000	0.000	0.000
00083	0.410	0.000	0.000	0.000	0.000
00084	0.415	0.000	0.000	0.000	0.000
00085	0.420	0.000	0.000	0.000	0.000
00086	0.425	0.000	0.000	0.000	0.000
00087	0.430	0.000	0.000	0.000	0.000
00088	0.435	0.000	0.000	0.000	0.000
00089	0.440	0.000	0.000	0.000	0.000
00090	0.445	0.000	0.000	0.000	0.000
00091	0.450	0.000	0.000	0.000	0.000
00092	0.455	0.000	0.000	0.000	0.000
00093	0.460	0.000	0.000	0.000	0.000
00094	0.465	0.000	0.000	0.000	0.000
00095	0.470	0.000	0.000	0.000	0.000
00096	0.475	0.000	0.000	0.000	0.000
00097	0.480	0.000	0.000	0.000	0.000
00098	0.485	0.000	0.000	0.000	0.000
00099	0.490	0.000	0.000	0.000	0.000
00100	0.495	0.000	0.000	0.000	0.000



第10図 状況図(エクセル形式)



第11図 ひびわれ幅の測定

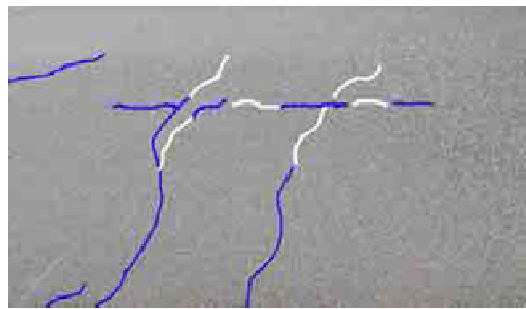
道路舗装の場合、解析作業に要する時間は、ひび割れ率により異なるが、ひび割れ率が20%程度の場合で1日当り約600m²である。なお、現地での測定作業については、ひび割れの多少に拘わらず一定であり、従来の方法に比べて大幅な削減が可能となった。またこれまでの舗装路面のひび割れ測定においては、ひび割れ幅の評価はほとんどなされていないが、ひび割れ幅

の評価を加えることにより、破損原因の検討や維持・修繕方法の検討資料として活用が可能である。

(5) 経年変化の追跡

本ソフトでは最新の撮影画像と同一位置の過去のひび割れデータを合成することができる。したがって、過去のデータに新たに発生したひび割れ、範囲等を付け加えることにより、追跡

第15図 調査時における測定値のデータ化、省力化が可能である。また、第15図のように過去のひび割れと最新のひび割れデータの線種・太さ・色を変え、ひび割れ幅・長さ・面積などの経年変化をわかりやすく表示することにより、劣化原因の検討資料として利用できる。

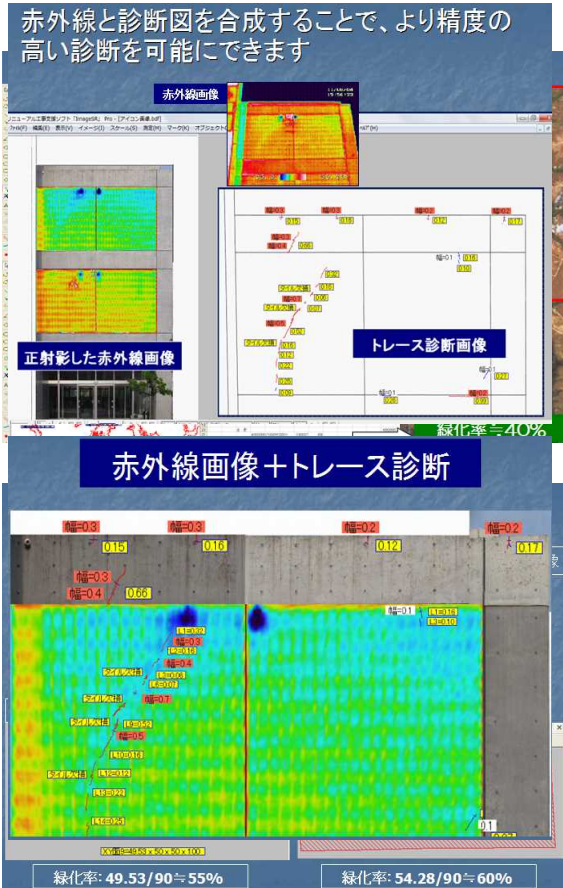


第15図 経年変化の追跡

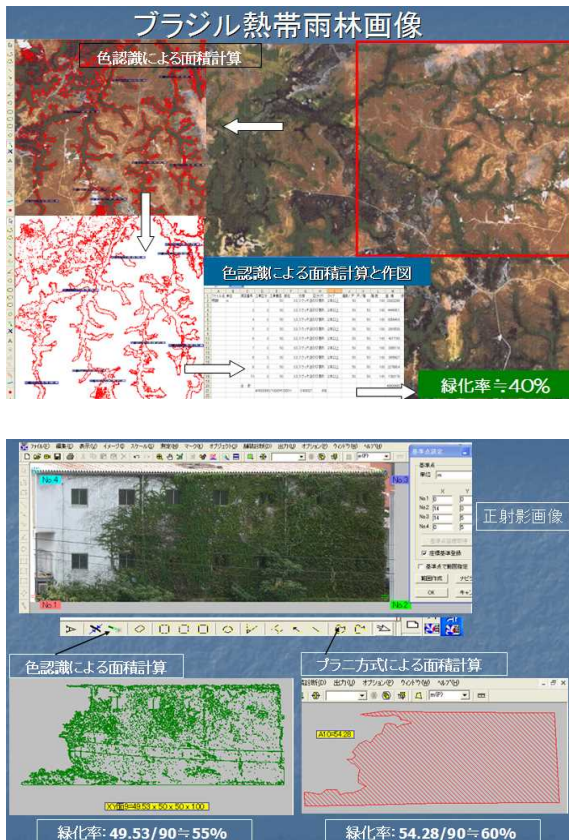
(6) 色の認識機能と座標データによる解析例

以下に、本画像システムを用いて、分析した事例を示す(第13図~第18図)。

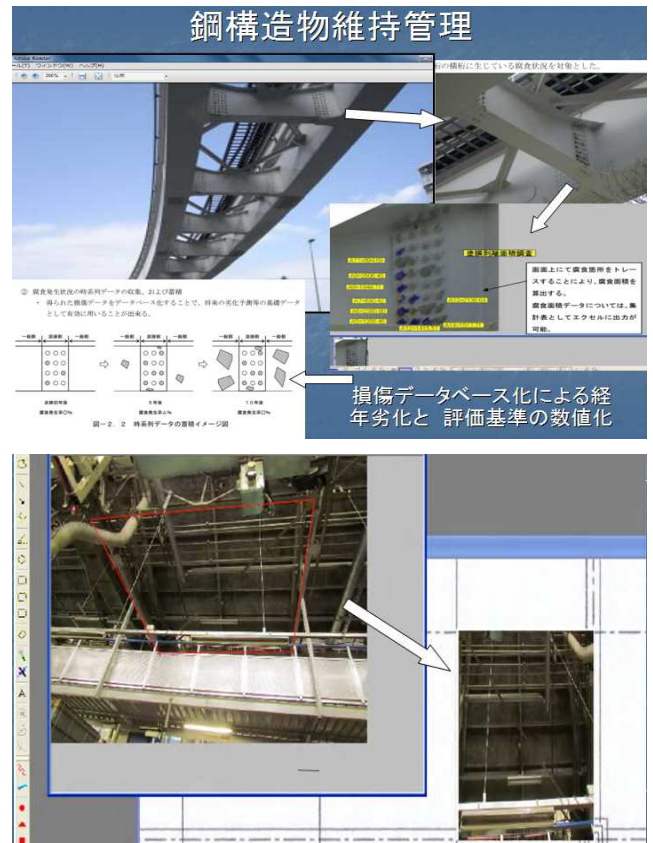
第13図 赤外線画像とデジタル画像による
外壁浮きおよびクラック解析事例



第14図 緑化率算出事例
上: 熱帯雨林緑化率 下: 建物壁面緑化率



第15図 鋼構造物の経年劣化調査事例
発錆調査と経年変化による劣化評価システム



第16図 工場耐震設計の為の荷重点位置平面作成

第17図 画像から図面作成例



(7) コンクリートの遠方から検出が可能な
技術 (アーチ式ダム調査例)

機能診断調査業務の内外壁(約 25,000m²)
ひびわれ画像診断業務

第18図 撮影箇所図 (最長下流側:約 102m)

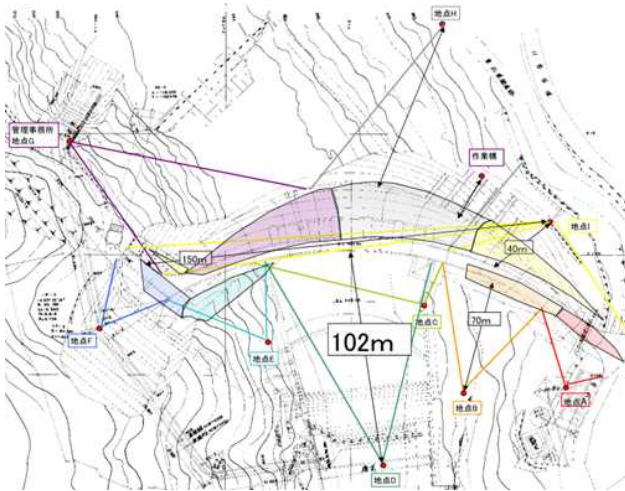


写真 2 下流側撮影状況 (800mm, 2600万画素使用)



※国土交通省「コンクリートのひび割れについて遠方から検出が可能な技術」採択試行済

(8) タブレット端末等を用いた「リモート撮影装置による遠隔操作での点検診断システム」の開発と、プラント施設での撮影・観察業務での保全作業の安全確保と低コスト化、効率化の事例。

現在も稼動している某プラント設備のコンクリート構造物の内部撮影装置での劣化調査事例。

写真 3 無線リモート撮影装置



写真 4 クレーンによる無線リモート装置投入監視



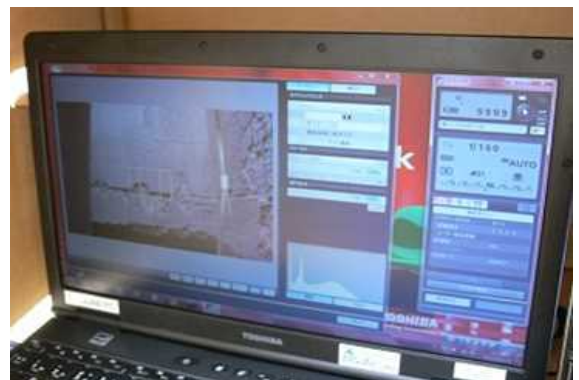
写真 5 投入状況 (地上より高さ約 30m・ブーム長 60m)



写真 6 ライブカメラによる内部投入監視



写真 7 PC による撮影及び保存状況



(9) デジタル画像診断手法を用いた簡易トンネル変状点検システム

「デジタル画像診断手法を用いた簡易トンネル変状点検システム」鹿島建設技術研究所 山本部長及び青森県道路公社による目視点検業務と赤外線による漏水調査比較。

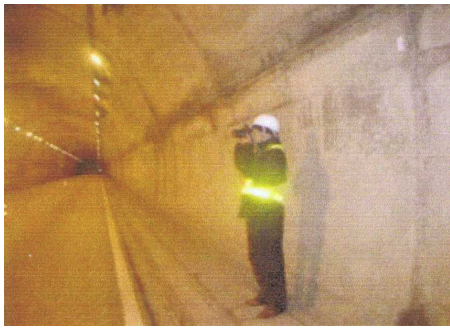
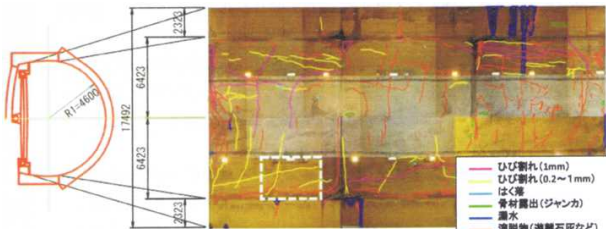
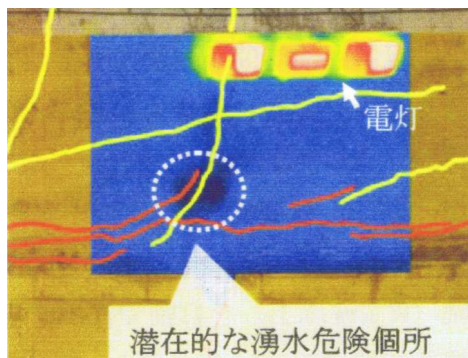


写真 8 デジタルカメラ撮影状況



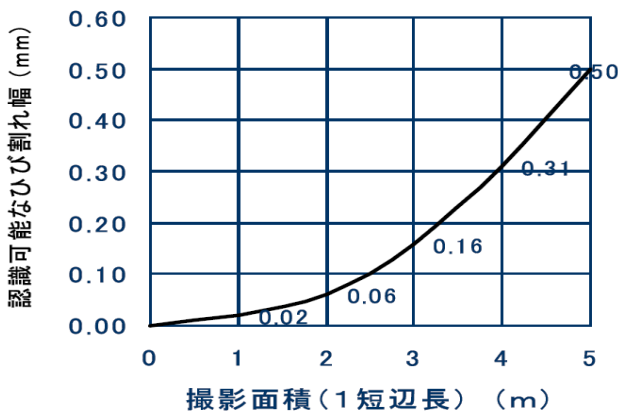
第19図 診断結果画像(口部分赤外線撮影箇所)



第20図 赤外線画像の正射影合成

4 画像システムの視認精度

当システムはひび割れ幅の例をとると視認精度については、500万画素のデジカメを使用した場合の例を第21図に示すように、一般的な閾値による2値化手法を用いず、画素分解能を超える分解能を有して撮影面積(1短辺長)3.3mで0.2mmのひび割れ幅の認識が可能である。



第21図 ひび割れの視認精度

最近の一眼レフカメラで1600万画素以上での実際の推奨撮影範囲は辺長4.5m以下であるがデジカメの性能向上で更に広がる。今回の無線リモート装置においては鮮明な撮影画像を確保できたが大規模なプラント施設内であり、一時的に流れ込む強い電波にリモートの電波が影響を受けて通信速度の低下及び急な回線が切断される状況も起きた。

以上の経験からプラント内での調査業務に於いては無数の強力な電波が考えられ、無線だけの対応ではなく、無線+有線、有線など調査方法の検討を進めている。

5 まとめ

老朽インフラの数は膨大であり、これらの延命化が重要な課題であるがセンサー、計測機器等によるモニタリングにも問題はある。

- ① 調査予算は限られている。
- ② 理想を追求するとセンサーや計測機器「以下計測機器とする。」だらけになる。
- ③ 計測機器は高価で常時モニタリングも高価になる。—コストダウンが必要
- ④ 測定データの安定性(教訓：緊急地震速報・地盤傾斜計)
などによりすぐに活用は難しい。
目視や打音によって得られるデータ
- ⑤ 人による誤差がおおきい。
- ⑥ 経時変化を定量的に評価することが容易でない。

以上より本画像診断システムの採用により、これまでの足場や人によるスケールやステッキメジャーなどを使用した測定方法に比べて現地における測定作業の大幅な省力化が可能となりデータ化ができる

また、ほとんどの場合は写真撮影作業が地上から実施が可能であることから、足場の設置や交通の規制を伴わずに作業の安全化を図れることも大きな利点である。さらにリモート装置等を使用すれば撮影困難な個所の撮影も可能になる。

本システムにより得られる画像は、現地の間近での目視観察状況に近いことから、複数の技術者の判断が加わる、また技術的な利用価値も

高い。幅・長さ・面積測定、赤外線画像など効率的な集計処理など、色の識別による各種の分析を細やかかつ迅速に可能にする優れた機能を有している。システム開発のコンセプトは汎用性のある常に先進IT技術を取り入れる画像処理技術の開発と今後はトンネル等の劣化診断支援のためにデジタル動画等についても適用が可能であり開発がスタートしている。また構造物の表面の画像解析にとどまらず構造物の変位計測及び監視システムとしての活用開発もすでにスタートしている。(室内試験での精度は0.01mm単位でのXY変位を確認)。物流施設やプラント及び工場設備等生産設備・補償調査や建設紛争など幅広い分野においても貢献できることを期待する。

6 おわりに

維持管理や点検の人材育成は最重要課題であり計測機器やシステムは支援ツールである。

医療においても、米国や英国では“General practitioner (GP)”と呼ばれる初期診療を行なう分野がある。我が国にも医療における診療科のひとつで総合診療科がある。あまりにも専門化・細分化しすぎた現代医療の中で、全人的に人間を捉え、特定の臓器・疾患に限定せず多角的に診療を行う部門である。

また、外来初診の「症状」のみの患者に迅速かつ適切に「診断」をつける診療科もある。『診断のついていない症状や健康問題を有する患者の生物・行動・社会的問題全てに対して行う因、臓器に限定されない包括的な切り口での診療』と定義された。

さらに、『ほとんどの外来疾患は病歴で診断できるという立場から、特に医療面接に重点を置いた診療を行っている(千葉大学医学部附属病院:生坂 政臣部長のHPより)』という総合診療の考えは、これからのインフラおよび生産設備の保全の分野においても通じる。

●謝辞

本稿を作成するに当たっては、鹿島建設(株)技術研究所 山本部長様、大畑様、青森県道路公社

道路工事課 三上恵津子様 ケミカル工事 山内名古屋支店長様 愛知デジタル画像解析技術研究会様より多大な協力をいただきました。ここに記して関係者に謝意を表す。

※ 国土交通省の老朽化対策に資する点検・診断技術の公募「コンクリートのひび割れについて遠方から検出が可能な技術」で試行可能技術評価(平成26年8月)公表予定

※ 2014年11月15日(水)～17日(金)

第44回インターネットコンジャンパン

東京ビックサイト

名古屋市「名古屋挑戦型企業塾」ブースにて「トンネル壁面変状の簡易走行自動撮影システム」展示予定

【参考文献】

- 1) 衣笠貢司:「デジタル画像診断支援システム ImageSR・PRO」平成23年度名古屋市工業技術グランプリ奨励賞(財)名古屋産業振興公社(2012.2)
- 2) 国土交通省HP NETIS新技術情報提供システム「デジタル画像による、構造物の点検・分析支援システム」震災復旧・復興支援サイト
- 3) 井原 正・加藤 晃・加藤和義:デジタル画像を利用した舗装路面のひび割れ測定, 第27回日本道路会議舗装43-7(2008.11)
- 4) 衣笠貢司:社会インフラの保全～震災からの復旧と今後の課題「構造物のひび割れ・劣化画像診断の遠隔・簡便化への取組み」プラントエンジニア(2012.5月号)
- 5) 衣笠貢司:産業・社会インフラの保全経営「インフラ保全におけるデジタル画像診断支援システムの活用」プラントエンジニア(2013.12月号)
- 6) 平成25年度緊急雇用創出事業「次世代IT技術開発にかかる産業人材育成事業:高度なデジタル画像処理技術とIT機器を用いたリモート撮影装置による次世代の社会インフラ保全・調査技術の開発と実稼働」
- 7) 平成26年度あいち創造研究開発事業採択

「トンネル壁面変状の走行自動撮影システムに関する研究開発採択」

- 8) 平成 26 年度土木学会全国大会 第 69 回年次
学術講演会 検査技術・診断 「デジタル画像
診断手法を用いた簡易トンネル変状点検シ
ステム」 鹿島建設 山本拓治 大畑俊輔 衣笠
貢司 三上恵津子(青森県道路公社) (2014. 9)
- 9) NIKKEI CONSTRUCTION 2013. 3. 25
「人手頼みの技術」の限界