

PC 橋の診断

肥田 研一*

1. はじめに

PC 構造物は、道路橋、鉄道橋、建築物など多種にわたり建設されてきた。また、PC 構造物は、高張力鋼を緊張することにより構造物にプレストレスを導入している。通常のコクリート構造物等と比べ、PC 鋼材の腐食等に敏感に反応し、耐久性能が落ちると安全性にも直接影響する。このため、PC 構造物の適切な診断と維持管理の必要性が求められている。

本誌面では、PC 道路橋の診断事例を 2 例紹介し、PC 橋梁の診断の要点について述べる。

2. 塩害を受けた PC 橋梁の診断 (事例 1)

2.1 概要

最初に塩害を受けた PC 橋の診断事例を紹介する。

調査対象となった PC 桁橋は、海岸線近くに位置するため、飛来塩分による塩害が著しい。

過去に断面修復、表面被覆などの補修工事が実施されていたが、ひび割れ、鋼材の腐食、かぶりコンクリートの剥離などの劣化現象が再び生じた。

このため、下記の現地調査、室内試験を行い、その結果に基づいて劣化予測を行い、健全度評価を行うとともに補修方法などの対策の検討を行った。

- ① 外観変状調査
- ② 中性化深さ測定
- ③ 塩分分析
- ④ アルカリ骨材反応促進試験
- ⑤ X 線回析による塩素化合物の分布状況分析
- ⑥ EPMA による元素分布の分析および塩分分析

2.2 劣化診断

(1) 中性化

中性化深さの測定結果を、岸谷式による推定結果と比較するとともに、中性化が鉄筋位置まで到達する時期を予測した。

中性化の進行は、図 - 1 に示すようにほぼ岸谷式による予測値と同程度であった。かぶりの少ない鉄筋でも中性化が鉄筋位置まで進行するのに数百年かかることから、中性化による構造物の劣化は考えられない結果となった。

(2) アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応の促進試験、EPMA 分析から、アルカリ骨材反応の発生の有無、今後の劣化の予測を行った。

図 - 2 に示すように促進試験を行った結果、外部からのアルカリの供給があるとアルカリ骨材反応による劣化が生じる可能性があることが分かった。海塩粒子などのアルカリを含んだ物質が浸透すると、アルカリ骨材反応を生じる可能性がある。

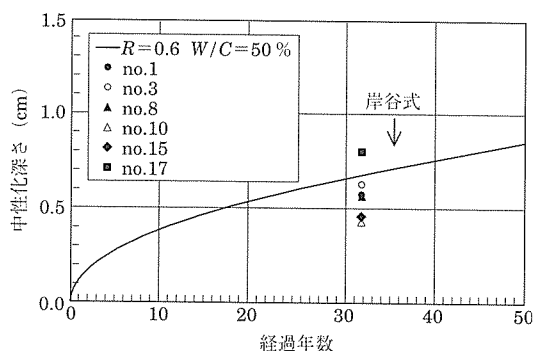


図 - 1 コンクリートの中性化進行状況

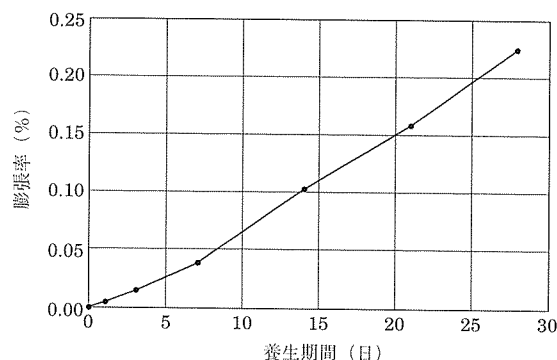


図 - 2 コア試料の促進膨脹試験

(3) 塩害

塩分分析、X 線回析、EPMA 分析の結果から、塩分の浸透解析を行い、表面被覆補修の有無による塩分浸透状況から、鉄筋腐食発生の可能性を予測した。

現状の塩分調査結果を用いて塩分浸透解析を行った結果、図 - 3 に示すように内部のコンクリートの塩分含有量が多いため、表面被覆補修だけでは 10 年後に 90 % 程度の鉄筋が塩分による腐食環境となる結果を得られた。



* Kenichi HIDA

(株)千代田コンサルタント
構造保全部 部長

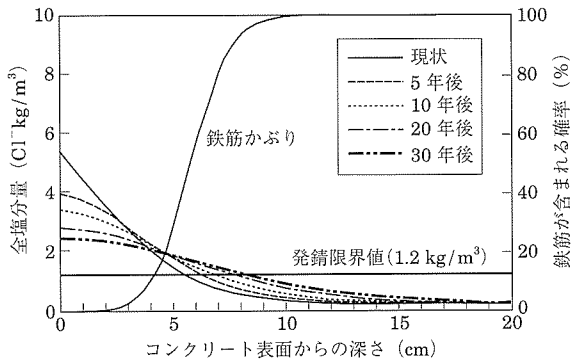


図-3 塩分分布の推定図

2.3 診断結果および補修対策

中性化による劣化は、供用期間中に問題となることは無いことが判明した。

アルカリ骨材反応は、膨張試験から発生の可能性は否定できないが現状では発生しておらず潜伏期にあるとして塩害とあわせ対策を行うものとした。

塩分は、表面被覆を行っても、すでに内部に多量の塩分が浸透していることから、30年後にはほとんどの鉄筋が腐食環境となることが分かった。しかし、将来的なPC鋼材の腐食破断等の現象は確認できなかった。

このため、鉄筋、PC鋼材の腐食進行を阻止するため、含有塩分量の多い表面付近（2 cm程度）のコンクリートをはつり取り、断面修復を行った後、表面被覆を行うか、電気防食を行うことを提案した。

3. ひび割れが発生したPC橋の診断（事例2）

3.1 概要

つぎは、ひび割れが発生したPC橋の診断事例を紹介する。対象となった橋梁は、2径間連続PC中空床版橋で、中間支点近くに橋軸直角方向のひび割れが発見された。また、桁側面には、遊離石灰等が発見されたためグラウト不良も考えられる。そこで、ひび割れの発生原因を確認するため以下の調査内容を実施した。

- ① 変状目視調査
- ② ひび割れ深さ調査
- ③ 鉄筋、PC鋼材位置調査
- ④ グラウト調査

3.2 調査結果

(1) ひび割れ深さ調査

ひび割れ深さ調査は、図-4に示す中間支点部付近の鉛直ひび割れと支間中央付近の水平ひび割れに着目して超音波を用い実施した。

中間支点部のひび割れAは、側面より約40 mm程度、

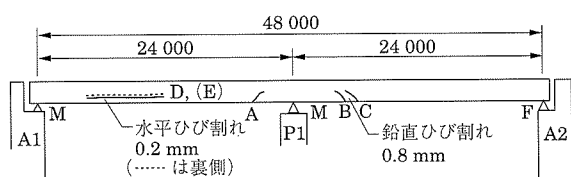


図-4 ひび割れ発生状況

下面より90 mm程度のひび割れ深さであった。しかし、B、Cひび割れは、側面が貫通しており下面からのひび割れ深さも桁高の1/2程度まで達していた。

また、支間中央部の水平ひび割れD、Eは、50 mm程度のひび割れ深さであった。

(2) グラウト調査

ひび割れ深さ調査を行った水平ひび割れは、遊離石灰が伴っており、グラウト不良である可能性が高いと判断されたためグラウト調査を実施した。

グラウト調査に先立ち、電磁波法により、鉄筋、PC鋼材位置を探索した。探索されたPC鋼材のかぶり部をコアカッターで削孔した後、シースまでコンクリートをはつりグラウトの状態を観察した。

写真-1に示すように、グラウトは、まったく入っておらず鋼材の表面は、発錆していた。グラウト調査は3箇所で行ったが、1箇所ではグラウトが完全充填されていることを確認したが、他2箇所は写真の状況のようであった。

削孔により、グラウト不良が確認されたPC鋼材において超音波試験を行った。図-5に示すようにグラウト不良部と充填部の共振波形を得た。この結果を用い水平ひび割れ部のグラウトの状態を超音波で確認した。この結果、写真-2に示すような箇所がグラウト不良である可能性が高い結果が得られた。

なお、グラウト調査で得られたコアを用い圧縮強度試験を行った。この結果、圧縮強度は57 N/mm²、静弾性係数27 500 N/mm²、であり、コンクリートの品質としては問題ないことが確認できた。

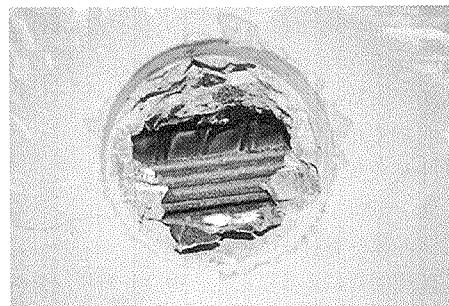
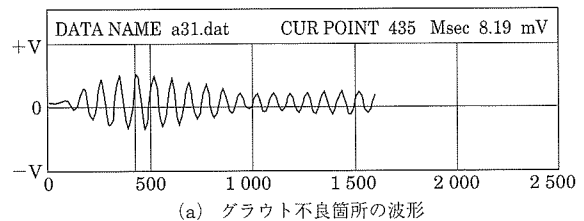
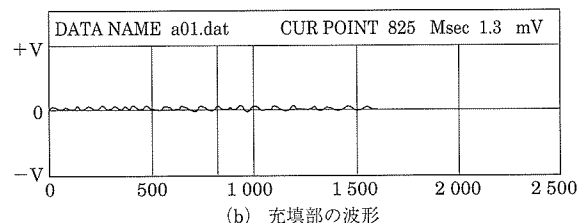


写真-1 グラウト状況



(a) グラウト不良箇所の波形



(b) 充填部の波形

図-5 グラウト不良部の波形

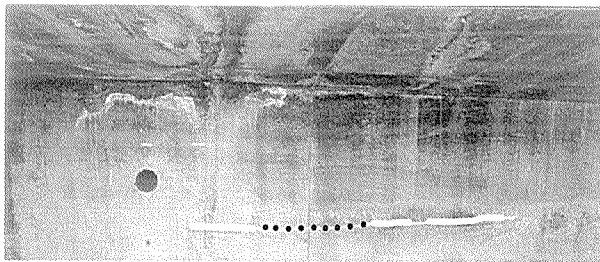


写真-2 超音波によるグラウト調査結果
(写真中・・・は鋼材位置、□はグラウト不良部分)

3.3 ひび割れの発生原因および補修・補強対策

図-4に示すひび割れA, B, Cに着目し、これらのひび割れの発生原因は、①構造上の問題、②使用材料、③施工上の問題、④切欠き部応力集中および支点拘束などであるとして検討を行った。

(1) 構造上の問題

本橋梁を建設時の設計計算書を基に、現行の設計基準に準じて再設計した結果、ひび割れ発生付近での応力状態は設計荷重時で -1.2 N/mm^2 の引張応力、死荷重時で圧縮応力となった。

(2) 使用材料および環境

コンクリートの圧縮強度は、コア試験結果より 57 N/mm^2 と設計圧縮強度を上回っており、使用材料としてはとくに問題ない。

また、本橋梁の立地条件は、温暖な内陸部あり、塩害、凍害、中性化、アルカリ骨材反応等の劣化現象が生じている兆候は見あたらない。

(3) 施工上の問題

施工上の問題点としては、グラウト不良があるが、グラウト不良により雨水等が浸透しPC鋼材の腐食破断の可能性は否定できない。しかし、調査時の技術水準から、PC鋼材等の破断、緊張力の減少等の確認はできなかった。

(4) 切欠き部応力集中および支点拘束

中間支点付近の下床版には、PC鋼材下縁定着部の切欠きがある。このため、切欠き部の応力状態およびひび割れ発生の可能性をFEM解析にて行った。

この結果、図-6に示すように、弾性解析で切欠き部にプレストレス導入時に、 6.0 N/mm^2 の引張応力が発生した。また、ひび割れに着目した材料非線形解析を行った結果、図-6に示すようにプレストレス導入時に切欠き部に、ひび割れの発生を確認できた。しかし、このひび割れは、クリープの進行とともに閉じる傾向にあると考えられる。

可動橋台上の支承の動きを観察した結果、可動支承が拘束されている可能性があることが判明した。このため、支点が拘束されているとして、支点条件を固定とし -10°C の温度変化時のPRC部材としての検討を行った。この結果、図-6に示すように、温度変化により、約 3.0 N/mm^2 の引張応力と 0.1 mm のひび割れ幅となることが確認された。

(5) ひび割れの発生原因と補修・補強対策

以上の検討の結果、本橋に発生している中間支点付近のひび割れは、切欠き部応力集中によるひび割れ発生箇所が、可動支承が拘束され温度変化により拡大したものであると

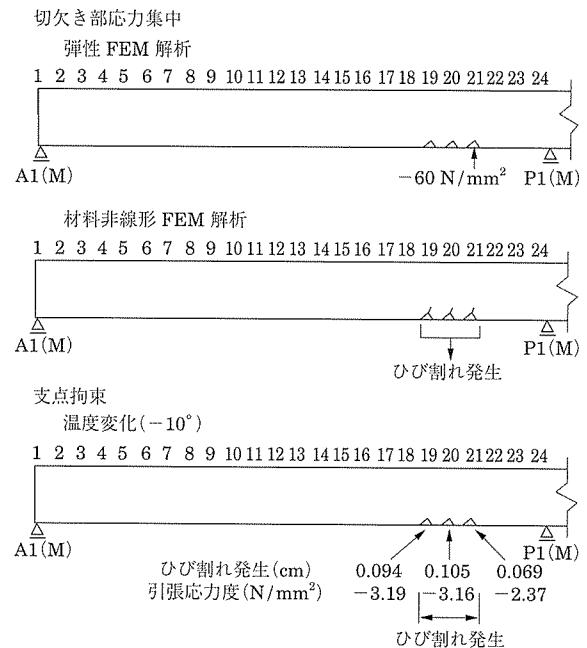


図-6 FEM解析結果

した。しかしながら、本橋のプレストレスの状態は不明でありかつ、グラウト状況からPC鋼材の変化の可能性も否定できないことから、補修・補強対策はPC鋼材の変化を考慮したものとした。

この結果、本橋には以下の補修・補強対策を実施した。

- ① ひび割れ部の注入工
- ② グラウト不良部の再グラウト
- ③ 支承改良
- ④ 外ケーブルによるプレストレス導入補強
- ⑤ 引張発生領域の鋼板接着補強

4. PC 橋の診断の要点

4.1 PC 橋の劣化としてのプレストレス減少

塩害環境での診断例とひび割れ発生の診断事例を紹介した。ここでは、コンクリートの劣化現象とPC構造の固有な現象を整理しPC橋の診断の問題点を整理する。

中性化、塩害は、コンクリート中に劣化因子が浸透しコンクリート中の鉄筋ならびにPC鋼材の発錆、腐食、破断が発生し構造物の安全性が低下する。

凍害、アルカリ骨材反応は、劣化因子によりコンクリートにひび割れを発生させ、コンクリート構造物の形状の保持が困難になり剛性が低下する。また、ひび割れより浸透した水分などによりコンクリート中の鉄筋ならびにPC鋼材を発錆、腐食、破断が発生し構造物の安全性が低下する。

ポストテンションプレストレスコンクリートでは、PCグラウトの不良による水素脆性破壊、応力腐食による破断が発生する。さらに、グラウトの不良箇所は、中性化、塩害などの劣化機構によるPC鋼材の腐食促進し破断につながる可能性がきわめて高くなる。

コンクリートは打設直後からクリープ変形し、そのクリープによりプレストレスが減少する。さらに、異常なたわみの原因の1つとなる設計値以上のクリープ現象が生じた事

例もある。そのような場合は、クリープによるプレストレスの減少量が大きくなることも考えられる。

以上のようにPC構造物の劣化は、中性化、塩害、凍害、アルカリ骨材反応およびグラウト不良によるPC鋼材の破断によるプレストレスの減少とクリープなどによるプレストレスの減少であると考えられる。このため、PC構造物の診断ではプレストレス量を的確に確認することが重要であると考えられる。

4.2 プレストレス減少に伴い生じる変状

プレストレスの減少により、図-7に示すように、たわみの増加、異常たわみ、ひび割れの発生、振動特性の変化などの変状が発生する。

プレストレスの減少に伴い、発生する引張応力がひび割れ発生応力以上になるとひび割れが発生する。プレストレスの減少は、耐荷力の低下と位置付けられ、プレストレスの減少が直接耐荷力に影響し安全性の低下となる。

したがって、プレストレスの減少に伴うPC構造物の変状から、応力状態等の情報を得ることによりPC構造物の的確な診断が可能になると考えられる。

さらに、プレストレスの減少を予測することにより補強等の対処の時期等を設定することができ構造物の安全性を計画的に保持することができると考えられる。

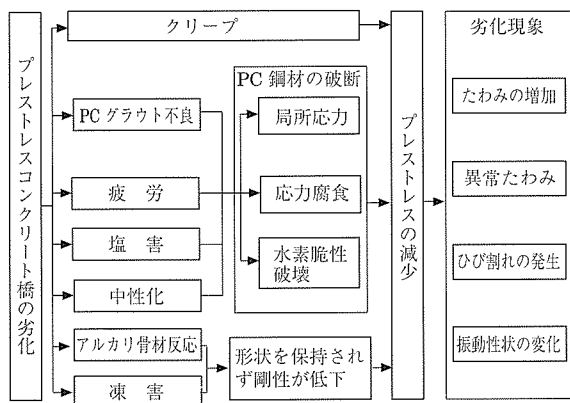


図-7 PC構造物の劣化要因と劣化現象

4.3 PC橋のモニタリングの現状

プレストレスの減少を計測する手法としては、表-1に示すように、応力を直接計測することによりプレストレスの減少をモニタリングする直接的な手法と腐食等の現象を計測する間接的な手法に分類される。これらのモニタリング手法の概要を述べる。

(1) プレストレスの応力

プレストレスを直接計測する手法である。

方法としては、コンクリート表面のスリットにフラットジャッキを挿入しジャッキの圧力からプレストレスを計測する手法である。この方法は、PCT桁橋の間詰床版部の調査が行われているが、経時的な変化を常時モニタリングする手法ではない。

コンクリートコアによる応力計測は、コアの応力解放時の応力を計測する手法や、コアに再度圧縮力を載荷し、カイザー効果によるAEを計測する手法²⁾であるが開発途上

表-1 プレストレス量減少のモニタリング手法

	計測目的	計測原理	計測手法
直接的	プレストレスコンクリートの応力	応力の測定	スリットの応力測定 コア応力
	PC鋼材の張力	定着部張力を計る	ロードセル
		張力による磁場の変化	EMセンサー
	PC鋼材の破断	AE	AEセンサー
	たわみ	たわみのモニタリング	変位計 定点の測量
	ひび割れ	目視	目視調査 定点の写真撮影
振動	振動のモニタリング	加速度計	
間接的	グラウト状態	弾性波	振動打音法
		目視	ドリル削孔と CCDカメラ
		電磁波	X線
	PC鋼材の腐食	腐食電流	自然電位 分極抵抗

である。

(2) PC鋼材の張力

PC鋼材の張力の計測は、緊張前の施工時にロードセルを定着部に取り付けモニタリングする手法がある。しかし、この方法は、プレテンション構造には、ロードセルは適用できない。

EMセンサー^{3),4)}は、鋼材の応力により磁束密度が変化することを利用して直接鋼材の応力を計測する手法である。斜張橋のケーブル、外ケーブルなどの張力の施工時から供用時までのモニタリングに利用されている。

PC鋼材の張力を計測する手法としてロードセルとEMセンサーが適用されている。しかし、PC橋梁には、多数の鋼材が配置されている。このため、精度良くプレストレスをモニタリングするには数多いセンサーに取り付ける必要がある。また、PC鋼材は、部材中心位置にあり、既設PC構造物であるとセンサーの取り付けが困難である。

(3) PC鋼材の破断

PC鋼材の破断時に発生する弾性波をAEでモニタリングする手法である。この方法は、AEセンサーをPC構造物に取り付け常時監視しPC鋼材破断時の弾性波を各種フィルターにより暗振動を除去して感知する方法である。これらをシステム化した手法もある⁵⁾。

しかし、AEでのPC鋼材破断の監視は、あくまでもPC鋼材の破断をモニターする手法に過ぎず、プレストレスの状態等は、別途解析等を行い推定する必要がある。

(4) たわみ

たわみの計測は、各種変位計、定点測量などの手法が考えられる。PC長大橋では、定点の測量を建設時から行ってたわみの変化量をモニタリングしている事例もある。

なお、変位計によりモニタリングする場合には不動点等の設定が難しい。また、たわみの変化がプレストレスの減少とクリープによって生じるためこの分離ができない等の問題もある。

(5) ひび割れ

ひび割れの監視は、目視と定点のデジタルカメラ撮影が考えられる。ひび割れの監視は、一般的に行われているが、

PC 構造物に発生する微細なひび割れの発見は通常の点検では難しいと考えられる。

(6) 振 動

プレストレスの減少により周波数の変化が考えられるが、現状の加速度計では振動の変化を感知することが難しいと考えられる。

(7) グラウト状態および腐食状況

グラウト状態を調査する手法としては、打音振動法⁶⁾、ドリル削孔による CCD カメラ、X 線⁶⁾ などがある。

また、腐食状況の調査は、自然電位法、分極抵抗法などにより行われている。しかし、鋼材の腐食は PC 鋼材の外側にある鉄筋から進行し、自然電位、分極抵抗も PC 鋼材の腐食を推定することは難しいと考えられる。

事例 2 でも述べたようにグラウト状態の調査は、PC 鋼材の腐食状況を観察することでありプレストレス減少の可能性を定性的に推測する手法である。

(8) ま と め

以上に述べてきたように PC 構造物の診断を行うために必要なデータであるプレストレスをモニタリングすることは、現状では難しいと考えられる。

しかし、各種の手法の特徴を理解したうえで複数の手法を組み合わせ工夫することによりプレストレスを推定し、適切な PC 橋の診断を行うことは可能であると考えられる。また、PC 橋は、クリープ、乾燥収縮等の無応力ひずみの影響を受ける。このため、これらの影響を加味し、長期にわたり応力状態をモニタリングできるセンサーも必要である。

5. あとがき

PC 橋の診断には、劣化機構およびグラウト状態などの耐久性能の診断と、プレストレス量（減少量）と変形などから耐荷性能を診断する必要がある。

前者の劣化機構に関する診断はコンクリート構造物に準じた手法を用いることが事例 1, 2 から分かると思われる。しかし、後者のプレストレスの推定手法と耐荷性能による診断技術はまだ確立されていないのが現状であると考えられる。

このため、表 - 2 に示すようなデータ等を各種手法を用い収集し、継続的な PC 橋の診断ができるシステムを構築する必要があると考えられる。

表 - 2 PC 橋の診断に必要なデータと手法

	データ	手法
構造諸元	構造形式	完成図
	形状寸法	完成図、寸法調査
施工条件	使用材料	施工記録
	鋼材配置	完成図、鋼材配置調査
	施工方法	施工記録
構造物の履歴	点検記録	点検記録
	補修・補強履歴	補修・補強記録
	地震履歴	橋梁台帳等
	車両等の衝突	橋梁台帳等
使用環境条件	立地条件	立地条件調査
	温度、湿度	計測
	降水量	計測
	風速	計測
	風向	計測
	CO ₂ 濃度	計測
	飛来塩分量	計測
	交通量	計測
構造物の状態	プレストレスコンクリート応力度	応力モニタリング
	PC 鋼材張力	張力モニタリング
	PC 鋼材の破断	破断音のモニタリング
	変位	変位計
	ひび割れ	目視、デジタル写真撮影
	ひび割れ以外の変状	目視、デジタル写真撮影
	中性化	中性化深さ
	塩分量	内部塩分量、浸透深さ
鋼材の腐食	目視もしくは腐食計	

参考文献

- 1) Thomas LE DIOURON, Bernard BASILE, Jerome STUBLER : STRESS MEASUREMENTS IN CONCRETE AND TENSIONED STEEL BARS AND BOLTS, STRUCTURAL ENGINEERS WORLD CONGRESS Yokohama, Oct.2002
- 2) 横山広, 湯山茂徳: 既設 PC 桁現有応力測定の実用化に関する研究, 土木学会第 54 回年次学術講演会, 1999 年 9 月
- 3) 羅黄順: EM センサーによる PC 鋼材の応力測定, プレストレスコンクリート Vol43 No6, 2001 年 11 月
- 4) 黒川章二, 羅黄順, Ming L Wang, 嶋野慶次: EM センサーを用いた PC 緊張材の応力モニタリング実験, 応用力学論文集, Vol1, 2002 年 8 月
- 5) Jack Elliott, Thomas Le Diouron, Jerome Stubler : CONTINUOUS REMOTE ACOUSTIC HEALTH MONITORING OF TENSIONED ELEMENTS IN STRUCTURES, FIB 2002 Congress, Osaka, Oct. 2002
- 6) 讃岐康博: 内部欠陥の品質管理技術, コンクリート工学, Vol.39 No.5, 2001 年 5 月

【2002 年 12 月 2 日受付】