

ASR劣化による局所的ひび割れを有するRCラーメン橋脚の構造性能低下に関する基礎的研究

玉井宏樹¹、添田政司²、櫛原弘貴³

著者1:九州大学、著者2:福岡大学、著者3:福岡大学

概要：本研究では ASR 劣化が疑われる実構造の RC ラーメン橋脚を対象とし、そのコアを利用することで、残存膨張量の算出ならびに劣化程度（膨張量）の異なるコア供試体を用い、材料試験を通して ASR 劣化によるコンクリートの力学性状の変化を把握した。さらに、その試験値をもとに局所的にひび割れが生じた RC ラーメン橋脚の数値モデルを構築した上で静的解析を実施した。

1.はじめに

我が国の社会資本整備を概観すると、高度経済成長期の“つくる時代”から“つくったものを長く使いこなす時代”になったと言える。もちろん、まだ新設すべき構造物も多いが、建設と維持管理のウェイトを見ると、明らかに維持管理の時代が到来したと言えるだろう。道路施設の中で重要度の高い構造物である道路橋に限って考えても、近年の交通量の増大や経年による老朽化に伴い、外観で変状が確認される例も多い。そのような背景を踏まえ、以前から塩害や疲労やアルカリ骨材反応（以下、ASR という）といった 3 大劣化機構に関する様々な研究がなされてきた。しかし、塩害や疲労に比べ、ASR によるコンクリートの劣化（写真-1 参照）に関しては未だに多くの課題が残されている状況にある。中でも、「ASR はコンクリート表面にひび割れが発生するが、構造物の使用性・安全性にほとんど影響を与えない」と考えられていたことが一番の間違いであったと考えられる。実際に ASR の進行により、コンクリート強度の著しい低下や橋脚において内部鉄筋の破断が生じること^①が報告されている。

ASR 劣化が生じた RC 構造物の構造性能低下に関する国内の研究を概観してみると、数少ない状況にあり、日々進行している ASR 劣化に対して補修補強工法を適切に選定できているかどうか不明である。さらに、構造物を見ても ASR 劣化程度が構造物全体で等しいわけではなく、水かかり部等で著しく発生している場合が多く、ASR による局所的なひび

割れ発生に対する構造物の性能が如何に変化するかを明らかにすることも合理的な維持管理技術の確立のためには非常に重要な意味を持つと考えられる。

そこで、本研究では、材料学的観点と構造工学的観点の両方からのアプローチ手法により、まず、ASR 劣化が疑われる実構造物の RC ラーメン橋脚のコア供試体を利用し、促進膨張試験により残存膨張率を算出し、劣化部のコア供試体による圧縮試験を実施することで劣化によるコンクリートの力学性状の変化を調べた。次に、ASR 劣化による局所的ひび割れを有する RC ラーメン橋脚の構造性能低下に関する基礎的考察を行った。



写真-1 ASR 劣化によるひび割れ

2. 研究計画および実施状況

図-1 に本研究の研究計画を示す。図中の点線で囲んだ部分を著者らが研究期間内に取り組んだ項目である。本研究の最終的な目標は、構造性能に影響を及ぼす ASR による許容限界膨張量を定量的に明らかにすることで補修

補強時期やその方法を合理的に決定可能とし、維持管理技術の確立に資することである。その最終目標を達成するために、まず、ASR劣化が疑われる供用中の実構造物であるRCラーメン橋脚からコアを採取し、デンマーク法による促進膨張試験を実施することで、残存膨張率の算定を行った。次に、促進膨張試験により得られた膨張率（劣化程度）の異なるコア供試体による圧縮強度試験を実施し、ASR劣化による力学性状の変化を明らかにする予定だった。しかし、供用中のため採取できるコア供試体の本数に限りがあり、膨張率をパラメータとした力学性状の変化を捉えることができなかつたため、予定を変更し、劣化部のコア供試体の圧縮強度試験を実施することにした。また、同様に、コアによる強度試験結果を用いて実橋梁の橋脚をモデル化することは時期尚早であると判断し、ASR劣化による材料特性の変化に関する既往の研究成果を利用し、基本的なRCラーメン橋脚を対象に、隅角部に局所的にひび割れが発生することによる剛性低下の影響を検討した。

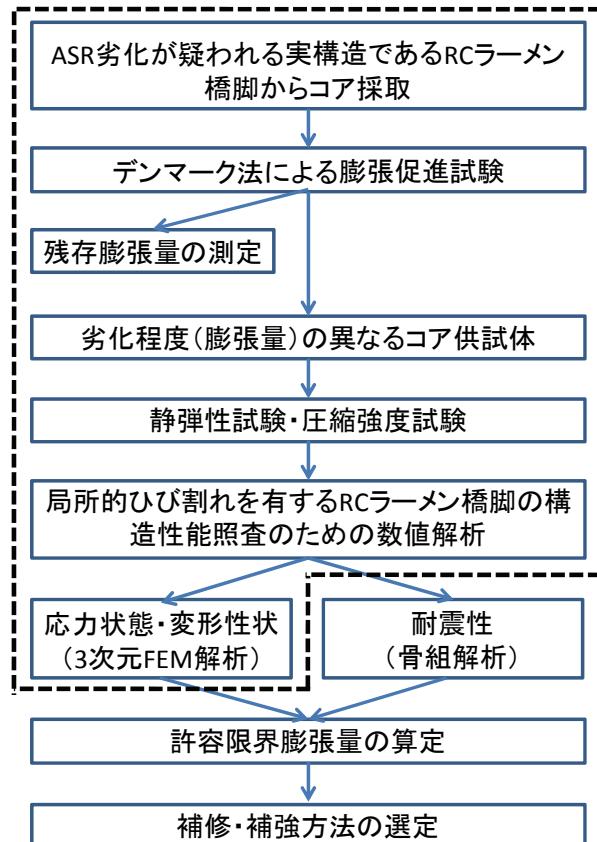


図-1 研究フロー図

3. 現場によるコアの採取

図-2にコア採取を実施した実橋梁のRCラーメン橋脚の概略図を示す。図中の黄線で囲まれた領域の比較的健全である箇所（健全部）で3本、水かかり部であり表面クラックが目視できる箇所（劣化部）で3本の計6本のコア供試体の採取を行った。写真-2、3にコア採取位置の外観図を示すように、健全部と水かかり部に相当する劣化部では、目視でも表面の黒ずみ（汚れ）やクラックを確認できた。

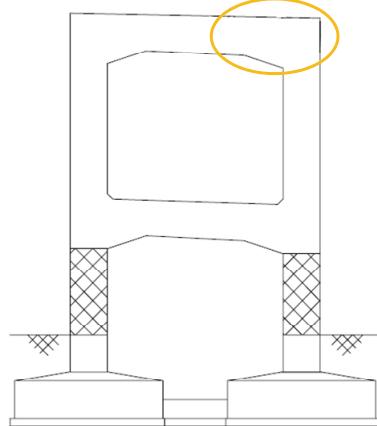


図-2 対象としたRCラーメン橋脚概略図およびコア採取位置（黄線で囲まれた部分）



写真-2 コア採取位置外観図（健全部）

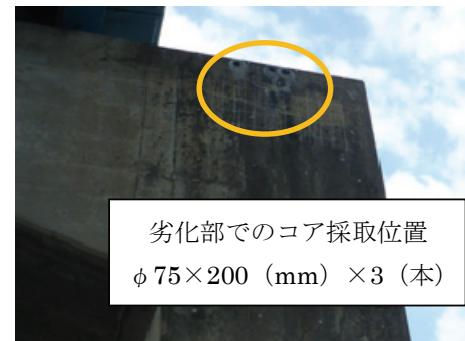


写真-3 コア採取位置外観図（劣化部）

4. 採取コアを用いた試験

4. 1 ASR の促進膨張試験

ASR による劣化進行の評価を行うため、コアの促進膨張試験を行い、残存膨張量を測定する方法²⁾が実施されている。その試験には、JCI-DD2 法、デンマーク法およびカナダ法などが用いられているが、本研究では、デンマーク法を採用した。デンマーク法はモルタルバーを用いた試験方法であるが、促進養生条件などがコアの促進膨張試験に応用されており、温度 50°C の飽和 NaCl 溶液にコア供試体を浸漬する促進膨張試験で、3 ヶ月間の膨張量が 0.1%未満で「膨張性なし」、0.1~0.4% で「不明確」、0.4%以上で「膨張性あり」と判定される。

本研究による試験供試体は、写真-4 に示すように円柱供試体にメタルバンドを 10cm 間隔で取り付け、そのメタルバンド上に測定用チップをクイックメンダーで接着した。測定用チップは供試体周囲に計 6 箇所接着した。その後、試験供試体は、50°C の飽和 NaCl 水溶液に浸漬させ、写真-5 に示すように測定材齢で各測定用チップ間の長さ変化をダイヤルゲージで測定し、膨張率を算出した。

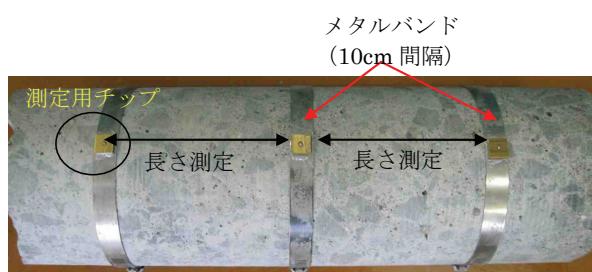


写真-4 促進膨張試験供試体



写真-5 長さ変化測定状況

図-3 に促進膨張試験で得られた膨張率と促進養生日数の関係を示す。この図は、健全供

試体、劣化供試体ともそれぞれ 3 体の平均値を示している。この図から、健全部では養生日数 3 ヶ月（91 日）における膨張率は約 0.126(%)であり、膨張性があるかないか不明確であることが確認できた。一方、劣化部では約 0.0664(%)と膨張性がないとの判定となった。健全部と劣化部に差異が生じたのは、劣化部ではコア採取時以前に ASR による膨張が生じていたことが起因していると考えられる。また、それほど大きな膨張率は得られなかったが、劣化部でも今後 ASR による更なる膨張の可能性が示されたといえる。また、健全部では、養生日数 149 日で膨張率約 0.139(%)、養生日数 204 日で膨張率約 0.139(%)を示し、膨張率が収束していることから、対象とした RC ラーメン橋脚に使用しているコンクリートの限界膨張率は約 0.139(%)であることが確認できた。

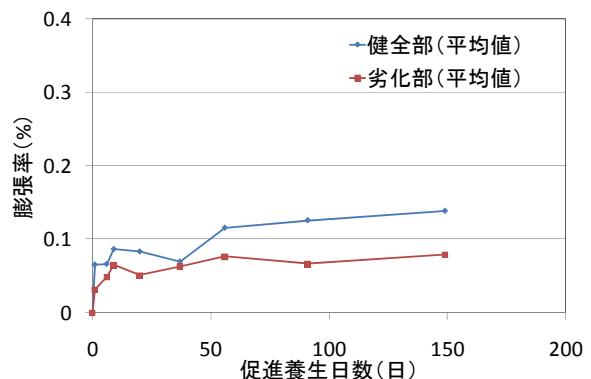


図-3 膨張率と促進養生日数の関係

4. 2 圧縮強度試験

当初の予定では、促進膨張試験により得られた膨張率（劣化程度）の異なるコア供試体による圧縮強度試験を実施し、ASR 劣化による力学性状の変化を明らかにする予定だったが、供用中のため採取できるコア供試体の本数に限りがあり、膨張率をパラメータとした力学性状の変化を捉えることができなかつたため、予定を変更し、促進試験終了後の劣化部のコア供試体の圧縮強度試験を実施することにした。

劣化部のコア供試体 3 本の圧縮試験結果を表-1 に示す。3 本の供試体の圧縮強度はそれぞれ 18.4, 20.2, 27.4(N/mm²)を示し、平均

値は $22.0(\text{N/mm}^2)$ であった。また、この圧縮試験ではひずみを測定しており、最大荷重の $1/3$ 量における圧縮荷重値から算定された応力とひずみから得られた静弾性係数の平均値は $27.4(\text{kN/mm}^2)$ となった。健全部の試験データは無いが、設計時のコンクリートの圧縮強度が約 $41.0(\text{N/mm}^2)$ 、圧縮強度から算出される静弾性係数の標準値が $19.7 \sim 29.8(\text{kN/mm}^2)$ （圧縮強度が 35.0 以上 $45.0(\text{N/mm}^2)$ 未満）であることが設計時の資料により確認できているため、これを健全部のデータとして考えると、劣化部の圧縮強度は約 33% 低下していることが明らかとなった。促進試験終了後の劣化部供試体を用いて圧縮試験を実施したため、この値は限界膨張率に対する圧縮強度の低下率と考えることができる。つまり、健全部の限界膨張量が $0.139(\%)$ であることから、膨張率 $0.139(\%)$ で圧縮強度が約 $33(\%)$ 低下するといった定量評価を得ることができた。一方、静弾性係数は設計時のものと同程度の値を示しており、劣化に伴い、著しい剛性低下は示していないことが確認できた。しかし、これはコアの採取位置を表面クラックが多数目視で確認できる箇所以外としたことによる結果とも言えるため、若干の剛性低下は生じているのではないかと推察される。

表-1 圧縮強度試験結果

供試 体名	単位容積 質量 (g/cm^3)	最大荷重 (N)	圧縮強度 (N/mm^2)	平均値 (N/mm^2)
劣 1	2.24	76600	18.4	22.0
劣 2	2.27	83900	20.2	
劣 3	2.29	114200	27.4	

4.3 骨材の鉱物学判定

本研究のストーリーに直接的に関与しないが、対象とした橋梁のコンクリートに使用している骨材が ASR に対して反応性（有害）か否かを調査するために、骨材の鉱物学判定を実施した。写真-6 にはオープンニコルによる偏光顕微鏡で得られた写真の一例を載せている。この写真より、微細な結晶粒やひずんだ

結晶格子を有する石英が検出され、反応性鉱物の存在が確認できた。また、X 線分析においても石英の検出が確認された。

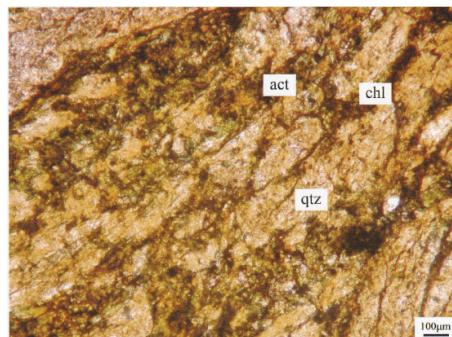


写真-6 鉱物顕微鏡写真（オープンニコル）

5. 隅角部に損傷を受けたRCラーメン橋脚の静的弾塑性FEM解析

上述の通り、実構造物の RC 橋脚から採取したコアを利用し、ASR の促進試験を実施し、膨張率を算出したが、現段階では、実橋梁隅角部の剛性低下や残存膨張量の定量的な評価には至っていない。また、残念ながら健全部と劣化部のコアの圧縮強度や弾性係数の差異に関する考察が不十分である。そこで、コアによる強度試験結果を用いて実橋梁の橋脚をモデル化することは時期尚早であると判断し、ASR 劣化による材料特性の変化に関する既往の研究成果を利用し、基本的な RC ラーメン橋脚を対象に、隅角部に局所的にひび割れが発生することによる剛性低下の影響を検討した。

5.1 解析対象および解析モデル図

解析対象は図-4 に示すような門型ラーメンであり、その形状寸法は、梁材の断面寸法を $200 \times 200\text{mm}$ の正方形断面とし、梁部の純スパンを 2000mm 、柱部の高さは 1500mm としている。ラーメンの軸方向鉄筋には、D13 を用い、芯かぶりを 40mm とし、帯鉄筋には D6 を用い、有効高さの $1/2$ である 80mm 間隔で配筋している。図-5 に解析モデルを示す。力学的な対称性を考慮した $1/4$ 部をモデル化し、鉄筋は 2 節点トラス要素、コンクリートは 8 節点ソリッド要素を用いた。境界条件としては、底部を全自由度固定し、図-5(a)中の載荷点に集中荷重を静的に作用させた。

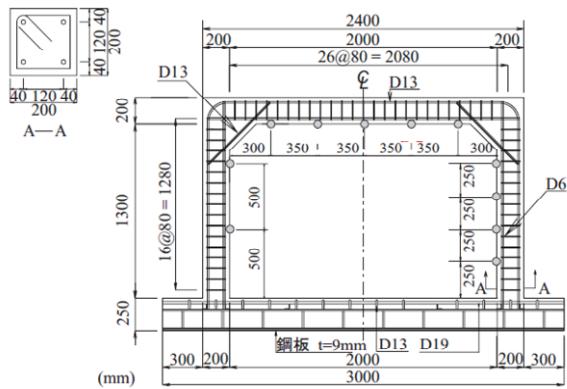
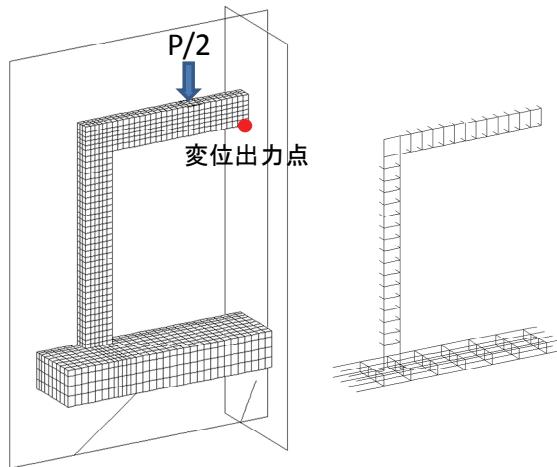


図-4 解析対象



(a)全体図

(b)鉄筋のみ表示

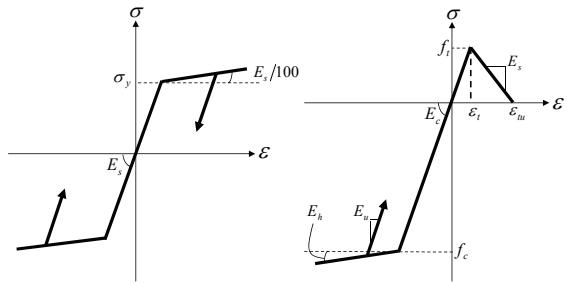
図-5 解析モデル

5.2 材料定数および材料モデル

本研究で仮定した材料定数および材料構成則（応力 - ひずみ関係）を表-2 および図-6 に示す。なお、鉄筋およびコンクリートとともに von Mises の降伏条件に従う弾塑性体としてモデル化した。なお、コンクリートの引張域は引張強度に達した後は、要素長と破壊エネルギーの関係から算出される勾配を有した線形軟化モデルとした。

表-2 材料定数

	コンクリート	鉄筋
弾性係数(GPa)	20.6	206
ボアソン比	0.17	0.3
圧縮強度(MPa)	39.2	降伏強度 392
引張強度(MPa)	3.92	



(a)鉄筋要素 (b)コンクリート要素
図-6 材料構成則（応力-ひずみ関係）

5.3 解析ケース

解析ケースは、健全時と隅角部に ASR 起因の局所的ひび割れを有する劣化時（劣化度合いで 2 ケース）の計 3 ケースである。本研究では ASR による RC 部材の劣化状態を表-3 示すように決定した。状態 I は健全時であり、状態 III は著しく損傷した状態を表す。

表-3 劣化状態の定義

	健全時	劣化時	
	状態 I	状態 II	状態 III
質量減少率	0(%)	3(%)	30(%)
鋼材腐食	×	○	○
コンクリート表面 ひび割れ発生	×	○	○
コンクリートと 鉄筋の付着の喪失	×	×	△
かぶりコンクリートの 剥離・剥落	×	×	△

表-3 の各状態を数値解析で再現するために、既往の研究³⁾から鉄筋腐食によるかぶりコンクリートの材料特性の変化や鉄筋の材料特性の変化を整理した。コンクリートに関してはひび割れ密度と強度の関係、膨張量（ひび割れ量）と弾性係数の関係から、ひび割れ密度の増大により圧縮強度は低下するが、その低下率は 4 割程度であることが確認できたため、本研究においても状態 II から状態 III で圧縮強度を 4 割低下させることとした。同様に弾性係数では 6 割程度の低下率が確認できたため、本研究においても状態 II から状態 III で 6 割低下させることとした。ちなみに、引張強度は圧縮強度の 1/10 を仮定しているため、劣化に伴う引張強度の低下は圧縮強度により一元的

に決定する。鉄筋に関しても同様に取り纏めた。以上を勘案して、本研究における隅角部の状態別の材料定数を表-4に示す。

表-4 状態別の材料特性

		健全時	劣化時	
		状態 I	状態 II	状態 III
鉄筋	弾性係数(GPa)	206	199.8	144.2
	降伏応力(MPa)	392	372.4	254.8
コンクリート	弾性係数(GPa)	20.6	16.5	8.2
	圧縮強度(MPa)	39.2	35.8	23.5
	引張強度(MPa)	3.92	3.58	2.35

5.4 解析結果および考察

図-7に荷重と鉛直方向変位の関係を示す。この図より、健全である状態Iの終局耐力は200(kN)に対し、著しく劣化した状態IIIの終局耐力は約170(kN)であり、約15%低下することが確認できた。状態IIIの解析モデルでは、鉄筋腐食による鉄筋とコンクリートの付着強度の低下を再現していないため、実際にはもう少し低下するものと考えられる。図-8に状態Iと状態IIIのひび割れ分布図を示す。この図中の灰色で呈された要素は引張終局ひずみに到達しひび割れの発生が予想される。状態Iに比較して、状態IIIは載荷点直下のひび割れ分布の拡大は見られないが、隅角部ではひび割れ分布が拡大することが確認できた。これは、隅角部に局所的に劣化が生じたことにより、劣化している隅角部とそれ以外の健全部との境界部がせん断や引張に対する耐荷性能が低下したためと考えられる。

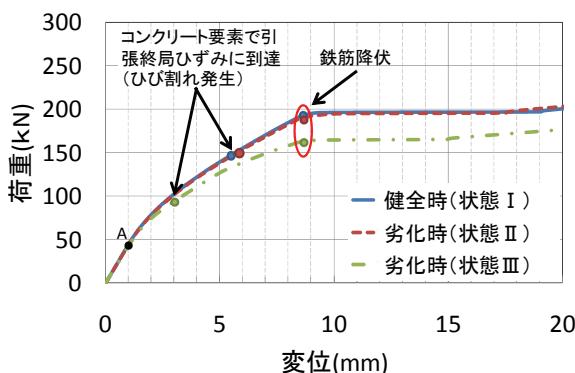


図-7 荷重 - 鉛直変位関係

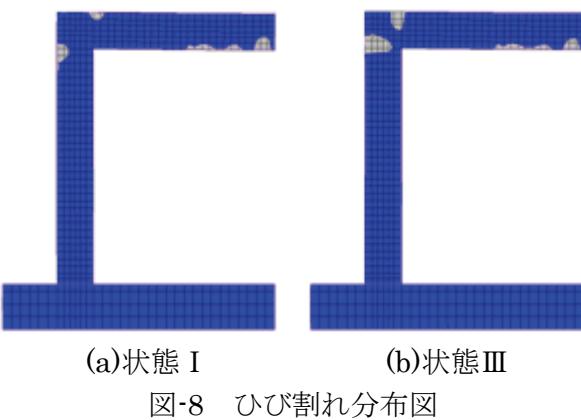


図-8 ひび割れ分布図

6. 結論

本研究で得られた成果は下記の通りである。
(1)供用中の実橋梁のRC橋脚部からコンクリートコア供試体を抽出し、ASR促進試験を実施した。その結果、健全部では養生日数91日における膨張率は約0.126%，劣化部では約0.0664%であること、さらに、限界膨張率は約0.139%であることが確認できた。
(2)促進試験終了後の劣化部供試体の圧縮強度および静弾性係数はそれぞれ22.0(N/mm²)、および27.4(kN/mm²)となった。設計時の値と比較すると、圧縮強度は約33%低下していることが確認できた。
(3)基本的なRCラーメン橋脚を対象に、隅角部に局所的にひび割れが発生することによる耐荷力低下の影響を検討したところ、本研究で定義した劣化状態IIIでは健全時と比較して、耐力が約15%低下し、さらに隅角部とその周辺の健全部との境界にひび割れが集中することが確認できた。

また、本研究の成果を踏まえ、更なる研究を遂行していくことで、今後、構造性能に影響を及ぼすASRによる許容限界膨張量の算定を定量的に評価可能になるとを考えている。

参考文献

- 1) 幸左賢二他, アルカリ骨材反応による鉄筋破断現象に関する実験的考察, 土木学会論文集E, Vol. 64, No. 2 pp.371-388, 2008年
- 2) 作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会, 報告書, p.207, 社団法人 日本コンクリート工学協会, 2008年
- 3) 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, コンクリート技術ビシリーズ71, 土木学会, 2006年