

報告 昭和初期に建設された鉄道高架橋のコンクリート品質に関する調査

高山 充直*1・井口 重信*2・松田 芳範*3

要旨：昭和初期に建設された鉄道高架橋について、非破壊調査や部分はつり調査および採取コアによる分析を行い、使用しているコンクリートの表層品質や強度特性について調査を行った。その結果、経年が83年であってもコンクリート表層部の強度特性は各部材間でばらつきが少ないことが確認できた。また、表層部の強度特性の低下は、高架下の利用環境や長年の雨かかりによる細骨材の露出など、建設後の使用形態に特に影響を受けることがわかった。一方、圧縮強度に対する静弾性係数は、現在の標準示方書に示されている静弾性係数に比べて高い傾向が認められた。

キーワード：非破壊調査, 中性化, 圧縮強度, 静弾性係数

1. はじめに

わが国の鉄道において、橋梁などの主要な構造物に鉄筋コンクリート構造が本格的に採用されたのは、「鉄筋混凝土設計心得」が制定された1914(大正3)年以降のことである。この頃建設された鉄筋コンクリート構造物の中には、現在も供用されている構造物も多数あり、それらは今後も鉄道事業者が維持管理を行っていくものである。しかしながら、初期に建設された鉄筋コンクリート構造物が、現在の標準的な品質と比較して、どの程度の性能を保有しているのか定量的な尺度で評価されることは少なく、今後、維持管理を行っていくうえで、その実態を明らかにしていくことが必要であると考える。

写真-1は、駅の構内開発事業により撤去が予定されている高架橋である。昭和初期に建設された高架橋であるが、撤去前に詳細な調査を行う機会を得ることができた。本稿では、微破壊・非破壊・コア採取による各種調査から得られたコンクリートの表層品質および強度特性についての結果について報告する。



写真-1 高架橋の外観

2. 高架橋の概要

表-1に調査を行った高架橋の構造諸元を、図-1に概略一般構造図を示す。本橋は、1936(昭和11)年に建設された、鉄筋コンクリート構造のビームスラブ式ラーメン高架橋である。当初、線路の立体交差化事業として建設が進められていたが、戦争の拡大などの理由から、途中で計画が頓挫してしまい、その後一度も供用されることがないまま、現在はアプローチ部の高架橋約108mが遺構として残されている。構造図のほか使用されているコンクリートの配合や鉄筋の特性値などについても施工時の記録は残されていないが、建設年度から推測すると、1931(昭和6)年に制定された「鉄筋コンクリート標準示方書(土木学会)」(以下、昭和6年標準示方書)に準じて設計・施工がされているものと考えられる。

表-1 高架橋の構造諸元

構造形式	ビームスラブ式 RC ラーメン高架橋
桁長	108.1m (5ブロック)
総幅員	8.7m
建設年度	1936年(昭和11年)
設計荷重	不明
配合	呼び強度・W/Cなど 不明

3. 調査の項目と方法

3.1 調査項目

調査は、現地における外観調査および非破壊・微破壊調査と、現地から採取したコンクリートコアの分析に大別される。表-2に調査項目を示す。

*1 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター (正会員)

*3 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター 工博 (正会員)

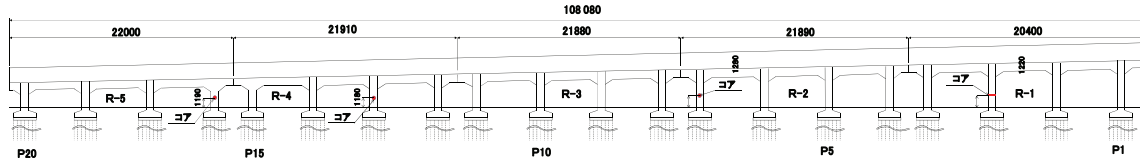


図-1 概略構造一般図

表-2 調査項目

現地調査	
外観調査	外観の状況，内部鋼材の腐食状況，中性化の状況
強度特性等	非破壊調査（反発度法）
採取したコアによる調査	
材料・配合	水セメント比の推定（鉄道総研法）
強度特性等	圧縮強度・引張強度・静弾性係数

現地調査では，外観調査，強度特性を評価するための調査を実施した。外観調査では打音検査を併用しながら劣化の状況を観察するとともに，場所打ち高欄の一部をはつり出し，内部鉄筋を露出させて腐食の状況を観察したほか，はつり面にフェノールフタレイン 1%アルコール溶液を噴霧し，中性化の状態を観察した。また，強度特性等の試験では，強度特性評価として実績が豊富な非破壊試験を用いて，高架橋各ブロックの柱における反発硬度を測定した。この他，高架橋柱の地表面から 1 m 以上離れた位置で水平貫通コア（ $\phi 100$ ）を採取した。

採取したコアは，封緘し，試験室に運搬して各種試験に必要な寸法に切断し，キャッピングなど試験に必要な措置を施した。その後，材料・配合に関する調査および強度特性などの各種調査を行った。材料・配合に関する調査では，水セメント比の推定を行った。また，強度特性等に関する調査では，圧縮強度試験，静弾性係数測定を実施した。そのほか，コア採取時の削孔面で中性化深さの測定を行った。

3.2 調査方法

(1) 強度特性等（リバウンドハンマー試験）

高架橋の各ブロックから，コンクリート表面の状態を確認して代表する柱を各 2 箇所抽出し，各々 4 面（東西南北）を打撃した。打撃箇所は地表面からおおよそ 1.5 m 程度の位置で統一し，JSCE-G 504-2007 に準拠して各測点間を 30mm 以上離れた測点で 20 点以上打撃し，偏差が平均の $\pm 20\%$ 以上の測定値を除外した測定値の平均を基準反発度とした。なお，打撃方向は全て水平であり，表面も乾燥した状態であったため，測定値の補正は行っていない。

(2) 強度特性等（圧縮強度・引張強度・静弾性係数）

高架橋の柱部からコアを採取し，採取コアを 200mm に切断して供試体とし，圧縮強度試験を行った。このとき，圧縮ひずみの測定はコンプレッソメータを使用した。引張強度は，「JIS A 1113 割裂引張強度試験」に準じて算出し，静弾性係数は，JIS A 1149-2001 に用いられている 1/3 割線弾性係数により算出した。

(3) 材料・配合の推定

採取コアをハンマーで粉砕し，粒径 $75 \mu\text{m}$ 以下の部分を取り出して，分析用のペレットを作成した。この試料を用いて，コンクリート中に生成する水酸化カルシウムの形態が水セメント比に依存する現象を用いた推定方法（鉄道総研法）により，コンクリートの水セメント比の推定を行った。

4. 現地調査

4.1 調査日の環境

現地調査は，以下の内容で 3 日間に分けて行われた。

1 日目：外観調査，リバウンドハンマー試験

2 日目：コア採取，中性化試験

3 日目：はつり調査，内部鋼材の観察，中性化状況

全日とも天候は「晴れ」であり，調査時の外気温は，気象庁の統計によると 1 日目と 2 日目はおおむね 25°C から 30°C であり，3 日目はおおむね 16°C から 19°C であった。ただし，1 日目と 3 日目は前日まで降雨があり，リバウンドハンマー試験を行った高架橋柱には直接の雨が降らないものの，雨垂れにより柱まで雨水が流れている箇所も点在した。また，3 日目に部分的なはつり調査を行った場所打ち高欄は，遮蔽物の無い暴露環境にある。

4.2 外観調査

目視調査は，高架橋全体を対象とし，過去の高架下の利用形態や表面コンクリートの状況や変状などにも着目して調査をおこなった。図-1 に示した R1・R3・R5 ブロックについては，スラブ下面と柱の一部が白く塗装されていたことから，事務室など建築物として活用されていたようであった。また，R2 ブロックはスラブ下面を中心に全体的に黒い煤が付着していた。高架下を鍛冶場などの作業場として使用していたことが推測される。

変状としては，かぶりコンクリートの剥離・剥落および鉄筋の腐食が多く確認された。昭和 6 年標準示方書に

よれば、「鉄筋の保護として必要なるコンクリート被厚は最も外縁の鉄筋表面よりの厚さ、版の下側にて1cm以上、桁にありては1.5cm以上、柱にありては2cm以上とす。」と記述されており、更に風雨に曝されるものは1cm増加させることとなっている。設計仕様の段階で現在よりも鉄筋かぶり厚さが小さく設定されているため、鉄筋の腐食とそれによるかぶりコンクリートの剥落などの変状が多いことが説明できる。一方、写真-2のような張出しスラブ下面では、雨垂れ跡のある範囲とない範囲での変状に明確な差異があった。すなわち、雨垂れのおよんでいる範囲では鉄筋の腐食とそれに伴う変状が確認され、雨垂れのない箇所では目立った変状は確認されなかった。また、柱部では目立った変状はみられなかったが、張出しスラブからの雨垂れが柱面まで及んでいる箇所があり、長年の雨水の作用を受けたことにより、細骨材が露出している表面状態であった。これらの柱部材は、鉄筋かぶりが40mmから50mm程度は確保されていたため、外観上でわかるような内部鉄筋の腐食などの変状は生じていないものと考えられる。以上のことから、現在では標準的に行われている張出しスラブ端縁の水切りなどに代表される水の処理が鉄筋コンクリート構造物の耐久性に重要であることが改めて確認された。



写真-2 場所打ち高欄および張出しスラブ下面の変状

4.3 はつり調査

4.3.1 調査の目的と概要

内部鉄筋の腐食状況と表層コンクリートの中性化の状況を確認するために場所打ち高欄の一部をはつり出し、フェノールフタレイン1%アルコール溶液を噴霧して呈色状況を観察した。調査の箇所は目視と打音検査を行い、表面の浮きやひび割れが無い箇所を抽出した。なお、はつり位置は図-2に示す橋面上の西面と東面および、場所打ち高欄外側東面の3箇所で行った。なお、付近に日射や風雨を遮る遮蔽物がない環境であるため、コンクリート表面は長年風雨に曝されてきた箇所である。そのため、雨水の作用により表層のセメントペースト成分が侵食されており、表面に細骨材が露出した状態であった。

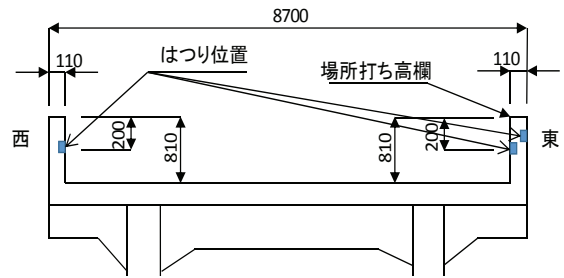


図-2 はつり調査位置図

表-3 はつり調査結果

方向	採取位置	中性化深さ (mm)		かぶり (mm)
		平均	最大	
西側	高欄内面	20.3	23	10
東側	高欄外面	14.5	18	20
東側	高欄内面	10.3	12	10



写真-3 内部鋼材の腐食と中性化の状況

4.3.2 はつり調査の結果

はつり調査の結果を表-3に、内部鉄筋の腐食と周辺コンクリートの中性化状態を写真-3に示す。

場所打ち高欄の内部鋼材(φ9)は3箇所ともに全面にわたり表面的な腐食が生じており、部分的に浅い孔食も生じている状況であった。場所打ち高欄の内側2箇所は鉄筋位置まで中性化が進行していたが、外面の東側は鉄筋の腐食が生じているものの、鉄筋位置まで中性化は進行していなかった。サンプルは少ないが、この現象や先述の張出しスラブ下面の雨垂れ範囲の鋼材腐食などの変状から、コンクリート内部の鋼材は、鋼材を覆っているコンクリートが中性化しているかどうかに関わらず水分の供給があれば鋼材の腐食が生じることを示唆しているものと考えられる。

4.4 リバウンドハンマー試験

4.4.1 試験の目的

リバウンドハンマー試験は、コンクリートの圧縮強度を推定するために古くから使用されてきた非破壊試験であり、種々の研究が行われてきた。しかしながら、コン

クリートの強度推定には多くの因子が関連するため、現状では普遍的な測定手法が確立されていないものと考えられる。そこで本調査では、リバウンドハンマーで測定した基準反発度を利用し、構造物のコンクリート強度特性のばらつきを調べることにした。これは、建設時の技術において、高架橋規模の鉄筋コンクリート構造物を建設する場合に、均一な品質のコンクリートを管理することは困難であったのではないかと推測したためである。また、建設後の雨垂れなどによる影響や、他の調査との相関についても考察することとした。

4.4.2 試験の結果

図-3 に高架橋の柱部材で実施したリバウンドハンマー試験により得られた基準反発度を示す。白抜きの棒グラフは写真-4(左)に示すような雨垂れ跡がある箇所でのデータである。

この結果によると、柱部材の基準反発度は平均値が51.5であり、標準偏差(σ)は4.8であった。雨垂れ箇所のほとんどは、平均値よりも基準反発度が低く、標準偏差(σ)からも外れている箇所があった。このような雨垂れ箇所は、雨水の作用によりコンクリート表面のセメントペースト成分が流出したことで細骨材が露出している状態となっていた。そのため表面硬度が低下したようである。また、全体のばらつきをみると、R2ブロックとR3左側の基準反発度が低いものの、その他は雨垂れ箇所を除けば比較的ばらつきが少ないようであった。今回の調査で比較的硬度が低い傾向にあった箇所については、その要因を今後の課題として調査を進めていくが、機械化した作業が少ない当時の施工技術にあっても品質のばらつきがそれ程多くない結果となった。

4.5 コア採取

4.5.1 試験の目的と概要

コンクリートの強度特性や物質移動抵抗性を分析するため、柱部から $\phi 100\text{mm}$ の貫通コアを採取した。コア

採取には湿式のコアドリルマシンを使用し、いずれも水平方向で削孔した。コアはR3ブロック以外の柱から各2本採取し、計8本を採取した。採取後は直ちにラップフィルムで封緘し、試験室に運搬した。



(左) 雨垂れ箇所 (右) 通常箇所
写真-4 リバウンドハンマー試験箇所の状況

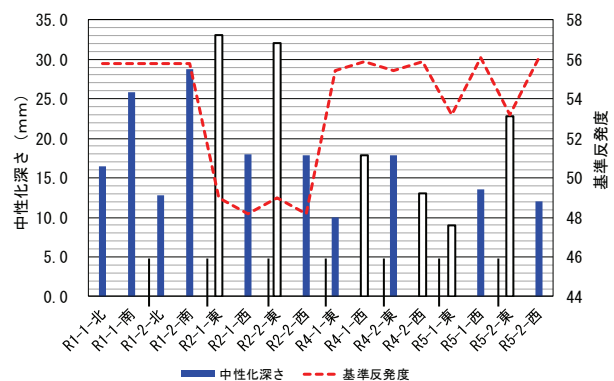


図-4 中性化深さと基準反発度の関係

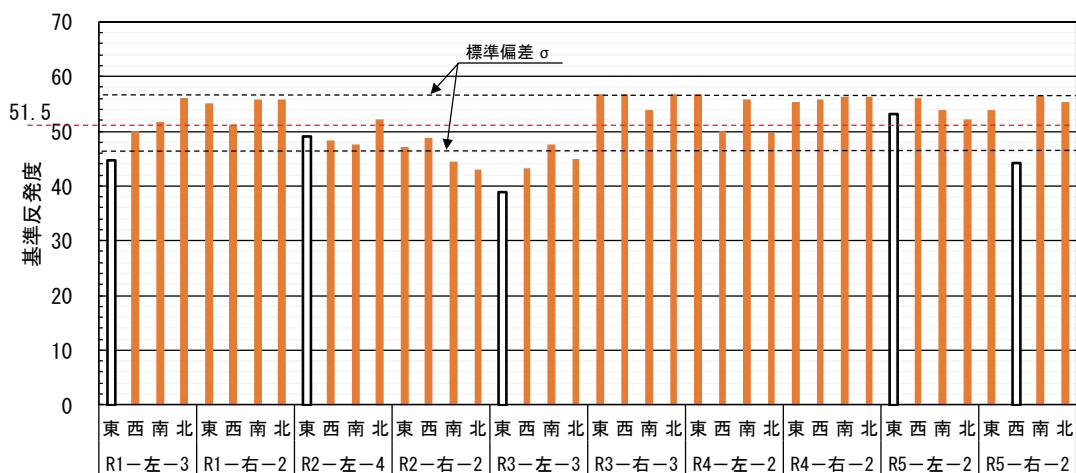


図-3 基準反発度の測定結果比較

4.5.2 中性化試験の結果

コアを切り出した表面で中性化深さを測定した。各孔とも上下左右4点を測定し、その平均値を中性化深さとした。図-4に中性化深さの測定結果と同箇所での基準反発度との関係について整理した。

図中の棒グラフは中性化深さを示しており、最大値が33mm、最小値が9mmとばらつきのある結果となった。白抜き棒グラフは高架橋の内側面を示しているが、各部位でみると、内側面の方が外面と比べて中性化が進んでいることが多いようであった。これらの箇所は、以前高架下を事務室や作業場などとして利用していた所である。一般に、屋内は屋外に比べて炭酸ガス濃度が高いため、中性化速度が速いことが知られている。そのため、建物として利用されていた内面は、外面よりも比較的中性化が早く進んでいるものと考えられる。

また、図中の折れ線グラフは、各箇所の基準反発度を示している。コンクリート表層部が密実でない場所では、物質移動抵抗性が低く、中性化も早い、それと同じ傾向が、基準反発度でも表れるのかどうかを確認した。その結果、先述のとおり、雨垂れ箇所は反発硬度が低くなる傾向があるようであったが、今回の調査では、中性化と基準反発度の相関性を見出すまでには至らなかった。

5. 採取したコアの分析

5.1 圧縮強度試験の結果

圧縮強度試験の結果を表-6に示す。コンクリートの圧縮強度は22.4N/mm²から38.2N/mm²であった。静弾性係数は24212N/mm²から40425N/mm²であった。引張強度は、割裂引張試験結果から算出し、おおむね圧縮強度の1/10~1/20程度であった。

表-6 コンクリートの強度特性

供試体 No	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)
1-1	22.4	0.72	31 323
1-2	37.8	2.32	30 791
2-1	35.1	1.90	34 557
2-2	27.7	1.71	24 510
4-1	31.5	3.17	33 207
4-2	33.2	3.19	24 212
5-2	38.2	1.84	40 425

図-5に得られた応力とひずみの関係を示す。応力-ひずみ曲線からもわかるとおり、試験値のばらつきが大きい結果となった。また、最大荷重時のコンクリートのひずみは、1600 μ から2000 μ 程度であった。通常は、最大

応力に達するひずみは2000 μ 前後であるので、やや小さい値であるといえる。また、引張強度についても一般的には圧縮強度の1/10から1/13程度とされているが、試験で得られた引張強度は、1/10から1/20程度であった。

写真-5に圧縮試験時の各供試体における破壊形態を示す。破壊形態は、粗骨材に沿って斜め方向にひび割れが入る形態であった。粗骨材には川砂利が使用されており、粒径が大きく、中には50mm以上の骨材も使用されていた。圧縮試験時には寸法の比較的大きな粗骨材の界面からひび割れが入り、破壊に至っていた。このことが、供試体毎の測定値のばらつきが大きくしている要因となっているものと推測される。

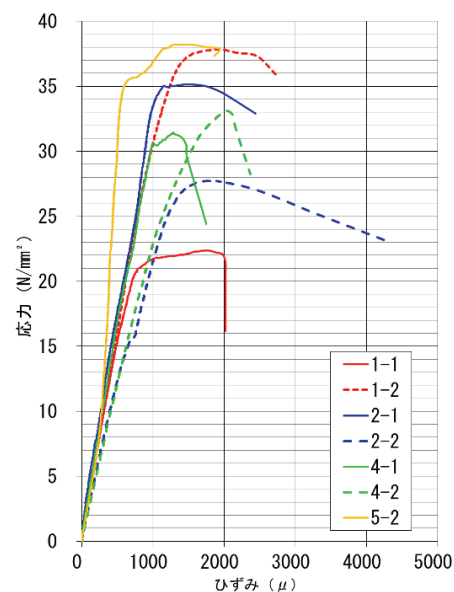


図-5 応力-ひずみ曲線



写真-5 供試体の破壊形態

試験で得られた圧縮強度と静弾性係数の関係を図-6に示した。測定値のばらつきを考慮し、平均値ではなく、供試体毎の値をプロットし、参考として現在のコンクリート示方書に示されている圧縮強度と静弾性係数の関係も表記した。

この図から、試験で得られた静弾性係数は、現在のコンクリート標準示方書と比較するとやや高い傾向を示しているようであった。

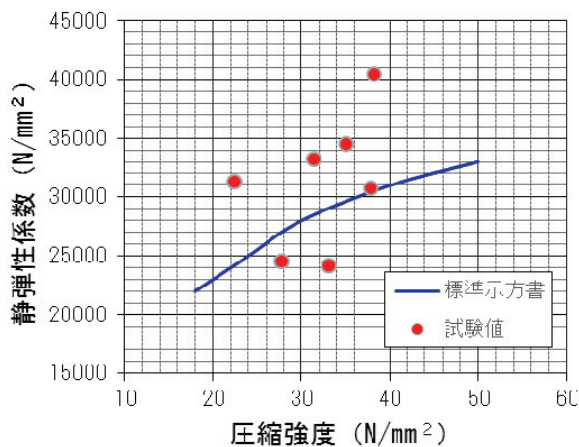


図-6 静弾性係数と圧縮強度の関係

5.2 水セメント比の推定

コンクリートの配合が不明であるため比較することはできないが、本試験による水セメント比の推定の結果、推定水セメント比 58.5% が得られた。現在のコンクリート標準示方書では、一般の環境下において、耐久性を満足する構造物の最大水セメント比は、柱部材で 50% とされているが、配合設計における水セメント比は 65% 以下とされており、この範囲内の値となっている。

6. まとめ

6.1 コンクリートの表層品質

外観目視調査より、場所打ち高欄や張出しスラブ下面などで内部鉄筋の腐食やかぶりコンクリートの剥落が多く見られたが、そもそも建設当時のかぶり厚の仕様は 1cm から 2cm と少なく、さらに 83 年の経年を考えれば表層コンクリートの品質が悪いとはいえない。また、張出しスラブや柱など、同じ環境の部位でも変状箇所が雨水などの供給がある範囲に集中していることは、内部鉄筋の腐食は、鋼材を覆っているコンクリートが中性化しているかどうかに関わらず水分供給の有無に大きく左右されることがわかった。このことは、場所打ち高欄で行ったはつり調査でも裏付けされた。

当初懸念していた品質のばらつきについても、反発硬度の結果でみるとそれほど大きくはなく、推定水セメント比も 58.5% という値が得られたことから古い構造物であっても水セメント比に留意した配合を行っていることがわかった。ただし、雨垂れや周辺環境によって反発硬度が小さくなる箇所もあったことから、実構造物における調査を行う場合には、建設後の使用環境に大きく影

響を受けることに留意する必要がある。

基準反発度と中性化には何らかの相関があると考え調査を行ったが、今回の調査では明らかな相関は見出すには至らなかった。

6.2 強度特性

反発硬度の結果は表面に細骨材が露出したような状態でなければ、比較的安定した結果であったが、一方で、採取したコアによる圧縮試験では、ばらつきが大きく表れた。供試体の破壊形態から、粗骨材の形状や寸法などに影響を受けているようであった。また、圧縮試験時の最大応力に達するときのひずみは、1600 μ から 2000 μ 程度であり、圧縮強度に対する引張強度の割合は、圧縮強度の 1/10 から 1/20 程度の値であった。一方、圧縮強度に対する静弾性係数は、現在の標準示方書に示されている静弾性係数に比べて高い傾向が認められた。以上のことから、当該高架橋のコンクリートには良質な粗骨材が多く使用されており、粗骨材量の大きい配合にすることで単位水量の小さい良質なコンクリートとなっているものと考えられる。

7. おわりに

今回の調査では、現場調査として外観調査、非破壊調査、微破壊調査、コア採取による各種試験を行った。それにより昭和初期のコンクリート品質を強度特性と品質について知ることが出来た。今後は、現在調査中の物質移動抵抗性についても研究をすすめ、今回よりも詳細な視点で表層品質の特徴と強度特性との相関についての新たな知見を得るために研究を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会 (335 委員会) 成果報告書およびシンポジウム講演概要集、コンクリート技術シリーズ 80, 土木学会
- 2) 鉄筋コンクリート標準示方書, 昭和 6 年 10 月, 土木学会
- 3) 吉田徳次郎: 鉄筋コンクリート設計法, 昭和 7 年 2 月, 養賢堂
- 4) 2013 年制定コンクリート標準示方書[規準編], 2013 年 11 月, 土木学会
- 5) 2012 年制定コンクリート標準示方書[施工編], 2013 年 3 月, 土木学会
- 6) 2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2013 年 3 月, 土木学会
- 7) 岸谷幸一, 西澤紀昭他編: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化, 技報堂出版, 1986