

1408 既設鉄筋コンクリート鉄道高架橋の 中性化による劣化の現況調査とその定量評価

正 [土] ○松橋 宏治 (パシフィックコンサルタンツ(株)) 正 [土] 轟 俊太朗 (鉄道総研)

正 [土] 曾我部 正道 (鉄道総研) 正 [土] 谷村 幸裕 (鉄道総研)

Investigation and Quantitative Evaluation of Deteriorations by Carbonation caused on the Existing Reinforced Concrete Railway Viaduct

Koji MATSUHASHI, Pacific Consultants Co., Ltd. 2-7, Nishi-Shinjuku 1-chome, Shinjuku-ku, Tokyo

Shuntaro TODOROKI, Railway Technical Research Institute.

Masamichi SOGABE, Railway Technical Research Institute.

Yukihiro TANIMURA, Railway Technical Research Institute.

In this research, to establish the forecast technique of deterioration by the carbonation of reinforced concrete structures, the fixed quantity evaluation concerning the deterioration was done based on the detailed investigation of an existing structure which deterioration by the carbonation was actualized and it considered about the occurrence and the progress speed of deterioration by the carbonation. First of all, it was shown that the remainder of the carbonation 10mm as a limit value concerning the reinforcing steel corrosion is roughly appropriate from the relation between the incidence of the strangeness and the remainder of the carbonation obtained by the investigation. Moreover, the difference of the amount of the moisture supply by the member and the part influenced the reinforcing steel corrosion speed, and it was shown that it was an item that had to be considered when deterioration was forecast.

Keywords: vehicle, dynamics, control, design, power supply, signaling system, train control, track, bridges, stations, tunnels

1. はじめに

鉄筋コンクリートの中性化は、鉄筋腐食の原因となる劣化機構の一つで、進行すると鉄筋の腐食膨張によりコンクリート片の剥落を引き起こす。市街地に立地する鉄道高架橋等でコンクリート片の剥落が生じた場合には、第3者被害等の重大事故の原因となるため、これを未然に防ぐ適切な対処が求められる。そのためには、適切な劣化予測に基づき、補修時期等に関する最適な計画を策定することが重要である。本研究では、鉄筋コンクリート構造物の中性化による劣化の予測手法の確立を目的に、剥落等の劣化が顕在化した実構造物に対する詳細な現況調査結果を基に劣化状況に関する定量評価を行い、中性化による劣化の発生や進行速度に関する考察を行った。

2. 構造物調査

2.1 対象構造物

構造物調査の対象は、剥離剥落といった鉄筋腐食によると思われる変状が顕在化した、鉄筋コンクリート（以下、RC と略称）製の鉄道ビームスラブ式ラーメン高架橋で、この内、柱部材を対象とした。構造物の一般形状および寸法を図1に示す。当該高架橋は、供用開始から35年が経過しており、当初、2柱式の単線高架橋として築造され、時期は不明であるが線増により3柱式複線高架橋に拡幅された。本調査では、当初に築造された範囲を調査対象とした。コンクリートの設計基準強度 f_{ck} は

24N/mm²で、最大水セメント比 W/C は55%であることが本高架橋のしゅん工図より明らかとなっているが、実際の配合条件等を示す施工記録は現存していない。また、鉄筋は異型鉄筋SD295が用いられている。

当該高架橋は市街地に立地しており、高架橋の左側には民家が軒を連ね、右側（線増側）は空き地となっている。海岸線からの距離は1km程度で、飛来塩分の影響は受けないと考えられ、また、事前調査により確認した部材深部の塩化物イオン濃度は0.3kg/m³程度以下であったことから、塩化物イオンによる鉄筋腐食の可能性は小さいと考えられる。そのため、当該高架橋に見られる鉄筋

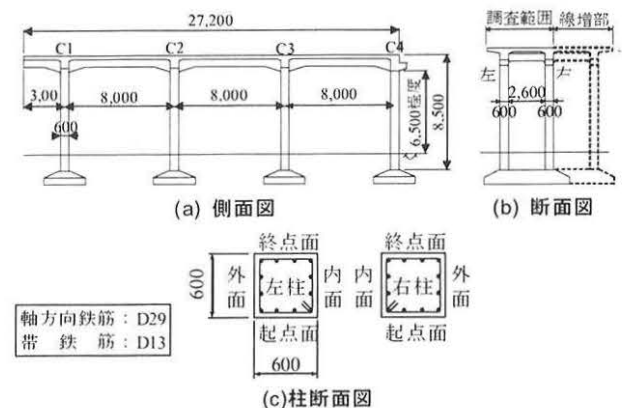


図1 調査対象構造物の一般形状・寸法（単位:mm）

腐食によると思われる変状は、コンクリートの中性化が主要因として推定された。

2.2 調査内容と調査箇所数

本調査の内容は、中性化深さ、かぶりの測定、およびひび割れや剥離・剥落と言った変状の発生率とした。変状発生率の算定方法については、次節にて詳述する。これら調査を柱の全高 6m 程度の範囲に対して行う詳細調査と、地上から 2m 以内の範囲に限定して行う簡易調査の 2 パターンをそれぞれ複数の柱に対し実施した。また、本研究では、図 1 に示す形状寸法を有する連続 2 ブロックの高架橋に対し、表 1 に示す柱本数の調査を行った。

表 1 調査した柱の本数

	調査範囲	高架橋ブロック	
		R1	R2
簡易調査	下部 1.5~2m 範囲	5 本	5 本
詳細調査	全高 6m 程度	1 本	3 本

2.3 調査方法

(1) 中性化深さ

中性化深さは、コンクリートをハンマードリルにより径 25mm、深さ 50mm 程度に削孔した孔内に、フェノールフタレイン 1% 溶液を噴霧し赤色に変色する位置のコンクリート表面からの深さを目視によりノギスで測定した。削孔 1 箇所につき孔の上下左右 4 点で測定し、その平均値を 1 箇所当りの中性化深さとした。柱 1 面当りの測定箇所数を図 2(a) に示す。図 2(a) に示す測定を、表 1 に示す調査柱の全面で実施した。詳細調査では柱 1 面当たり 4 又は 8 箇所 (1.5m 程度又は 0.75m 程度の間隔) 測定を行い、柱高さ方向へのばらつきを調査した。簡易調査では、地上から 1m 程度の高さ位置 1 箇所測定した。

(2) かぶり

かぶりは調査範囲の帯鉄筋全てを対象に、電磁波レーダーにより位置を特定した後、電磁誘導法による鉄筋探査機を用い非破壊により測定した。図 2(a) に示すとおり、柱 1 面当たり 2 本の測線を設け、矩形の帯鉄筋 1 辺の左右端付近 2 点のかぶりを測定した。調査した鉄筋本数は、詳細調査では柱 1 本当たり 25 本程度、簡易調査では 10 本程度である。

(3) 変状発生率

本研究では、帯鉄筋の腐食によると考えられる変状に着目し、変状の発生状況を変状発生率として定量化を行った。まず、近接目視および打音により、柱表面に生じたひび割れおよび剥離・剥落を確認し、変状の発生位置、方向、範囲について詳細に記録した。次に、電磁波レーダーにより位置を特定した帯鉄筋上に変状確認点を設け、その点での変状の有無をひび割れ、剥離・剥落に分けて確認し、確認した変状の箇所数の全変状確認点に対する割合を変状発生率とした。なお、変状確認点は図 2(b) に示すとおり、帯鉄筋 1 辺当たり 7 点とした。これは、軸方向鉄筋上の 4 点とその中間点 3 点としたものである。

3. 調査結果

3.1 中性化深さ

まず、中性化深さの測定結果について示す。図 3 には、地上 1m 高さで測定した中性化深さの柱毎の分布状況を、表 2 には図 3 で示した測定値の平均値、標準偏差および標準偏差を平均値で除した変動係数をそれぞれ柱の面方向で区別して示した。図 3 より、地上 1m 高さでの中性化深さは 0~30mm 程度の範囲で柱毎にばらついており、

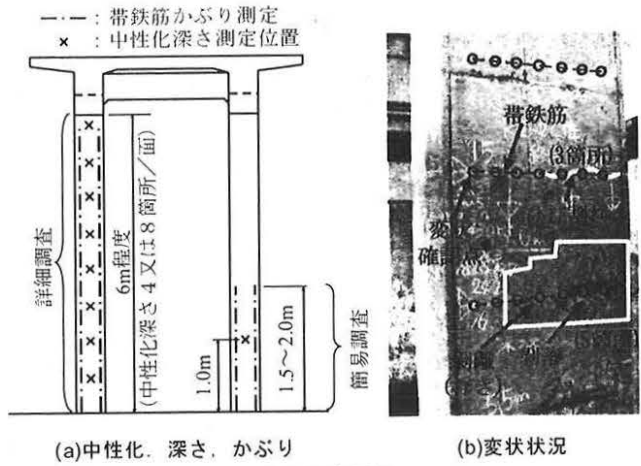


図 2 調査要領

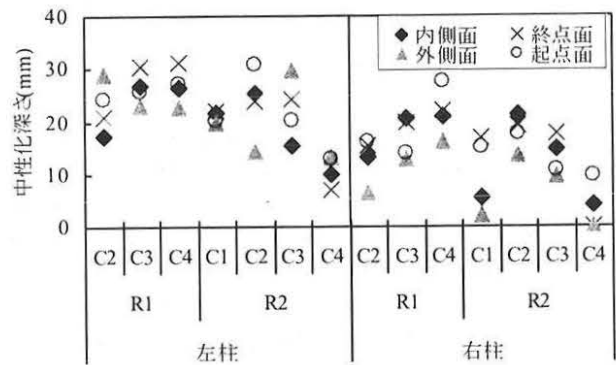


図 3 柱毎の中性化深さ (地上 1m 高さ)

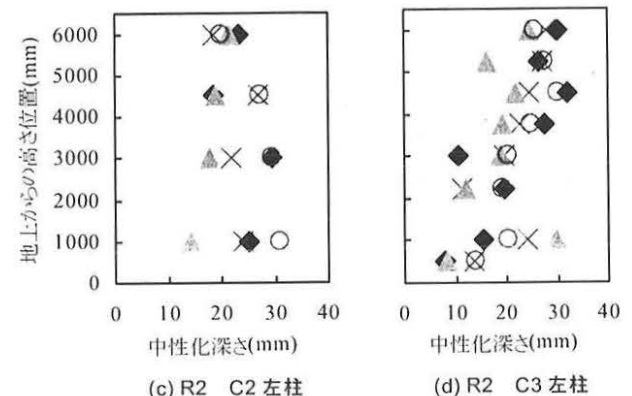
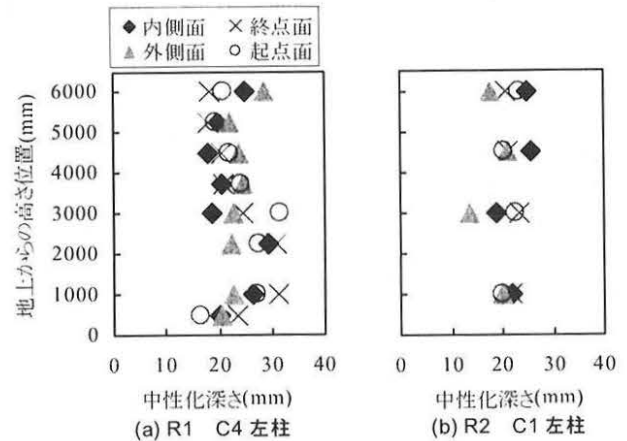


図 4 中性化深さの柱高さ方向分布

また同一柱においても測定面により 10mm 程度以上の差のある場合がほとんどであった。図 3 の結果を集計した表 2 より、地上 1m 高さの中性化深さの平均値は、柱面別で 15.2~19.3mm、全体では 17.8mm であった。また、ばらつきの程度を示す変動係数は、柱面別には 0.35~0.59、全体では 0.44 であった。

図 4 には、柱高さ方向の中性化深さの分布状況として、詳細調査を実施した柱の測定結果を示した。既往の研究¹⁾において、柱上部の打継目付近ではブリーディング等の影響で材料品質が低下し、中性化深さが大きくなる傾向にあることが示されているが、図 4 に示す調査結果では、柱高さ方向の分布に明確な傾向は見られなかった。

3.2 中性化残り

次に、かぶりの測定結果を基に前節の中性化深さの測定結果を差し引いた中性化残りについて整理する。図 5 は、各柱の高さ方向 1.5m 範囲毎の平均値を、柱面別に整理したものである。ここで、中性化残りの算出に用いる中性化深さは、各々の鉄筋に最も近い位置の測定結果を適用した。また、同図中に示す中性化残り 10mm とは、土木学会コンクリート標準示方書²⁾において鉄筋腐食が開始する閾値とされるものである。図 5 に示す結果において、柱高さ位置~1.5m の結果 (0.0~1.5m 範囲の平均値) は簡易調査および詳細調査を合わせた 10 本の柱の結果で、これ以外の高さ位置は詳細調査を行った 4 本の柱の結果である。

図 5 について、測定数の多い柱高さ 0.0~1.5m の結果に着目すると、柱によって中性化残りに大きなばらつきが見られ、中性化残りが 10mm を下回る柱の箇所数は、何れの柱面においても 4~5 箇所、これは全調査柱の 3 割程度に当たる。また、(c)外側面において中性化残りが -10mm を下回る極端に小さい箇所が確認された。その他の柱高さについては、調査した柱本数が少なく明確とは言いがたいが、柱高さ位置が高くなるにしたがい、柱による中性化残りのばらつきが小さくなる傾向が見られる。

3.3 変状発生率

続いて、ひび割れおよび剥離・剥落の発生率について示す。図 6 は、各調査柱の変状発生率の調査結果を面別に示したもので、図 6(a)は左柱、図 6(b)は右柱の結果を示した。図 6(a)において名称を枠で囲った柱は詳細調査を実施した柱で、柱 1 本全面 (高さ 6m 程度) の変状発生率で、その他の簡易調査柱の結果は下部 1.5~2.0m 範囲の変状発生率である。図 6 より、変状の有無や発生率は箇所によって大きく異なっているが、変状の生じている箇所に着目すると、ひび割れおよび剥離・剥落を合計した変状発生率は、(a)左柱の 2 箇所 50%または 80%程度と著しく大きくなっている以外は、概ね 20%程度以下であった。左柱で変状の著しく大きい 2 箇所は、何れも柱の外側面である。

次に、図 6 で示した詳細調査柱の変状発生率を柱高さ 1.5m 範囲毎に細分化し、図 5 で示した中性化残りと同様に、柱高さ毎の変状発生率を柱面別に整理した。その結果を図 7 に示す。図 7 より、(a)内側面に関しては、ひび割れの発生率が最大で 20%程度で、剥離・剥落の発生率は何れの柱でも 0%であった。(b)終点面に関しては、ひび割れの発生率は何れの柱高さでも最大 20%程度以下で、剥離・剥落の発生率は柱高さ 3m 以下の範囲で最大 30~40%程度が確認された。(c)外側面に関しては、ひび割れの発生率は何れの柱高さでも最大 10%以下で、剥離・剥落の発生率は、柱高さ 3m 以下の範囲で最大 80%程度、柱高さ 3.0~4.5m の範囲で 50%程度、柱高さ 4.5~

表 2 地上 1m 高さの中性化深さの集計(mm)

	内側面	終点面	外側面	起点面	全面
平均値	17.3	19.3	15.2	19.3	17.8
標準偏差	7.3	8.2	9.0	6.8	7.9
変動係数	0.42	0.43	0.59	0.35	0.44

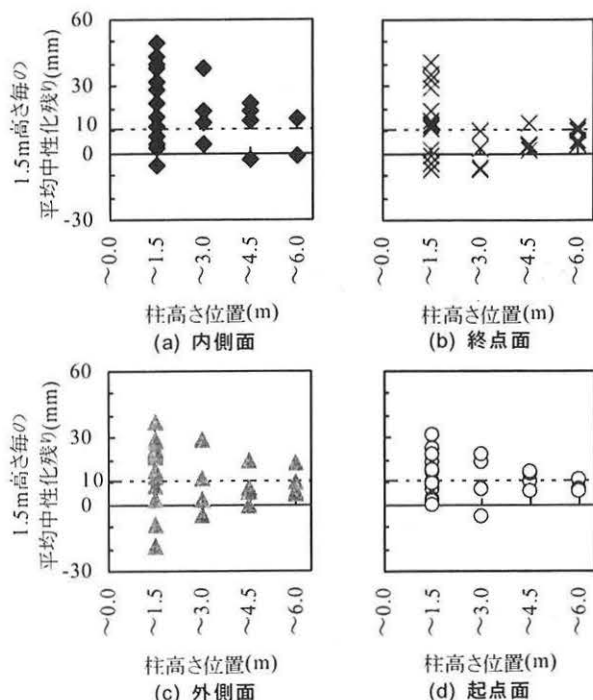


図 5 1.5m 高さ毎の平均かぶり

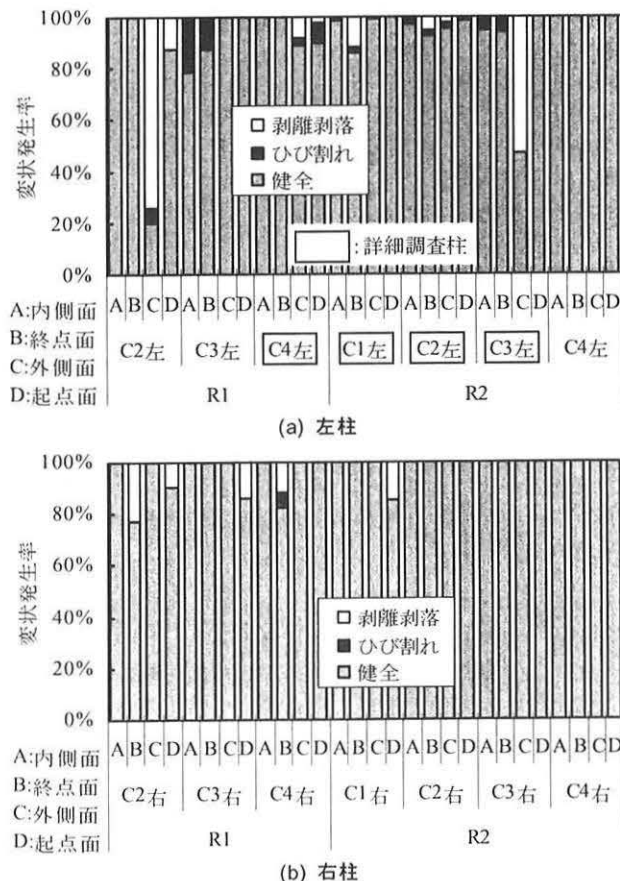


図 6 各調査柱の変状発生率

6.0m の範囲で 30% 程度であった。(d) 起点面に関しては、ひび割れの発生率は柱高さ 1.5~4.5m の範囲のみで 20~30% 程度が確認され、剥離・剥落の発生率は柱高さ 0.0~1.5m の範囲で 20% 弱、その他の柱高さでは数% 程度以下であった。

4. 変状発生の影響要因に関する考察

4.1 中性化による影響

本研究で得られた変状調査結果を基に、中性化の進行が変状の発生に及ぼす影響について考察する。図 8 には、図 5 および図 7 で整理した柱高さ 1.5m 範囲毎の中性化深さと変状発生率の関係を柱面別に示した。図 8 より、何れの柱面においても、中性化残りが小さくなるに従い変状発生率が大きくなる傾向が見られる。変状が顕在化し始める中性化残りは、変状発生率が最も顕著な(c)外側面に着目すると、中性化残り 10mm を下回る辺りで剥離・剥落の発生率が 30% 程度に達し、中性化残りの減少とともに変状発生率が大きくなっている。このことは、土木学会示方書²⁾に示される鉄筋腐食が開始する中性化残りの閾値 10mm が概ね適切であることを示すものと考えられる。ただし、外側面以外の柱面においては、20% 程度以下の変状発生率が中性化残り 10mm 以上の範囲で確認される。この点については、図 5 で整理した中性化残りに考慮されていない、かぶりおよび中性化残りの局所的なばらつきによるデータ整理上の誤差の影響が、比較的変状発生率の小さい領域で顕著になったものと考えられ、今後、データ整理法を含め精査する予定である。

4.2 柱面の違いによる影響

柱面別に変状発生率を整理した図 7 または図 8 より、柱面による変状発生率の違いを見ると、剥離・剥落の発生は(c)外側面において特に顕著で、次いで(b)終点面ならびに(d)起点面が比較的大きく、(a)内側面に関しては全く生じていないことが特徴的であった。この傾向の生じる原因としては、柱面の違いにより、雨がかりの有無や程度に差があることが考えられる。外側面では、降雨により鉄筋腐食条件の一つである水分の供給が他の面よりも多いため、鉄筋腐食の生じ易い環境にあると考えられる。そのため、図 8 で示すように同程度の中性化残りであっても他の面に比べ鉄筋腐食の進行が早く、変状発生率が大きくなっていると考えられる。一方、内側面では雨がかりをほとんど受けないため、鉄筋腐食の進行が非常に遅く、また終点面や起点面では、外側面ほどではないが、ある程度の雨がかりは受けるため、内側面よりは腐食の進行が早いと考えられ、これが図 7 または図 8 で得られた変状発生率に影響したものと考えられる。鉄筋の腐食速度の評価は、劣化の将来予測をする上で非常に重要な項目である。より精度の高い劣化予測を行うには、部材や部位による雨がかり等の水分供給度合いの違いも考慮して行う必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 柱高さ方向に 1.5m 範囲毎の平均中性化残り と変状発生率との関係を整理した結果、中性化深さの減少とともに変状発生率が大きくなる傾向が確認された。また、変状発生率が最も顕著な外側面の結果では、中性化残りが 10mm を下回ると変状発生率が急激に増加しており、これは、土木学会示方書に示される鉄筋腐食が開始する中性化残りの閾値 10mm が概ね適切であることを示すと考えられる。

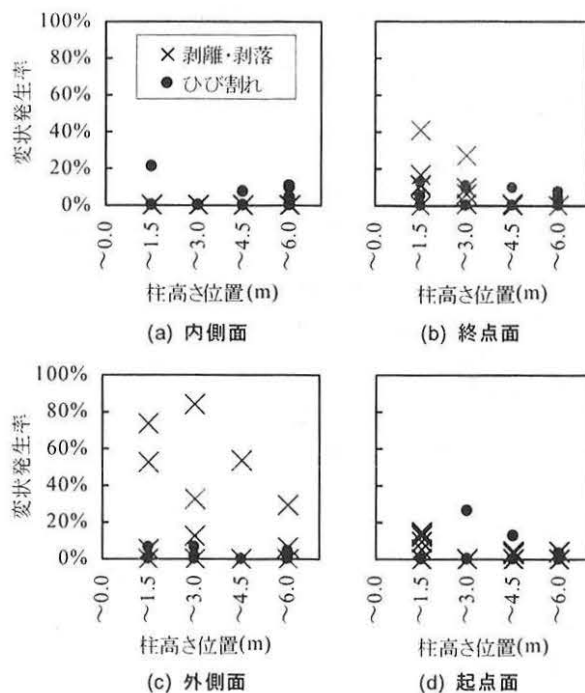


図 7 柱高さ 1.5m 毎の変状発生率

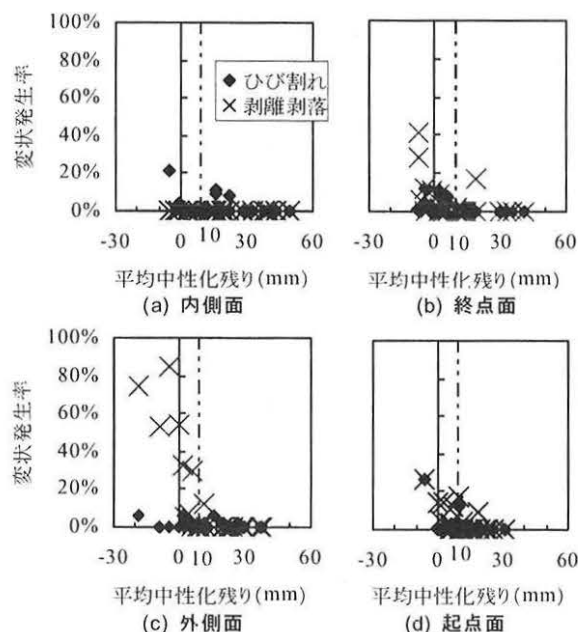


図 8 変状発生率と中性化残りの関係

- 調査結果で得られた柱面による変状発生率の差異より、鉄筋腐食の速度には雨がかりの受け易さが影響することが示された。このことから、劣化予測においては部材や部位による水分供給度合いの違いについても考慮する必要があると考えられる。

参考文献

- 谷村幸裕, 長谷川雅志, 曾我部正道, 佐藤勉: 鉄道 RC ラーメン高架橋の中性化に関する耐久性照査法の適用に関する研究, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp. 147-157, 2004.
- 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】, 2008