

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

谷村幸裕¹・長谷川雅志²・曾我部正道³・佐藤勉⁴

¹正会員 工修 (財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都分寺市光町2丁目8-38)

E-mail: tanimura@rtri.or.jp

²正会員 北海道旅客鉄道(株) (〒060-8644 北海道札幌市中央区北11条西15丁目1-1)

³正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都分寺市光町2丁目8-38)

⁴正会員 工博 (財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都分寺市光町2丁目8-38)

近年、コンクリートの中性化に関する研究が進められており、土木学会コンクリート標準示方書に中性化に関する耐久性照査方法が示されている。しかしながら、中性化速度は環境条件により大きく異なることが知られており、実構造物に適用するには、その影響を定量的に把握しておく必要がある。

そこで、本研究では、建設後数十年経過した鉄道ラーメン高架橋の調査結果をもとに、環境条件が中性化に及ぼす影響について検討を行った。その結果、柱の上方と下方、日照条件、雨がかりによって中性化速度が異なることが明らかになった。また、土木学会コンクリート標準示方書の中性化に関する照査を適用して、概ね10mm程度の誤差で中性化深さを推定できることが明らかになった。

Key Words : durability, carbonation, corrosion of reinforcing bars, railway RC rigid frame viaducts

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下、「RC」という)構造物において、コンクリートの中性化は鉄筋腐食の原因となるため、維持管理上の問題となる場合がある。コンクリートの中性化は、大気中の二酸化炭素等の影響により生じるため、多くのRC構造物に起こりうる問題であり、RC構造物の耐久性を検討するうえで重要な検討項目である。

土木学会コンクリート標準示方書¹⁾では、中性化に関する耐久性照査方法が示されており、次式を満足することを確かめることにより照査される。

$$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} \leq 1.0 \quad (1)$$

ここに、 γ_i : 構造物係数

y_{lim} : 鋼材腐食発生限界深さ

y_d : 中性化深さの設計値

式(1)において、中性化深さの設計値 y_d は、環境、中性化速度係数、および耐用年数などの関数として計算される。このうち、耐用年数については、中性化深さがその平方根にほぼ比例することが \sqrt{t} 則として一般に広く知られている²⁾。また、中性化深さと耐用年数の平方根の関係を示す比例係数である中性化速度係数は、同一環境下では、水結合材比との間に高い相関があることが明らかになっており、既往の研究³⁾により予測式が示されている。

しかし、実構造物の中性化深さを調査した結果によると、測定箇所によるばらつきが非常に大きく、場合によっては予測値を大きく上回ることがあることが明らかにされている⁴⁾。また、鉄道橋のRC桁⁵⁾、道路橋のRC桁の調査結果^{6), 7)}や建物の調査結果⁸⁾においても、構造物によって、あるいは同一構造物であっても部位によって中性化深さが大きく異なることが明らかにされている。これは、実構造物にお

いては、部位によって環境条件が異なっていることや、部位によって施工条件が異なるためにコンクリートの品質が異なることが、中性化速度に影響を及ぼすためと考えられる。

コンクリートの中性化速度に及ぼす環境条件等の影響については、既往の研究より、温度、湿度や炭酸ガス濃度の影響を受けることが促進試験や暴露試験により明らかにされている^{9),10),11)}。また、コンクリートの含水状態により中性化速度が異なることも明らかにされており¹²⁾、降雨により水分の供給を受ける環境と受けない環境では中性化速度が異なることが明らかにされている¹³⁾。しかし、促進中性化試験は中性化に影響を及ぼす環境条件について、自然暴露試験とは異なった傾向を示す可能性があることが指摘されており¹⁴⁾、実験的に明らかにするのは困難な状況となっている。そこで、実構造物の調査によって、これらの影響を明らかにすることが必要が

ある。

一方、最近のコンクリート片の剥落問題を鑑みて、コンクリート片の剥落が生じた高架橋等の調査が行われており、かぶり、中性化残りおよび雨水の影響が、コンクリート片の剥落および鉄筋腐食と関係が深いことが明らかにされている¹⁵⁾。しかし、環境条件の各種要因と中性化速度との関係は明らかにされておらず、耐久性照査や劣化予測を行うための基礎データは、ほとんど得られていないのが現状である。

そこで、本研究では、建設後数十年程度経過した実構造物の調査を行い、部材や部位による中性化速度の差異を明らかにし、耐久性照査における環境条件等の影響の考慮方法を検討することとした。なお、本研究では、鉄道高架橋として最も一般的に採用されている構造形式であるビームスラブ式 RC ラーメン高架橋を対象としている。

表-1 調査対象高架橋の諸元

高架橋名	A	B	C	D	E	F	G	H	
経年	24年	32年	32年	30年	30年	28年	32年	32年	
高さ H (m)	11.0	6.3	6.5	7.0	7.3	10.3	9.5	7.6	
線路方向スパン L_1 (m)	8.4	8.0	8.0	8.0	8.0	6.0	8.0	8.0	
線路直角方向スパン L_2 (m)	3.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	4.8*	
幅員 B (m)	6.0	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	14.1	
張出部長さ L_3 (m)	1.3	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	
線路方向の方位 (方位角: 起点方向を北から時計回りに表示)	南北 (20°)	東西 (105°)	東西 (130°)	東西 (120°)	東西 (120°)	東西 (115°)	東西 (90°)	東西 (90°)	
高架下の状況	駐車場	空地	駐車場	空地	空地	空地	駐車場	駐車場	
周辺の土地利用	畑	住居	住居	住居	住居	住居	住居	住居	
柱	塩化物イオン量(kg/m ³)	0.61	0.19	1.13	0.71	0.20	0.09	0.36	0.18
	圧縮強度(N/mm ²)	40.9	42.8	20.1	34.6	44.1	27.2	31.8	40.3
スラブ	塩化物イオン量(kg/m ³)	0.25	0.26	2.05	0.79	0.72	0.35	0.17	0.17
	圧縮強度(N/mm ²)	36.7	41.2	24.4	36.9	31.1	40.8	30.2	39.4

注：高架橋Hは線路直角方向2径間。

塩化物イオン量は、鉄筋位置（設計かぶり、柱：50mm、スラブ：30mm）での測定値

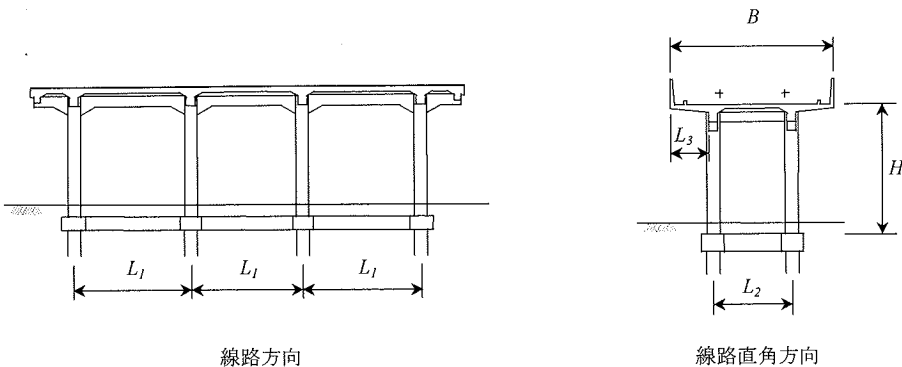


図-1 高架橋概略形状

2. 調査の概要

(1) 調査対象構造物

調査は、表-1に示す8高架橋について実施した。高架橋の概略形状を図-1に示す。いずれの高架橋も、表面に仕上げや塗装等は行われておらず、高架下に建物等の障害物は存在しない。

また、表-1には、高架橋が立地する周囲の状況を示すとともに、鉄筋位置のコンクリートからJCI-SC4¹⁶⁾により測定した全塩化物イオン量ならびにコンクリートの圧縮強度を示した。なお、これらは調査対象構造物の、柱の高さ1.5mの位置および張出スラブから採取したφ55mmのコアから測定したものである。

A高架橋は平野部に位置しており、周囲は畑である。高架下はアスファルト舗装されており駐車場となっているが、ほとんど利用されていない。高架橋は、調査時点で建設後24年が経過しているが、高架橋全体の表面に変状はほとんどない。また、海岸からの距離は500m程度であるが、鉄筋位置での塩化物イオン量は 0.61kg/m^3 （柱）、 0.25kg/m^3 （スラブ）であり、塩害の影響は特に受けていないものと考えられる。

B～H高架橋は市街地に位置しており、高架下は、アスファルト舗装されて駐車場として利用されているか、もしくは未舗装で利用されていない。高架橋は、調査時点で建設後28～32年が経過している。B高架橋の張出スラブ下面の一部およびC高架橋の中間スラブ下面に、鉄筋の腐食によると思われるかぶりコンクリートの浮きが認められたが、その他については、表面に目立った変状は認められなかった。B高架橋の鉄筋が腐食している箇所は、張出スラブの水切りとして断面を切り欠いている部分であり、局部的なかぶり不足が鉄筋腐食の原因と考えられる。また、これらの高架橋は海岸から3km以上離れており、BおよびD～H高架橋の塩化物イオン量は $0.19\sim 0.79\text{kg/m}^3$ であり、鋼材が腐食するレベルの塩化物イオン量は含まれていないものと考えられる。C高架橋は、塩化物イオン量が $1.13\sim 2.05\text{kg/m}^3$ 存在するが、前述の中間スラブを除くと、腐食ひび割れ等の変状は認められていない。なお、C高架橋はスラブの深さ100mmの位置での塩化物イオン量が 1.46kg/m^3 であり、建設当初から塩化物イオンが比較的多く含まれていたものと考えられる。

なお、今回調査した高架橋は、いずれも温暖地にあつて凍害等の影響は受けておらず、構造物の立地する環境条件としてはほぼ同一とみなせる。

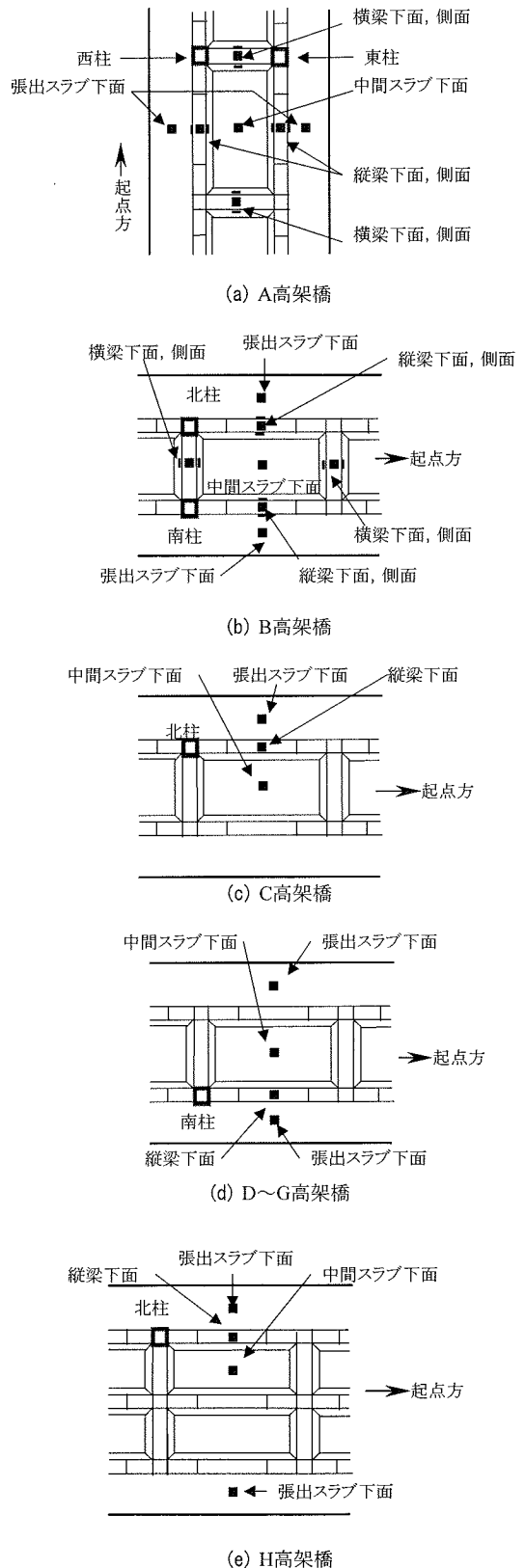
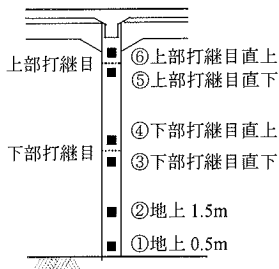
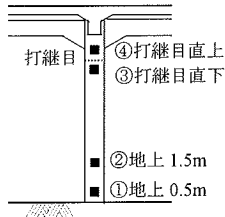


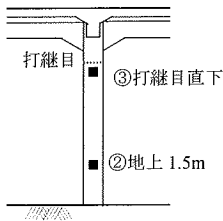
図-2 梁、スラブ測定位置（見下げ図）



(a) A高架橋



(b) B高架橋



(c) C~H高架橋
図-3 柱測定位置

(2) 調査方法

中性化の測定は、200mm×200mm程度の範囲を鉄筋が露出するまではつり出し、ブローアにより清掃した後、フェノールフタレイン1%エタノール溶液を吹き付けて、コンクリート表面から発色点までの距離をノギスにより測定した。測定箇所1箇所あたり8点の測定を行い、その平均値を調査箇所の測定値とした（以下、「はつり法」という）。測定位置の詳細を図-2、3に示す。

測定は、各高架橋の1スパンについて行い、梁、スラブは下面の中央付近で各1箇所を測定を行った。AおよびB高架橋については、梁の側面でも測定を行っている。また、柱は、A高架橋は東側柱、西側柱各1本の合計2本、B高架橋は北側柱、南側柱の2本、CおよびH高架橋は北側柱1本、D~G高架橋は南側柱1本について測定を実施した。A、B高架橋では、柱の各方向4面について、C~H高架橋は、高架橋の

表-2 梁、スラブ中性化深さ測定結果 (mm)

高架橋名	データ数	平均値	最大値	最小値
A	15	11.6	13.7	4.6
B	15	23.7	29.3	18.7
C	3	26.4	26.8	26.3
D	4	26.8	31.8	24.0
E	4	22.1	25.3	20.0
F	4	14.2	16.3	13.0
G	4	25.3	26.4	23.6
H	4	19.2	22.1	17.6

表-3 柱中性化深さ測定結果 (mm)

高架橋名	データ数	平均値	最大値	最小値
A	48	6.8	15.2	2.5
B	32	15.8	24.1	4.4
C	4	26.2	34.4	15.3
D	4	24.9	28.9	20.8
E	4	16.8	24.8	9.6
F	4	19.8	32.4	9.8
G	4	25.0	29.8	19.9
H	4	13.1	17.4	8.1

外側に該当する面と内側に該当する面の2面で測定を行った。測定位置は、コンクリートの打継目の直下と地表面から高さ1.5mの位置とし、AおよびB高架橋についてはこれに加えて打継目直上および地表面から高さ0.5mの位置でも測定を行った。なお、A高架橋は打継目が2箇所、B~H高架橋は打継目が1箇所存在する。

また、柱の中性化深さの分布を調査するため、ドリルを用いて中性化深さを測定する方法¹⁷⁾（以下、「ドリル法」という）も用いた。ドリル法は、ドリルにより直径10mmの孔を穿孔し、排出されるコンクリート粉をフェノールフタレイン1%溶液を染み込ませたろ紙で受け、発色時の穿孔深さをノギスにより測定するものである。測定箇所1箇所あたり3孔穿孔してそれぞれ測定し、その平均値を中性化深さとした。ドリル法の測定は、A高架橋の西柱南面およびB高架橋の北柱北面で地表面から梁直下まで高さ方向に100~500mmごとに行った。

3. 調査結果

(1) 中性化深さ測定結果

表-2、3に、各高架橋の各部材ごとの中性化深さ測定値の平均値、最大値、最小値を示す。測定値は2.5~34.4mmで、各高架橋ごとの平均値では6.8~26.8mmであった。

表-4 鉄筋の腐食度評価基準

腐食度	評価基準
0	施工時の状況を保ち、以後の腐食が認められない
I	部分的に軽微な腐食が認められる
II a	表面の大部分に腐食が認められる
II b	部分的に断面欠損が認められる
III	鉄筋の全周にわたり断面欠損が認められる
IV	鉄筋断面が 1/6 以上欠損している

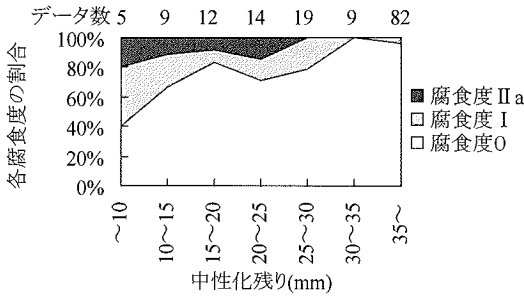


図-4 中性化残り と鉄筋腐食度の比率の関係

(2) 中性化残り と鉄筋腐食度の関係

鉄筋の発錆は、鉄筋表面から中性化領域までの距離（以下、中性化残りという）と深い関係があるとされている。そこで、はつり法による測定箇所において、鉄筋かぶりの測定と鉄筋の腐食度を目視判定し、中性化残り と鉄筋腐食度の関係について検討することにした。なお、鉄筋腐食度の評価は表-4に示す6段階で行った。

図-4に、中性化残り と鉄筋腐食度の比率の関係を示す。なお、塩化物イオン量が比較的多いC高架橋のデータは除いて検討した。図より、中性化残りが少なくなるほど腐食度 I 以上となる鉄筋の比率が大きくなる。今回の調査では、鉄筋位置まで中性化しているものや、腐食度が II b 以上のものはなかったが、中性化残りが10mm以下となると腐食度 I 以上が半数を占める結果となった。

土木学会コンクリート標準示方書では、鋼材腐食発生限界の中性化残りは10mmとされている。これは、既往の実構造物調査等より中性化残り10mm以上では腐食しても構造物の機能を損なうような重大な腐食を生じた例が極めて少ないためである。本調査においては、中性化残り10mm以上の場合には腐食を生じていた鉄筋は半数以下であり、また、断面欠損が認められるような腐食は生じておらず、土木学会コンクリート標準示方書の限界値を用いて安全側に評価できる結果となった。

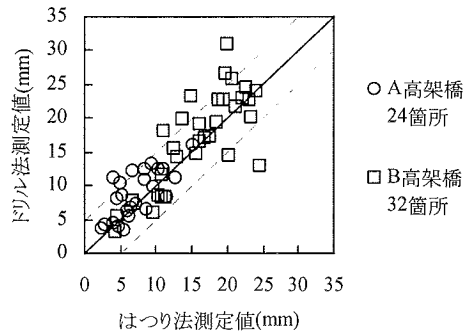


図-5 はつり法とドリル法の測定値の比較

(3) 中性化深さ測定方法の検証

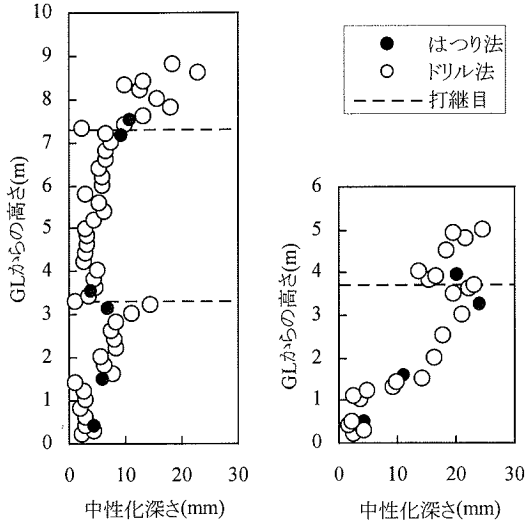
本調査では、はつり法とドリル法の2つの測定方法を用いたため、両者の測定結果の差異について検証した。A高架橋の西柱およびB高架橋の北柱、南柱において、はつり法による中性化深さ測定箇所の近傍でドリル法による測定を行った。それぞれの測定結果の関係を図-5に示す。ドリル法による測定値は、はつり法による測定値とほぼ一致し、概ね5mm程度の誤差におさまることがわかる。

4. 中性化速度に影響する要因の検討

(1) 柱における高さの影響

AおよびB高架橋の柱における、ドリル法とはつり法により測定した中性化の高さ方向分布を図-6に示す。A高架橋西柱南面は直射日光があたり、B高架橋北柱北面は直射日光があたらないが、いずれもコンクリートの打継目直下で中性化深さが大きくなり、下方に向かって小さくなる傾向を示している。また、スラブ直下の雨が掛からない位置では中性化深さが比較的大きい。

分布形状がこのようになる原因としては、打継目直下ではブリーディングの影響により中性化速度が速くなること、コンクリート打込み時に下方のコンクリートは自重により締め固められるため密実なコンクリートとなることが考えられる。また、柱の上部はスラブの存在により雨が掛からず乾燥状態となること、逆に地表面付近では雨が掛かるうえに地表面から供給される湿気により湿潤状態となっていることも影響していると考えられる。したがって、コンクリートの品質と環境条件の両者が影響して図-6のような分布となっているものと考えられる。



(a) A高架橋西柱南面 (b) B高架橋北柱北面

図-6 柱の中性化の高さ方向分布

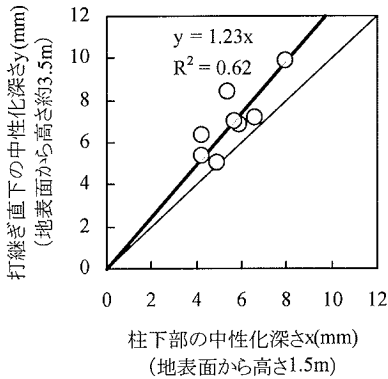


図-7 柱高さによる中性化深さの比較 (A高架橋)

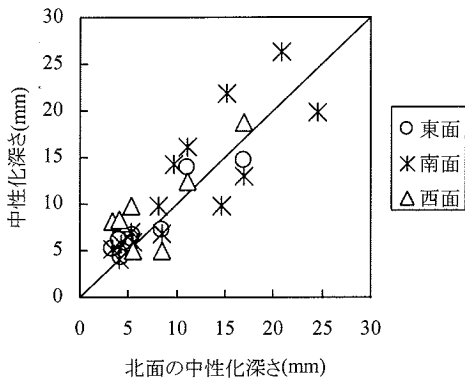


図-8 柱の方位による中性化深さの比較

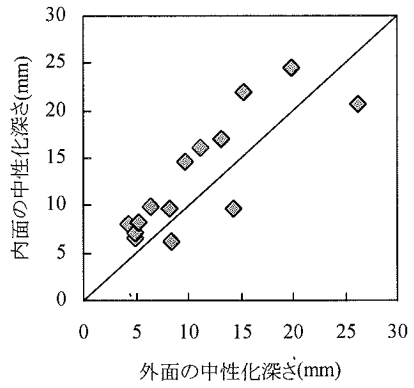


図-9 柱の外側と内側の中性化深さの比較

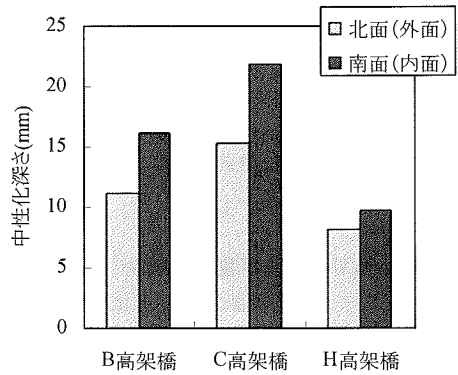


図-10 雨がかりの違いによる中性化深さの比較 (北柱)

このうち、コンクリートの品質の影響について、A高架橋の調査データをもとに検討を行った。A高架橋は柱高さが比較的高く、下方の打継目はスラブの下方約6mに位置している。このため、これより下方のコンクリートは、スラブによる雨除けの効果はほとんどなく、高さ方向による環境条件の差は少ないものと思われる。そこで、この部分の打継目直下(図-3(a)の③の位置)の中性化深さと、下方の位置(図-3(a)の②の位置)における中性化深さの差異は、コンクリート打込み時の上下位置の影響が支配的と考えられる。下方の位置を、地表面からの影響の比較的少ない高さ1.5mの位置として、東西2本の柱各4面の高さによる中性化深さの比較を図-7に示した。図より、この部分においては、下方の位置よりも打継目直下のほうが中性化深さはおおよそ1.23倍であることがわかる。

(2) 柱面の方向による影響

建物では、雨水がかかる場合、日照条件による乾湿の差から、方位によって中性化速度が異なるとい

う報告がある⁸⁾。そこで、本調査対象構造物の柱で、雨水がかかり、かつ方位により日照の影響に差が生じると考えられる測定箇所（A高架橋の柱：高さ1.5mおよび下部の打継目直下と直上、B～H高架橋の柱：高さ1.5m）について、方位と中性化深さの関係を検討することにした。

図-8に、北面の中性化深さと同じ位置の他の面の中性化深さの関係を示す。南面と北面の中性化深さを比較すると、14箇所中10箇所です南面の方が中性化深さが大きい結果となり、概ね建物の調査と同様の傾向が認められる。北面の中性化深さに対する南面の中性化深さの比率は平均1.16であった。しかし、北面の方が中性化深さが大きくなる場合も少なからず存在し、柱の向きの方位による明確な傾向が認められるとは言い難い。これは、大きな壁により構成される建物と異なり、ビームスラブ式ラーメン高架橋はスレンダーな柱で構成されているため、方位による環境条件の差が必ずしも明確に表れないものと考えられる。

なお、南面よりも北面の方が中性化深さが大きい4箇所のうち、3箇所は南柱であった。南柱の北面は、高架橋内側に面しており、雨水がかからず常に乾燥状態が保たれる部位である。したがって、北面の方が中性化深さが大きくなる理由として、日照条件以外に雨がかりが影響している可能性がある。

そこで、高架橋内面と外面の中性化深さを比較したところ、図-9に示すとおり、14箇所中11箇所です内面の方が大きい結果となった。外面の中性化深さに対する内面の中性化深さの比率は平均1.29であった。外面の方が中性化深さの大きい3箇所の内訳は、南柱の南面2箇所、西柱の西面1箇所であり、いずれも日当たりの良い条件であった。したがって、中性化速度に影響する要因としては、日照条件と雨がかりの両方が複合しているものと考えられる。

ところで、日当たりの悪い北柱では、外面（北面）と内面（南面）の中性化速度の差は、雨がかりの違いのみによって生じるものと考えられる。今回の調査で該当するB、C、H高架橋北柱の北面と南面の中性化深さの比較を図-10に示した。いずれも、南面の方が中性化深さが大きく、その比率は平均で1.36倍であった。

一方、対象構造物では柱の測定面によって必ず雨がかりの差が生じるため、日照条件のみによる影響を定量的に把握することは困難であった。

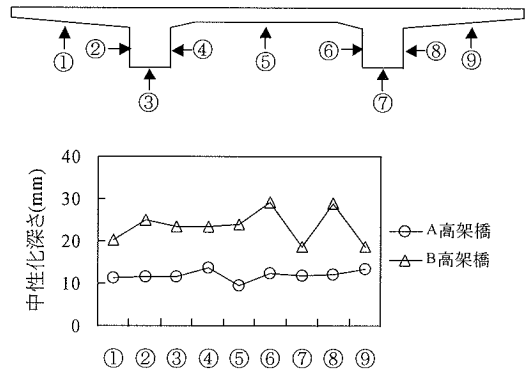
以上より、ビームスラブ式ラーメン高架橋の柱においては、雨がかりの少ない部位よりも多い部位の方が中性化速度が小さく、これに、さらに日照条件の影響が加わり中性化速度の差が生じるものと考え

られる。

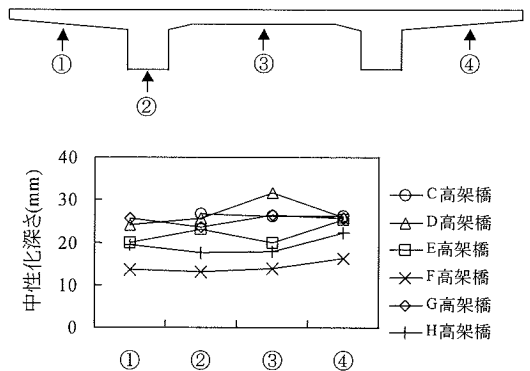
なお、柱の同じ高さでの中性化深さの測定値の最大値と最小値の比は、平均1.59であった。したがって、ビームスラブ式ラーメン高架橋の柱における、乾燥の程度による影響としては、日照条件と雨がかりの影響を含めて、同一柱において測定面によって最大1.59倍程度の差が生じると考えておけばよいものと思われる。

(3) 梁、スラブの部位による影響

図-11に、各高架橋における梁の下面および側面、中間スラブ下面、張出スラブ下面の中性化深さを示す。B高架橋の縦梁にややばらつきが見られるものの、部位の違いによって中性化深さに差が生じている傾向は見られない。



(a) A, B 高架橋



(b) C～H 高架橋

図-11 梁、スラブの中性化深さ

梁およびスラブは、張出スラブの先端には水切りが設けられており、雨が降ったり伝ったりすることがないため、いずれも乾燥状態にある部位である。また、柱のような高さ方向の違いもないため、部位による差が生じることは少ないと考えられる。

なお、スラブ上面については、今回の調査では各高架橋1~3箇所の合計11箇所ではつり調査を実施した。中性化深さは、1.0~11.6mm、平均6.4mmと比較的小さい結果となっていたが、これは、雨が直接かかるための影響と考えられる。一方、スラブの上面には、排水勾配コンクリートが設置されるのが一般的で、通常、設計かぶりよりもはるかに大きいかぶりとなる。調査対象高架橋においても、小さいものでも100mm程度のかぶりがあった。このため、梁、スラブの上面においては、中性化に関する耐久性上の問題が生じることは少ないものと考えられる。

5. 耐久照査法の適用に関する検討

(1) 中性化深さの設計値の算定

はつり法による中性化深さの測定値と、中性化深さの設計値の比較を行った。ここで、中性化深さの設計値 y_d は、文献1)に示される式(2)により算出した。

$$y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

ここに、 y_d : 中性化深さの設計値 (mm)。

γ_{cb} : 中性化深さの設計値 y_d のばらつきを考慮した安全係数。一般に1.15としてよい。(本検討では1.0とする)

α_d : 中性化速度係数の設計値 (mm/√年)。
 $= \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c$

α_k : 中性化速度係数の特性値 (mm/√年)。
 ここでは、式(3)により算定した¹⁾。

$$\alpha_k = 1.1 \times (-3.57 + 9.0W/C) \quad (3)$$

W/C: 水セメント比。

β_e : 環境作用の程度を表す係数。一般に、乾燥しがたい環境、北向きの面などでは1.0、乾燥しやすい環境、南向きの面などでは1.6としてよい。

γ_c : コンクリートの材料係数。一般に1.0としてよい。ただし、上面の部位に関しては、1.3とするのがよい。

t : 中性化に対する耐用年数 (年)。

ここで、環境の程度を表す係数 β_e およびコンク

リートの材料係数 γ_c は、対象とする部位やその環境によって数値を使い分けようになっている。例示されている数値は、既往の研究等に基づいているものと思われるが、鉄道RCラーメン高架橋に適用する場合に、どのような使い分けをするのが適切であるのか明確になっていない。また、数値についても、このような構造形式に適用する場合の妥当性は明らかになっていない。そこで、本調査で得られたデータをもとに、中性化深さの検証を行うこととした。本検討は式(2)の妥当性を検証することを目的としており、安全係数 γ_{cb} は1.0とした。

なお、水セメント比W/Cの正確な値は、建設当時の施工記録等が残っていないため不明である。そこで、本検討では、調査対象高架橋が建設された当時に、鉄道ラーメン高架橋に一般的に用いられていた値を考慮し、58%として計算した。

(2) 柱

a) コンクリートの材料係数

柱の上部は、コンクリートの打ち込みに伴いブリーディングによる品質の低下が生じやすい部位と考えられる。これに対し、柱の下部は、コンクリートの自重により締め固められるため、適切に施工されていれば、コンクリートの品質は確保されるものと考えられる。測定結果からも、柱上部は下部に比べて中性化深さが1.23倍となっていた。

一方、土木学会コンクリート標準示方書では、上面の部位に関してコンクリートの材料係数 γ_c を1.3とすることが示されている。

そこで、ここでは、測定結果よりもやや大きい値ではあるが、コンクリートの材料係数 γ_c として、コンクリート打込み時に上方の部位となる打継目直下では1.3を、それ以外の部位では1.0を用いることとした。

b) 環境作用の程度を表す係数

環境作用の程度は、前述のとおり、日照条件と雨がかりの影響を受けるものと考えられる。日当たりが悪く、雨がかりのある、北柱の北面で最も中性化速度が小さくなるものと考えられ、それ以外の部位ではこれよりも中性化速度が大きくなるものと考えられる。また、柱の方位よりも、雨がかりの有無の影響を大きく受けている傾向が見られた。一方、調査結果から、同じ柱の異なる面で中性化速度に1.59倍の差が生じていた。

そこで、環境作用の程度を表す係数 β_e としては、雨がかりが多く、中性化速度が比較的小さいと考えられる、柱下部の外面上において1.0を、その他の部位においては1.6を用いることとした。なお、A高架

橋については、比較的幅員が狭く高さが高くなっており、張出スラブの長さも小さいことから、柱の部位による雨がかりの差が小さいと考え、 β_e は全て1.0とした。

c) 中性化深さの測定値と設計値の比較

柱における中性化深さの測定値と設計値との関係を図-12~14に示す。これによると、ごく一部の場合を除いて、設計値と測定値の誤差が概ね10mm程度におさまる結果となった。

図-13は、高架橋Bの柱の各部位における中性化深さの測定値と設計値の比較を示したものである。柱の部位による傾向は特に見られず、各部位による中性化深さの差の傾向をよくとらえており、環境条件の影響を概ね把握できる結果となった。

なお、図-14で、測定値が設計値よりも10mm以上大きい箇所が4箇所あるが、このうち2箇所はC高架橋である。C高架橋の柱から採取したコンクリートの圧縮強度は 20.1N/mm^2 と他の高架橋に比べて低く、実際の水セメント比が仮定した58%よりも高かったことが考えられる。このため、C高架橋の柱については、測定値が設計値よりも大きくなる傾向があるものと考えられる。

(3) 梁、スラブ

梁下面および側面、ならびにスラブ下面は、コンクリート打込み時に、ブリーディングによる品質の低下が生じにくい部位であるため、コンクリートの材料係数 γ_c は1.0とすることとした。また、雨水が直接かからず、張出スラブ先端に水切りがあるため、雨水が流れてくることもないため、乾燥しやすい環境にある。したがって、環境作用の程度を表す係数 β_e は1.6を用いることとした。

梁およびスラブの中性化深さの測定値と設計値の差の度数分布を図-15に示す。53箇所データに対し、中性化深さの測定値-設計値の値は-9.7~15.8mmで、平均3.9mmであった。53箇所中50箇所で中性化深さの測定値と設計値の差が10mm以内となり、ほぼ、10mm以内の誤差におさまる結果となった。

測定値と設計値の差が10mmを超えたのは、B高架橋2箇所とD高架橋1箇所であり、その差はそれぞれ12.5mm、12.8mmと15.8mmであった。表-2に示したとおり、これらの高架橋では、中性化深さの測定値の最大値と最小値の差が比較的大きくなっており、ばらつきがみられる。しかし、測定データの多いB高架橋では、測定値と設計値の差の平均は7.2mmであり、個々の高架橋内の平均値としては概ね10mm程度の差におさまる結果となった。

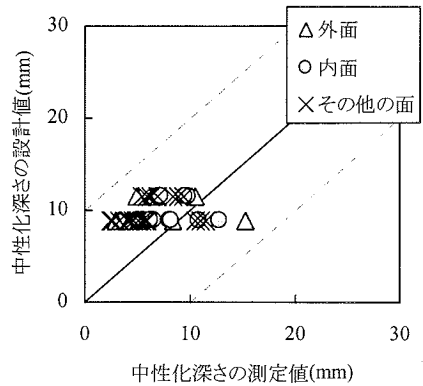


図-12 中性化深さの測定値と設計値との比較 (A高架橋：柱)

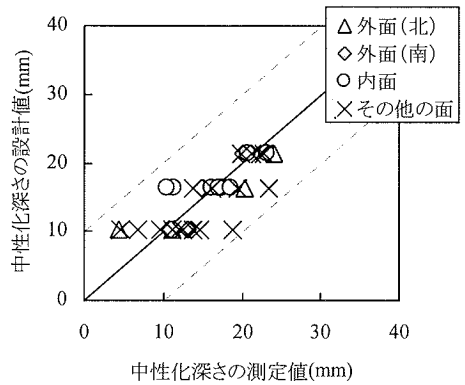


図-13 中性化深さの測定値と設計値との比較 (B高架橋：柱)

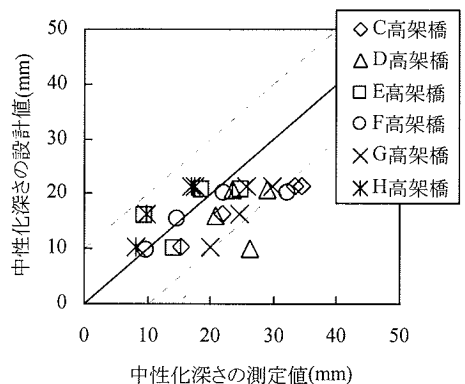


図-14 中性化深さの測定値と設計値との比較 (C~H高架橋：柱)

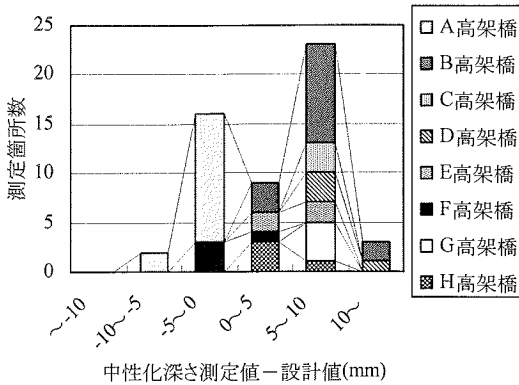


図-15 中性化深さの測定値と設計値との比較
(梁, スラブ)

6. 結論

本研究では、中性化に関する照査を行うにあたっての、環境条件等の要因の具体的な考慮方法の検討を行うために、中性化の進行した鉄道ビームスラブ式RCラーメン高架橋の調査を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 柱の中性化深さはコンクリートの打継目直下で大きくなり、下方に向かって小さくなる傾向が見られた。これは、打継目直下でのブリーディングによる品質の低下、下方コンクリートの自重による締固め作用等が影響しているものと考えられる。また、この影響による中性化速度の差は1.23倍であった。
- (2) 柱は、雨がかりや日照条件の違いによって、中性化速度が異なる傾向が見られた。これは、おもに乾湿の状況に差異が生ずることが影響しているものと考えられる。なお、雨がかりのみの違いによる中性化速度の差は1.36倍であり、同一柱の測定面の向きによる最小値と最大値の差は1.59倍であった。
- (3) 梁、スラブの下面および側面は、部位による中性化速度の差が少ない。これは、部位による乾湿の状況およびコンクリートの品質の差が小さいためと考えられる。
- (4) 土木学会コンクリート標準示方書に基づき、中性化深さの設計値の算定方法を、ビームスラブ式ラーメン高架橋に適用する場合の取り扱いについて検討を行った。その結果、次のように各係数を設定することにより、安全係数 γ_{cb} を1.0とした場合に概ね10mm程度の誤差で中性化

深さを推定できることが明らかになった。

- a) 柱において、ブリーディングの影響による品質低下が考えられる打継目直下では、コンクリートの材料係数 γ_c を1.3とする。その他の部位においては、 γ_c を1.0とする。
- b) 柱において、雨がかりが多く中性化速度が比較的小さいと考えられる柱下部の外側面において環境作用の程度を表す係数 β_e を1.0とする。その他の部位においては1.6とする。
- c) 梁、スラブの下面および側面において、ブリーディングの影響による品質低下が少ないと考えられることから、コンクリートの材料係数 γ_c を1.0とする。また、雨がかりが少なく、水切りが機能して雨が流れてこない場合は乾燥しやすいと考えられるので、環境作用の程度を表す係数 β_e を1.6とする。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編 [2002年制定]，2002。
- 2) 和泉意登志，喜多達夫，前田照信：中性化，コンクリート構造物の耐久性シリーズ，岸谷孝一，西澤紀昭他編，技報堂出版，1986。
- 3) 土木学会：フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期的研究（最終報告），コンクリートライブラリーNo.64，1988。
- 4) 石橋忠良，北後征雄：鉄筋コンクリート床版下面に施工した各種補修工法の効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9, No.1, pp.429-434, 1987。
- 5) 谷内田昌熙，石橋忠良，佐藤勉：鉄筋コンクリート橋梁のひびわれと鉄筋腐食に関する調査研究，土木学会論文集，第378号/V-6, pp.195-202, 1987。
- 6) 今井富士夫，中澤隆雄，赤木正見，枝元宏彰：鉄筋コンクリート橋の部位の違いによる材料劣化に関する考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15, No.1, pp.841-846, 1993。
- 7) 枝元宏彰，中澤隆雄，今井富士夫，新西成男：既設鉄筋コンクリート橋における中性化進行と塩分侵入，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.2, pp.985-990, 1998。
- 8) 池田美和，嵩英雄，和泉意登志，浅井達也，押田文雄，川畑茂男：既存RC構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋腐食について（その2）コンクリートの中性化に及ぼす各種要因とその効果，日本建築学会学術講演梗概集（北陸），pp203-204, 1983
- 9) 鄭載東，平井和喜，三橋博三：モルタルの中性化速度

- に及ぼす温度・湿度の影響に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, 第1巻第1号, pp.95-94, 1990.1.
- 10) 魚本健人, 高田良章: コンクリートの中性化速度に及ぼす要因, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp.119-128, 1992.
- 11) 白川敏夫, 島添洋治, 麻生実: コンクリートの中性化と湿度の関係に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.723-728, 1996.
- 12) 佐伯竜彦, 大賀宏行, 長滝重義: コンクリートの中性化の機構, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.563-568, 1989.
- 13) 佐伯竜彦, 長滝重義, 大賀宏行, 高見浩之: 降雨による水分の供給を受けるコンクリートの中性化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.609-614, 1991.
- 14) 佐伯竜彦, 大賀宏行, 長滝重義: コンクリートの中性化の機構解明と進行予測, 土木学会論文集, 第414号/V-12, pp.99-108, 1990.
- 15) 石橋忠良, 古谷時春, 浜崎直行, 鈴木博人: 高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp.125-134, 2002.
- 16) 日本コンクリート工学協会: JCI-SC4 硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法, コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案), 1987.
- 17) 笠井芳夫, 湯浅昇: コンクリートの中性化とその簡易な試験方法の提案, 非破壊検査, Vol.47, No.9, 1998.

(2003. 6. 16 受付)

DURABILITY EVALUATION METHOD OF CARBONATION FOR RAILWAY RC RIGID FRAME VIADUCTS

Yukihiro TANIMURA, Masashi HASEGAWA, Masamichi SOGABE
and Tsutomu SATO

It is necessary to understand the influence of environmental conditions quantitatively to apply evaluation methods for durability of carbonation to existing structure because carbonation rate varies by environmental conditions. In this research, it is shown that carbonation rate varies by height in columns, the sunshiny and rain condition, based on investigations of railway RC rigid frame viaducts after tens of years from completion. Then, it is clarified to be able to presume carbonation depth within about 10mm in the error margin when the evaluation method that JSCE adopts is used.