論文　48 年経過したコンクリートの中性化と同コンクリートを用いた促進中性化

桐山　和也[*1]・渡邉　義規[*2]・星野　実[*3]・梅原　秀哲[*4]

要旨：促進中性化試験は，耐久性の重要な指標のひとつである中性化を評価する上で極めて重要な役割を担っている。この促進中性化試験により中性化に対する抵抗性を相対的に評価することは可能であるが，自然状態の何倍の促進が行われているかについて検討された事例は少ない。本研究では建設後 48 年経過した鉄筋コンクリート橋脚取壊しの際，同橋脚よりコア試料を採取して促進中性化試験を行い，実橋での中性化深さの測定結果と対比した。その結果，温度 20℃，湿度 60%，CO_2 濃度 5%の条件で促進中性化試験を行った場合，橋梁桁下における屋外自然暴露の約 35 倍の促進になった。

キーワード：促進中性化試験，屋外暴露，中性化深さ，中性化速度係数

1. はじめに

コンクリート構造物の中性化とは，大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し炭酸化反応を起こすことによって細孔溶液の pH が低下する現象である。これにより，コンクリート内部の鋼材に腐食の危険性が生じる。通常の自然環境下では，コンクリートの中性化は徐々にしか進行しない。

一方，促進中性化試験は，中性化を短期間で生じさせる方法であり，一般には高濃度の炭酸ガス槽内にてコンクリート供試体を中性化させる方法で行う。この促進中性化試験を行うことにより，どのような材料や配合が中性化に対する抵抗性に優れているかを相対的に評価することは可能である。しかし，課題として促進中性化試験は炭酸ガスの拡散を促進することはできるが，水和の影響や水分供給の影響についての再現はできない[1),2)]。また，促進中性化試験によって行われる中性化の促進が，自然状態の何倍の促進となるかについて記述した研究は少ない[1)]。さらに，促進中性化試験における 26 週の促進期間が，自然状態の何年に相当するかの記述も少ない。

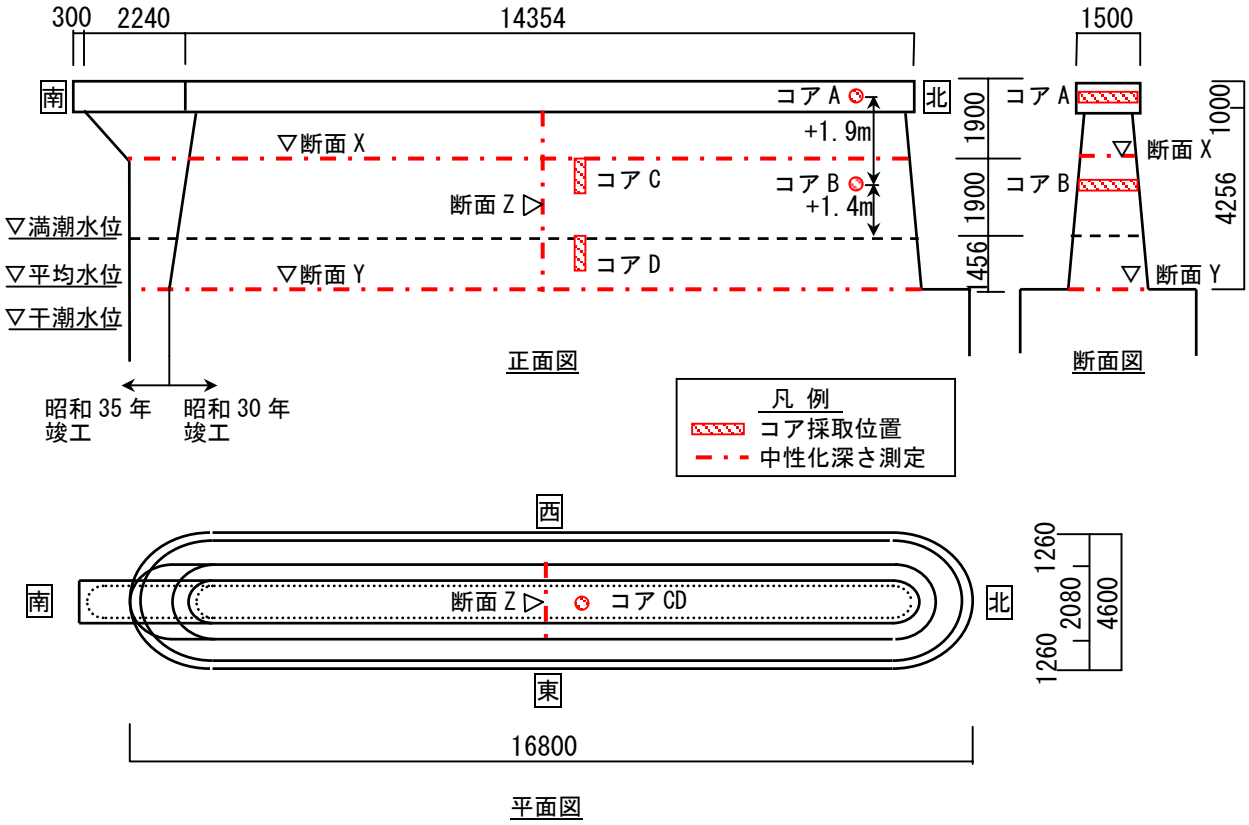
本研究では，長期暴露試験結果と促進中性化試験との対応を検討する一つの方法として，建設後 48 年経過した鉄筋コンクリート橋脚撤去時にコア試料を採取して促進中性化試験を行い，実橋での中性化深さの測定結果と対比した。なお，水和反応が進行中の段階で試験を開始する一般的な促進試験と，長期間に渡って組織が形成された実構造物より抜き取ったコアによる促進試験を単純に比較することはできないと考えられるが，この点については今後検討を加えていく予定である。

2. 実験概要

調査を行った構造物は，昭和 30 年に竣工した河川内の橋脚である。調査は橋脚 2 基について行った。橋脚はワイヤーソーにより切断の上，撤去された。

現地での調査項目は，橋脚切断面での中性化深さの調査（フェノールフタレイン法[3)]），鉄筋

*1 矢作建設工業（株）　土木技術部調査課　(正会員)
*2 矢作建設工業（株）　土木技術部調査課　工修
*3 竹本油脂（株）　第三事業部研究開発部コンクリート材料研究所　主任研究員　(正会員)
*4 名古屋工業大学大学院教授　工学研究科つくり領域都市循環システム工学専攻　Ph.D　(正会員)



図－１　調査橋脚の形状と調査位置の概略図（P1・P2 共通）

表－１調査項目と数量

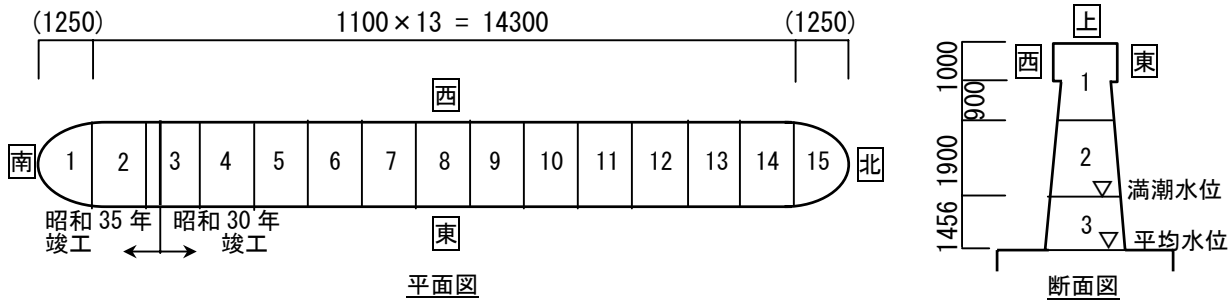
橋脚 P1 の調査概要	
種別（図－１）	試験項目と数量
断面 X	中性化深さの測定（100mm 間隔で測定，306 点），鉄筋かぶりの測定
断面 Y	中性化深さの測定（100mm 間隔で測定，40 点）
コア A（直径 150mm）	促進中性化試験（2 体），配合推定（1 試料）
コア B（直径 150mm）	促進中性化試験（2 体），配合推定（1 試料）
コア C（直径 100mm）	圧縮強度・静弾性係数試験（3 本）
橋脚 P2 の調査概要	
種別（図－１）	試験項目と数量
断面 X	中性化深さの測定（100mm 間隔で測定，147 点）
断面 Z	中性化深さの測定（100mm 間隔で測定，86 点），鉄筋かぶりの測定
コア C（直径 100mm）	促進中性化試験（1 体），配合推定（1 試料），圧縮強度・静弾性係数（3 本）
コア D（直径 100mm）	促進中性化試験（1 体），配合推定（1 試料），圧縮強度・静弾性係数（3 本）

のかぶり調査（切断面で実測）である。試験室では採取コアによる圧縮強度試験，静弾性係数試験，配合推定（セメント協会法 [4]），促進中性化試験（JIS A 1153，促進条件は温度 20±2℃，湿度 60±5%，CO_2 濃度 5±0.2%）を行った。なお，配合分析では骨材の密度を 2650kg/m^3，セメントの密度を 3150kg/m^3 とした。

調査を行った橋脚の形状と調査位置を**図－１**に示す。調査を行った２橋脚の形状寸法は同一である。橋脚 P1 と P2 の調査項目と数量を**表－１**に示す。

中性化深さの実測は，橋脚 P1 では断面 X と断面 Y で行った。橋脚 P2 では断面 X と断面 Z で行った。

促進中性化試験用の供試体は，全く中性化していない位置から採取した。橋脚 P1 では水平方



図－２　中性化深さ調査ブロック割付図（P1・P2 共通）

表－２　中性化深さの測定結果

橋脚 P1 の断面 X の調査結果（単位：mm）															
測点	西 1	西 2	西 3	西 4	西 5	西 6	西 7	西 8	西 9	西 10	西 11	西 12	西 13	西 14	西 15
平均	1.8	3.5	20.8	47.4	57.5	38.9	33.9	33.7	31.4	30.9	21.0	23.0	16.5	13.8	1.2
最大	4	6	26	70	65	48	53	42	34	36	26	29	23	26	3
最小	0	2	17	25	48	30	28	25	25	22	14	15	8	7	0
測点	東 1	東 2	東 3	東 4	東 5	東 6	東 7	東 8	東 9	東 10	東 11	東 12	東 13	東 14	東 15
平均	2.2	5.1	24.3	37.1	36.4	15.0	18.7	24.9	28.8	31.7	27.7	23.2	21.7	12.4	1.5
最大	4	10	42	50	43	20	24	29	37	40	31	28	31	22	5
最小	0	2	10	20	22	10	13	19	21	22	23	17	11	1	0
備考	西側平均　30.7mm　，　東側平均　25.1mm　，　平均値　28mm　（ただし，1,2,15 を除く※1）														
橋脚 P2 の断面 X の調査結果（単位：mm）															
測点	西 1	西 2	西 3	西 4	西 5	西 6	西 7	西 8	西 9	西 10	西 11	西 12	西 13	西 14	西 15
平均	－	－	11.0	10.6	28.1	－	25.8	29.2	－	－	－	－	23.8	18.8	22.9
最大	－	－	25	17	32	－	33	35	－	－	－	－	27	35	32
最小	－	－	3	7	21	－	18	22	－	－	－	－	14	11	2
測点	東 1	東 2	東 3	東 4	東 5	東 6	東 7	東 8	東 9	東 10	東 11	東 12	東 13	東 14	東 15
平均	－	－	14.1	19.6	－	－	－	32.0	－	－	－	－	26.0	19.7	24.4
最大	－	－	27	28	－	－	－	42	－	－	－	－	46	30	32
最小	－	－	3	9	－	－	－	26	－	－	－	－	15	10	13
備考	西側平均　21.0mm　，　東側平均　22.3mm　，　平均値　22mm　（ただし，15 を除く）														

橋脚 P1 の断面 Y の調査結果（単位：mm）※2				
測点	西 7	東 7	西 12	東 12
平均	0.8	1.1	1.1	0.9
最大	5	4	3	4
最小	0	0	0	0
備考	平均値　1mm			

橋脚 P2 の断面 Z の調査結果（単位：mm）							
測点	上 1	西 1	東 1	西 2	東 2	西 3	東 3
平均	12.4	22.8	15.2	－	－	1.9	1.5
最大	25	70	45	－	－	6	4
最小	5	5	0	－	－	0	0
備考	ブロック 1 平均　19mm　，　ブロック 3 平均　2mm						

※１：竣工年の違うブロックは除外した。また，端部は排水管の直下のため除外した。
※２：全ブロックとも中性化深さは同程度であったため，他のブロックの結果は割愛する。

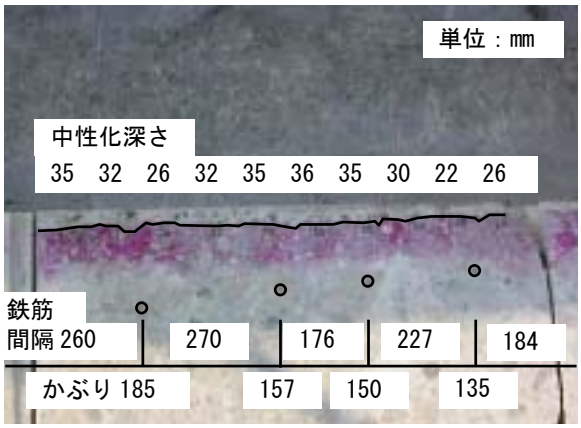
向に径 150mm のコア A とコア B を採取した後，コンクリートカッターを用いてコアの円周曲面部分と表面から 200mm の部分を切断した後の中心部分を用い，縦 100mm 横 100mm 長さ 300mm の角柱供試体を作製した。橋脚 P2 では橋脚中心部の鉛直方向に径 100mm のコア C とコア D を採取した後，長さ 500mm に切断して促進中性化試験用の供試体とした。なお，角柱供試体は JIS に従って 2 面をエポキシ樹脂でコーティングし，残った 2 面を中性化させた。一方，円柱供試体は，全表面から中性化させた。

3. 実験結果

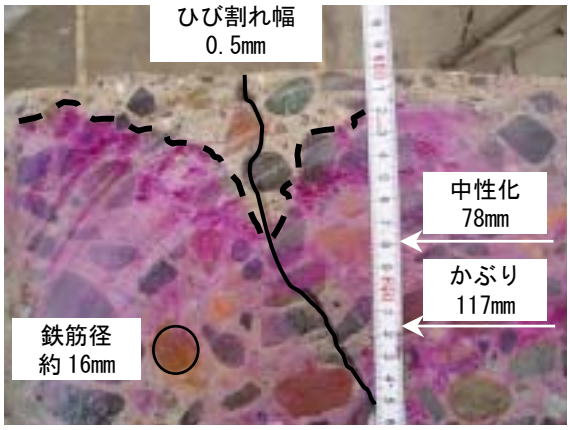
3.1 現地調査結果

橋脚断面での中性化深さの測定は，切断されたブロックごとに行った。調査割付図を**図－２**に示す。橋脚切断面での中性化深さの測定結果を**表－２**に示す。

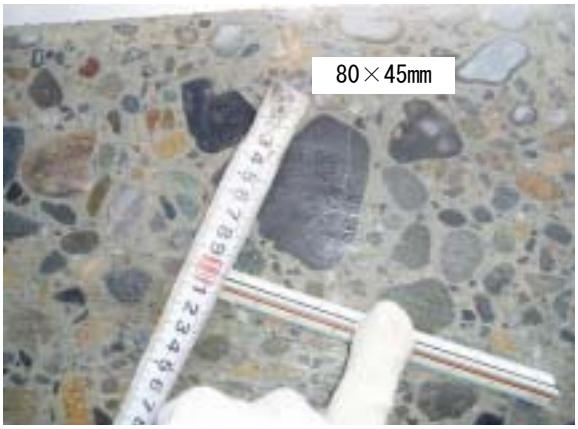
表－２より，中性化深さの平均値は橋脚 P1 の断面 X で 28mm，断面 Y で約 1mm となり，断面 X と断面 Y で明確な差異が認められた。これは，断面 Y が平均水位の位置にあり，常に水分の供給を受けていたためであると考えられる。また，



写真－１　橋脚 P1 西 10 の測定状況



写真－２　ひび割れ箇所の中性化（P2）



写真－３　コンクリートの状況（P2）

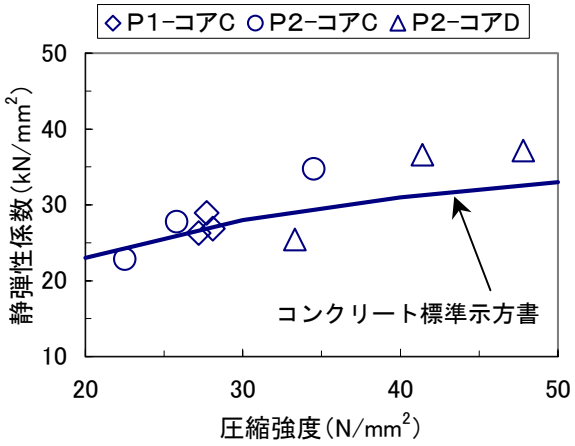
橋脚 P2 の断面 Z のブロック 1 とブロック 3 についても，干満の影響を受けるブロック 3 が小さい中性化深さを示した。一方，方位の影響について，明確な傾向は確認できなかった。

鉄筋の調査結果より，使用されていた鉄筋の径は，主鉄筋が 16mm，配力鉄筋が 13mm であった。断面 X の主鉄筋のかぶりは平均 130mm（範囲 90～185mm），間隔は平均 250mm（範囲 150～445 mm）であった。断面 Z の配力鉄筋のかぶりは平均 100mm（範囲 60～140mm），間隔は平均 290mm（範囲 240～320mm）であった。

調査状況の一例を**写真－１**，**写真－２**，**写真－３**に示す。**写真－２**より，ひび割れ部分では，ひび割れに沿って中性化が進行していた。**写真－３**より，粗骨材はチャートの川砂利が大半を占めていた。また，２橋脚とも 100mm 程度の比較的大きい骨材が散在していた。

表－３　圧縮強度と静弾性係数の試験結果

項　目	調査部位	試験結果	
		範　囲	平均
圧縮強度 (N/mm²)	P1-コア C	27.2・27.7・28.1	27.7
	P2-コア C	22.5・25.8・34.5	27.6
	P2-コア D	33.3・41.4・47.8	40.8
静弾性係数 (kN/mm²)	P1-コア C	26.30・28.95・26.87	27.37
	P2-コア C	22.85・27.80・34.74	28.46
	P2-コア D	25.45・36.60・37.15	33.07



図－３　圧縮強度と静弾性係数の関係

3.2 圧縮強度と静弾性係数

圧縮用のコアは，各部位とも 3 本採取した。圧縮強度と静弾性係数の試験結果を**表－３**に，圧縮強度と静弾性係数の関係を**図－３**に示す。

表－３より，圧縮強度は 22.5～47.8N/mm^2，静弾性係数は 2.29×10^4～3.72×10^4N/mm^2 の範囲であった。また，**図－３**より，今回調査した構造物に用いられたコンクリートの力学的特性に問題はなく，48 年経過した後においてもコンクリートとして十分な性能を有していた。

3.3 配合推定

配合推定の結果を**表－４**に示す。なお，単位水量は空気量を 5%と仮定して計算した値である。**表－４**より，単位セメント量は 181～243kg/m^3，単位水量は 90～153kg/m^3 の範囲であった。また，橋脚 P1 と P2 の単位セメント量に 50kg/m^3 程度の差がみられた。

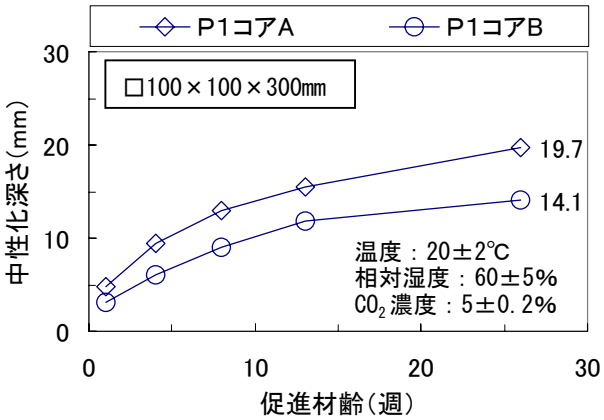
3.4 促進中性化試験

橋脚 P1 から採取したコア A と B の促進中性化試験結果を**図－４**に示す。橋脚 P2 から採取したコア C と D の促進中性化試験結果を**図－５**に示す。促進材齢 26 週における中性化深さは，橋脚 P1 のコア A で約 20mm（範囲 13～25mm），コア B で約 14mm（範囲 10～20mm）となり，配合推定による水セメント比の小さいコアの中性化深さが小さく現われた。また，橋脚 P2 のコア C で 27mm（範囲 24～31mm），コア D で 19mm（範囲 17～22mm）となり，圧縮強度の大きいコアが小さい中性化深さを示した。これは，コンクリートの組織が緻密なほど炭酸ガスがコンクリート中に拡散しにくくなり，中性化の進行速度が小さくなるためである[5]と考えられる。

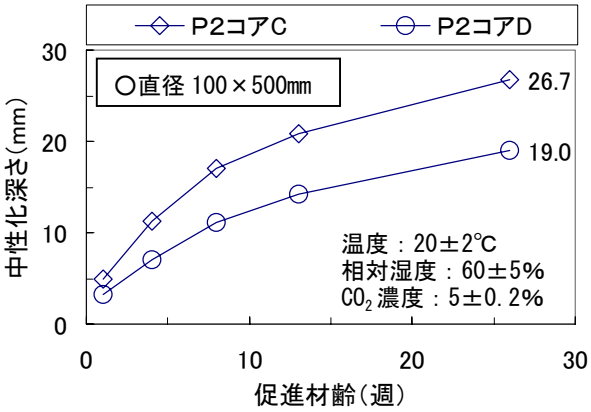
促進中性化試験と現地調査結果より中性化速度係数を算定したものを**表－５**に示す。表より角柱供試体（断面 100×100mm）である橋脚 P1 の中性化速度係数が 3.32mm/week$^{1/2}$，円柱供試体（断面直径 100mm）である橋脚 P2 の係数が 4.49mm/week$^{1/2}$ となり，円柱供試体である橋脚 P2 が角柱供試体である橋脚 P1 より大きい値を示した。一方，現地実測結果の平均値より，中性化速度係数を断面 X について算定すると，橋脚 P1 が 4.04mm/year$^{1/2}$（48 年で中性化深さ 28mm），橋脚 P2 が 3.18mm/year$^{1/2}$（48 年で中性化深さ 22mm）となり，橋脚 P1 が橋脚 P2 より大きい値を示していた。円柱供試体が角柱供試体より大きい中性化速度係数を示した一つの要因として，円柱供試体の方が乾燥しやすく，かつ炭酸ガスが中心に向かって進行する[6]点があげられる。すなわち，中性化の進行は，水分の蒸発速度と密接に関係している[7]ためである。

表－４　配合推定結果

調査部位	推定単位量(kg/m^3)			W/C
	骨材 A	セメント C	水 W	(%)
P1-コア A	1908	243	153	63.0
P1-コア B	1964	232	135	58.2
P2-コア C	2080	182	107	58.8
P2-コア D	2126	181	90	49.7



図－４　促進材齢と中性化深さの関係（橋脚 P1 コア A と B）



図－５　促進材齢と中性化深さの関係（橋脚 P2 コア C と D）

表－５　促進試験と実測の中性化速度係数

橋脚	中性化速度係数			促進倍率
	(1)促進試験		(2)現地調査	(倍)
P1	コア A	3.86	断面 X 4.04	25～48 平均 35
	コア B	2.77		
	平均	3.32		
P2	コア C	5.24	断面 X 3.18	72～142 平均 104
	コア D	3.73		
	平均	4.49		

※単位：(1)mm/week$^{1/2}$，(2)mm/year$^{1/2}$

よって，48 年経過した実構造物より採取したコンクリートの角柱供試体を用い，温度 20℃，湿度 60%，CO_2 濃度 5%の条件で促進中性化試験

（JIS A 1153）を行った結果と 48 年経過した実構造物の中性化深さを比較したところ，促進試験は橋梁桁下における屋外自然暴露の約 35 倍の促進が行われている結果となった。また，促進期間 1.5 週が屋外自然暴露の 1 年に相当する結果となった。

一方，同条件で直径 100mm の円柱供試体を促進中性化試験した結果，促進試験は橋梁桁下における屋外自然暴露の約 104 倍の促進となり，促進期間 0.5 週が屋外自然暴露の 1 年に相当する結果となった。

4. まとめ

建設後 48 年経過した鉄筋コンクリート橋脚取壊しの際，各種調査を行うとともに同橋脚よりコア試料を採取して促進中性化試験を行った。その結果と実橋脚での中性化深さの測定結果と対比し，長期暴露試験結果と促進中性化試験との対応を検討した。本研究の範囲で得られた結果を以下に列記する。

(1) 橋梁桁下の気中部にある断面（満潮水位 +1.9m）の中性化深さは，橋脚 P1 で 28mm，橋脚 P2 で 22mm であった。一方，干満の影響を受ける断面（満潮水位～平均水位）の中性化深さは 1～2mm 程度と気中部に比べてかなり小さかった。

(2) 使用されていた鉄筋の径は，主鉄筋が 16mm，配力鉄筋が 13mm であった。また，鉄筋の間隔は，主鉄筋が約 250mm，配力鉄筋が約 290mm であった。

(3) 配合推定の結果より，単位セメント量は 181～243kg/m^3，単位水量は 90～153kg/m^3 程度の値であった。

(4) 圧縮強度は 22.5～47.8N/mm^2，静弾性係数は 2.29×10^4～3.72×10^4N/mm^2 の範囲を示し，48 年経過した後においてもコンクリートとして十分な性能を有していた。

(5) 促進中性化試験の結果より，配合推定による水セメント比が小さいコアの中性化深さが小さく現われた。また，圧縮強度の大きいコアが小さい中性化深さを示した。

(6) 角柱供試体（断面 100×100mm）を用い，温度 20℃，湿度 60%，CO_2 濃度 5%の条件で促進中性化試験を行った場合，橋梁桁下における屋外自然暴露の約 35 倍の促進になった。また，促進期間 1.5 週が屋外自然暴露の 1 年に相当する結果となった。

(7) 円柱供試体（断面直径 100mm）を用い，温度 20℃，湿度 60%，CO_2 濃度 5%の条件で促進中性化試験を行った場合，橋梁桁下における屋外自然暴露の約 104 倍の促進になった。また，促進期間 0.5 週が屋外自然暴露の 1 年に相当する結果となった。

参考文献

1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会報告書，pp.83-87，2000.5
2) 日本コンクリート工学協会：炭酸化研究委員会報告書，1993.3
3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'02［基礎編］，2002.1
4) セメント協会：硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験結果，専門委員会報告 F-18，1967
5) 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.451，5-17，pp.119-128，1992.8
6) 中村則清，鈴木澄江，阿部道彦，鹿毛忠継：コンクリートの促進中性化に及ぼす試験方法上の要因と影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.761-766，2003.6
7) 佐伯竜彦，大賀宏行，長瀧重義：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，No.414，5-12，pp.99-108，1990.2