論文　鉄筋コンクリート構造物の効率的な維持管理手法に関する研究

内田　雅人[*1]・松尾　賢[*2]・岸　利治[*3]

要旨：被りコンクリートの耐久性から，鉄筋コンクリート構造物の効率的な維持管理手法を確立するため，長野新幹線の高架橋を調査した。調査項目は，中性化速度係数，透気係数および流水距離とした。中性化速度係数による構造物の劣化予測では，中性化深さのわずかな差でも劣化予測に大きな乖離を生じるため，中性化速度係数による劣化予測に実務的な精度はないことを確認した。また，透気係数および流水距離では，測定箇所ごとのバラつきが大きいものの，高架橋ごとに平均した測定値を用いることで，表層コンクリート品質から維持管理の優先順位をつけることにより，効率的な維持管理を行えることを確認した。

キーワード：維持管理，耐久性，表層品質，非破壊試験

1. はじめに

1.1 研究背景

我が国では高度経済成長期に集中的に整備された社会資本ストックは建設から 40 年近くが経過し，今後，損傷が集中的に発生することが予想される。これらの社会資本ストックの維持管理が適切になされなかった場合，老朽化した社会資本ストックは本来の性能を失い，崩壊等による事故の発生にともない，社会的な不安を招くとともに，社会生活基盤のサービス低下を招くことが懸念されている。

このような状況のなか，鉄道構造物では，２年に１度の通常全般検査において，目視を主体とした検査の実施により，構造物の状態を把握している。また，損傷が発生した箇所では軽微なうちに補修を実施することで，構造物の健全度を維持している。しかし，新幹線構造物は線区ごと一定時期に集中して整備されており，損傷が集中的に発生した場合には，補修費用および施工労力において，大きな負担を強いられることになる。そのため，今後の維持管理では，構造物の状態を適切に評価し，損傷が発生する前から対策を実施する予防保全型維持管理とすることで，これまで以上に効率的な維持管理を検討する必要がある。

1.2 研究目的

既設の鉄筋コンクリート構造物に損傷が発生する前から対策を実施する予防保全型維持管理を行うためには，表層コンクリートの品質を定量的に評価し，構造物の劣化予測を行う必要がある。そこで，本研究では，中性化速度係数による鉄筋コンクリート構造物の劣化予測の精度について確認を行った。また，表層コンクリートの品質による鉄筋コンクリート構造物の効率的な維持管理の可能性について検証を行った。

表層コンクリートの品質を評価する方法として，中性化や塩害などの原因である水や酸素および二酸化炭素などの劣化因子に対するかぶりコンクリートの物質移動抵抗性を指標とすることが有効である。そのため，本研究では，現場で簡便かつ定量的に物質移動抵抗性を評価できる手法により行うこととした。また，評価手法が非破壊試験であることは，実構造物に対して広く活用するうえで重要であるため，非破壊試験により，表層コンクリート品質の定量的な評価を行うこととした。

現在，非破壊試験で表層コンクリートの品質を評価する手法として，表層透気試験を用いた透気係数による評価手法が提案されており，本研究においても，この評価手法を用いることとした。また，延長が長い新幹線構造物を効率的に測定するため，より簡便な流水試験による評価を行うこととした。なお，本研究では対象構造物を高架橋とした。

2. 調査概要

調査は新幹線の３高架橋で行った。諸元を表-1に示す。なお、各高架橋の配合条件と施工条件に違いはない。

表-1　調査高架橋諸元

No.	高架橋名	駅　間	竣工年月
1	A高架橋	佐久平-上田	1996/ 7
2	B高架橋	軽井沢-佐久平	1995/10
3	C高架橋	上田-長野	1996/ 5

劣化予測精度検証は，C高架橋で詳細調査を行った。新幹線高架橋で調査を行った理由は以下の３つである。

(1) 連続的に詳細調査を実施するため，耐震補強や剥離剥落対策等で表面被覆されていない構造物である。

(2) 部材，方向性，高さ，水等の影響を考慮した劣化因子

*1 東日本旅客鉄道（株）　設備部構造物管理グループ　(正会員)
*2 東日本旅客鉄道（株）　長野支社設備部設備土木課　(非会員)
*3 東京大学　生産技術研究所　教授　博士(工学)　(正会員)

侵入度合いを把握するため，沿線に建屋が少なく日射の影響や方位を理想的な条件で選定できる構造物である。
(3) 変状が少なく健全であり，今後劣化予測による予防保全を検討すべき構造物である。

3. 中性化試験

3.1 中性化深さ測定方法

中性化深さはドリル法により測定した。中性化深さは直径 12㎜ のドリルを使用し，1 カ所につき 3 削孔した平均値とした。なお，3 削孔の中で最大値と最小値の差が 7㎜ 以上となった際は 2 削孔追加し，5 削孔の最大・最小値を除外した平均値を中性化深さとした。また，フェノールフタレイン・エタノール溶液（以下，PP 溶液）による中性化深さ判断は精度を高めるため削孔粉末が PP 溶液に触れ瞬時に発色する深さとした。これは，PP 溶液の発色領域は pH8.2～10 .0 以上と曖昧さを含み，瞬時に発色せず数分後に発色する領域があるためである [2)]。柱下部の測定は毛管現象による土中からの水の影響を排除するためグランドレベルから 1.5m の高さで行った。打継目下部・上部の測定は打継目からそれぞれ約 30cm の離れで行った。スラブ下面，縦梁の測定は横梁から 1.5m～2.0m の線路方向位置で行い，縦梁は外側面で行った。

3.2 中性化深さ測定結果

測定断面位置を図-1，各部材の中性化深さ測定結果を図-2 に示す。測定位置は，雨水の影響による中性化深さの違いを確認するために調整桁部と中間部で測定した。同一高架橋においても部材の違いにより中性化深さが大きくバラつくことが確認された。また，4 断面の縦梁と横梁には 10 ㎜の差が生じている。柱の下部（柱下部）と上部（柱打継下部）では 4.5m 程の高低差があり下部コンクリートが上部に比べ密で中性化が進んでいないと考えられたが，その傾向は見られなかった。本調査から中性化進行が速く弱点となりうる部材は確認されなかった。

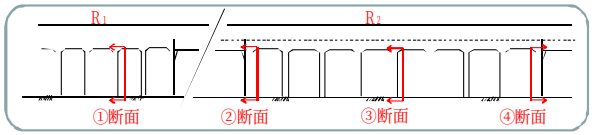

図-1　高架橋測定断面位置

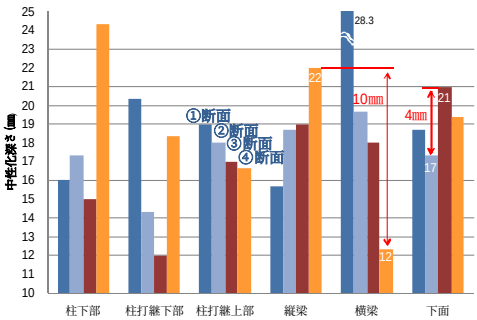

図-2　部材別中性化深さ

部位と方位の中性化影響を柱下部により詳細調査した。測定位置を図-3 に示す。西側柱の中性化深さ測定結果を図-4 に示し，東側柱の結果を図-5 に示す。西側柱では 1 柱，9 柱を除き外側が内側に比べ中性化が進行し，リバウンドハンマーにより計測した硬度が低い。外面では 2 柱と 8 柱で最大差 5.7 ㎜が生じており，測定の高さ及び面が同じでも柱により中性化進行にはバラつきがあった。東側柱では西側のような方位や硬度による傾向はみられないが，西側同様大きなバラつきがあり，最大差約 6 ㎜生じていた。

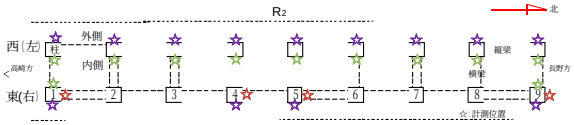

図-3　柱部測定位置

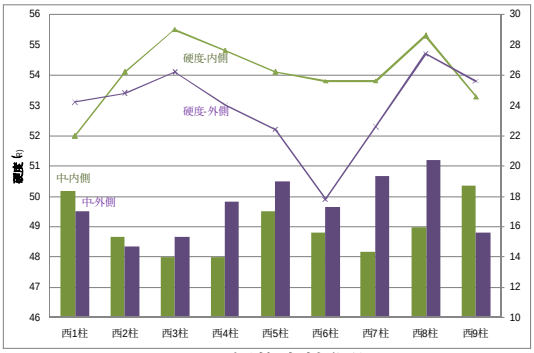

図-4　西側柱中性化深さ

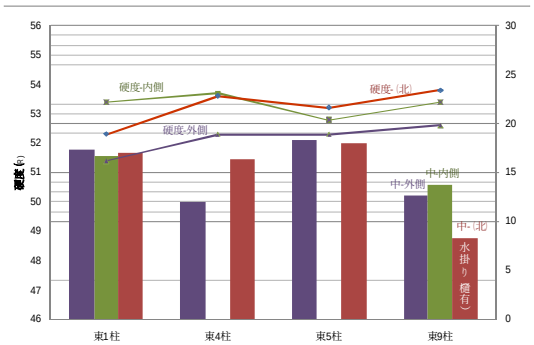

図-5　東側柱中性化深さ

水掛りの影響の確認として排水樋が設置された柱及び桁受部の測定を行った。水掛り箇所では中性化進行は水掛り具合により遅くなることが確認された。中性化深さは狭い範囲でもバラつくことが確認出来たが，同一高架橋におけるラーメン構造部（R_1 と R_2）では，中性化のバラつき分布傾向がほぼ等しいことが図-6 および図-7 より確認された。図-6 に 3 高架橋の中性化速度係数の分布，図-7 に中性化速度係数を確率分布で示す。 計測は水掛りのない柱部材において行った。高架橋が異なると中性化速度係数のバラつき分布は異なるが，同一高架橋におけるラーメン構造部ではほぼ等しい。これは高架橋ごとに施工管理が行われたことが理由と考えられる。

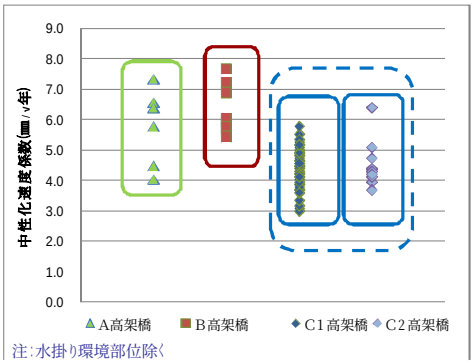

図-6　中性化速度係数分布

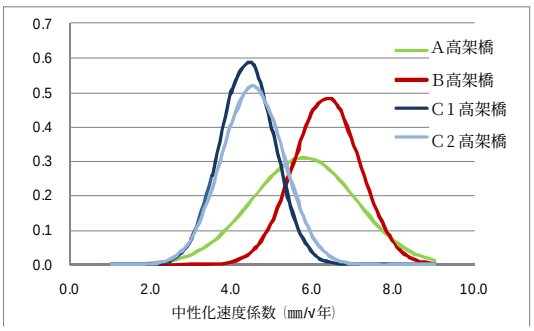

図-7　中性化速度係数確率分布

3.3 定量的な劣化予測精度の検証

現地構造物の実測値を基にした定量的な劣化予測は高架橋の代表値次第で鉄筋腐食開始時期の予測に数十年の差を生じる。また，予測精度を高めるための代表値見直し測定も中性化のバラつきの影響を受け劣化予測に数十年の差を生じる。このため，構造物の将来の健全度を現在の技術レベルで定量的に評価することは困難である。

3.4 劣化予測方法

安全性能低下までの予測は 2 段階に分かれる。まず鉄筋が腐食開始するまでの期間を中性化速度により求める。そして鉄筋が腐食開始してから断面欠損に至るまでの期間を鉄筋腐食速度により求める。本研究では前者の鉄筋が腐食開始するまでの期間を式（1）により予測する。中性化による鉄筋腐食は鉄筋の不動態皮膜が中性化により破壊され，水と酸素の供給があって腐食する。水の存在を示すエフロの点在が確認される中間スラブ下面は鉄筋が腐食し得る部材のため，中間スラブで予測した。

$$y = \alpha \sqrt{t} \qquad (1)$$

y：中性化深さ（mm）

α：中性化速度係数（mm/√年）

t：年数（年）

3.5 劣化予測結果

図-1 高架橋測定断面位置 2，3 断面の下面の中性化深さはそれぞれ 17mm，21mm である。式 1 により求めた中性化速度係数を表-2 を示す。2 点の劣化予測を図-8 に示す。数 mm の中性化深さの差でも劣化予測は大きな乖離を生じる。鉄筋が腐食開始するとされる中性化残り 10 mmに到達する時期には，中性化深さ 4mm の差でも 15 年の差が生じることが分かる。

表-2　②，③断面スラブ下面の中性化速度係数

中性化深さ (mm)		中性化速度係数(mm/√年) α＝y / √14.5
y1	17	4.5
y2	21	5.5

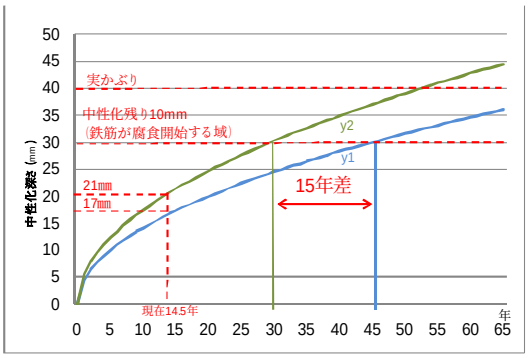

図-8　代表値による劣化予測の差

さらに，別の高架橋において、’95，’09 年の調査から算出した中性化速度係数を図-9 に示す。同部材の測定でも中性化速度係数が変動した。これはドリル法による中性化深さ測定は，中性化速度係数の見直しの際，同一箇所の再測定が出来ない宿命上，バラつき影響を受け速度係数が大小変動しうるためである。図-10 にスラブにおける劣化予測の見直し年数を示す。経年 25 年に当たる’09 年に劣化予測を見直すと鉄筋が腐食開始するまでに当初予測から 30 年の予測修正が生じることが分かる。以上から定量的な劣化予測による健全度評価は実務的な精度ではないと考える。

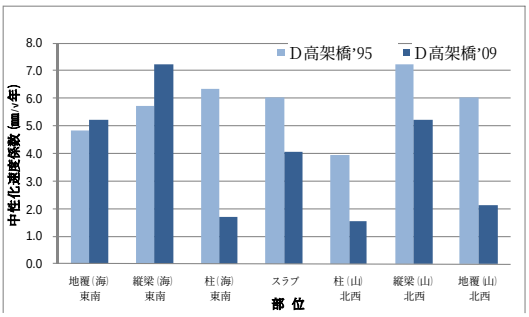

図-9　中性化速度係数の変動

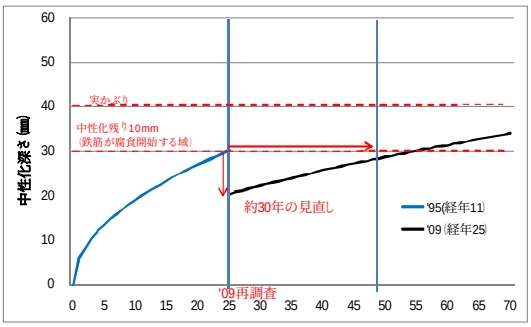

図-10　見直しによる劣化予測の修正

4. 表層透気試験

4.1 表層透気試験について

非破壊の表層透気試験をもちいた品質評価により，既設高架橋の劣化しやすさを評価出来るか検証した。表層透気試験は，表層コンクリートの空気の通りやすさを原位置において，測定可能な非破壊試験器である。中性化や塩害は劣化因子の侵入により進行するが，劣化因子を含めた物質の移動抵抗性を空気の通りやすさとして評価する試験である。本試験状況を図-11 に示す。また，図-12 にチャンバー略図を示す。試験器の特徴はチャンバーが二重構造になっている点である。外側チャンバーがコンクリート表面の横からの透気を取り込み排除することで内側のチャンバーが深さ方向のみの透気性を計測仕組みである。透気性は透気係数として算出される。計測原理を図-13 に示す。計測原理は，大気圧の約 100 分の 1 の気圧（対象コンクリートの品質に変動するが約 1kPa）までコンクリートを吸引後 2.5kPa 気圧復旧するまでの時間を計測する。透気係数の算出はボイル=シャルルの法則から構成される。透気係数値が小さければコンクリートが密であり物質移動抵抗性が大きく高品質である。既往の研究[1)]から透気係数はコンクリート配合の W/C が大きければ大きく，コンクリート含水率が高ければ小さくなることが明らかにされている。なお、表層透気試験は中性化が進んでいない材齢の若い構造物の測定や非破壊であるため、同一箇所での劣化の進行を確認できるなどの利点がある。コンクリート構造物の品質は施工プロセスに大きな影響を受ける。材料劣化に対する耐久性照査設計の課題は，設計において耐久性照査が行われてもコンクリート構造物は個別現場生産ゆえ設計品質の確保を施工後の確認なしに確証出来ないことである。性能規定とは性能によって規定することであり，耐久性照査とは要求される耐久性能が現実に発揮することを確認することである。しかし，耐久性照査技術はまだまだ十分な段階でなく，構造物の完成後に直接耐久性能の過不足を検証する技術とシステムの確立を目的とした研究が土木学会小委員会において行われている。

図-11 試験状況

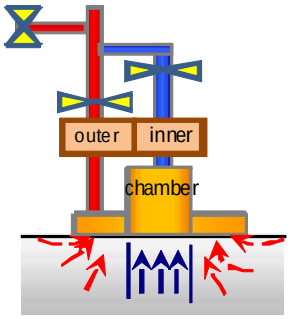

図-12　チャンバー略図

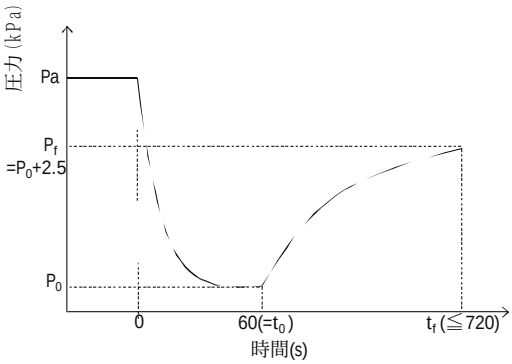

図-13　測定原理

4.2 測定方法

透気係数はコンクリート表層部のマイクロクラックに大きな影響を受けるため，各部位の透気係数は 2 回測定の平均値とした。なお，目で確認できるクラックは避けて計測した。また，透気係数の計測器に表示される範囲は 0.001～100×E-16 m²であるが，本研究では測定値の多くが計測器の測定表示限界（10～100×E-16 m²）に近い値であった。コンクリート含水率はコンクリート・モルタル水分計にて測定した。どの部材においても 3.8～4.2%範囲で乾燥状態であった。

4.3 表層透気試験測定結果

C 高架橋における透気係数測定位置は中性化深さ測定と同位置である。透気係数の測定結果を図-14 に示す。透気係数は部位・部材にかかわらず 10～100×E-16 m²であった。中性化速度係数の測定結果と同様，目立って大きな値を示す部位・部材は確認されなかった。

3 架橋の柱部にで行った透気試験の結果を図-15 に示す。係数に対する中性化速度係数のバラつきから透気係数によって中性化速度係数を算出することは難しいと考える。また，A 高架橋と B 高架橋においては透気係数のバラつきが大きいため，中性化しやすさの判断が困難である。

しかし，中性化速度係数の平均値μやバラつきσと透気係数のそれらを相関分析すると相関が強いことが分かる。平均値とバラつきの相関分析結果を表-3 に示す。透気係数の平均値やバラつきが大きいと中性化速度係数の

バラつきや平均値も大きくなることが分かる。透気係数のバラつきと平均値が大きいとコンクリートは劣化しやすい。このため，透気係数の平均値とバラつきにより高架橋における劣化しやすさの順位判定が可能である。
劣化しやすさの順位判定結果を図-16 に示す。平均値とバラつきを考慮した確立分布を求め，ある確立で発生する透気係数で優先順位評価した。図は発生確率 5%における透気係数値により優先順位評価を行った。この結果第一上塚原高架橋が最も劣化しやすく次に第二中軽井沢高架橋に続く。このように非破壊検査による透気係数により劣化しやすさを相対評価することが出来る。非破壊検査の透気係数を測定することで予防保全対策実施の優先順位判定精度を高められると考える。

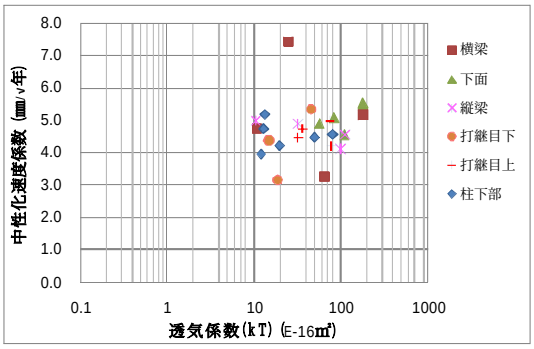

図-14　部材別透気係数

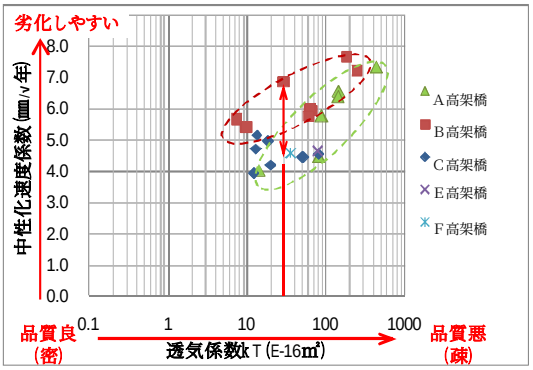

図-15　高架橋別透気係数（柱）

表-3　相関分析

相関分析		透気係数：KT ($kT\times10^{-16}m^2$)		中性化速度係数：α (mm/√年)	
		平均μ	標準偏差σ	平均μ	標準偏差σ
KT	μ	1	—	—	—
	σ	0.996	1	—	—
α	μ	0.631	0.694	1	—
	σ	0.977	0.971	0.568	1

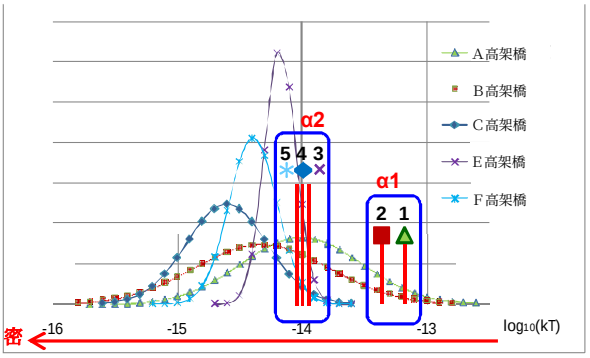

図-16　優先順位評価

5. 流水試験

表層コンクリートの品質をより簡便な手法である流水試験により評価できるか検討を行った。

5.1 試験概要

流水試験は，既往の研究 [3]において提案された試験方法である。この手法では，定量の水をコンクリート壁面に流し，その流水距離により表層コンクリートの品質を評価しようとする簡便かつ定量的な手法である。原理としては，コンクリートの毛細管現象を利用したもので，多孔質なものほど内部への水の浸透量が多くなるため，流水距離が短くなる傾向がある（図-17）（図-18）。また，適用範囲は，コンクリート構造物であり，試験箇所は原則として壁，柱，梁などの垂直面である。なお，測定面に表面被覆工が施された箇所には適用できない。

図-17　緻密なコンクリート

図-18　多孔質なコンクリート

5.2 調査方法

調査は，中性化試験および透気試験と同様に，長野新幹線の 3 高架橋で実施した。また測定時の条件を統一するため，調査は同一日で行った。測定概要を以下に示す。

・試験箇所をウエスで強く 10 回擦り，付着した埃や汚れを除去する。なお，除去の程度は流水距離に大きく影響するため，一定となるよう注意した。

・マイクロピペットを使用し，測定箇所に 0.2ml の水を流す。このとき，水が変状の影響が少なくなるルートを流れるよう注意する。

・流水はスケールを用いて 1 箇所で 3 回測定する。このとき，ひび割れや表面気泡等の影響を受けた測定値は，平均値から除くものとする。また，除いた分追加測定し，合計 3 回の平均値を測定値とする。

図-19　水試験状況

5.3 試験結果

流水試験の評価は，中性化速度係数との相関により ha 判断することとした。3 高架橋の柱部における流水試験の結果を以下に示す。まず，測定箇所ごとの中性化速度係数と流水距離の相関を図-20 に示す。流水試験は，ひび割れや表面気泡等の表層コンクリートの状態に大きく影響されるため，表面が荒れた実構造物を測定箇所ごとに評価することは困難であると考える。

次に，高架橋ごとに平均した中性化速度係数と流水距離の相関を図-21 に示す。高架橋ごとに測定値を平均化することで，表層コンクリートの状態が流水距離に与える影響も平均化され，中性化速度係数と流水距離に高い相関性を得ることができた。

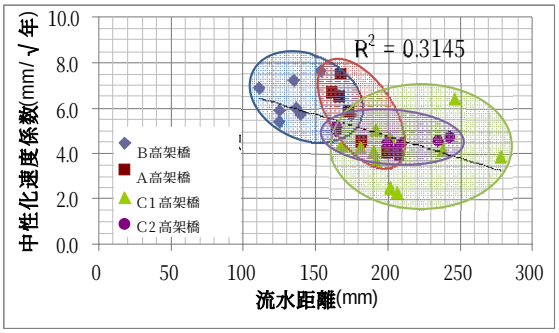

図-20　測定箇所別の相関

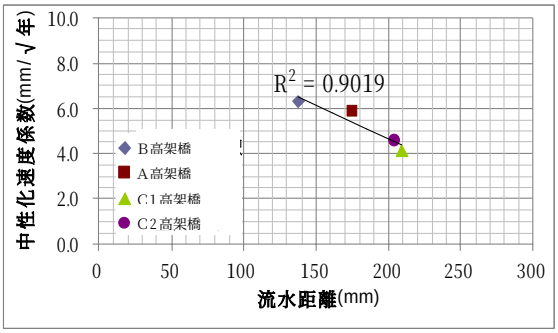

図-21　高架橋別の相関

6．まとめ

(1) 中性化速度係数による将来の健全度を定量的に予測することに試みた。しかし，同じ構造物において，20，30 年先を予測する目的が見直しの度に 10，20 年のズレを生じることが分かった。このため，鉄筋コンクリート構造物の将来の健全度を現在の技術レベルで定量的に評価することは困難であると考える。

(2) 表層透気試験を用いて透気係数よる被りコンクリートの品質評価を行うことで，供用期間中に鉄筋の断面欠損が発生し得る品質の構造物すなわち安全性能が低下する品質の構造物であるかを定量的に評価することができる。

(3) 流水距離と中性化速度係数には相関があり，流水試験を用いて被りコンクリートの耐久性を評価することができる。

(4) 透気試験や流水試験等の非破壊試験を用いて，安全性能が低下する品質の構造物を抽出し，優先順位付け，変状が発生する前に対策を実施することにより，対策工事の平準化が図られ効率的な維持管理を行うことが可能であると考えられる。

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，（社）土木学会コンクリート委員会，コンクリート技術シリーズ 80，(2008)

2) 佐藤　周之ほか：フェノールフタレイン法によるコンクリート中性化の詳細評価技術に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，2009

3) 地濃茂雄ほか：打放しコンクリート外壁面における雨水の吸水・流下に関する検討，第 65 回セメント技術大会講演要旨，pp.156-157，2011