

PC波形鋼板ウェブ箱桁橋のコンクリートの高強度化に関する研究

中日本高速道路株式会社 正会員 博士(工学) ○酒井 秀昭
工修 草野 成一
竹沢 正文

1. はじめに

PC波形鋼板ウェブ箱桁橋に使用しているコンクリートの設計基準強度は、レディーミクストコンクリートを用いることや現場施工方法を考慮して $40\text{N}/\text{mm}^2$ が多く採用されている。しかし、近年は、設計基準強度が $100\text{N}/\text{mm}^2$ を超える超高強度繊維補強コンクリートなど使用したPC橋が完成しており、高性能な高強度コンクリートをPC橋に採用し、初期コストの削減やライフサイクルコスト(LCC)の削減を図る必要性が増大している。本論文は、設計基準強度 $60\sim 80\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の高強度のレディーミクストコンクリートを使用するPC波形鋼板ウェブ箱桁橋を対象として、コンクリート重量の低減効果や耐久性の向上等の特性について、解析結果や試験結果を基に論ずるものである。

2. 研究の目的および方法

2.1 研究の目的

本研究は、設計基準強度 $60\sim 80\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の高強度のレディーミクストコンクリートをPC波形鋼板ウェブ箱桁橋に採用することを可能とし、コンクリート重量の低減により初期建設コストを削減するとともに、高強度コンクリートの使用により、塩化物イオンの侵入、化学的侵食、コンクリートの中性化等による構造物の劣化に対する抵抗性を増大させ、将来の維持管理費の低減によるライフサイクルコストの削減を図ることを目的としている。さらには、これらのことにより、経済的な社会資本整備も可能となる。

2.2 研究の方法

研究にあたっては、現在施工中のコンクリート設計基準強度が $40\text{N}/\text{mm}^2$ のPC波形鋼板ウェブ箱桁橋を対象とし、強度を $60\text{N}/\text{mm}^2$ および $80\text{N}/\text{mm}^2$ として試算を行い、高強度コンクリートの使用による重量の低減等の効果を把握し、初期建設コストへの影響を明らかにした。次に、架橋地点で調達可能なレディーミクストコンクリートの高強度化の可否について検討を行うとともに、コンクリート強度と塩化物イオン拡散係数との関係に着目し、「電気泳動法によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)」¹⁾により試験を行い、コンクリートの高強度化による構造物の劣化に対する抵抗性の増大について考察を行った。

3. 高強度コンクリートによるPC波形鋼板ウェブ箱桁橋の重量削減効果

新東名高速道路において、現在施工中のコンクリートの設計基準強度が $40\text{N}/\text{mm}^2$ のPC波形鋼板ウェブ箱桁橋を対象として、その強度を $60\text{N}/\text{mm}^2$ および $80\text{N}/\text{mm}^2$ として試算を行い、高強度コンクリートの使用による重量の低減等の効果の検討を行った。その検討内容について以下に述べる。

3.1 対象橋梁の概要

対象橋梁の概要は、以下のとおりである。また、橋脚位置の制約条件で、中央径間長 92.5m に対して側径間長 91.3m となり、施工時の支点モーメントが最大となることから、最大下床版厚となる第4支点部の横断面図を図-1に示す。

構造形式：PC 5 径間連続波形鋼板ウェブ箱桁橋	橋 長：481.0m
支 間：99.55+115.0+80.0+92.5+91.3m	有効幅員：11.625m
架設工法：張出し架設工法	

3.2 試算の条件

試算は、コンクリート応力度の制限値を道路橋示方書²⁾(以下、「道示」という)とコンクリート標準示方書³⁾(以下、「示方書」という)とに区分して、2つの規準による制限値を用いて個別に実施した。

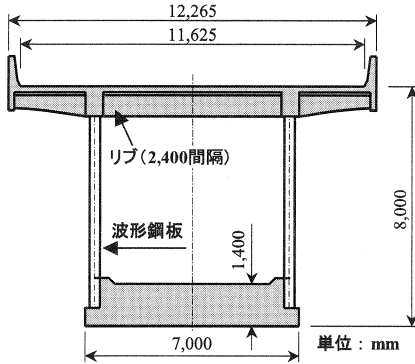


図-1 対象橋梁の横断面図 (第4支点部)

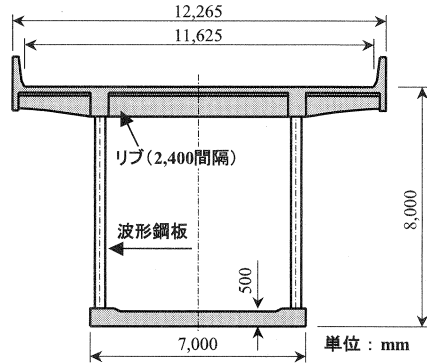


図-2 ケースD-80 試算結果 (80N/mm², 道示適用)

(1) 道示のコンクリート曲げ圧縮応力度の制限値

コンクリートの設計基準強度 40N/mm² および 60N/mm² の道示の曲げ圧縮応力度の制限値については、設計荷重作用時、プレストレス直後に区分して、道示による許容応力度を用いた。施工時については、道示の許容応力度の割増係数 (1.25) を用いて算定した。ただし、設計基準強度 80N/mm² の制限値については、道示に規定がないため、60N/mm² における許容応力度と設計基準強度の比と同等と仮定して算定した。試算に用いた曲げ圧縮応力度の制限値を表-1に示す。

(2) 示方書のコンクリート曲げ圧縮応力度の制限値

コンクリートの設計基準強度 40N/mm²、60N/mm² および 80N/mm² の曲げ圧縮応力度の制限値については、永久荷重作用時、プレストレス直後、施工時に区分して、表-1に示す示方書による制限値を用いた。

(3) 試算ケース

試算ケースは、コンクリートの設計基準強度を 40N/mm² としたケースを基本ケースとして、これと比較するため、架設時に圧縮部材となる下床版の設計基準強度をパラメーターとし、60N/mm² および 80N/mm² に変化させ、示方書および道示に基づく曲げ圧縮応力度の制限値を用いて、個別に必要な断面形状およびP C鋼材量等を算定した。上床版については、主として輪荷重によってその必要厚さが決定されているので、コンクリート強度パラメーターとしても部材厚が変化しないため、本試算ケースについては下床版のコンクリートの高強度化による部材厚の減少効果を明らかにすることを目的として、下床版のコンクリート強度のみをパラメーターとした。試算ケースの一覧表を表-2に示す。

3.3 試算結果

(1) 下床版厚

下床版厚の算定にあたっては、施工条件等より最小版厚を 22cm とし、最小版厚で決定しない箇所については、照査する版厚の単位を 10cm とし、安全性の照査を行った。表-2に示したケースごとの下床版厚、下床版のコンクリート体積、橋軸方向のP C鋼材量の算定結果を表-3に、ケースD-80 (設計基準強度 80N/mm², 道示適用) の第4支点部の試算結果による横断面図を図-2に示す。

表-3からわかるように、基本ケース (設計基準強度 40N/mm², 道示適用) において、下床版厚が最大の 140cm となる第4支点では、設計基準強度が 60N/mm²

表-1 曲げ圧縮応力度の制限値 (N/mm²)

設計基準強度	道路橋示方書				コンクリート標準示方書	
	設計荷重時	施工時	プレストレス直後	永久荷重作用時	施工時	プレストレス直後
40	14.0	17.5	18.0	16.0	検討時点の圧縮強度の特性値の0.6倍	
60	18.0	22.5	22.0	24.0		
80	24.0	30.0	29.3	32.0		

表-2 試算ケース

ケース	設計基準強度 (N/mm ²)		圧縮応力度の制限値適用示方書
	上床版	下床版	
基本	40	40	道路橋示方書
C-40	40	40	コンクリート標準示方書
D-60	40	60	道路橋示方書
C-60	40	60	コンクリート標準示方書
D-80	40	80	道路橋示方書
C-80	40	80	コンクリート標準示方書

表-3 試算結果 (下床版厚・コンクリート体積・PC鋼材量)

ケース (径間長)	下床版厚 (cm)									コンクリート		橋軸方向PC鋼材	
	第1径間 99.55m	第1支点 110	第2径間 115.0m	第2支点 70	第3径間 80.0m	第3支点 22	第4径間 92.5m	第4支点 140	第5径間 91.3m	第5支点 22	下床版体積 (m ³)	基本との 比率	鋼材量 (t)
基本	22	110	22	70	22	40	22	140	22	1,741.7	1.00	129.5	1.00
C-40	22	90	22	60	22	40	22	120	22	1,582.6	0.91	129.5	1.00
D-60	22	70	22	40	22	22	22	90	22	1,331.8	0.76	118.9	0.92
C-60	22	40	22	30	22	22	22	60	22	1,110.6	0.64	118.9	0.92
D-80	22	40	22	22	22	22	22	50	22	1,060.7	0.61	113.8	0.88
C-80	22	22	22	22	22	22	22	30	22	949.7	0.55	115.5	0.89

であるケースD-60 (道示適用) において90cm, 80N/mm²であるケースD-80において50cmとなる。これは、設計基準強度の増加に伴いコンクリートの曲げ圧縮応力度の制限値が増加し下床版厚が減少することにより、死荷重が大幅に減少することと、架設工法が張出し架設であることにより部材厚の決定に与える死荷重の影響が顕著であることなどによるものと推察される。

次に、適用標準の相違の影響については、基本ケース (道示適用) において、下床版厚が最大の140cmとなる第4支点では、示方書の制限値を適用したケースC-40において120cmとなる。同様に、設計基準強度が60N/mm²の場合は、90cm (道示) から60cm (示方書) に、設計基準強度が80N/mm²の場合は、50cm (道示) から30cm (示方書) になる。これは、示方書においては、永久荷重作用時のコンクリートの曲げ圧縮応力度の制限値を設計基準強度の40%、施工時において検討時点の圧縮強度の特性値の60%まで許容しているのに対して、道示においては、設計基準強度60N/mm²の場合に設計荷重作用時で30%、プレストレッシング直後で約38%までしか許容していないことに起因すると推察される。

(2) 下床版のコンクリート体積

表-3に示したように、下床版のコンクリート体積については、道示を適用した場合に基本ケースのコンクリート体積に対して、設計基準強度が60N/mm²であるケースD-60において76%、80N/mm²であるケースD-80において61%になる。示方書を適用した場合は、道示を適用した基本ケースに対して、ケースC-40において91%、ケースC-60において64%、ケースC-80において55%になる。

(3) PC鋼材量

表-3に示したように、PC鋼材量については、道示を適用した場合に基本ケースのPC鋼材量に対して、設計基準強度が60N/mm²であるケースD-60において92%、80N/mm²であるケースD-80において88%になる。示方書を適用した場合は、道示を適用した基本ケースに対して、ケースC-40において100%、ケースC-60において92%、ケースC-80において89%になる。

3.4 まとめ

本試算結果から、コンクリートの設計基準強度を増加させることにより、下床版厚が大幅に減少し、コンクリート体積も大幅に減少すること (道示適用において、40N/mm²から80N/mm²に変更したケースD-80で61%に減少) が検証できた。さらに、コンクリート体積の減少による死荷重の低減により、前述のPC鋼材量のみならず、支承の規模や下部工・基礎工費の低減が可能となると推察される。ただし、本試算結果は、対象橋梁での事例を示したものであるもので、実橋においては、対象橋梁の規模等によりコンクリート体積等の減少量は変化するものと思われる。

4. 高強度コンクリートの配合および塩化物イオンの拡散係数に関する検討

4.1 コンクリートの配合および強度

コンクリートの配合を決定するにあたっては、現場においてレディーミクストコンクリートを使用することが想定されるため、設計基準強度を従来の張出し架設工法によるPC波形鋼板ウェブ箱桁橋と同様な40N/mm²としたケース (以下、「N40」という)、高強度化を想定して60N/mm²としたケース (以下、「N60」という)、80N/mm²としたケース (以下、「N80」という) の3ケースで、配合試験および強度試験を行った。

配合試験にあたって、使用する骨材は、新東名高速道路の建設が計画されている地域に近接する神奈川県

表-4 試験対象コンクリートの配合条件および示方配合

配合 種別	設計基準 強度 (N/mm ²)	目標 強度 (N/mm ²)	水セメント 比 (%)	目標 スランプ (cm)	空気 量 (%)	細骨 材率 (%)	単体量(kg/m ³)				高性能AE減水剤		AE剤 (g/m ³)	
							水	セメント	細骨材		種類	添加量 (kg/m ³)		
									S1	S2				粗骨材
N40	40	50	43.0	20±2.5	4±1	49.0	170	395	633	211	895	SP8SBs	4.345	8
N60	60	75	34.0			48.2	170	500	590	197	863	SP8SBs	5.000	8
N80	80	100	25.0			46.7	170	680	521	174	808	SP8HU	6.120	14

内のレディーミクストコンクリート製造工場で実際に使用されている骨材とした。実構造物において使用するセメントは、使用する配合により早強セメントや低発熱型セメントも想定されるが、セメント種別の相違による影響を受けないようにすべて普通ポルトランドセメントとした。

配合設計にあたっては、各々のケースの目標強度を表-4に示すとおりとした。また、目標スランプについては、セメント量が多くなり粘性が増大することから、ワーカビリティおよび試験ケースごとの統一性を考慮して20±2.5cmとした。配合試験による示方配合を表-4に示す。

コンクリートの練混ぜは、100リットル2軸強制練りミキサーを用いて行ったが、設計基準強度が大きいほど練混ぜ時間が増大したが練混ぜは可能であり、目標スランプおよび空気量とも配合条件を満足することができた。したがって、既存のレディーミクストコンクリート製造工場において、設計基準強度80N/mm²までのコンクリートについては、製造が可能であると推察される。

コンクリートの強度については、試験ケースごとに、材齢3日・7日・28日における圧縮強度試験 (JIS A 1108)、材齢28日における引張強度試験 (JIS A 1113) および曲げ強度試験 (JIS A 1106) を行った。コンクリートの強度試験の結果を表-5に示す。試験結果から、圧縮強度については、概ね目標強度を満足することができたが、実際の使用にあたっては、セメント水比の調整を行い、配合を決定する必要がある。セメント水比と圧縮強度との関係を図-3に示す。

表-5 コンクリートの強度試験結果

配合 種別	圧縮強度 (N/mm ²)		曲げ強度 (N/mm ²)		引張強度 (N/mm ²)
	3日	7日	28日	28日	28日
N40	36.9	46.6	59.4	6.84	3.66
N60	50.6	66.6	80.0	8.75	4.54
N80	67.7	85.1	97.6	11.3	5.62

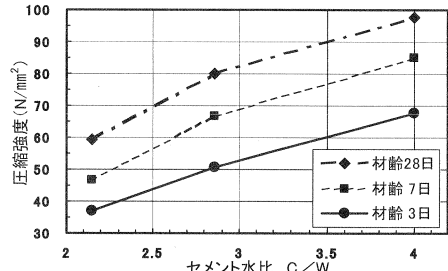


図-3 セメント水比と圧縮強度

4.2 塩化物イオンの拡散係数

示方書⁴⁾によれば、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査方法としては、塩化物イオンの侵入に対する耐用年数時点の鋼材位置における塩化物イオン濃度を、フィックの拡散方程式の解 (示方書⁴⁾式 (2.3.2)) をもとに算定し照査を行っており、コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数 (塩化物イオンの見掛けの拡散係数) の特性値が重要なパラメーターとなっている。塩化物イオンの見掛けの拡散係数とは、「塩化物イオンがコンクリートの細孔溶液中で固定化をとめないながら濃度勾配を駆動力として移動するとき、全塩化物イオンを対象として拡散の速さを規定する係数」¹⁾であり、「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法 (案) (JSCE-G572-2003)」¹⁾ (浸せき法) により試験することができる。ただし、低水セメント比の場合は試験期間が長期になる¹⁾ため、本試験においては、短期間で可能な「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法 (案) (JSCE-G571-2003)」¹⁾ (電気泳動法) により、「コンクリートの細孔溶液中に存在する塩化物イオンの電気泳動のし易さを表す係数」である電気泳動法による塩化物イオンの実効拡散係数を求めた。この塩化物イオンの実効拡散係数は、示方書で用いている見掛けの拡散係数とは相違するが、理論的には両者に相関性があることから、見掛けの拡散係数に変換することができる¹⁾ため、実効拡散係数を見掛けの拡散係数に変換して評価した。

(1) 電気泳動法による実効拡散係数

標準養生で材齢28日後の試験体を用いて、電気泳動法により実効拡散係数 D_e を求めた結果を表-6に示

す。試験においては、試験ケース N40 で試験開始後 7 日以降に、試験ケース N60 で 18 日以降に、陽極側溶液中の塩化物イオン濃度の増加量が定常状態を示した。しかし、試験ケース N80 では、試験開始から 23 日間経過後においても、陽極側の塩化物イオン濃度が、試験ケース N60 の 1/10 以下程度しか増加しない定常化に至らず、 D_e が算定できなかった。試験結果から、試験ケース N60 は、N40 に比べて実効拡散係数が 50% 以下となっており、コンクリートの高強度化にともない実効拡散係数が減少することが確認された。

(2) 見掛けの拡散係数

見掛けの拡散係数は、電気泳動法による実効拡散係数 D_e を用いて、次式から算定することができる¹⁾。

$$D_{ae} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e \tag{1}$$

ここで、 D_{ae} ：電気泳動法による実効拡散係数から換算した見掛けの拡散係数 (cm²/年)

k_1 ：コンクリート表面におけるコンクリート側、陰極側溶液側それぞれの塩化物イオン濃度の釣り合いにかかわる係数

k_2 ：セメント水和物中への塩化物イオンの固定化現象にかかわる係数

式(1)に示した換算係数 $k_1 \cdot k_2$ は、見掛けの拡散係数と実効換算係数との比 (D_{ae}/D_e) で求められるため、普通ポルトランドセメントを結合材として使用し、主として、3%の NaCl 水溶液に 1 年間以上浸漬して求めた見掛けの拡散係数と電気泳動法による実効換算係数との関係を示した既存のデータ¹⁾ から、図-4 に示すように水セメント比 (W/C) を変数とした次式に示す回帰式を求めた。

$$k_1 \cdot k_2 = 5.7685 \cdot (W/C)^2 - 3.6465 \cdot W/C + 0.828 \tag{2}$$

式(2)により換算係数 $k_1 \cdot k_2$ を求めて、式(1)から、電気泳動法による実効拡散係数から換算した見掛けの拡散係数 D_{ae} を算定すると表-6 の値となる。計算結果から、水セメント比が小さく設計基準強度が大きい試験ケース N60 は、N40 に比べて見掛けの拡散係数 D_{ae} が 40% 以下となっており、コンクリートの高強度化にともない見掛けの拡散係数 D_{ae} が減少することが確認された。

(3) 拡散係数の予測値

示方書⁴⁾においては、塩化物イオンに対する拡散係数の照査に用いるコンクリートの拡散係数の予測値 D_p の算定方法として、普通ポルトランドセメントを使用する場合に、以下に示す回帰式が提案されている。

$$\log D_p = -3.9 \cdot (W/C)^2 + 7.2 \cdot (W/C) - 2.5 \tag{3}$$

式(3)によるコンクリートの拡散係数の予測値 D_p と前述の電気泳動法による実効拡散係数から換算した見掛けの拡散係数 D_{ae} とを比較すると、図-5 のとおりとなる。

今回の試験から算定された D_{ae} は、 D_p と比較すると少し小さな数値となるが、その傾向は概ね類似しているものと思われる。今回の試験は、データ数が少ないため、断定することは困難ではあるが、本試験の対象となった材料を用いたコンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の照査に用いるコンクリートの拡散係数の予測値としては、式(3)を使用してもよいものと推察される。ただし、設計基準強度が 60N/mm² を超えるコンクリートについては、試験等を実施しその適用の妥当性を検証する必要がある。

4.3 まとめ

今回の試験結果から、新東名高速道路の建設が計画されて

表-6 電気泳動法による拡散係数

試験ケース	設計基準強度 (N/mm ²)	圧縮強度の試験値 (N/mm ²)	水セメント比 W/C (%)	実効拡散係数 D_e (cm ² /年)	見掛けの拡散係数 D_{ae} (cm ² /年)
N40	40	59.4	43.0	1.84	0.601
N60	60	80.0	34.0	0.859	0.219
N80	80	97.6	25.0	-	-

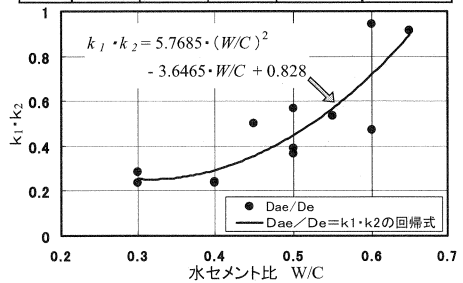


図-4 水セメント比と $k_1 \cdot k_2$

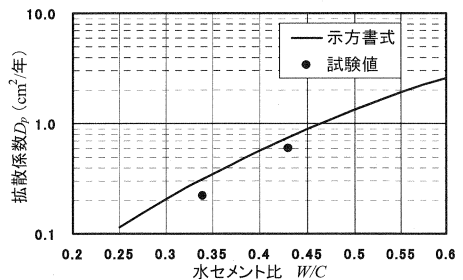


図-5 拡散係数の予測式と試験結果

いる地域に近接する神奈川県内のレディーミクストコンクリート製造工場で使用されている骨材を用いても、設計基準強度 80N/mm^2 までのコンクリートについては、製造可能であると推察される。また、今回の試験の対象となった範囲の高強度コンクリートにおいては、コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数が低下して、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する安全性が増大することが確認された。

4. 4 今後の課題

今回の検討の対象となっているPC波形鋼板ウェブ箱桁橋においては、設計基準強度 60N/mm^2 までのコンクリートの使用実績（豊田アローズブリッジ）しかないため、これを超える高強度コンクリートを実構造物に適用するにあたっては、現場でのコンクリートの打込みおよび締固めが適切に実施できるか試験施工等により確認する必要があるものと思われる。

5. 結論

本研究により、以下に述べる事項が明らかになった。

第一に、張出し架設工法によるPC波形鋼板ウェブ箱桁橋においては、実橋を対象とした試算結果から、下床版が主として圧縮部材となるので、コンクリートの設計基準強度を増大することにより、橋体重量を削減するとともに、死荷重の低減によりPC鋼材量等も削減することができる。

第二に、新東名高速道路の建設が計画されている地域に近接する神奈川県内のレディーミクストコンクリート製造工場で使用されている骨材を用いても、配合試験によれば、設計基準強度 80N/mm^2 までのコンクリートについては、製造可能である。

第三に、「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）」による試験結果から、高強度コンクリートの使用により、コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数が低下して、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する安全性が増大することが確認された。

これらのことから、レディーミクストコンクリートを使用する場所打ち工法によるPC波形鋼板ウェブ箱桁橋においては、設計基準強度 80N/mm^2 までは採用可能であり、軽量化による初期建設コストの削減や耐久性の向上により、ライフサイクルコストの削減が可能となると推察される。

今回の実橋を対象とした試算は、下床版のみ高強度化したケースで実施したが、上床版も高強度化した場合は、上床版の重量の削減効果はほとんどなく上床版のみの建設コストは増大するが、下床版の建設コストの削減効果のほうが大きく、橋梁全体としては初期建設コストが削減され、凍結防止剤（NaCl）等に対する耐久性の向上や中性化の抑制等に著しい効果があると推察される。

6. あとがき

PC波形鋼板ウェブ箱桁橋は、比較的長大スパンで採用されることから、コンクリートの高強度化による荷重の削減効果が大きく、コンクリート部材が支点部を除いて上下床版に限定されるため、高強度コンクリートの施工作业に適した橋梁であるので、高強度コンクリートの採用について、積極的に取り組む必要があると思われる。ただし、高強度コンクリートは、その品質管理が高度化することや水和熱・自己収縮等によるひび割れの危険性が增大する可能性があるため、事前の検討が重要となる。

最後に、本論文に用いたPC波形鋼板ウェブ箱桁橋の試算にご協力いただいた三井住友建設(株)の春日昭夫氏・平喜彦氏に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向、コンクリート技術シリーズ55.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋編，2002.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]，2002.