

高強度コンクリートを適用するPC波形鋼板ウェブ橋の耐久性および施工性

中日本高速道路(株) 正会員 博士(工学) 酒井 秀昭

1. 概要

日本では、近年、PC波形鋼板ウェブ橋が、死荷重の低減による建設コストの削減を主な目的として、高速道路橋等に広く採用されてきている。本形式の高速道路橋は、既に数十橋を超えており、特に張出し架設工法において広く採用されている。本形式に使用され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40N/mm²が多く採用されている。しかし、近年は、設計基準強度が100N/mm²を超える低収縮型超高強度コンクリートや超高強度繊維補強コンクリートを使用したPC橋が完成している。したがって、レディーミクストコンクリートを用いる通常の場合打ち工法によるPC波形鋼板ウェブ橋においても、高強度コンクリートを適用することにより、初期建設コストの削減や耐久性の向上等のライフサイクルコストへ与える影響や現場での施工性を明らかにする必要があるが、既往の研究等においては、これらに関する検討事例¹⁾が少ないのが現状である。

本研究は、場所打ち工法に使用可能な高強度のレディーミクストコンクリート(設計基準強度60~80N/mm²程度)を使用するPC波形鋼板ウェブ橋を対象として、塩化物イオンの拡散係数の低減効果や施工性について、「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)」²⁾(電気泳動法)による試験や実物大部分模型試験により検討を行ったものである。

2. 研究の方法

本研究は、以下に述べる手法で行っている。

第一に、コンクリートの高強度化による耐久性の向上については、コンクリート強度と塩化物イオンの拡散係数との関係に着目し、電気泳動法により試験を行い、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う。

第二に、桁高の変化等により、支点部付近では、縦断勾配が最大で15%程度に達する可能性があるPC波形鋼板ウェブ箱桁橋の下床版を対象に、高強度コンクリートの施工時の充填性や表面仕上げの可否等に着目した実物大部分模型試験を実施し、実構造物における施工性の検討を行う。

3. 塩化物イオンの拡散係数に関する検討

3.1 コンクリートの配合および強度

コンクリートの配合にあたっては、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(N40)、高強度化を想定して60N/mm²としたケース(N60)、80N/mm²としたケース(N80)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。配合試験に使用した材料を、表-1に示す。配合設計にあたっては、各々のケースの目標強度を表-2に示すとおりとした。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

表-1 使用材料

項目	種類	産地・メーカー等	密度	
セメント	普通ポルトランドセメント	住友大阪セメント	3.15	
細骨材	粗砂	神奈川県藤野町	2.60	
	細砂	千葉県市原市	2.58	
粗骨材	碎石(Gmax=20mm)	神奈川県相模原市	2.64	
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物	高強度用	N社	1.041
		超高強度用	N社	1.067
AE剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤	N社	—	

表-2 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 (%)	単位量(kg/m ³)					高性能AE減水剤		AE剤 (g/m ³)
							水	セメント	細骨材		粗骨材	種類	添加量 (kg/m ³)	
									S1	S2				
N40	40	50	43.0	20±2.5	4±1	49.0	170	395	633	211	895	高強度用	4.345	8
N60	60	75	34.0			48.2	170	500	590	197	863	高強度用	5.000	8
N80	80	100	25.0			46.7	170	680	521	174	808	超高強度用	6.120	14

を考慮して 20±2.5cm とした。

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-3に示す。

表-3 コンクリート強度試験結果

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

3. 2 塩化物イオンの拡散係数

コンクリート標準示方書³⁾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をもとに算定し照査を行っている。この式の算定にあたっては、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) 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は、「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)」²⁾ (浸せき法) により試験することができる。ただし、今回の試験ケースのように低水セメント比の場合は試験期間が長期になる²⁾ため、本試験においては、比較的短期間で可能な電気泳動法により、「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ため、直接示方書の照査に用いることはできないが、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²⁾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

電気泳動法による実効拡散係数 D_e を求めた結果を、表-4に示す。試験結果から、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 N80 は、N40 に比べて実効拡散係数が15%以下となっており、高強度化にともない実効拡散係数が大幅に減少することが確認された。

表-4 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	0.272	0.0693

(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²⁾。

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

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²⁾ から、図-1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} (以下、「見掛けの拡散係数 D_{ae} 」とする。) 算定すると表-4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 N80 は、N40 に比べて見掛けの拡散係数 D_{ae} が 12%以下となっており、コンクリートの高強度化により見掛けの拡散係数 D_{ae} が大幅に減少することが確認された。

(3) 拡散係数の予測値

コンクリート標準示方書³⁾では、コンクリートの塩化物イオン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は、以下に示す回帰式が提案されている。

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

式(3)によるコンクリートの拡散係数の予測値 D_p と前述の見掛けの拡散係数 D_{ae} とを比較すると、図-2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。

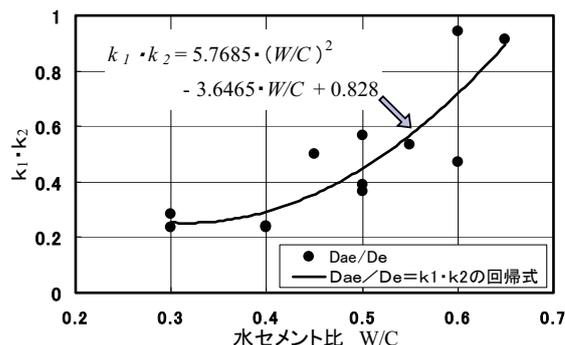


図-1 水セメント比と $k_1 \cdot k_2$

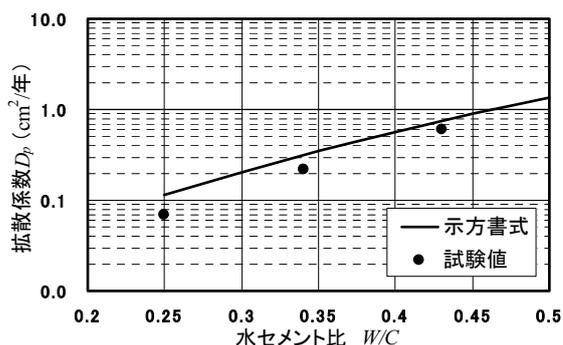


図-2 拡散係数の予測式と試験結果との関係

4. 実構造物における施工性の検討

4.1 高強度コンクリートの施工時における課題

高強度コンクリートをPC波形鋼板ウェブ箱桁橋に採用するにあたっての施工時の課題は、主に以下に示す3項目があると思われる。

- ①高強度コンクリートの配合および打設時の充填性
- ②表面仕上げ方法
- ③セメントの水和に伴うひび割れ

本研究においては、これらのうち「高強度コンクリートの配合および打設時の充填性」および「表面仕上げ方法」に着目して、実物大部分模型試験による検討を行った。

4.2 実物大部分模型試験

(1) 対象構造物

高強度コンクリートの施工性の検討を目的とした実物大部分模型試験は、図-3に示す実橋の横断面形状を参考とした。

(2) 試験体の形状

実物大部分模型試験の試験体は、桁高変化の影響が大きい下床版を対象とした。試験体の断面寸法は、図-3を参考に下床版厚を50cm、下床版幅を700cmとした。試験体の長さは、張出し架設工法が想定されることから、分割施工の最大施工長と想定される500cmとした。試験体の縦断勾配は、その値が大きいほどコンクリートの充填や表面仕上げが困難になると想定されるので、支点部付近の桁高変化部の最大勾配と想

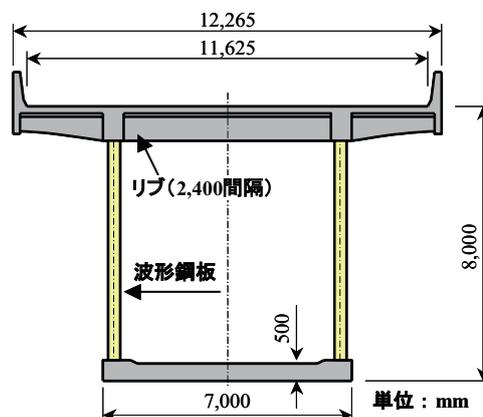


図-3 対象橋梁の横断面図

定される 15%とした。波形鋼板は、特に床版との接合部付近が最もコンクリートの充填に影響を与えると想定されるので、図-3 に示した実橋に採用されているアングルジベル接合方式を試験体に採用した。波形鋼板の高さについては、施工性にほとんど影響が無いものと想定し、50cmとした。

試験体は、コンクリートの設計基準強度を塩化物イオンの拡散係数に関する検討と同様に、 40N/mm^2 としたケース（N40）、 60N/mm^2 としたケース（N60）、 80N/mm^2 としたケース（N80）の3体とした。試験体の形状を図-4に示す。

（3）コンクリートの運搬および打込み方法

コンクリートは、製造工場からトラックアジテータ車にて運搬した。運搬時間は、運搬日時によってばらついたが、概ね 30 分程度となった。コンクリートの打込みは、実構造物ではポンプ車による施工がほとんどあるが、本試験においては、その施工数量が少ないことから、 0.5m^2 のバケットを用いた。締固めは、内部振動機（棒状バイブレーター）を用いた。コンクリートの練混ぜ打ち終わるまでの時間は、平均で 60 分程度であり、最大でも 1.5 時間以内となった。

（4）試験結果

コンクリートの充填性については、硬化後のはつりや打込み時の目視等により確認を行ったが、充填不良等の初期欠陥の発生は、確認されなかった。また、波形鋼板のフランジプレート下面にもコンクリートが適切に充填されていた。コンクリートの表面仕上げは、金ごてにより行ったが、勾配 15%でも、十分に表面仕上げが可能であった。また、下床版の表面にも有害なひび割れの発生は、確認されなかった。

したがって、設計基準強度 80N/mm^2 程度までの高強度コンクリートは、レディーミクストコンクリート製造工場で製造可能であり、PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋等への施工も可能であることが確認された。

ただし、実橋への適用にあたっては、事前施工性試験等により確認する必要があると思われる。

5. 結論

本研究により、第一に、電気泳動法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大幅に増大することが確認された。第二に、実物大部分模型試験の結果から、設計基準強度 80N/mm^2 までのコンクリートについては、コンクリートの充填および表面仕上げが可能であることが確認された。これらのことから、場所打ち工法によるPC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になると推察される。

参考文献

- 1) 酒井ほか: PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋への高強度コンクリートへの適用, プレストレストコンクリート, Vol.49, No.6, 2007, pp85-92
- 2) 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.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 [施工編], 2002.

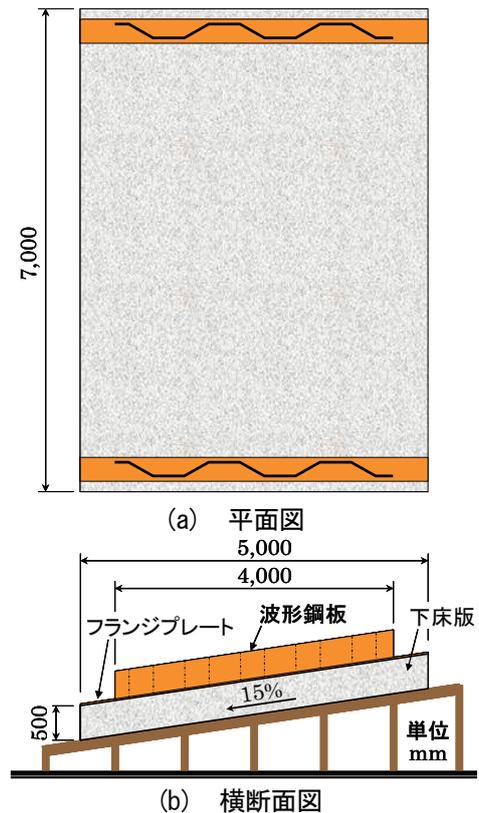


図-4 実物大部分模型試験体