

# PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋への 高強度コンクリートの適用

酒井 秀昭\*1・草野 成一\*2・竹沢 正文\*3

## 1. はじめに

近年、PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋が、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、すでに数十橋を超えており、とく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 40 N/mm<sup>2</sup> が多く採用されている。しかし、近年は、秋葉原公共デッキ<sup>1)</sup> などにおける設計基準強度が 100 N/mm<sup>2</sup> 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所打ち工法による 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し、その建設コストへの影響や耐久性に与える影響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がないのが現状である。

本論文は、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 ~ 80 N/mm<sup>2</sup> 程度）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、近年採用されつつある PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋に、高強度コンクリートを適用した場合の建設コストや耐久性に与える影響を検討することを目的としている。

### 2.2 研究の方法

本研究は、以下に述べる手法で行っている。

初めに既往の文献等から PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋の現状を調査し、従来の PC 箱桁橋と比較して、コンクリート重量等の低減効果を整理分析を行う。さらに、現在施工中のコンクリートの設計基準強度が 40 N/mm<sup>2</sup> の PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋を対象として、その強度を 60 N/mm<sup>2</sup> および 80 N/mm<sup>2</sup> 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する。

次に、架橋地点において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）」<sup>2)</sup> 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。

## 3. PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋について

### 3.1 PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋の概要

PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋は、コンクリートウェブを波形鋼板に置き換えることにより自重を低減できること、波形鋼板のアーコーディオン効果により効率的なプレストレスの導入が可能となること、鋼板を波形状に加工することにより鋼板が高いせん断座屈耐力を有していることなどの特徴を有している。さらに、コンクリートウェブの配筋、型枠、コンクリート施工などが省略できることから、現場施工の省力化および工期の短縮が可能となる。

### 3.2 自重の低減効果

PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋の自重の低減効果を把握するため、既往の文献<sup>3)</sup> を調査し、既存のコンクリートウェブの PC 箱桁橋との比較を行った。

調査は、PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋について、旧日本道路公団が施工した 2 車線以上の自動車専用道路のうち、張出し架設工法による 3 径間以上で最大径間長が 70 ~ 130 m 間の 14 橋梁を対象とした。PC 箱桁橋については、同様に 41 橋梁を対象とした。

対象橋梁の橋軸方向の主ケーブル配置は、いずれも外ケーブルのみか外ケーブルと内ケーブル併用方式であり、PC 箱桁橋においても、内ケーブルの配置からはウェブ厚は決定していない。

データの分析にあたっては、第一に、対象橋梁の最大径間長と橋面積あたりのコンクリート量との関係に着目して、図 - 1 に示すとおりグラフ化し、おのおのの橋種ごとに回帰式を求めた。第二に、橋梁本体の自重としては、波形鋼板の重量も無視できないので、対象橋梁の最大径間長と橋面積あたりのコンクリート重量に波形鋼板の重量を加算した重量（以下、「橋体重量」という）との関係に着目して、図 - 2 に示すとおりグラフ化し、おのおのの橋種ごとに回帰式を求めた。

\*1 Hideaki SAKAI : 中日本高速道路(株) 横浜支社 技術検査部 博士 (工学)

\*2 Seiichi KUSANO : 中日本高速道路(株) 横浜支社 技術検査部 工修

\*3 Masafumi TAKEZAWA : 中日本高速道路(株) 横浜支社 技術検査部

図-2 に示したデータにはばらつきがあるものの、最大径間長と橋体重量との回帰式は、式 (1), (2) のとおりとなった。

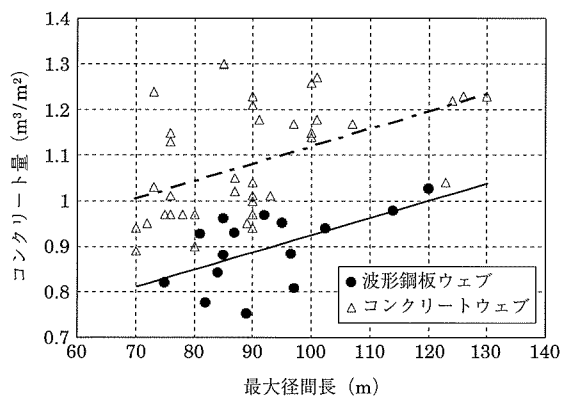


図-1 最大径間長とコンクリート量

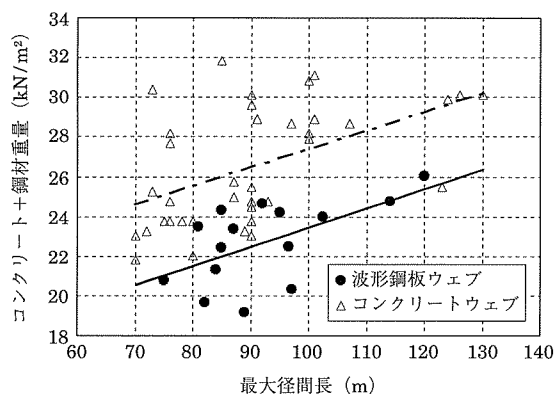


図-2 最大径間長と橋体重量

$$W_{cw} = 0.0941 \cdot I_{max} + 18.0 \quad (1)$$

$$W_{sw} = 0.0964 \cdot I_{max} + 13.8 \quad (2)$$

ここで、 $W_{cw}$  : PC 箱桁橋の橋面積あたりの橋体重量 (kN/m<sup>2</sup>)

$W_{sw}$  : PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋の橋面積あたりの橋体重量 (kN/m<sup>2</sup>)

$I_{max}$  : 最大径間長 (m)

式 (1) から、最大径間長 70 m および 130 m の PC 箱桁橋の橋面積あたりの橋体重量を算定すると、それぞれ 24.6 kN/m<sup>2</sup>, 30.2 kN/m<sup>2</sup> となる。同様に、式 (2) から、最大径間長 70 m および 130 m の PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋の橋面積あたりの橋体重量を算定すると、それぞれ 20.5 kN/m<sup>2</sup>, 26.3 kN/m<sup>2</sup> となる。

したがって、最大径間長 70 ~ 130 m の張出し架設工法による PC 橋においては、コンクリートウェブを波形鋼板に置き換えることにより、橋面積あたりの橋体重量を約 13 ~ 17 % 程度削減することができる。ただし、この値は、条件により相違することが予測されるが、傾向としては、波形鋼板ウェブによる橋体重量の削減効果は、比較的多いものと推察される。

#### 4. 高強度コンクリートによる PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋の橋体重量削減効果

第二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 N/mm<sup>2</sup> の PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋を対象として、その強度を 60 N/mm<sup>2</sup> および 80 N/mm<sup>2</sup> 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。

##### 4.1 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 92.5 m に対して側径間長 91.3 m 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-3 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：481.0 m

支 間：99.55 + 115.0 + 80.0 + 92.5 + 91.3 m

有効幅員：11.625 m

桁 高：中間支点部 8.0 m

径間中央部・端支点部 4.5 m

架設工法：張出し架設工法

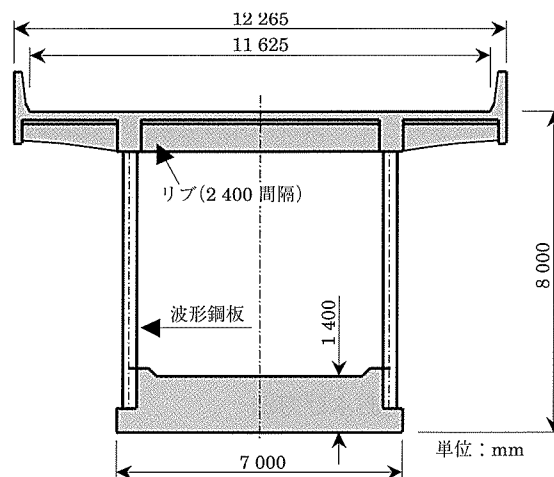


図-3 対象橋梁の横断面図 (第 4 支点部)

##### 4.2 試算の条件

試算にあたっては、コンクリート応力度の制限値を道路橋示方書<sup>4)</sup> (以下、「道示」という) とコンクリート標準示方書<sup>5)</sup> (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。

##### (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 40 N/mm<sup>2</sup> および 60 N/mm<sup>2</sup> 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。架設時においては、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 80 N/mm<sup>2</sup> の制限値については、道示に規定がないため、60 N/mm<sup>2</sup> 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。

表 - 1 曲げ圧縮応力度の制限値 (N/mm<sup>2</sup>)

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	プレストレッシング直後	永久荷重作用時	プレストレッシング直後
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 <sup>2</sup> )		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

(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 40 N/mm<sup>2</sup>, 60 N/mm<sup>2</sup> および 80 N/mm<sup>2</sup> の曲げ圧縮応力度の制限値については、永久荷重作用時、プレストレッシング直後に区分して、示方書による制限値を用いた。架設時の曲げ圧縮応力度の制限値は、各架設ステップに応じて、プレストレッシング直後の制限値の考え方と同様に、検討時点の圧縮応力度の特性値の 0.6 倍を用いた。試算に用いた曲げ圧縮応力度の制限値を表 - 1 に示す。

(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 40 N/mm<sup>2</sup> 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とし、60 N/mm<sup>2</sup> および 80 N/mm<sup>2</sup> 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、個別に必要断面形状および PC 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している。このため、設計基準強度を 40 N/mm<sup>2</sup> から 80 N/mm<sup>2</sup> に増加させても、本対象橋梁においては、部材厚を減少することができないため、本試算ケースにおいては、上床版のコンクリート設計基準強度をすべて 40 N/mm<sup>2</sup> にした。ただし、中間支付近で引張部材となる上床版においては、設計基準強度の増加に伴い、曲げ引張強度の制

限値も増加するため、PC 鋼材量は減少する可能性がある。試算ケースの一覧表を表 - 2 に示す。

4.3 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 22 cm 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 10 cm として、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 PC 鋼材量の算定結果を表 - 3 に、ケース D-80 (設計基準強度 80 N/mm<sup>2</sup>, 道示適用) の第 4 支点部の試算結果による横断面図を図 - 4 に示す。

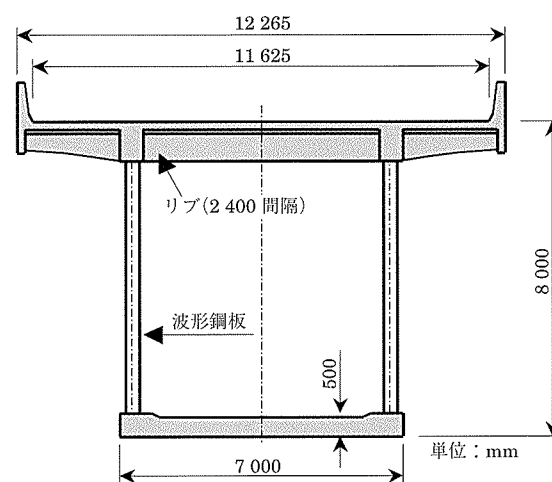


図 - 4 ケース D-80 試算結果 (80 N/mm<sup>2</sup>, 道示適用)

表 - 3 からわかるように、基本ケース (設計基準強度 40 N/mm<sup>2</sup>, 道示適用) において、下床版厚が最大の 140 cm となる第 4 支点では、設計基準強度が 60 N/mm<sup>2</sup> であるケース D-60 (道示適用) において 90 cm, 80 N/mm<sup>2</sup> であるケース D-80 において 50 cm 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、適用規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 140 cm 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 120 cm となる。同様に、設計基準強度が 60 N/mm<sup>2</sup> の

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	下床版厚 (cm)									コンクリート		橋軸方向 PC 鋼材	
	第 1 径間	第 1 支点	第 2 径間	第 2 支点	第 3 径間	第 3 支点	第 4 径間	第 4 支点	第 5 径間	下床版 体積 (m <sup>3</sup> )	基本との 比率	鋼材量 (t)	基本との 比率
(径間長)	99.55 m		115.0 m		80.0 m		92.5 m		91.3 m				
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

場合は、90 cm（道示）から 60 cm（示方書）に、設計基準強度が 80 N/mm<sup>2</sup> の場合は、50 cm（道示）から 30 cm（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 %、プレストレッシング直後において検討時点の圧縮応力度の特性値の 60 % まで許容しており、本検討の架設時においても検討時点の圧縮応力度の特性値の 60 % まで許容したのに対して、道示においては、設計基準強度 60 N/mm<sup>2</sup> 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 37 %、架設時で 37.5 % 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 60 N/mm<sup>2</sup> であるケース D-60 において 76 %、80 N/mm<sup>2</sup> 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 60 N/mm<sup>2</sup> であるケース D-60 において 92 %、80 N/mm<sup>2</sup> 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。

4.4 まとめ

本試算結果より、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、40 N/mm<sup>2</sup> から 80 N/mm<sup>2</sup> 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ため、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。

4.5 高強度コンクリート製造における課題

張出し架設工法による PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋は、場所打ち工法により施工が行われているため、高強度コンクリートの施工にあたっては、架橋地点でレディーミクストコンクリートを調達する必要がある。したがって、高強度

コンクリートを使用した PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋を具現化するためには、架橋地点近傍の工場で製造するレディーミクストコンクリートの高強度化が必要となるが、一般の工場においては、50 N/mm<sup>2</sup> 程度までのコンクリートの出荷実績がほとんどである。近年、中層から高層の建築物においては、大都市近傍において、50 N/mm<sup>2</sup> を超える使用実績があるが、本構造形式の橋梁を採用する箇所は、山岳地がほとんどであり、周辺の工場での高強度コンクリートの出荷実績は皆無に等しい。したがって、実際の工場での高強度コンクリートの製造の可否について検討する必要がある。

5. 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

5.1 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 40 N/mm<sup>2</sup> としたケース（以下、「N 40」という）、高強度化を想定して 60 N/mm<sup>2</sup> としたケース（以下、「N 60」という）、80 N/mm<sup>2</sup> としたケース（以下、「N 80」という）の 3 ケースで、配合試験および強度試験を行った。

(1) 配合条件および示方配合

配合試験にあたって、使用する骨材は、第二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。今回の配合試験に使用した材料を、表 - 4 に示す。

表 - 4 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	S 社	3.15	
細骨材	粗砂	神奈川県藤野市	2.60	
	細砂	千葉県市原市	2.58	
粗骨材	碎石 (Gmax = 20 mm)	神奈川県相模原市	2.64	
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸	高強度用	B 社	1.041
	エーテル系化合物	超高強度用	B 社	1.067
AE 剤	変性ロジン酸化合物系 陰イオン界面活性剤	B 社	—	

配合設計にあたっては、各々のケースの目標強度を表 - 5 に示すとおりとした。また、目標スランプについては、

表 - 5 試験対象コンクリートの配合条件および示方配合コンクリートの強度試験結果

配合種別	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	目標強度 (N/mm <sup>2</sup> )	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 <sup>3</sup> )				高性能 AE 減水剤		AE 剤 (g/m <sup>3</sup> )	
							水	セメント	細骨材		粗骨材	種類		添加量 (kg/m <sup>3</sup> )
									S 1	S 2				
N 40	40	50	43.0	20 ± 2.5	4 ± 1	49.0	170	395	633	211	895	高強度用	4.345	8
N 60	60	75	34.0			48.2	170	500	590	197	863	高強度用	5.000	8
N 80	80	100	25.0			46.7	170	680	521	174	808	超高強度用	6.120	14

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 ± 2.5 cm とした。配合試験による示方配合を表 - 5 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。練混ぜの状況は、設計基準強度が大きいほど練混ぜ時間が増大したが、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 80 N/mm<sup>2</sup> 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。

(2) コンクリートの強度

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 「コンクリートの圧縮強度試験方法」)、材齢 28 日における引張強度試験 (JIS A 1113 「コンクリートの割裂引張強度試験方法」) および曲げ強度試験 (JIS A 1106 「コンクリートの曲げ強度試験方法」) を行った。コンクリートの強度試験の結果を表 - 6 に示す。

表 - 6 コンクリートの強度試験結果

配合種別	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> ) ①	引張強度の計算値 (N/mm <sup>2</sup> ) ②	①/②
	3 日	7 日	28 日	28 日	28 日		
N 40	36.9	46.6	59.4	6.84	3.66	2.98	1.23
N 60	50.6	66.6	80.0	8.75	4.54	3.78	1.20
N 80	67.7	85.1	97.6	11.3	5.62	4.45	1.26

試験結果から、圧縮強度については、おおむ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。また、張出し架設工法においては、工期短縮の必要性から、PC 鋼材の緊張に必要なコンクリート強度 (一般に、30 N/mm<sup>2</sup> 程度以上) に達した時点で速やかに PC 鋼材の緊張 (材齢 3 日程度) を行う必要があるが、本試験における結果からは、材齢 3 日強度がすべて 30 N/mm<sup>2</sup> 以上となっている。試験ケースごとの試験材齢と圧縮強度との関係を図 - 5 に、セメント水比と圧縮強度との関係を図 - 6 に示す。

コンクリートの引張強度の特性値  $f_{tk}$  は、示方書<sup>3)</sup>によれば、式 (3) に示す圧縮強度の特性値  $f_{ck}$  から算定される。

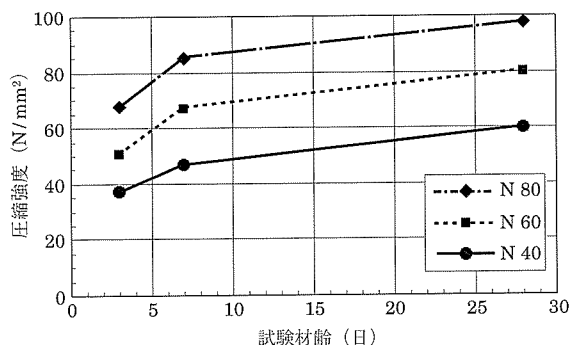


図 - 5 コンクリートの材齢と圧縮強度

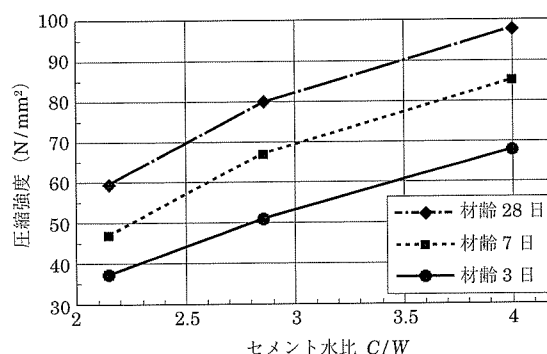


図 - 6 コンクリートのセメント水比と圧縮強度

$$f_{tk} = 0.23 f_{ck}^{2/3} \quad (3)$$

式 (3) を用いて、材齢 28 日の圧縮強度の試験値から引張強度を算定すると、表 - 6 に示す値 (引張強度の計算値) となる。試験ケースごとの引張強度は、引張強度の計算値の 1.20 ~ 1.26 倍となっており、今回の試験の対象となった圧縮強度の範囲においては、圧縮強度が増加しても式 (3) が適用可能なものと推察される。

5.2 塩化物イオンの拡散係数

示方書<sup>6)</sup>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、次式に示すフィックの拡散方程式の解 (示方書<sup>6)</sup> 式 (2.3.2)) 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。

$$C_d = g_{cl} \cdot C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1 \cdot c}{\sqrt{D_d} \cdot t} \right) \right)$$

ここで、 $C_d$  : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値

$\gamma_{cl}$  :  $C_d$  のばらつきを考慮した安全係数

$C_0$  : コンクリート位置における想定塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$c$  : かぶりの期待値 (mm)

$D_d$  : 塩化物イオンに対する設計拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年)

$t$  : 塩化物イオンの侵入に対する耐用年数 (年)

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」<sup>2)</sup>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)」<sup>2)</sup> (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<sup>2)</sup>ため、本試験においては、比較的短期間で可能な「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)』<sup>2)</sup> (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、直接に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<sup>2)</sup> 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

電気泳動法では、標準養生において材齢 28 日後の試験体を用いた。電気泳動法による実効拡散係数  $D_e$  を求めた結果を、表 - 7 に示す。

表 - 7 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 <sup>2</sup> )	圧縮強度の試験値 (N/mm <sup>2</sup> )	水セメント比 W/C (%)	実効拡散係数 $D_e$ (cm <sup>2</sup> /年)	見掛けの拡散係数 $D_{ac}$ (cm <sup>2</sup> /年)
N 40	40	59.4	43.0	1.84	0.601
N 60	60	80.0	34.0	0.859	0.219
N 80	80	97.6	25.0	—	—

試験においては、試験ケース N 40 で試験開始後 7 日以降に、試験ケース N 60 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 N 80 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 N 60 の 1/10 以下程度しか増加せず、定常化に至らなかった。

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 N 60 は、N 40 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<sup>1)</sup>。

$$D_{ac} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e \quad (4)$$

ここで、 $D_{ac}$  : 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 (cm<sup>2</sup>/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 (4) 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 ( $D_{ac} / D_e$ ) 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<sup>2)</sup> から、図 - 7 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。

$$k_1 \cdot k_2 = 5.7685 \cdot (W/C)^2 - 3.6465 \cdot W/C + 0.828 \quad (5)$$

式 (5) により、換算係数  $k_1 \cdot k_2$  を求めて、式 (4) から、

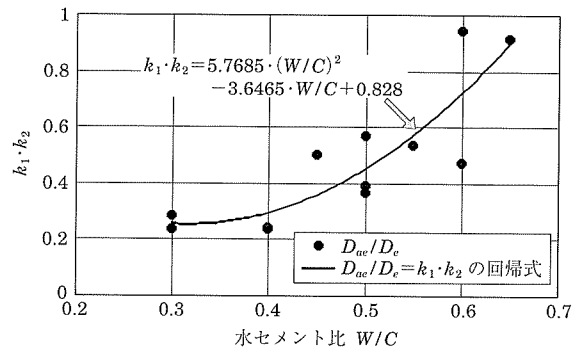


図 - 7 水セメント比と  $k_1 \cdot k_2$

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  $D_{ac}$  を算定すると表 - 7 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 N 60 は、N 40 に比べて見掛けの拡散係数  $D_{ac}$  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  $D_{ac}$  が減少することが確認された。

示方書<sup>6)</sup> によるコンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値  $D_d$  は、実構造物の調査あるいは暴露実験から得られたコンクリート中の塩化物イオン量分布に基づいて求められるものである<sup>6)</sup> ので、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  $D_{ac}$  とは、必然的にやや異なる値となるが、 $D_{ac}$  と実構造物の塩化物イオン量分布から求められた見掛けの拡散係数とを比較した文献<sup>7)</sup> によれば、 $D_{ac}$  の値は、示方書の照査に使用する見掛けの拡散係数として十分に利用できる可能性があると考えられている。

(3) 拡散係数の予測値

示方書<sup>6)</sup> 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。

$$\log D_p = -3.9 \cdot (W/C)^2 + 7.2 \cdot (W/C) - 2.5 \quad (6)$$

式 (6) 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  $D_{ac}$  とを比較すると、図 - 8 のとおりとなる。

今回の試験から算定された  $D_{ac}$  は、 $D_p$  と比較すると少し

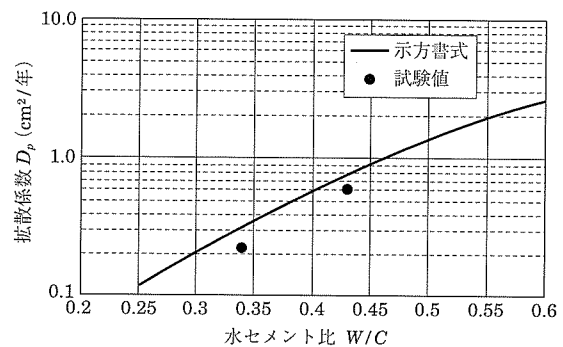


図 - 8 拡散係数の予測式と試験結果との関係

小さな数値となるが、その傾向はおおむ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、断定することはきわめて困難ではあるが、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(6)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60 N/mm<sup>2</sup>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ものと思われる。

### 5.3 ま と め

今回の試験結果から、第二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、設計基準強度80 N/mm<sup>2</sup>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。

## 6. 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、過去の施工事例の調査から、最大径間長70～130 mの張出し架設工法によるPC橋においては、PC波形鋼板ウェブ箱桁橋を採用することにより、橋面積あたりの橋体重量を約13～17%程度削減することが可能となる。

第二に、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、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。最大径間長115 mの橋梁の試算結果からは、コンクリートの設計基準強度を40 N/mm<sup>2</sup>から60 N/mm<sup>2</sup>および80 N/mm<sup>2</sup>に変更することにより、道示のコンクリート応力度の制限値を用いた場合に、下床版のコンクリート体積を76%および61%に、橋軸方向PC鋼材量を92%および88%に削減することが可能となる。

第三に、第二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80 N/mm<sup>2</sup>までのコンクリートについては、製造可能である。ただし、セメント量が増大するとともに水セメント比が低下するため、水和熱や自己収縮に起因するひび割れの抑制方策について検討するとともに、試験施工により、その施工性について確認することが望ましい。

第四に、「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。また、水セメント比が低下することから、中性化速度も低下すると推察される。

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80 N/mm<sup>2</sup>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。ただし、対象橋梁の規模等により、軽量化の程度は相違するため、その採用にあたっては十分な検討が必要となる。

## 7. 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60 N/mm<sup>2</sup>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。

また、セメント量が多くなるため水和熱が増大すること、水セメント比が小さくなるため自己収縮が増大することなどから、コンクリート部材にひび割れが発生する可能性が増大するおそれがある。したがって、高強度コンクリートを実橋に適用するにあたっては、断熱温度上昇量や自己収縮量などの試験を行うとともに、解析等により、その影響を把握することが望ましい。

PC波形鋼板ウェブ箱桁橋においては、波形鋼板の耐久性や補修補強費等も、ライフサイクルコストの算定のうえでは重要となる。本形式の採用事例が多い高速道路会社においては、波形鋼板の桁外面には、ポリウレタン樹脂塗料またはフッ素樹脂塗料を、桁内面には変性エポキシ樹脂塗料を用いることとし、波形鋼板の耐久性の向上を図っている。また、波形鋼板と床版との接合部の界面には、エポキシ樹脂等の防錆剤を塗布している。ただし、これらの防錆対策については、年数があまり経過しておらず、補修補強等の事例もないことから、ライフサイクルコストとして評価することは困難である。したがって今後は、波形鋼板部の耐久性等の評価や補修補強費等の検討を行うことも重要である。

## 8. おわりに

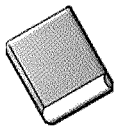
場所打ち工法による高速道路のPC橋においては、従来は、そのほとんどが設計基準強度40 N/mm<sup>2</sup>までのコンクリートを採用している。しかし、PC波形鋼板ウェブ箱桁橋は、前述のとおり、高強度コンクリートを主として圧縮部材となる下床版に採用すればその効果は大きいと思われる。また、耐久性も向上するため、ライフサイクルコストが削減されるものと期待される。

したがって、今後は、PC波形鋼板ウェブ箱桁橋への高強度コンクリートの採用を積極的に検討する必要がある。

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。また、骨材を提供していただいた神奈川県生コンクリート工業組合に感謝いたします。

参考文献

- 1) 岡本ほか：低収縮型超高強度コンクリートのPC橋への適用，プレ  
ストレストコンクリート，Vol.48，No.1，2006，pp28-33
- 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  
と標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) 高速道路技術センター：波形鋼板ウェブを用いたPC橋設計施工ガ  
イドライン（案），2005
- 4) 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
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]，2002  
【2007年4月25日受付】



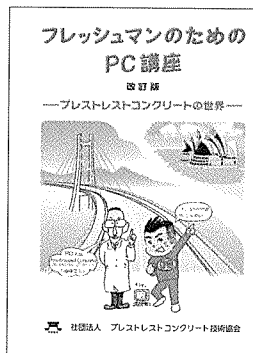
新刊図書案内

## フレッシュマンのためのPC講座・改訂版

— プレストレストコンクリートの世界 —

大変ご好評をいただいております「フレッシュマンのためのPC講座」も平成9年に第一版が発刊されてから約10年が経過いたしました。

その間に、基準値・規格値をはじめとした技術基準が従来単位系からSI単位系に移行しました。また、プレストレストコンクリート構造物においても、複合構造等の新しい構造物が誕生しています。そこで、これらの項目を新しく見直して、改訂版を発刊することにいたしました。これからの技術者を育てるためには、大変有意義な図書であると確信しておりますので、是非有効利用されることをお勧めいたします。



主な改訂項目

- ・従来単位系からSI単位系に変更しました。
- ・PCを利用した構造物の紹介に、最近の新しい構造物を盛り込みました。

発刊日：2007年3月

頒布価格：会員 3,000円（非会員 3,600円）郵送代 400円/冊

体裁：A4判，140頁

申込先：(社)プレストレストコンクリート技術協会