

高性能材料を使用した PC 箱桁橋の開発

— 高強度材料とプレテンウェブのシナジー効果 —

酒井 秀昭 *1・春日 昭夫 *2

1. まえがき

道路等の社会資本の整備を取り巻く環境は、年々厳しさを増している。とくに最近では、石油や鉄鋼等の材料の高騰等により、そのコストも増大している。しかしながら、持続可能な社会を形成するためには、道路等の社会資本の整備やその適切な維持管理がきわめて重要である。このようななかで、土木技術者の果たすべき役割としては、現状の社会や経済の状況を前提として、持続可能な発展 (sustainable development) を推進することではないかと思われる。

本研究においては、持続可能な発展を推進するため、最近の技術開発の成果等をもとに、初期建設コストや維持管理費も含めたライフサイクルコスト (LCC) の削減および省資源化・省力化・工期の短縮が可能な PC 箱桁橋の開発に関する検討を行った。

2. 研究の目的および方法

2.1 研究の目的

本研究は、高性能材料としての高強度コンクリートと高強度 PC 鋼材を使用し、PC プレキャストプレテンションウェブ (プレテンウェブ) を採用する PC 箱桁橋を対象として、その建設コストや耐久性および安全性等について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。

第一に、現場打ちのレディーミクストコンクリートを使用する場合のコンクリートの高強度化の可否やその耐久性および施工性について、既往の研究成果等から検討を行う。

第二に、最近開発され JIS G 3536 に規定する PC 鋼より線 SWPR7B の引張荷重の規格値より 20 % 程度高強度となる PC 鋼材の安全性等について、既往の試験結果等から検討を行う。

第三に、高強度コンクリートと高強度 PC 鋼材を使用し、プレテンウェブを採用する PC 箱桁橋の建設コスト等について検討を行う。

3. 高強度コンクリート

3.1 研究の対象

PC 橋のコンクリートの設計基準強度は、現場打ちのレディーミクストコンクリートを使用する場合は、一般的に支保工施工において 36 N/mm²、張出し架設工法において 40

N/mm²の強度が多く採用されてきた。しかし、近年は、秋葉原公共デッキリなどの設計基準強度が 100 N/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。

現場打ちコンクリートを使用する PC 橋においては、架橋地点近傍の製造工場でコンクリートを製造し現場で施工すること、対象橋梁のコンクリート仕上げ面は縦断勾配および横断勾配等により勾配がついていること等を考慮して、コンクリートの配合設計を行う必要がある。本研究においては、これらの点を考慮して、現場打ちのレディーミクストコンクリートでコンクリートの表面仕上げが 10 % 程度の勾配でも可能な設計基準強度が 80 N/mm²までコンクリートを対象として検討を行った。

ただし、レディーミクストコンクリートとしては、100 N/mm²を超える強度のコンクリートも製造可能であるが、この場合は施工性等から高流動コンクリートとせざるを得ないケースがほとんどであると想定される。本研究においては、前述のとおり勾配がある表面仕上げとする必要があるため、80 N/mm²までのコンクリートを対象とした。

3.2 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、設計基準強度を従来の張出し架設工法による PC 箱桁橋と同様な 40 N/mm²としたケース (N 40)、高強度化を想定して 60 N/mm²としたケース (N 60)、80 N/mm²としたケース (N 80) の 3 ケースで、配合試験および強度試験を行った²⁾。

(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、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。使用セメントは、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。

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	砕石 (G _{max} = 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	N 社	1.041
	エーテル系化合物	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	—

*1 Hideaki SAKAI : 中日本高速道路 (株)

*2 Akio KASUGA : 三井住友建設 (株)

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 (%)	目標スランブ (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)
									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

配合設計にあたっては、おのおののケースの目標強度を表 - 2 に示すとおりとした。また、目標スランブについては、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 ± 2.5 cm とした。配合試験による示方配合を表 - 2 に示す。配合試験の結果、設計基準強度が大きいほど練混ぜ時間が増大したが、目標スランブ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/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。

(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、材齢 28 日における引張強度試験および曲げ強度試験を行った。コンクリートの強度試験の結果を表 - 3 に示す。

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、水セメント比の調整を行い、配合を決定する必要がある。

表 - 3 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
N 40	36.9	46.6	59.4	6.84	3.66
N 60	50.6	66.6	80.0	8.75	4.54
N 80	67.7	85.1	97.6	11.3	5.62

3.3 コンクリートの耐久性

コンクリート標準示方書³⁾によれば、コンクリート構造物の耐久性に関する照査としては、塩害および中性化による鋼材腐食、凍害、化学的浸食によるコンクリートの劣化に対して行うこととなっている。本研究においては、これらの照査項目のうち塩害による鋼材腐食に着目して、高強度コンクリートの耐久性の検討を行った。

塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査においては、コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数（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）（JSCE-G572-2003）」⁴⁾（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⁴⁾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）」⁴⁾（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。ただし、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⁴⁾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。

電気泳動法による試験においては、表 - 2 に示した配合種別および配合で試験体を作製し、標準養生において材齢 28 日後に試験を行った²⁾。見掛けの拡散係数は、電気泳動法による実効拡散係数を用いて変換して評価した²⁾。電気泳動法による実効拡散係数とそれを変換して評価した見掛けの拡散係数を表 - 4 に示す。

表 - 4 から分かるように、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 80 は、N 40 に比べて見掛けの拡散係数 D_{ac} が 12 % 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} が大幅に減少することが確認された。したがって、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推察される。

表 - 4 塩化物イオンに対する拡散係数

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_{ac} (cm ² /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	0.272	0.0693

3.4 施工性

(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 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てん性
- 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てん性」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。

(2) 実物大部分模型試験

実物大部分模型試験は、図-1に示す現在施工中のPC波形鋼板ウェブ箱桁橋の横断面形状を参考に、高強度コンクリートの採用による重量削減効果が大きい下床版を対象として試験体の形状を決定した。

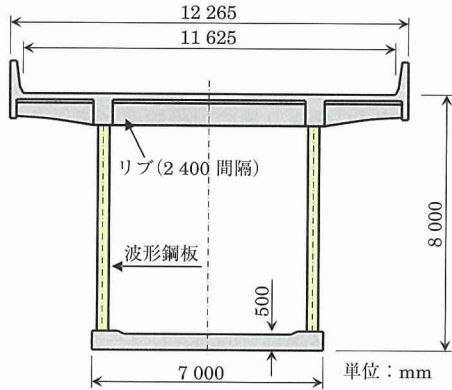


図-1 PC 波形鋼板ウェブ箱桁橋の横断面図例

試験体の断面寸法は、図-1を参考に下床版厚を50 cm、下床版幅を700 cm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500 cm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てん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定される15%とした。波形鋼板は、とくに床版との接合部付近がもっともコンクリートの充てんに影響を与えると想定されるので、図-1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、50 cmとした。試験体は、コンクリートの設計基準強度を高強度コンクリートの配合試験と同様に、40 N/mm²としたケース(N40)、高強度化を想定して60 N/mm²としたケース(N60)、80 N/mm²としたケース(N80)の3体とした。試験体の形状を図-2に示す。

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、0.5 m³のバケツを用いた。締固めは、内部振動機(棒状バイブレーター)を用いた。

コンクリートの配合は、表-2に示した高強度コンクリートの配合試験の結果と同様な配合とした。

(3) 試験結果

本試験では、コンクリートの強度に影響されず、通常どおりの金ごてによる表面仕上げが可能となった。硬化後のコンクリートのはつり等による充てん状況の確認においても、充てん不良等の初期欠陥の発生は、確認されなかった。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80 N/mm²程度までの高強度コンクリートは、波形鋼板ウェブへの適用が十分に可能であると推察される。ただし、コンクリートの配合は、地域性や当該橋梁の施工条件により相違するので、実橋への適用にあたっては、コンクリートの施工性について、

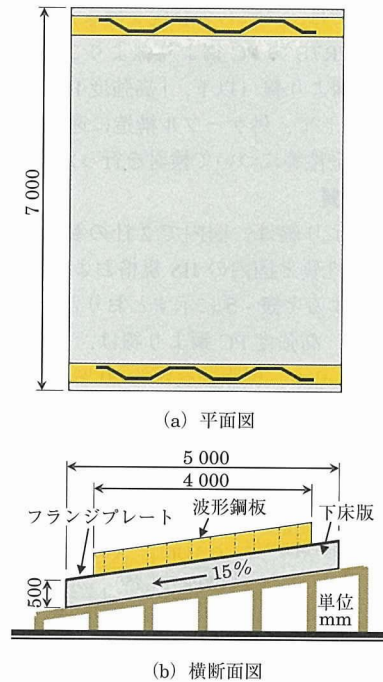


図-2 実物大部分模型試験体

当該橋梁で採用されるコンクリートによる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。

3.5 まとめ

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、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/mm²までのコンクリートについては、製造可能である。

第二に、「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。

第三に、実物大部分模型試験の結果から、設計基準強度80 N/mm²までのコンクリートについては、コンクリートの充てんおよび表面仕上げが可能である。

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橋においては、設計基準強度80 N/mm²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²⁾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。

4. 高強度 PC 鋼より線

4.1 研究の対象

PC橋の外ケーブル構造および内ケーブル構造に使用されるPC鋼材としては、JIS G 3536に規定するPC鋼より線が広く用いられている。外ケーブル構造のPC鋼材については、SWPR7BのPC鋼より線をマルチストランドとして使用しているケースが多くなっている。現在、わが国においては、一部のメーカーにおいて、引張強度がこの規格値より20%程度高強度となるPC鋼より線が開発されている。

本研究においては、これらの状況を踏まえて、JIS G 3536 に規定する SWPR7B の PC 鋼より線より 20 % 程度引張強度が大きい PC 鋼より線（以下、「高強度 PC 鋼より線」とする。）を対象として、外ケーブル構造に適用した場合の材料規格および安全性等について検討を行った。

4.2 機械的性質

高強度 PC 鋼より線は、国内で 2 社の製造実績があり、その主な機械的性質と国内の JIS 規格および海外の代表的な規格とを比較すると表 - 5 に示すとおりとなる。表 - 5 から分かるように、高強度 PC 鋼より線は、従来の SWPR7B の PC 鋼より線よりも、引張強度が約 20 % 増大している。

表 - 5 高強度 PC 鋼より線の機械的性質

国名	高強度 PC 鋼より線		日本		アメリカ		イギリス		
			JIS	ASTM ^{※1}	BS ^{※2}				
規格番号			G 3536	A 416	BS 5896				
呼び			SWPR7B	250	270	standard	super		
直径 (mm)	15.2	15.7	15.2	15.2	15.24	15.2	15.7		
引張荷重 (kN)	314	335	261	240.2	260.7	232	265		
0.1 % 永久伸びに対する荷重 (kN)	-	-	-	-	-	197	225		
0.2 % 永久伸びに対する荷重 (kN)	267	285	222	-	-	-	-		

※1 ASTM : American Society for Testing and Materials

※2 BS : British Standards

4.3 高強度 PC 鋼より線の必要性能とその照査方法

高強度 PC 鋼より線を PC 橋の外ケーブルとして使用した場合は、機械的性質を除いた PC 鋼より線としての主な必要性能として、以下に示す項目が考えられる。

- ① 供用中に遅れ破壊による鋼材破断がないこと。
- ② 供用中に疲労破壊しないこと。
- ③ 偏向した場合の引張強度が確保されていること。

(1) 遅れ破壊に対する安全性

上記の項目のうち ① の遅れ破壊に対する安全性については、わが国ではその照査方法が規定されていないが、FIP の報告書にはその試験方法⁵⁾ および判定基準⁶⁾ が示されている。

試験方法としては、試験温度 50℃ で 0.8 Pu の引張力を与えたピアノ線を腐食溶液（20 % チオシアン酸アンモニウム水溶液）に浸せきして、ピアノ線の破断時間を計測するものである。試験の判定基準としては、最短破断時間が 1.5 時間以上で、50 % 破断確率が 4 時間以上の場合合格としている。

(2) 疲労に対する安全性

前述の ② の疲労破壊に対する安全性については、コンクリート標準示方書³⁾ において、「鋼材の疲労強度の特性値は、鋼材の種類、形状および寸法、継手の方法、作用応力の大きさと作用頻度、環境条件等を考慮して行った試験による疲労強度に基づいて定めるものとする。」と規定されているが、その具体的な試験方法や試験時の上限応力度や変動応力度等については定められていない。海外では、ISO 6934-4:1991 (Steel for the prestressing of concrete - Part 4 :

Strand) において、定着具と組み合わせない PC 鋼より線本体の疲労性能の確認方法が示されている。

これによれば、上限荷重 0.7 Pu (規格引張荷重の 70 %), 変動応力幅 195 N/mm² で繰り返し載荷試験を行い、繰り返し回数 200 万回で破壊しないことにより安全性の照査を行うこととしている。

(3) 偏向した鋼材の安全性

外ケーブル構造においては、偏向部において PC 鋼より線を偏向して使用するのが一般的であるので、前述の ③ に示した偏向した PC 鋼より線の引張強度が確保されているか照査する必要があるが、わが国においては具体的に規定されていない。FIP の報告書⁷⁾ においては、その試験方法および判定基準が示されている。

これによれば、20° 以上に偏向した PC 鋼より線に引張力を作用させ、その破断荷重の低下が 28 % 以下であることを確認することにより安全性の照査を行うこととしている。

4.4 外ケーブル構造の必要性能とその照査方法

高強度 PC 鋼より線を PC 橋の外ケーブルとして使用した場合は、定着部および偏向部の外ケーブル構造としての主な必要性能として、以下に示す項目が考えられる。

- ① 定着体は、所定の緊張力を保持し、かつ緊張材を定着するコンクリートに有害なひび割れおよび過度の変形等を生じさせない⁸⁾ こと。
- ② 偏向部は、緊張材を所定の角度に偏向し、かつ腹圧力などの荷重により偏向部および周辺部材に有害なひび割れおよび過度の変形等を生じさせないこと。
- ③ 供用中に疲労破壊しないこと。

(1) 定着部の安全性

定着部の安全性としては、第一に、定着具が定着される緊張材の規格引張荷重以下で破断したり、著しい変形を生じることのないような構造および強さを有するものでなければならない。第二に、所定の緊張力を保持できるものでなければならない。これらの照査方法としては、「PC 工法の定着具および接続具の性能確認試験方法」(JSCE-E 503-1999) により、定着具をコンクリートと組み合わせた試験において、定着体が緊張材の規格引張荷重の 100 % 以上に耐えること⁸⁾ により確認することができる。さらに、定着具の緊張材と組み合わせた試験において、付着のない状態での静的引張試験で、定着具の接続効率が緊張材の規格引張荷重の 95 % 以上であること⁸⁾ により確認することができる。

第三に、使用性および耐久性に関する照査として、定着部および周辺部材の応力度およびひび割れ幅の検討を行う必要がある。

(2) 偏向部の安全性

偏向部の安全性としては、使用性および耐久性に関する照査として、定着部および周辺部材の応力度およびひび割れ幅の検討を行う必要がある。また、断面破壊に対する照査としては、定着部および周辺部材が断面破壊の限界状態に至らないことを確認することにより行う。

(3) 疲労に対する安全性

外ケーブル構造の PC 鋼材の疲労破壊に対する安全性に

については、コンクリート標準示方書³⁾の解説文中において、「PC鋼材の疲労強度は、実際に使用するPC鋼材および定着具を用いた疲労試験によって定めるのを原則とする・・・(中略)・・・PC鋼材については、一般に母材よりも定着部のほうが疲労強度が小さくなる」と述べられているが、その具体的な試験方法や試験時の上限応力度や変動応力度等については定められていない。FIPの報告書⁹⁾においては、定着具と組み合わせたPC鋼より線の疲労性能の確認方法が示されている。

これによれば、上限荷重 0.65 Pu (規格引張荷重の 65%)、変動応力幅 80 N/mm² で繰り返し載荷試験を行い、繰り返し回数 200 万回で破壊しないことにより安全性の照査を行うこととしている。

4.5 高強度 PC 鋼より線の性能照査結果

前項で述べた高強度 PC 鋼より線およびそれを用いた外ケーブル構造の必要性能について、既往の試験結果等からその性能照査結果の調査を行った。調査方法は、国内で製造実績がある 2 社 (D 社および S 社) で行った試験結果等のヒヤリングおよび資料の提供による手法で行った。ただし、定着部の安全性のうち使用性および耐久性に関する照査と偏向部の安全性については、対象構造物ごとに照査すべき課題であるので本調査からは除外した。

外ケーブル構造の必要性能の照査結果の調査にあたっては、調査時点における実橋への適用事例が 1 橋のみであったので、当該橋梁における施工実績を有する PC 定着工法である D 社の外ケーブルシステムにおける試験結果を対象とした。

調査対象とした性能とその照査規準等を表 - 6 に示す。また、その調査結果について以下に述べる。

表 - 6 調査対象性能および照査規準

検討対象	必要性能	試験名	規 準
PC 鋼より線	遅れ破壊に対する安全性	遅れ破壊特性試験	FIP ^{5), 6)}
	疲労に対する安全性	疲労試験	ISO 6934-4
	偏向した鋼材の安全性	曲げ引張試験	FIP ⁷⁾
外ケーブル	定着部の安全性	定着具の圧縮試験	JSCE-E503
		定着具の性能試験	JSCE-E503
	疲労に対する安全性	疲労試験	FIP ⁹⁾

(1) 遅れ破壊に対する安全性 (PC 鋼より線)

高強度 PC 鋼より線の中心の素線を抽出し、12 本の試験体で、表 - 6 に示した規準で試験を行っている。試験結果から、2 社の製品とも FIP による判定基準⁶⁾を満足している。ただし、D 社においては、防錆方法が PC グラウト方式の場合の実環境下での安全性については 2010 年を目的に調査中であり、当面は水素脆性に起因する遅れ破壊の危険性を除去できるエポキシ樹脂被覆タイプに出荷を限定する計画であるとのヒヤリング結果となった。

(2) 疲労に対する安全性 (PC 鋼より線)

定着具と組み合わせない PC 鋼より線本体の疲労性能について、表 - 6 に示した規準で試験を行っている。試験結果から、2 社の製品とも ISO 6934-4 による判定基準を満足

している。

(3) 偏向した鋼材の安全性 (PC 鋼より線)

偏向した鋼材の安全性については、D 社において、表 - 6 に示した規準で試験を行っている。試験結果から FIP による判定基準⁷⁾を満足している。

(4) 定着部の安全性 (外ケーブル)

定着部の安全性については、表 - 6 に示した「PC 工法の定着具および接続具の性能確認試験方法」(JSCE-E503-1999)により試験を行っている。D 社の外ケーブルシステムにおける試験結果からは、19S15.7 の定着具を設計基準強度 36 N/mm² および 50 N/mm² のコンクリートと組み合わせた試験 (定着具の圧縮試験)において、定着体が緊張材の規格引張荷重の 100% 以上に耐えることを確認している。同様に 19S15.7 の定着具の緊張材と組み合わせた試験 (定着具の性能試験)において、付着のない状態での静的引張試験で、定着具の接続効率が緊張材の規格引張荷重の 95% 以上であることを確認している。

(5) 疲労に対する安全性 (外ケーブル)

外ケーブル構造としての疲労に対する安全性については、表 - 6 に示した規準で試験を行っている。D 社の外ケーブルシステムにおける試験結果からは、1 本の 15.7 mm の PC 鋼より線を外ケーブルシステムに用いられているウェッジで定着した状態で行った試験で、FIP による判定基準⁹⁾を満足している。また、マルチケーブルとしての疲労に対する安全性の照査を行うため、19S15.7 の定着具を用いて、曲げによる疲労強度の低下の影響を受ける可能性が高い最外縁に配置可能な 12 本の PC 鋼より線のうち 6 本を配置した状態で疲労試験を行い、その安全性を確認している。

4.6 ま と め

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、JIS G 3536 に規定する SWPR7B の PC 鋼より線より 20% 程度引張強度が大きい高強度 PC 鋼より線は、呼び名で 7 本より 15.2 mm と 15.7 mm の製品が現在のところ国内 2 社で製造可能であり、その機械的性質についても、十分に実用に供することが可能であるものと思料される。また、その使用実績は、すでに供用中の橋梁¹⁾が 1 橋あり、現在施工中の橋梁が 1 橋ある。

第二に、機械的性質を除いた PC 鋼より線としての主な必要性能については、わが国ではその照査方法が明確には規定されていない。このため、FIP の報告書や ISO の規準により照査した結果、「遅れ破壊に対する安全性」、「疲労に対する安全性」、「偏向した鋼材の安全性」について、高強度 PC 鋼より線は、十分にその必要性能を保持することが可能であるものと思料される。ただし、防錆方法が PC グラウトによる場合は、遅れ破壊に対する実環境下での安全性について調査中であるので、その結果が確認されるまでは、その採用にあたっては十分な検討が必要なものと思われる。また、遅れ破壊に対する当面の懸念を払拭するためには、エポキシ樹脂被覆タイプ等の水素の侵入を防止可能な防錆方法を採用する等の方法も考えられる。

第三に、高強度 PC 鋼より線を PC 橋の外ケーブルとして使用した場合の定着部および偏向部の外ケーブル構造とし

での主な必要性能のうち、プレストレストコンクリート工法設計施工指針⁸⁾に示されている定着部の必要性能については、施工済みの実績を有するPC定着工法であるD社の外ケーブルシステム(19S15.7)を対象として、JSCE-E503により行った試験結果により、その必要性能を保持していることを確認した。また、疲労に対する安全性については、FIPの報告書の手法により照査した結果により、その必要性能を保持していることを確認した。したがって、高強度PC鋼より線をPC橋の外ケーブルとして使用した場合においても、その必要性能を保持することが可能であるものと思料される。

これらのことから、高強度PC鋼より線をPC橋の外ケーブルとして使用した場合は、従来のPC鋼より線を用いた場合と同等な性能を保持することが可能なものと思料される。また、高強度PC鋼より線は、単位重量あたりの単価は増大するが使用量が減少するため、外ケーブル構造として採用する場合は、トータルコストは削減されるものと思料される。

5. 高性能材料を使用したプレテンウェブ箱桁橋

5.1 プレテンウェブ箱桁橋の概要

プレテンウェブ箱桁橋は、通常は場所打ち工法で施工されるコンクリートウェブを、図-3に示すようにプレテンション方式で高さ方向にプレストレスを導入したプレキャスト部材に置き換えて場所打ち床版と一体化した構造であり、高速道路橋等で採用^{10, 11)}されている。プレテンウェブは、高強度コンクリートを使用することおよびプレストレスを導入することから、通常のコンクリートウェブと比較して高いせん断耐力を有するので部材厚を低減することが可能となる。また、プレキャスト部材を使用することから、現場作業の省力化や工期の短縮を図ることが可能となる。

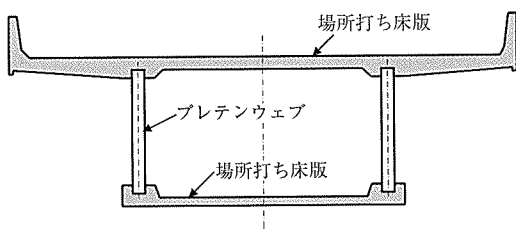


図-3 PCプレテンウェブ箱桁橋のイメージ

プレテンウェブと床版との接合は、プレテンウェブから突出した鉄筋を床版鉄筋と一体化する鉄筋継手構造が採用されている。

プレテンウェブ相互の橋軸方向の接合は、プレストレスおよび多段式せん断キーを用いている。ただし、マッチキャストによることが製作上困難なため、精度の高いモールドで個別に製作する手法が採用¹⁰⁾されている。

5.2 検討の対象

本検討においては、高強度材料とプレテンウェブを同時に採用することにより、個々の要素技術の効果を最大限に

生かして、ライフサイクルコストの削減や省資源化を図り、持続可能な発展(sustainable development)に貢献することを目的としている。これらの要素技術を採用可能な橋梁は種々想定されるが、本検討においては、施工の合理化や工期の短縮が可能で、都市内でも効率的なPC橋の採用が可能となる押し出し工法によるPC箱桁橋を対象として試算による検討を行った。検討対象橋梁の規模および形式を以下に示す。

- ① 形式 PC 5 径間連続プレテンウェブ箱桁橋
- ② 橋 長 5 @ 50.00 m = 250.00 m
- ③ 幅 員 10.30 m
- ④ 架設工法 押し出し架設

従来の場所打ち工法によるケースを図-4に、高性能材料とプレテンウェブを採用したケースの横断面図を図-5に示す。

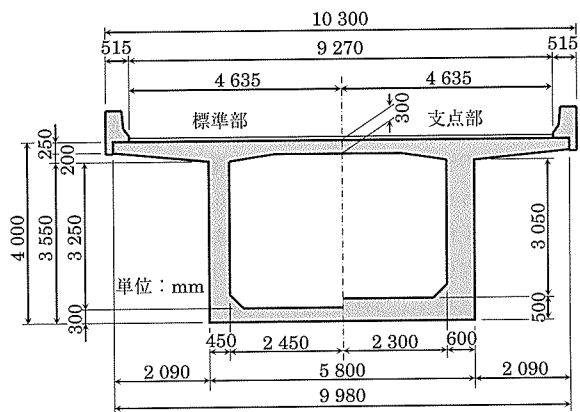


図-4 比較対象としたPC箱桁橋の横断面図

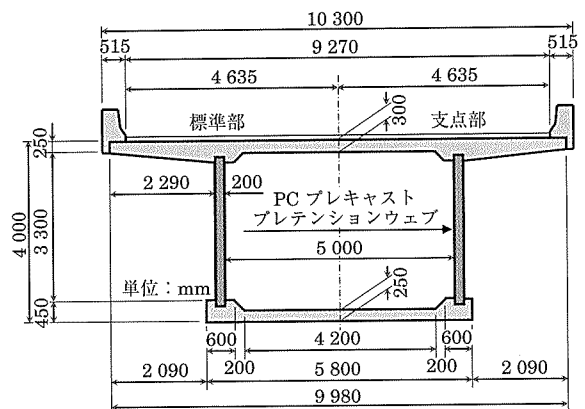


図-5 検討対象のPCプレテンウェブ箱桁橋の横断面図

図-4に示した従来工法においては、コンクリートの設計基準強度を40 N/mm²に、PC鋼材をSWPR7Bとして試算した。図-5に示した高性能材料とプレテンウェブを採用した検討工法においては、コンクリートの設計基準強度を上床版で40 N/mm²、下床版で60 N/mm²、プレテンウェブで70 N/mm²に、PC鋼材のうち押し出し施工時の1次鋼材をSWPR7Bとし、押し出し施工後の2次鋼材を表-5に示した

高強度 PC 鋼より線として試算した。また、工場でのプレテンウェブへのプレテンションを導入するための PC 鋼材としては、φ 17 (SBPR930 / 1080) の PC 鋼棒を使用した。なお、検討工法におけるコンクリート設計基準強度や使用 PC 鋼材の種別については、比較のため便宜的に決定したものである。実橋での検討を行う場合は、その経済性等について十分に検討を行う必要があるものと思料される。

5.3 検討結果

従来工法と検討工法とのコンクリートと PC 鋼材の数量比較を表 - 7 に示す。

検討結果から、高強度コンクリートとプレテンウェブを使用することにより、コンクリート量を従来工法より 19 % 低減することが可能となる。これによって、押出し施工時の死荷重の低減と高強度コンクリートの使用による許容値の増大により、押出し施工時の PC 鋼材が約 28 % 低減できる。また、ウェブがプレキャストであるために型枠設備が省略でき、1 ブロック (平均ブロック長約 15 m) の製作日数も 2 割程度削減できる。

次に、従来工法と検討工法との工事費比較を表 - 8 に示す。

検討結果から、高強度コンクリートとプレテンウェブを使用することにより、工事費を従来工法より 10 % 程度削減することが可能となる。工事費の構成比率から分かるように、検討工法においては、あらかじめ工場でのプレテンウェブを製作するため、現場における主桁製作設備の削減が可能となる。また、押出し施工時の死荷重の低減により押出

し架設の費用を大幅に削減することが可能となる。

6. 結 論

本研究により、国内ではその採用事例が比較的多くない押出し架設工法による PC 箱桁橋に、新技術としての高強度コンクリート、高強度 PC 鋼材およびプレテンウェブを採用することにより、工事費および現場工期の削減や耐久性が向上することが明らかになった。この結果から、都市部等の架設の制約等から鋼橋となっていた箇所においても、PC 上部工の採用が増大することが期待される。ただし、本研究で行った比較検討は、新技術の採用による効果の傾向を明らかにすることを目的として検討条件を設定したものである。実橋の設計においては、使用材料の設定や経済性等について十分な検討が必要となる。

7. あとがき

昭和から平成に替わり 20 年間になるが、その間に PC 橋においては、PRC 構造、エクストラドーズド橋、プレキャストセグメント工法、PC 波形鋼板ウェブ橋、複合トラス橋などが開発あるいは普及してきた。昨今は、経済情勢も非常に厳しくなっているが、今後も持続可能な発展 (sustainable development) に貢献するため、新たな技術開発や本研究のような種々の要素技術を組み合わせる努力が必要となっている。本研究が今後の技術開発の一助となれば幸いである。

参考文献

- 岡本裕昭, 一宮利通: 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, pp.28-33, 2006
- 酒井秀昭, 草野成一, 竹沢正文: PC 橋波形鋼板ウェブ箱桁橋への高強度コンクリートの適用, プレストレストコンクリート, Vol.49, No.6, pp.85-92, 2007
- 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編: 本編], 2007
- 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
- FIP: Report on prestressing steel: 5. Stress corrosion cracking resistance test for prestressing tendons, 1980
- FIP: Tendons, Technical report, 1995
- FIP: Deflected tensile test, Recommendation, 1996
- 土木学会: プレストレストコンクリート工法設計施工指針, コンクリートライブラリー 66, 1991
- FIP: Recommendations for the acceptance of post-tensioning systems, 1993
- 中須誠, 堤忠彦: プレテンションウェブ工法の実用化について, プレストレストコンクリート, Vol.49, No.2, pp 47-52, 2007
- 堀内達斗, 市岡隆興, 手塚教雄, 加藤伸雄: 中新田高架橋の設計・施工, 第 16 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.113-116, 2007

【2008 年 10 月 23 日受付】

表 - 7 従来工法と検討工法との主要数量比較

項	目	単位	従来①	検討②	②/①	備 考
コンクリート	場所打ち	40 N/mm ²	m ³	2 700	1 300	
		60 N/mm ²	m ³		560	下床版
	プレキャスト	70 N/mm ²	m ³		330	
	小 計	m ³	2 700	2 190	0.81	
PC 鋼材	1 次鋼材	1S28.6	t	82	59	0.72
	2 次鋼材	19S15.2	t	48		
	2 次鋼材	19S15.7	t		37	高強度鋼材
	ウェブ	φ 17	t		11	プレキャスト
	小 計	t	130	107	0.82	

表 - 8 従来工法と検討工法との工事費比較

項 目	従来	検討	備 考	
工事費	1.00	0.90	従来工法を 1.0 としたときの比	
構成比率	橋体工	58 %	74 %	コンクリート・PC 鋼材・鉄筋・プレテンウェブ
	主桁製作設備	15 %	12 %	型枠・クレーン・上屋等
	押出し架設	27 %	14 %	押出し架設設備および架設工
	計	100 %	100 %	