

報告 鋼・コンクリート合成構造を対象とした高強度コンクリートの適用性に関する検討

北野 勇一*1・堀池 一男*2・段下 義典*3・橋 吉宏*4

要旨: 鋼・コンクリート合成構造の橋梁においては設計基準強度 60N/mm²までのコンクリートの使用実績しがなく、これを超える高強度コンクリートの適用に際しては種々の確認が必要である。そこで、鋼・コンクリート合成構造を対象に、設計基準強度 80N/mm²程度の高強度コンクリートに関する各種検討を実施した。その結果、力学特性に関しては既往の設定方法を準用できることが確認された。一方、コンクリートの高強度化に伴い増大する水和熱や自己収縮ひずみと、これらの特性が鋼・コンクリート合成構造であることにより大きく影響される初期ひび割れ抵抗性については、試験等により事前確認を必要とする結果が得られた。

キーワード: 鋼・コンクリート合成構造, 高強度コンクリート, 初期ひび割れ抵抗性

1. はじめに

鋼・コンクリート合成構造は、鋼およびコンクリートの構造材によって断面が構成され、一体として挙動するとみなせる 1 種類の合成部材で作られた構造である¹⁾。橋梁分野においては、鋼橋あるいはコンクリート橋の単独構造とは異なる力学特性の創出により、橋梁の高性能化やコスト縮減に寄与する第三の橋梁形式として注目されている。また、その設計方法として性能照査型設計法を取り入れた基準も定められてきている²⁾。

今後、鋼・コンクリート合成構造の適用拡大やさらなる合理化を図るためには、コンクリート断面の縮小化や高張力鋼の利用などが有効である。また、補修分野では、たとえば鋼橋の床版取替え工法として鋼・コンクリート合成床版（以下、合成床版）を適用する際の社会的な要請として、急速施工性が求められる。これらに対応する技術として、高強度コンクリートの適用が期待されるものと考えられる。

一方、鋼・コンクリート合成構造の橋梁においては、設計基準強度 60N/mm²までのコンクリートの使用実績しがなく³⁾、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は種々の確認が必要となる。また、コンクリートの高強度化に伴い水和熱や自己収縮ひずみが増大するため、初期ひび割れが懸念される。このように、設計基準強度 60N/mm²を超えるような高強度コンクリートを実際の鋼・コンクリート合成構造橋に広く適用するのは難しい現状にある。

そこで、設計基準強度 80N/mm²程度の高強度コンクリートを主な対象とし、鋼・コンクリート合成構造の設計に際しての基礎情報を得るため各種検討を行った。

2. 検討概要

(1) 適用規準

鋼・コンクリート合成構造橋の既往規準には、高強度コンクリートに関する独自規定が今のところ記載されていない。そこで、プレストレストコンクリート技術協会より発刊されている「高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工規準」⁴⁾（以下、PC 規準）を準用できるかどうかについて検討を進めるものとした。

PC 規準は設計基準強度が 60~160N/mm²の高強度コンクリートを適用の範囲としている。また、試験や過去の実績等により材料特性、ひび割れ抵抗性、構造体強度、施工性が確認された高強度コンクリートを使用することを原則としている。図-1 は PC 規準における材料特性の設定方法を示したものである。これによれば、圧縮強度以外の諸物性についても、必要に応じ、試験を行って求めるものと規定されている。

また、材料特性は力学特性、体積変化特性、熱特性など広範にわたる。本稿では主に初期ひび割れ抵抗性に関する特性に着目し、検討を進めることにした。

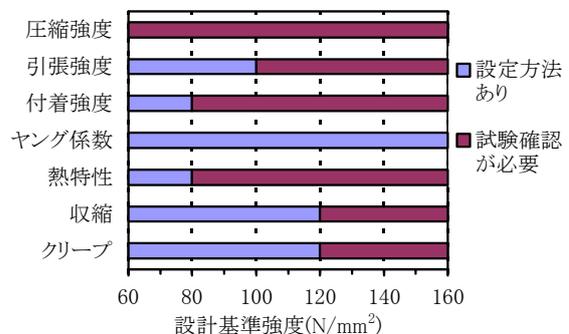


図-1 PC 規準における材料特性の設定方法

*1 川田建設 (株) 技術部技術課 (正会員)

*2 川田建設 (株) 東日本統括支店北関東事業所那須工場品質管理課

*3 川田工業 (株) 橋梁事業部保全技術室

*4 川田工業 (株) 橋梁事業部技術部東京技術部 (正会員)

表-1 コンクリート配合とそのフレッシュ性状

配合	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						フレッシュ性状試験結果				
			W	B		S	G	SP	スランプフロー (cm)	フロー時間(sec)		空気量 (%)	コンクリート温度(°C)
				C	HA					50cm	停止		
H100	20.0	41.2	155	620	155	610	908	10.1	57.5×56.0	16.6	67.8	1.3	19.0
H80	25.0	46.7	155	527	93	751	892	6.2	61.5×60.0	13.3	65.1	1.9	19.0
H50	34.7	45.0	168	487	0	729	926	4.9	18.5(スランプ ^o)	—	—	4.3	20.0

W/B=W/(C+HA)：水結合材比，s/a：細骨材率，W：水（比重 1.00），C：普通ポルトランドセメント（比重 3.15），HA：高強度混和材（比重 2.65），S：陸砂（硬質砂岩，比重 2.56），G：碎石 2005（比重 2.66），SP：ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤（比重 1.06）

(2) 使用コンクリート

使用コンクリートは表-1 に示す 3 配合とした。設計基準強度 80N/mm² 程度の配合 H80 を本検討の主な対象とし、設計基準強度 100N/mm² 程度の配合 H100 およびプレバウム合成桁⁵⁾にて製造実績のある設計基準強度 50 N/mm²（スランプ 18cm，空気量 4.5%）の配合 H50 を比較の対象とした。これらのコンクリートの製造は設計基準強度 120N/mm² までのプレキャスト建築部材の製作実績のある N 工場にて行った。また、配合 H80 と配合 H100 は次のように配合を決定した。

- ・ 水結合材比(W/B)はN工場の実績を勘案し、配合 H80 を W/B=25%，配合 H100 を W/B=20%とした。
- ・ 結合材(B)は普通ポルトランドセメントを基本とし、セメント重量の 20%（配合 H100）および 15%（配合 H80）を高強度混和材（以下、HA。JASS 5T-701 高強度コンクリート用セメントの品質基準（案）附属書 3：スラグせっこう系混和材の品質基準（案）に規定されるスラグせっこう系混和材と JIS A 6207 に規定されるシリカフェュームを予め 2 対 1 でプレミックスしたもの⁶⁾にて置換した。これは、コンクリートの施工性とレディーミクストコンクリート工場での製造性を考慮したものである。
- ・ 単位水量(W)は 155kg/m³とした。これは、高強度混和材を用いることで配合 H50 より単位水量を減じることができると考えたためである。
- ・ 骨材はアルカリシリカ反応性試験で無害と判定されたものを用い、粗骨材容積 335L/m³を確保した。
- ・ スランプフローは 60±7.5cm，空気量は 2.0±1.0%を目標とした。空気量は、PC 規準にて凍結融解試験による耐凍害性の確認を必要とする値とした。

(3) 試験方法

各配合の試験練りは温度 20±3°C，湿度 60%以上に保った試験室にて 2008 年 10 月 28 日に実施した。その結果、表-1 に示したように 3 配合とも所要のフレッシュ性状が得られた。また、配合 H80 に関しては構造体コンクリート強度や熱特性を確認するため、翌日 29 日に実機練りを行った。その結果は割愛するが、ほぼ同様なフ

表-2 力学特性試験結果の一覧(材齢 28 日)

項目	養生方法	H100	H80	H50
圧縮強度 (N/mm ²)	20°C水中	136.5	109.8	84.1
	20°C封緘	122.5	97.2	69.9
引張強度 (N/mm ²)	20°C水中	8.16	7.04	5.20
	20°C封緘	7.19	6.64	4.75
せん断強度(N/mm ²)	20°C封緘	11.7	12.7	8.88
ヤング係数 (kN/mm ²)	20°C水中	42.4	43.2	37.0
	20°C封緘	—	42.7	—
ポアソン比	20°C水中	0.213	0.209	0.194

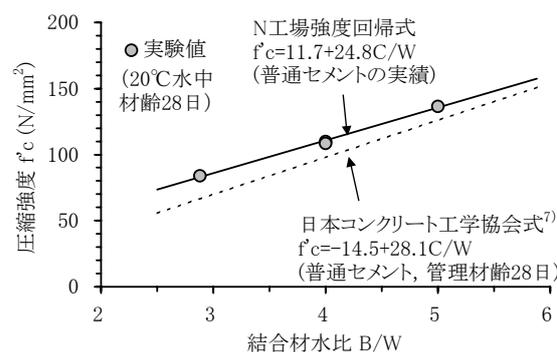


図-2 圧縮強度と結合材水比の関係

レッシュ性状と圧縮強度が得られた。

上記のコンクリートを用いて各種試験を実施し、PC 規準との対比や PC 規準に基づく解析検討を行った。その詳細については以下の該当項目の中で述べる。

3. 材料特性に関する検討

3.1 力学特性

力学特性は、圧縮強度（JIS A 1108 による）、引張強度（JIS A 1113 による）、せん断強度（JSCE-G 553 に従い断面 10×10cm の直接 2 面せん断強度試験による）、ヤング係数（JIS A 1149 による）、ポアソン比（ASTM C 469-83 のひずみゲージ法による）の各試験を行って確認した。このうち、材齢 28 日の結果を表-2 に示す。

(1) 圧縮強度

図-2 は、圧縮強度試験結果を結合材水比(B/W)との関係として整理した結果である。N 工場の実績による強度

回帰式（ただし、普通ポルトランドセメント単体で設計基準強度の上限は 70N/mm²）と実測値とを比較すると、概ね一致する結果となった。

図-3は材齢 91 日の圧縮強度を 1.0 とした時の各材齢の圧縮強度との比率を算出し、片対数グラフとして示したものである。図中の線分は式(1)中の定数 a に各数値を代入した結果（定数 b に関しては式(1)の右辺が材齢 t を 91 日とした時に 1.0 となるように求めた）を示している。

$$f'c(t)/f'c(91) = t/(a+bt) \quad (1)$$

ここで、a, b : 定数, t : 材齢 (日)。

これより、今回検討した高強度コンクリートの強度発現は定数 a が 1.5~2.9 程度の値をとることが確認された。

図-4 は日本建築学会 JASS 5T-705⁸⁾による断面 1.0×1.0m の上下面を断熱した模擬柱を製作し、材齢 28 日 (20℃水中) の圧縮強度に対する構造体コンクリート強度の補正值 (S 値, βt) を求めた結果である。これより、日本建築学会の S 値⁸⁾に対しては標準値以下となった。PC 規準の βt については標準値の規定がないものの、βt=1.1 以下となった。

(2) 引張強度, せん断強度, ヤング係数, ポアソン比

図-5 は、表-2 中の引張強度を圧縮強度との関係として整理した結果である。これより、養生方法にかかわらず PC 規準による設定値と同等程度かそれ以上の引張強度を有することが確認された。

せん断強度試験は自己収縮の影響が顕著となると考えられる封緘養生のみを実施した。その結果、表-2 に示したように配合 H80 の 12.7N/mm²より配合 H100 の方が 11.7N/mm²とせん断強度が低下した。ただし、配合 H80 と配合 H100 とも配合 H50 の 8.88N/mm²を下回ることはなかった。

図-6 は、表-2 中の結果を含め各材齢のヤング係数を圧縮強度との関係として整理した結果である。これより、養生方法にかかわらず PC 規準による設定値と同程度のヤング係数を有することが確認された。

ポアソン比は PC 規準において弾性範囲内で 0.2 としてよいとされている。表-2 中の結果をみると、概ね同様の値が得られた。

3.2 体積変化特性

(1) 乾燥収縮ひずみ

図-7 は JIS A 6204 に従い温度 20℃, 湿度 60% の条件にて 10×10×40cm の供試体を 20℃水中にて材齢 7 日まで養生し、以後 6 ヶ月が経過するまで JIS A 1129 付属書 2 の方法で測定した乾燥収縮ひずみを片対数グラフとして示したものである。図には配合 H80 および配合 H50 の実測値と、表-1 中の単位水量ならびに表-2 中の圧縮強度 (20℃水中) を用いて算出した PC 規準の設定値を併せて示した。これより配合 H80 は配合 H50 より若干

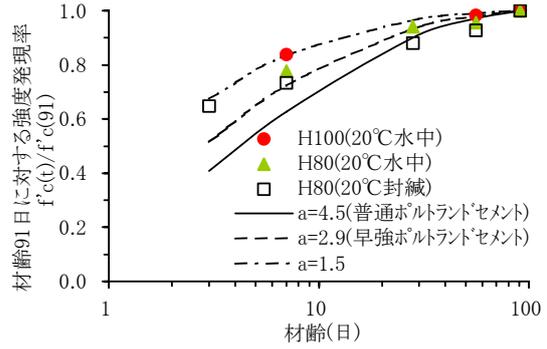


図-3 強度発現特性

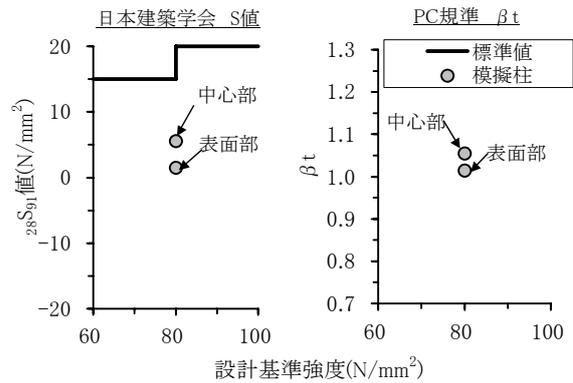


図-4 構造体コンクリート強度の補正值

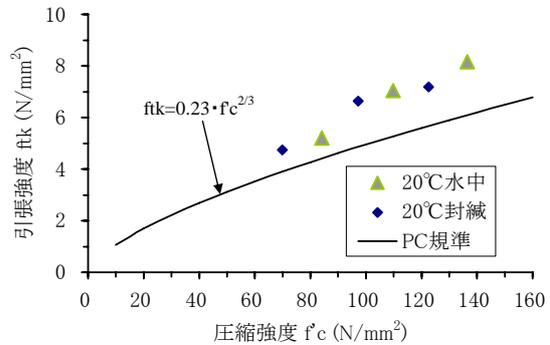


図-5 圧縮強度と引張強度の関係

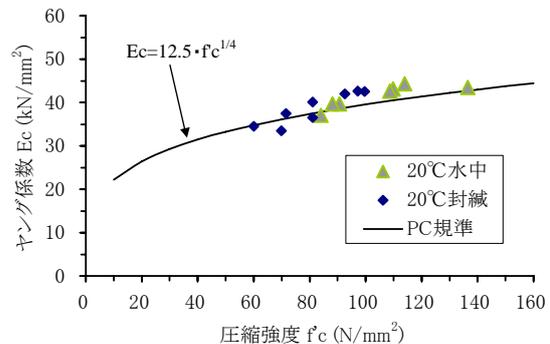


図-6 圧縮強度とヤング係数の関係

小さくなったものの、PC 規準の設定値とは乖離した。原因は明らかでなく、今後の課題とする。

(2) 自己収縮ひずみ、自己収縮応力

表-3 は日本コンクリート工学協会 JCI-SAS2「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(案)」を参考に鉄筋の有無と径を変化させた 10×10×40cm の供試体を封緘状態にして埋込ゲージ(自己収縮応力はひずみゲージ)にてコンクリートの硬化初期から自己収縮ひずみ(ε_{as})と自己収縮応力(σ_c, 式(2)により算出)を測定した結果である。

$$\sigma_c = (E_s \times \epsilon_s \times A_s) / A_c \quad (2)$$

ここで、E_s: 鋼材の弾性係数、ε_s: 鋼材のひずみ、A_s: 鋼材の断面積、A_c: コンクリートの純断面積。

これより、配合 H80 の自己収縮ひずみは、前項(1)の乾燥収縮ひずみと同様な条件にて算出した PC 規準の設定値より小さくなる傾向であった。また、自己収縮応力は材齢および鉄筋径に応じて増大し、材齢 28 日においては鉄筋コンクリート構造の鋼材比で想定される鉄筋径 D13 の供試体で 0.46N/mm² となるのに対し、合成床版等の鋼材比で想定される鉄筋径 D22 や D32 の供試体は 1.11 N/mm², 1.77N/mm² となることが確認された。この自己収縮応力は、設計引張強度の 28%, 45%に達する。

なお、自己収縮応力を確認した供試体では付着を切った部分を設けずにひずみゲージを鉄筋の長さ方向の中央に貼付し、これに対し定着長を 20cm としたものであったが、既往研究⁹⁾の鋼材比と拘束率の関係に概ね一致する結果であった(図-8)。

3.3 熱特性

ここでは、模擬柱の内部温度を実測した結果と、温度解析結果を比較し、熱特性に関する検討を行う。

図-9 は実機練りした配合 H80 の模擬柱の中心温度を測定した結果である。図には周辺温度と PC 規準による設定値(市販の温度解析ソフトを利用)を併せて示した。解析は外気温 15°C、コンクリート初期温度 20°C、発熱開始を注水後 0.3 日の条件で行い、普通ポルトランドセメントの量を C=620kg/m³(配合 H100 相当)と C=527kg/m³(配合 H80 相当)の 2 ケースについて検討した。

これより実測値は最高温度 66.4°C、温度上昇量 44.8°C となり、解析値 C=620kg/m³ と乖離した。一方、解析値 C=527kg/m³ とは概ね一致したことから、高強度混和材の発熱を無視したような結果となった。これに加え、N 工場の実績のある W/C=26%、C=615kg/m³ の普通ポルトランドセメントを単体で用いたコンクリートでは温度上昇量が 53°C(打設時 10°C、最高温度 63°C)であったことを勘案すると、高強度混和材の使用は温度上昇量の低減に寄与するものと判断される。この要因とし、高強度混和材の添加によりコンクリート中のせつこう量が高

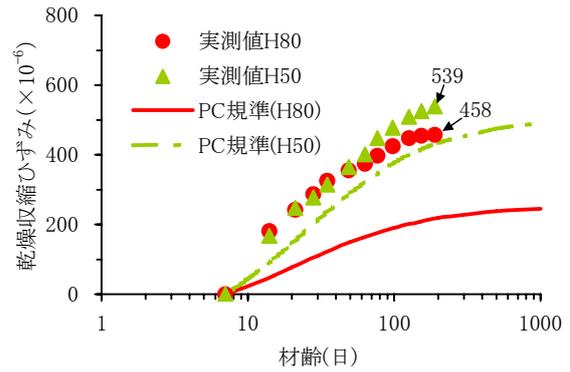
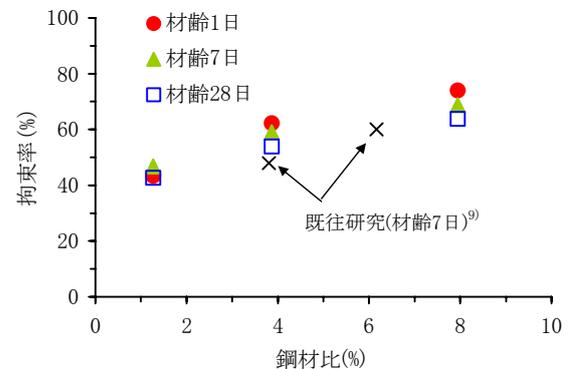


図-7 乾燥収縮ひずみの経時変化

表-3 自己収縮ひずみと自己収縮応力(配合 H80)

材齢	自己収縮ひずみ		自己収縮応力(実測値)		
	実測値	PC 規準	D13	D22	D32
1 日	123	394	0.19 (14%)	0.38 (28%)	0.53 (39%)
7 日	220	498	0.32 (10%)	0.74 (24%)	1.14 (37%)
28 日	294	507	0.46 (12%)	1.11 (28%)	1.77 (45%)
鋼材比	0%		1.3%	3.9%	7.9%

()内は、PC 規準により設計基準強度 80N/mm² から算出される設計引張強度に対する自己収縮応力の比率。ただし、引張強度算出時の式(1)中の定数 a は 4.5、材料係数 γ_c は 1.0 とした。



注) 拘束率は、(ε_{as} - ε_s)/ε_{as} × 100, より算出した。

図-8 自己収縮ひずみにおける鋼材比と拘束率の関係

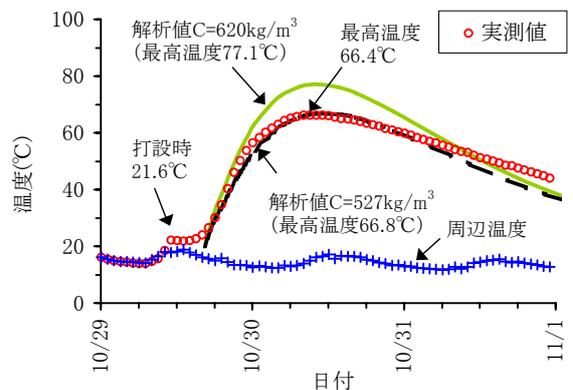


図-9 模擬柱の内部温度履歴(配合 H80)

まり、水和反応の進行を緩和したと考えられる。

4. 耐久性に関する検討

PC 規準では、高強度コンクリートを用いた PC 構造物の耐久性について、コンクリートの中性化、塩化物イオンの侵入、凍結融解作用および化学的侵食等の劣化に対する抵抗性に関する照査を行うものとしている。また、アルカリ骨材反応に対する照査についてはアルカリ骨材反応に対して無害な骨材を使用することを原則として照査を行わないものとしている。さらに、コンクリートの中性化はかぶりの設計値を 30mm とすることで照査を省略でき、橋梁構造物では化学的侵食を受けるケースが限られている。そこで、主として塩化物イオンの侵入と凍結融解作用に対する抵抗性について検討した。

(1) 塩化物イオンの侵入に対する抵抗性

図-10 は土木学会 JSCE-G572「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)」に従い濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液中に 6 ヶ月間浸せきした供試体を用い、EPMA 法による面分析結果より塩化物イオン拡散係数を求めたものである。これより、水結合材比を低くして設計基準強度を高めるほど、塩化物イオン拡散係数が小さくなることが実測された。ただし、図中に併記した PC 規準による設定値と比べると、実測した塩化物イオン拡散係数の方が大きくなる傾向であった。これは、PC 規準が実構造物の見掛けの拡散係数を求めたデータに基づいていることと、今回の実験が半年程度の材齢までの実験結果より見掛けの拡散係数を求めていることに起因すると考えられる。

(2) 凍結融解作用に対する抵抗性

図-11 は配合 H80 の高強度コンクリートを用い、JIS A 1148 の水中凍結融解試験方法(A 法)により凍結融解作用を与え、供試体の動弾性係数と質量を 300 サイクルまで測定した結果をとりまとめたものである。これによると、空気量を 2%とした配合 H80 においても PC 規準にて照査を省略できる相対動弾性係数 90%以上を 300 サイクルまで確保した。また、供試体の質量は 300 サイクルまでほとんど変化しなかった。

5. 初期ひび割れ抵抗性に関する検討

ここでは、1 章に述べた合成床版の急速施工に対応するため、既報¹⁰⁾のコンクリート打込み後 1~2 日で再供用可能な高強度膨張コンクリートを取りあげ、初期ひび割れ抵抗性について検討する。ただし、要求性能の観点より、前述までの普通ポルトランドセメントでなく、早強ポルトランドセメントを用いるものとした。

写真-1 はロビンソン型合成床版を模した平面寸法 1.1×1.2m、厚さ 18cm の試験体製作状況である。使用コ

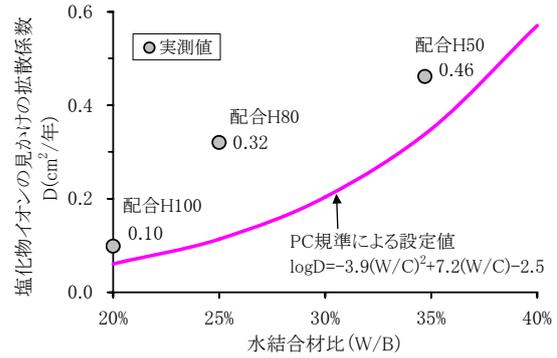


図-10 塩化物イオン拡散係数

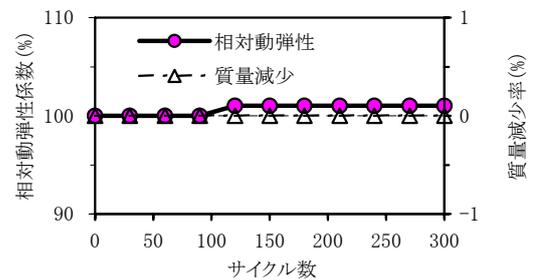


図-11 凍結融解試験結果(配合 H80)

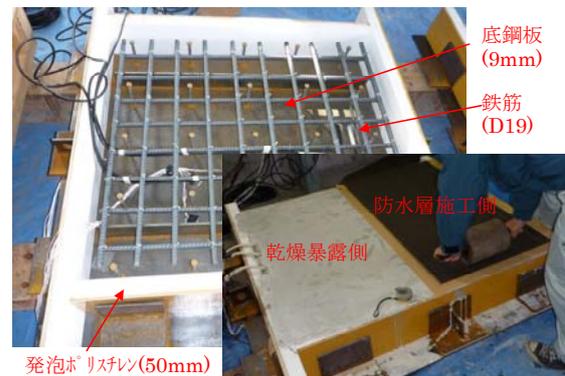


写真-1 合成床版試験体の製作状況

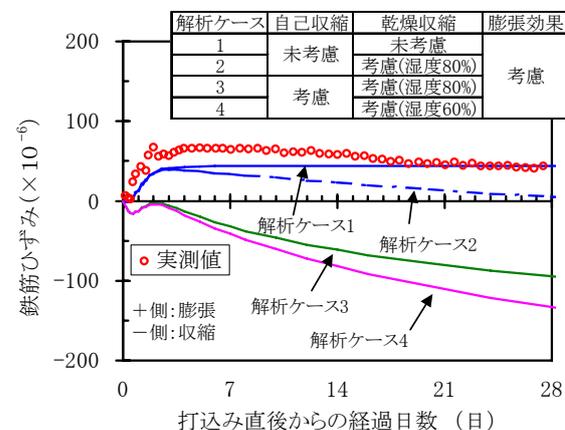


図-12 合成床版試験体の鉄筋ひずみの履歴

ンクリートは材齢1日で設計基準強度30N/mm²を確保するため、表-1中の配合H80を以下の通り修正した。

- ・ 単位水量を155kg/m³から160kg/m³に引き上げた。
- ・ 膨張材を標準使用量である20kg/m³添加した(JIS A 6202 附属書2による20℃水中養生を行った材齢7日の一軸拘束膨張率で206×10⁻⁶が得られた)。

コンクリートは、打込み後6時間が経過してから散水養生を開始し、20～24時間の間に防水層を施工した。この際、初期ひび割れの発生は確認されなかった。また、試験体は通風や降雨の影響を受けない上屋内で材齢3ヶ月まで暴露した。

図-12は防水層側に設置した鉄筋計によるひずみ測定結果である。図には自己収縮および乾燥収縮の算定条件を変えた4ケースの解析値(市販の温度応力解析ソフトを利用)を示したものである。解析にあたっては、材料特性をPC規準に従うものとし(2章にて確認済み)、湿度を60%(上屋内の平均湿度を想定)あるいは80%(防水層の効果を仮に想定)と設定し、若材齢時のクリープの影響を有効ヤング係数として考慮した。また、膨張ひずみについてはPC規準に取り決めがないため、式(3)に示す日本コンクリート工学協会式⁷⁾を用いた。

$$\epsilon_{ex}(t_e) = 150 \times [1 - \exp\{-0.69(t_e - 0.30)^{1.11}\}] \quad (3)$$

ここで、 ϵ_{ex} :膨張ひずみ(×10⁻⁶)、 t_e :有効材齢(日)。

これより、自己収縮を考慮した解析ケース3および解析ケース4とは乖離し、自己収縮を考慮せずに乾燥収縮の進行度を湿度80%で算定した解析ケース2の傾向と一致した。このことから、既報¹⁰⁾に示した膨張材使用の効果と、適切な散水養生による自己収縮ひずみの大幅な低減、速やかな防水層施工による乾燥収縮ひずみの進行抑制が温度応力解析を用いて定量的に示された。

なお、今回製作した合成床版試験体に関しては、高強度膨張コンクリートを用いたということもあり、乾燥暴露側については材齢3ヶ月までひび割れが生じないことを目視にて確認している。

6. まとめ

鋼・コンクリート合成構造を対象とし、主に設計基準強度80N/mm²程度の高強度コンクリート(配合H80)に関する各種試験を実施し、既往規準であるPC規準との対比やPC規準に基づく解析検討を行った結果をまとめると次のようになる。

- (1) 材料特性に関する確認試験を行い、力学特性に関してはPC規準の設定方法を準用できる結果が得られた。一方、体積変化特性はPC規準の設定値と乖離し、熱特性については高強度混和材の使用により発熱量が抑制されるような結果となった。したがって、こ

れらの材料特性の実績がない場合は、設計の必要性に応じて、試験等により確認する必要がある。

- (2) 耐久性に関する確認試験を実施し、塩化物イオンの侵入に対しては水結合材比を低くすることで塩化物イオン拡散係数が小さくなること、凍結融解作用に関しては目標空気量を2%とした配合H80においてPC規準に規定されている耐久性を確保することが確認された。
- (3) 初期ひび割れ抵抗性については、実橋を模した合成床版試験体による確認試験を実施した。その結果、試験体中の鉄筋ひずみの実測値はPC規準の設定値とは乖離したものの、高強度膨張コンクリートを用い、適切な養生を行うこと等によりひび割れの発生を抑制できた。また、温度応力解析を用いて定量的な評価が可能であることも確認された。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート技術協会：複合橋設計施工規準，2005.11
- 2) 土木学会：2007年制定 鋼・合成構造標準示方書，2007.3
- 3) 上東泰，宮本健次，柘木正喜，柳井修司，今井昌文：世界初[波形ウェブPC・鋼複合斜張橋]における高強度コンクリートの施工，セメントコンクリート，Vol.701，pp.25-37，2005.7
- 4) プレストレストコンクリート技術協会：高強度コンクリートを用いたPC構造物の設計施工規準，2008.10
- 5) プレベーム振興会：プレベーム合げた橋設計・製作・施工要領書，2005.4
- 6) 二戸信和，久保田賢，市川哲，米道修，藁品忠義，石崎元嗣：高強度混和材を用いた生コン工場での高強度コンクリート(80N/mm²)の単独大臣認定取得について，コンクリートテクノ，Vol.27，No.1，pp.26-31，2008.1
- 7) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2008，2008.11
- 8) 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針(案)・同解説，2005.2
- 9) 林田都芳，大野義照，中川隆夫：コンクリートの自己収縮応力試験における拘束鉄筋と試験体長の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.2，pp.733-738，1999
- 10) 北野勇一，大友直之，橋吉宏，田口克也：急速施工を伴う鋼橋取替え床版への高強度膨張コンクリートの適用性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1265-1270，2010.7