

特集 「技術研究所再整備」

常温硬化型高じん性高強度モルタル「スリムクリート®」の
屋内ブリッジへの適用

武田 篤史 平田 隆祥 石関 嘉一
丹羽 博則 湊田 安浩 渡辺 哲巳
(本社設計本部)

Construction of Indoor Bridge with High-ductility and High-strength Mortar Cured at Normal Temperature —"SLIM-Crete"

Atsushi Takeda Takayoshi Hirata Yoshikazu Ishizeki
Hironori Niwa Yasuhiro Fuchita Tetsumi Watanabe

Abstract

SLIM-Crete is a high-ductility and high-strength mortar, and its strength is more than 170N/mm^2 in compression and more than 11N/mm^2 in tension. It is included in the material called Ultra high strength Fiber reinforced Concrete(UFC). Ordinary UFC must be cured at hi-temperatures after placing at a precast factory, and thus it is limited in applications. In contrast, SLIM-Crete can be cured at normal temperature because of its unique mixing recipe. Therefore, it finds greater applications, and it helps reduce costs because it can be used for placing in site or site precast. In this paper, summaries of SLIM-Crete and indoor bridge using it are presented. The bridge was designed as a PC structure which was allowed tensile stress. Furthermore, the execution characteristics, structural performance, and fire-resistant performance of the member are described.

概要

スリムクリートは、圧縮強度 170N/mm^2 以上、引張強度 11N/mm^2 以上の材料強度を持つ高じん性高強度モルタルであり、超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high strength Fiber reinforced Concrete : 以下UFCと表記) と呼ばれる材料に含まれる。既往のUFCは給熱養生が必要であり適用対象に制約があったが、スリムクリートは、特殊な配合とすることにより、給熱養生が不要な常温硬化が可能となった。よって、現場打設やサイトプレキャストも可能となり、適用性は大きく広がり、コストダウンも可能となる。本論文は、開発したスリムクリートの概要を述べるとともに、実構造物への適用事例として、引張応力度を許容するPC構造として設計した部材の概要を示す。さらに、その施工性、構造性能、耐火性能について述べたものである。

1. はじめに

近年、様々な短繊維補強セメント複合材料が開発され、その特徴を活かした適用が進んでいる。以下にその例を示す。

コンクリートに鋼繊維を混入したSFRC(Steel Fiber Reinforced Concrete)は、シールドセグメントの材料として多くの実績を有している¹⁾。鋼繊維の引張負担を考慮することで配力筋を省略できるだけでなく、ひび割れ幅も低減できるものである。

モルタル中に有機繊維を混入したHPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites)は、すでに土木学会から設計施工指針(案)²⁾が発行されている。大きな特徴は、たわみ硬化特性を有し、伸びが2~3%におよぶことである。補修用だけでなく、橋梁基部への適用³⁾などの含めた幅広い用途が検討されている。

高じん性セメントボードは、高強度ビニロン繊維を用いて抄造法(和紙すきとりの原理)によって大量工場生

産した厚さ6~9mmの板材料である。引張強度や引張じん性が大きく、埋設型枠、剥落防止や高欄のリニューアル⁴⁾などに用いられている。

厚付け用湿式吹付断面修復工法は、ポリマーセメントと短繊維を用いた吹き付け工法であり、トンネルの補修工事などに適用されている⁵⁾。

UFCは、超高強度モルタルと高強度鋼繊維で構成されており、 150N/mm^2 以上の圧縮強度と 5N/mm^2 以上の引張強度を持つ材料である。部材断面の縮小、軽量化、使用材料の減少、長期耐久性の向上など多くの合理化が可能であり、次世代の建設材料として期待されている。2004年には、土木学会より超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)⁶⁾(以下「UFC指針」と表記)が発行されており、今後、これらの材料を使用した構造物は増加すると予想される。一方で、既往のUFCは高温の給熱養生が必須であり、工場生産によるプレキャスト部材としての施工に限定されていた。そのため、適用範囲に制約があるだけでなく、高コスト化も招いていた。

Table 1 配合 Mix Proportion

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)			SP C×%
	W	P	S	
14.0	220	1764	445	3.0

W：水，B：結合材，P：プレミックス粉体材料

S：指定細骨材，SP：特殊高性能減水材，C：セメント



Photo 1 高強度鋼繊維 High-Strength Steel Fiber



Photo 2 モルタルフロー Mortar Flow

Table 2 品質試験項目および判定基準 Quality Control Parameter

		判定基準
試験項目	モルタルフロー (mm) (繊維混入前)	320以上
	スランブフロー (mm)	550以上
	50cmフロー達成時間	20以下
	空気量 (%)	4.0以下

そこで、著者らは、常温で硬化するUFCとして、高じん性高強度モルタル「スリムクリート」を開発した。スリムクリートは、通常コンクリートと同等の養生で良いため、現場打設やサイトプレキャストによる施工が可能であり、UFCの適用範囲の拡大が期待される。

本論文は、開発したスリムクリートの概要を述べるとともに、実構造物への適用事例として、引張応力度を許容するPC構造として設計した大林組技術研究所新本館「テクノステーション」内屋内ブリッジ（以下「スリムクリートブリッジ」と表記）の概要を示す。さらに、その施工性、構造性能、耐火性能について報告する。

2. 使用材料

2.1 構成材料

スリムクリートのうちモルタル部分は、セメント等の反応性微粉末と微粉細骨材を混合したプレミックス粉体（P）、水（W）、細骨材（S）および特殊高性能減水剤（SP）で構成されている。また、空気量は消泡剤を用いて、5%以下に調整した。このモルタルは常温硬化型であり、給熱養生等の特殊な養生を行わなくても十分な強度特性を発現できるものである。配合をTable 1に示す。

鋼繊維には一般建設用鋼繊維とは異なる高強度鋼繊維を使用した。なお、使用した鋼繊維をPhoto 1に示す。高強度鋼繊維は、延伸製法により製造された自動車タイヤに使用するスチールコードである。表面は真ちゅうでメッキされており、引張強度は2,000N/mm²以上で、形状はすべて直線状である。

2.2 スリムクリートの特長

スリムクリートは高じん性高強度であり、圧縮強度

Table 3 試験項目および物性値 Material Properties

試験項目	物性値	試験方法
圧縮強度 (N/mm ²)	172.7	JIS A1108
ヤング係数 (kN/mm ²)	43.7	JIS A1149
ポアソン比	0.236	ゲージ貼り付けにより測定
直接引張り強度 (N/mm ²)	11.6	JSCEI27-3.2.3 引張り強度試験に準拠
割裂引張り強度 (N/mm ²)	17.4	JIS A 1113
割裂ひび割れ発生応力 (N/mm ²)	7.3	
曲げ強度 (N/mm ²)	22.0	JSCE-G 552
曲げ靱性係数 (N/mm ²)	17.7	
曲げひび割れ発生応力 (N/mm ²)	11.3	

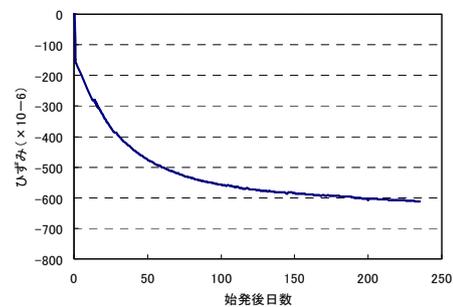


Fig. 1 収縮ひずみおよび始発後日数 Shrinkage Strain

170N/mm²以上、引張強度11N/mm²以上の材料強度を持つ。さらに、本材料にポリプロピレン繊維（以下、PP繊維と表記）を混入することにより火災時における爆裂を防止し、建築基準法で耐火建築物とすることが要求される建築物への適用も可能としている。また、モルタルのフレッシュ性状は、鋼繊維混入前のモルタルフロー値は320mm以上で、鋼繊維混入後において、スランブフロー値550mm以上と流動性が著しく良好であり、30mm以下の著しい偏狭部においても閉塞することなく充填が可能となった。なお、モルタルの品質試験項目および判定基準をTable 2、モルタルフローをPhoto 2に示す。

2.3 スリムクリートの硬化特性

硬化試験における試験項目および物性値の試験結果をTable 3に示す。物性値は6章に示す耐火性能向上の目的でPP繊維を混入したことにより、多少の低下が確認されたものの、UFC指針⁹をほぼ満足する結果となった。また、収縮ひずみは材齢230日において600μ程度である。なお、収縮ひずみおよび始発後日数をFig. 1に示す。

3. スリムクリートブリッジ概要

3.1 構造概要と特長

スリムクリートブリッジは、スパン約14m、幅員1.7mの屋内人道橋であり、大林組技術研究所新本館「テクノ

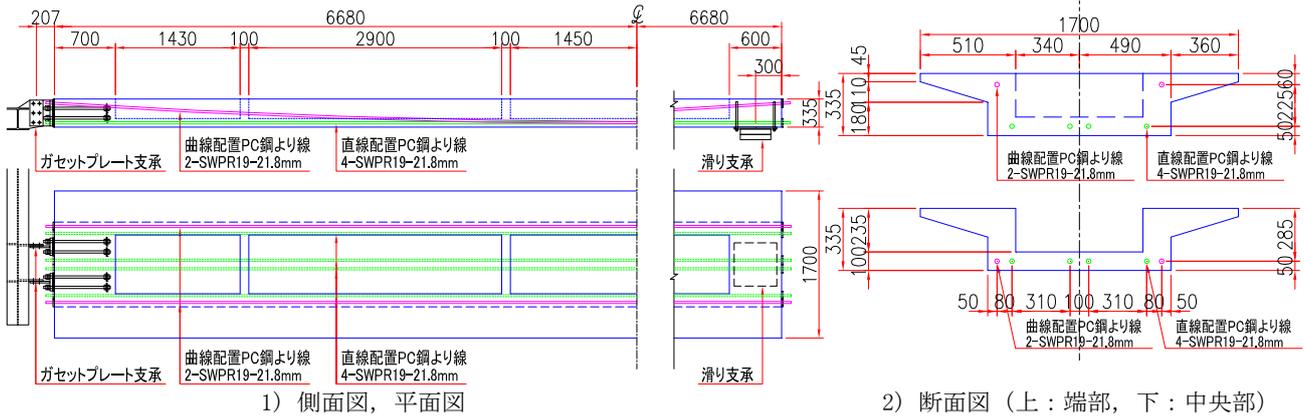


Fig. 2 スリムクリートブリッジ構造図
Design of SLIM-Crete Bridge

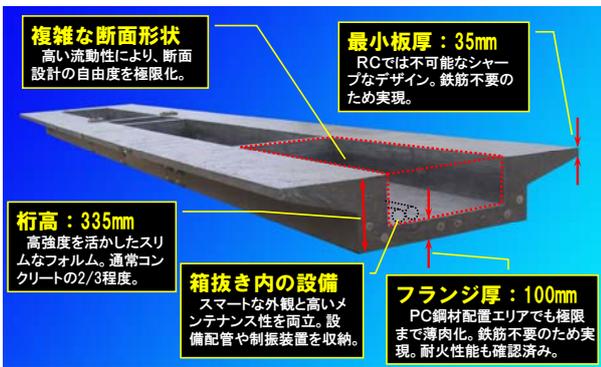


Fig. 3 スリムクリートブリッジの特長
Characteristics of SLIM-Crete Bridge

ステーション」の3階吹抜け部にかかる渡り廊下である。

Fig. 2にスリムクリートブリッジの構造図を示す。断面中に2本の曲線配置PC鋼材と4本の直線配置PC鋼材を配置した構造であり、普通鉄筋は用いていない。

プレストレスの導入は、ポストテンション方式とし、テンション導入後、シーズ内にグラウト材を充填した。支持条件は、一方がガセットプレートによるピン支持、他方がすべり支承によるピンローラー支持となっている。

スリムクリートブリッジの断面の特長をFig. 3に示す。スリムクリートの圧縮強度、引張じん性、高流動性などを活かした設計としている。

3.2 設計基準強度と許容応力度

Table 4に、設計基準強度と許容応力度を示す。スリムクリートは曲げ引張強度が高いだけでなく、曲げ引張強度に達した後も応力度を維持できるため、ある程度の引張応力度が部材に生じるのを許容した設計としている。

3.3 振動特性

長スパンのスリムクリートブリッジは歩行などによる振動が大きくなるのが懸念されるため、制振装置の適用を検討した。2名同時歩行を想定したシミュレーション解析を行い、居住性能評価ランク^{7) 8)}により評価した結果をFig. 4に示す。非制振時の居住性能はランク0(あり得ない)であるが、200kgのパッシブ型制振装置

Table 4 設計基準強度および許容応力度
Specified Strength and Allowable Stress

設計基準強度	長期許容応力度		短期許容応力度	
	圧縮	曲げ引張	圧縮	曲げ引張
170	56.7	3.8	113.3	7.5

(N/mm²)

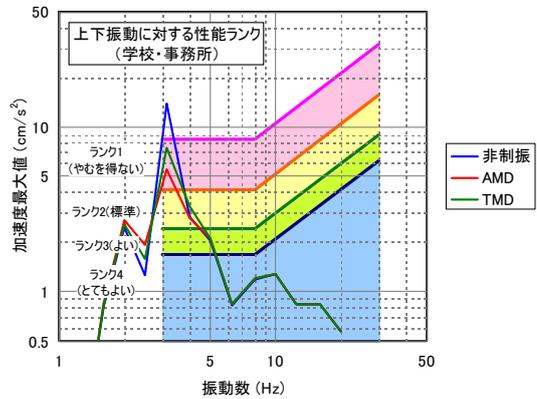


Fig. 4 居住性能の予測結果
Habitability Performance Rank of the Bridge



Photo 3 振動表示モニター
Vibration Monitor of the Bridge

(TMD) または70kgのアクティブ制振装置 (AMD) を設置すればランク1 (やむを得ない) に改善できることが確認された。

評価の上ではTMDとAMDの差は大きくはないが、実感としての差を確認し、コストパフォーマンスを含め顧客に提案する際の資料とするため、2本のスリムクリートブリッジのうち東側にAMD、西側にTMDを設置することとした。

さらに、AMDには擬似的にTMD相当および非制振相



Photo 4 ホッパーによる打設作業
Mortar Placing by Hopper

Photo 5 モルタルの流動状況
Mortar Flowing



Photo 6 ブリッジの搬入
Transportation

Photo 7 取り付け状況
Set Up

当を再現できる機能を加えるとともに、振動の状況を居住性能ランクと比較して確認できるモニタ (Photo 3) を設置し、1箇所での制振効果と居住性能ランクを体感しながら見学できるようにしている。

4. 施工

4.1 製造工程

スリムクリートブリッジの製造工程は、現場にて製作図の承認後、PC工場にて使用材料の受入検査を行った。その後、型枠組立・埋込み金物類の取付を行い、モルタル打設を行った。無筋であるため、煩雑な配筋作業やかぶり厚さの検査などが不要となり、工程の省力化を図ることができた。

打設については、Photo 4に示すホッパーを用いて打設した。Photo 5に示すように、流動性が良いため、複雑な形状の箱抜きや埋込み金物およびシース管などの周囲まで充填が可能であることを確認できた。脱型後には、気泡の巻き込みやジャンカなどは見られなかった。

冬期の打設であったため、凍害を防止する目的からシート掛け養生を行った。

脱型後は、圧縮強度がプレストレス導入時80N/mm²以上、材齢28日で170N/mm²以上であることを確認した。

導入プレストレスの管理は、PC鋼材の断面積・ヤング係数のばらつき、摩擦損失量の推定誤差、その他の誤差を考慮して、伸びの測定値と計算値の差が5%以下となるように行った。セット量は、CCLシングルストランド工法で定められた値に測定誤差を考慮した数値以下となるように管理した。

グラウトは、シース内の空気を押し出す様に、常に1~2MPaの圧力をかけて連続して注入し、排出口から様な濃度のグラウトが排出されたことを確認後、排出口を閉じ注入圧より大きな圧力(3~5MPa)を保つようにして注入を終了した。

Table 5 有効プレストレスの比較
Prestressing Force

		設計値	試験体
緊張量	P (kN/本)	396.0	326.1
想定有効率	η	0.70	0.85
有効プレストレス量	P_n (kN/本)	277.2	277.2
緊張時平均プレストレス応力	σ_{po} (N/mm ²)	9.88	8.14
有効平均プレストレス応力	σ_{pn} (N/mm ²)	6.92	6.92

4.2 現場搬入・取り付け

PC工場から、ポルトトレーラーにて現場搬入し(Photo 6)、クローラークレーンにて建方を行った(Photo 7)。1本当たり取付所要時間は、おおよそ1時間であり、軽量化による現場施工の省力化も図ることができた。

5. 構造性能の検討

5.1 実験概要

スリムクリートブリッジの構造安全性および終局挙動の把握を目的として、実物大スリムクリートブリッジ模型を用いて梁曲げ実験を行った。

梁曲げ実験は目的にあわせ、以下に示す、2種類の載荷レベルを設定し、それぞれセットアップを変えて行った。

5.1.1 実用レベル載荷 設計荷重に対する部材性能の検証として、実部材と同様の支承条件(ガセットプレート支承、ピンローラー支承)のもと、設計荷重の1.5倍相当の梁曲げ載荷を行った。

5.1.2 終局レベル載荷 非線形領域での挙動や最終の破壊状態を把握することを目的として、理想化された支承条件(両支点ともピンローラー支承)のもと、終局領域までの載荷を行った。

5.2 構造実験試験体

5.2.1 寸法形状 試験体は、スリムクリートブリッジと同断面とし、長さは、約12.5mとした。曲線配置のPC鋼材は、中心断面および端部断面で、実部材と同位置になるようにパラボラ状に配置した。

5.2.2 プレストレス 載荷時のプレストレス力は、有効プレストレス力の設計値を上回らないように定めた。

有効率 η として考慮すべき減退量には、摩擦損失・セット損失・リラクゼーション・クリープ・収縮がある。このうち、摩擦損失およびセット損失については、実部材と試験体でほぼ同等と考えることができる。一方で、リラクゼーション・クリープ・収縮については、時間に依存するものであり、実部材では十分な時間が経過した後の収束値で考慮するのに対し、実験ではほとんど時間が進んでいない。そこで、時間に依存しない損失については設計と同様の損失を見込み、時間に依存する損失については損失が0と仮定して、有効プレストレス力が設計と試験体で等しくなるようにした。設計値と試験体にお

Table 6 スリムクリート圧縮試験結果
Compression Test of SLIM-Crete

密度 (t/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
2.47	188	44.7	0.221

試験体サイズ: φ100xH200

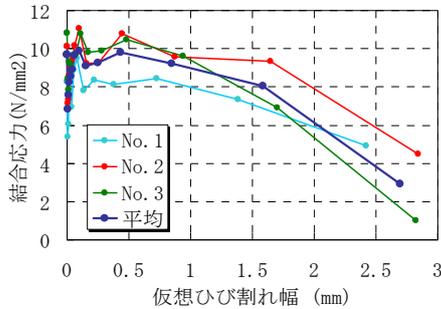


Fig. 5 スリムクリート引張軟化試験結果
Tension Softening Test of SLIM-Crete

Table 7 規準鋼材引張試験
Tension Test of Tendon

	0.2% オフセット 強度 (N/mm ²)	最大強度 (N/mm ²)	0.2%オフ セット強度 時ひずみ (%)	弾性係数 (kN/mm ²)
ひずみゲージ			0.997	217.7
300mm区間	1741	1888	1.124	188.8

けるプレストレスについて、Table 5にまとめる。なお、実際は、緊張から実験までに14日が経過しており、リラクゼーション・クリープ・収縮はある程度進んでいるため、実験時のプレストレスは実部材を下回っていると考えられる。

5.2.3 材料特性 スリムクリートの材料試験は、一軸圧縮強度試験および引張軟化特性試験を行った。Table 6に、終局レベル載荷実験の当日（材齢38日）に行ったスリムクリートの一軸圧縮試験結果を示す。また、JCI規準の「切欠きはりをを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法」⁹⁾ および「コンクリート引張軟化曲線推定方法」¹⁰⁾ により試験・計算した引張軟化曲線をFig. 5に示す。

PC鋼材は、引張試験を行った。試験結果をTable 7に示す。なお、ひずみはひずみゲージにより素線のひずみをはかる方法と、300mm区間における変形量を計る方法の2通りで評価した。

5.3 載荷方法

載荷は、実用レベル載荷、終局レベル載荷とも単純梁への2点載荷とした。Fig. 6に載荷の模式図を示す。

実用レベル載荷においては、実物と同様の支点条件を模擬するため、一方をガセットプレート支承、もう一方をピンローラー支承とした。載荷点は、等分布荷重における最大曲げモーメントと最大せん断力の比が等しくなる点として端部から1/4の点とした。ただし、プレストレ

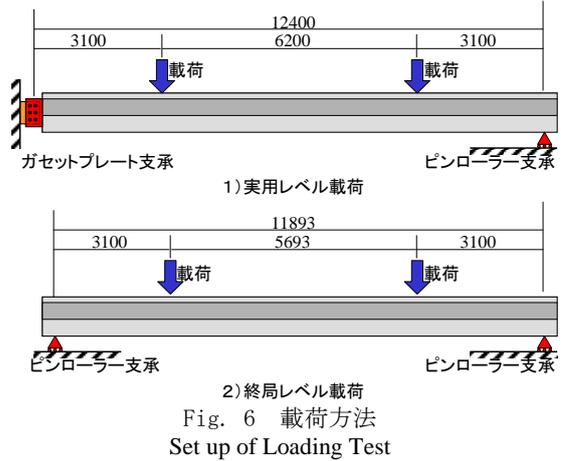


Fig. 6 載荷方法
Set up of Loading Test



Photo 8 載荷状況
Test View of Loading Equipment

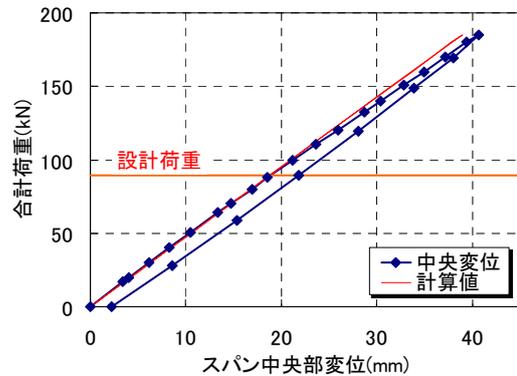


Fig. 7 荷重-変位関係
Load-Displacement Relationship

スによる曲げモーメントおよびせん断力を考慮した場合、曲げモーメントとせん断力の比は等しくはならない。

終局レベルにおいては、大変形となることを考慮して、両支承ともピンローラー支承とした。支承を変えたことで、等曲げスパン部の長さが若干短くなっている。

載荷全景をPhoto 8に示す。

5.4 実用レベル載荷結果

5.4.1 荷重変位関係 荷重-スパン中央変位関係をFig. 7に示す。荷重は載荷点荷重の合計を示す。図中に示す計算値は、1) 弾性挙動を示すこと、2) 全断面有効であること、3) ガセットプレートもピン支承として挙動すること、の仮定の下に計算したものである。

100kN程度まではほぼ計算値どおりに弾性挙動してい

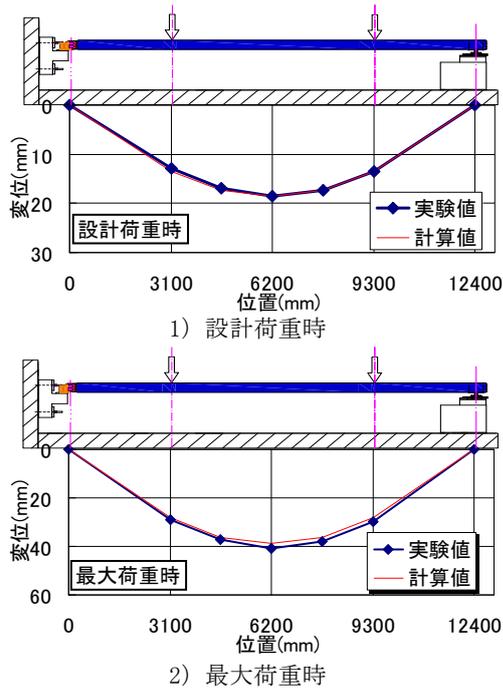


Fig. 8 変位分布
Distribution of Vertical Displacement

るが、その後剛性が若干小さくなっていることがわかる。ただし、目視によるひび割れは観測されておらず、また、ひずみゲージの値からモルタルの引張ひずみも計測されていない。よって、この非線形性はひび割れ以外に起因するものといえる。

設計で想定する短期荷重と曲げモーメントが等しくなる荷重（以下、設計荷重と表記）は89.5kNであり、この領域においてはほぼ完全に弾性である。

5.4.2 変位分布 Fig. 8に、設計荷重時および最大荷重時における変位分布を示す。

設計荷重時（ $P=89.5\text{kN}$ ）は、非線形性が出始める前であり実験値と計算値はほぼ一致している。最大荷重時において実験値は、計算値を若干上回っているが、局所的に上回っているわけではないことから、5.4.1に示される非線形性は、局所的な損傷が原因ではないと推定される。

最大荷重時の分布は、ガセットプレート側よりピンローラー支承側でわずかに変形が進んでいるが、これはガセットプレート支承が若干の剛性を持っているためと考えられる。ただし、その影響は限定的であり、設計上問題となるレベルではない。

5.4.3 PC鋼材ひずみ Fig. 9に、スパン中央および加力点付近における荷重-PC鋼材ひずみ関係を示す。計算値は、5.4.1に示す仮定に完全付着を加えてひずみの変動分を計算し、載荷前におけるひずみに加算した。

いずれのPC鋼材においても、若干の非線形性が表れており、荷重が増加したにもかかわらずひずみが線形に伸びない、または減少する局面を有している。これは、グラウト材のひび割れに起因するものと考えられる。スリムクリートはプレストレスが導入されているため引張と

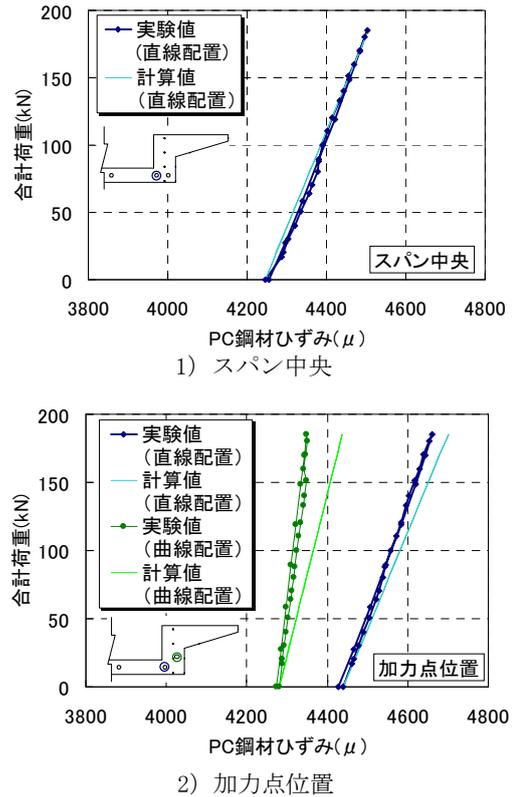


Fig. 9 荷重-PC鋼材ひずみ関係
Load-Strain Relationship of Tendon

なることはないが、グラウト材にはプレストレスが導入されておらずひずみが引張側へ変動することによりひび割れることが想定される。グラウトがひび割れた場合、ひび割れ近傍ではPC鋼材ひずみは大きくなるがその他の箇所では小さくなるという現象が生じうる。結果的に荷重の増加に見合ったひずみ増加が起きないのである。

5.4.1で示した非線形性の原因も、このグラウト材のひび割れに起因するものが大きいと推測される。

また、除荷時（プロット点の少ないパス）においてはほぼ線形に戻っていることから、グラウト材のひび割れは除荷後も残留しており、その結果残留変位が生じたものと考えられる。

Fig. 9 1) においては、若干の非線形性はあるものの、実験値と計算値は非常によく適合している。

Fig. 9 2) において、直線配置のPC鋼材は、初期においては計算値とほぼ一致するひずみが計測されている。荷重の増加に伴い計算値より若干小さくなったもののその差は大きくはなく、グラウト材のひび割れによる変動分の範囲内と考えられる。

一方で、曲線配置のPC鋼材は初期よりひずみが小さく出ている。これは、断面高さ方向の位置について、実際は端部でPC鋼材が水平になるように調整するのに対し、計算においてはPC鋼材を2次曲線で仮定しているためと考えられる。つまり、実際のPC鋼材配置よりも中立軸から遠い位置にあったものと仮定して計算していたものと考えられる。

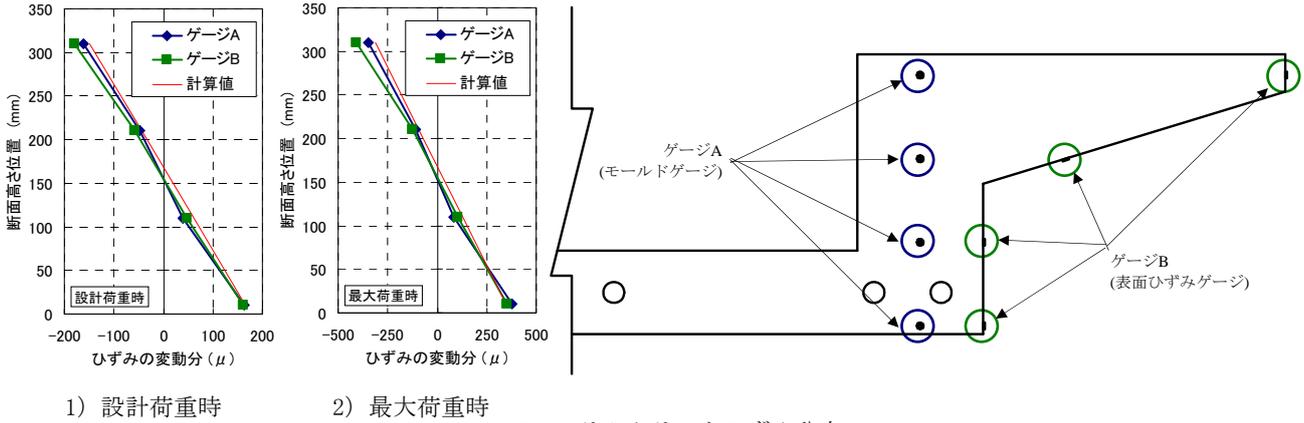


Fig. 10 スリムクリートひずみ分布
Strain Distribution of SLIM-Crete

5.4.4 スリムクリートのひずみ Fig. 10に、スパン中央における設計荷重時および最大荷重時のひずみ分布を計測位置とともに示す。ゲージAは内部に埋め込んだモールドゲージの値を、ゲージBは表面に添付したひずみゲージの値をそれぞれ示している。ひずみは、全て加力による変動分のみをプロットしている。

分布形状は全てほぼ直線状であり、また、内部のモールドゲージ(ゲージA)と表面のひずみゲージ(ゲージB)の差も小さいことから、断面端部の張出部も含めた全断面で平面保持の仮定が成り立っていることがわかる。

1) 設計荷重時と2) 最大荷重時を比較すると、ひずみの絶対値は異なるものの、中立軸位置はほぼ等しいため、最大荷重まで断面内の挙動としてはほぼ線形であったことがわかる。

中立軸位置実験値は、計算値より若干下方にあるが両者の差は15mm程度であり、実験値と計算値はよく一致している。

5.4.5 実用レベル载荷のまとめ 設計荷重に対する部材性能の検証を目的として、設計荷重の1.5倍相当の荷重により梁曲げ試験を行った。実験の結果、以下のことがわかった。

- 1) 設計荷重相当を超えて荷重100kNまではほぼ線形で挙動し、弾性を仮定した計算と同様の荷重-変位関係であったが、設計荷重1.5倍相当の荷重においては、若干の非線形挙動が見られた。これは、グラウト材ひび割れの影響と考えられる。なお、スリムクリートへのひび割れは観察されていない。
- 2) スリムクリートのひずみより、全断面有効として平面保持を仮定した弾性計算をすることで挙動を概ね表現できる。
- 3) ガセットプレート支承は若干の剛性を持っているが、実用上はピン支持と考えてよい。

5.5 終局レベル载荷結果

5.5.1 荷重変位関係と破壊過程 Fig. 11に荷重-スパン中央鉛直変位関係を示す。荷重は、全载荷荷重の合計値を示している。曲げひび割れ耐力および曲げ破壊耐

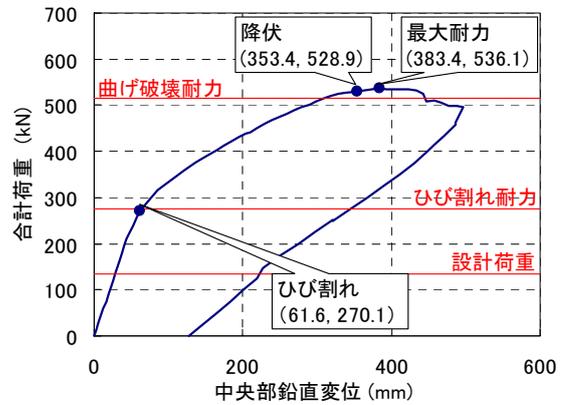


Fig. 11 荷重-変位関係
Load-Displacement Relationship

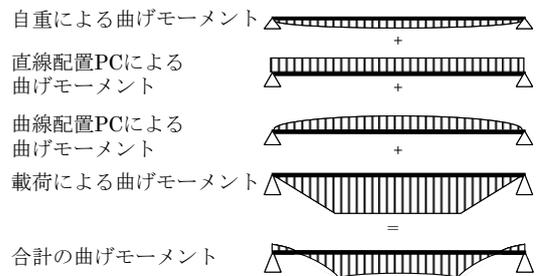


Fig. 12 曲げモーメントの合成
Superposition of Flexural Moment

力は、材料の実強度を用いてPC規準¹¹⁾に従って求めたものであるが、プレストレス力は、当初想定した有効プレストレス力を用いている。

ひび割れは、270kN付近で加力点位置付近から発生した。ひび割れ幅は、0.05mm(クラックスケールの最小値)と同等かそれ以下であり、非常に細かいひび割れであった。曲げひび割れ耐力の計算値は277kNであるため、ほぼ想定どおりの挙動をしているといえる。加力点位置がクリティカル断面となるのは、Fig. 12に示すように、曲線配置のPC鋼材の影響で、加力点位置が最大曲げモーメントとなるためである。



Photo 9 最大耐力時のひび割れ
Crack at Maximum Load



Photo 10 底部を貫通したひび割れ
Crack through the Bottom Flange



Photo 11 最大変位時のひび割れ
Crack at Maximum Displacement

ひび割れ発生以降はPC鋼材の降伏時まで、シャワシャワ音が鳴り続けたが、この音は、ひび割れの拡大に伴い、鋼繊維が付着すべりを起こすことにより発生するものと考えられる。材軸方向のひび割れ間隔は、300kN時には800mm程度であったが、荷重の上昇とともに小さくなり、PC鋼材の降伏時には100mm程度となった。

曲げ破壊耐力計算値とほぼ同じ529kNの時点で、加力点位置の直線配置のPC鋼材が降伏ひずみに達した。そのときの降伏位置でのひび割れ幅は、0.25mm程度であり、大きく開いてはなかった。

PC鋼材降伏後はほとんど耐力上昇がなく、変位383mmで最大荷重536kNに達し、載荷点付近のひび割れが大きく開き始めた。このときのひび割れ幅は、4mm程度であった。(Photo 9)

変位が470mmの時に、ひび割れは断面底部の肉厚100mmの部分を通って広がった。(Photo 10)

変形が500mmに達した時点で載荷を終了し、除荷した。この時点でひび割れ幅は20mmを超えており(Photo 11)、鋼繊維の長さが13mmであることからひび割れ面において鋼繊維の働きはなくなっていることがわかる。残留変位は、126mmであり、降伏後の塑性変形量144mmに比して小さいことから、一般的なPC部材と同様に残留変位は小さいと言える。

5.5.2 変位分布 Fig. 13にひび割れ時、降伏時、最大荷重時、および最大変位時の変位分布を示す。

最大荷重時までは、左右均等であり、一部が著しく変形しているということはないが、最大変位時においては、左側加力部付近(x=3100mm)で大きく変形し、左右のバランスが崩れていることがわかる。最大荷重以降、左側加力部付近で大きくひび割れが開いたことが原因である。

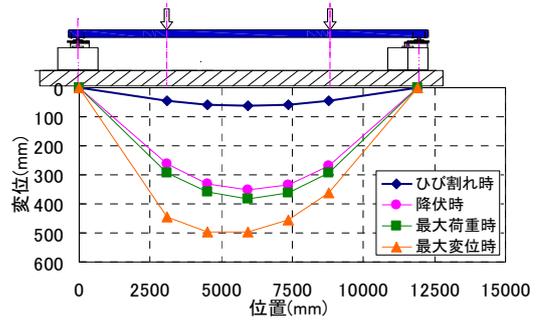


Fig. 13 変位分布
Distribution of Vertical Displacement

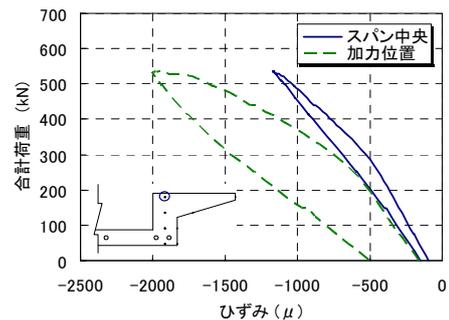


Fig. 14 荷重-スリムクリートひずみ関係
Load - Strain Relationship of SLIM-Crete

5.5.3 スリムクリートのひずみ Fig. 14に、圧縮縁から10mm断面内部に入った位置でモールドゲージにより計測したスリムクリートの材軸方向ひずみと荷重の関係を示す。計測断面はスパン中央と加力位置である。

スパン中央断面と加力断面を比較すると、初期値は異なるものの、ひび割れが入る270kN程度まではほぼ同様の勾配を示しているが、その後、加力断面のほうが大きなひずみとなっている。これは加力点位置においてひび割れが大きく開いたためと考えられる。

クリティカル断面である加力断面において、スリムクリートの最大圧縮ひずみは2000 μ 程度であった。スリムクリートの材料試験においては、最大強度時ひずみは4200~4700 μ 程度であるため、最大耐力時においても圧縮応力度には十分な余裕があることがわかる。

5.5.4 終局レベル載荷のまとめ 非線形領域の挙動や最終破壊状態の把握を目的として、単調載荷による梁曲げ試験を行った。実験の結果、以下のことがわかった。

- 1) PC鋼材の降伏まで、ひび割れは分散して大きくは開かないが、PC鋼材が降伏すると、ひび割れは局所化し変形は1点に集中する。その結果、耐力はほとんど上昇しなくなる。
- 2) ひび割れ荷重や最大荷重はほぼ計算どおりであり、PC規準¹¹⁾の方法で十分評価可能である。
- 3) 最大荷重時においてもモルタルの圧縮応力度は十分な余裕がある。

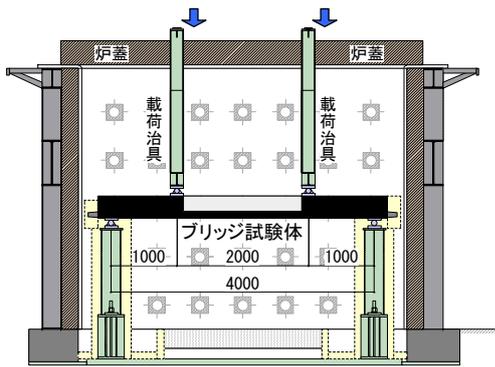


Fig. 15 载荷加熱実験のセットアップ状況
Setup of Fire Resistance Test



【炉内加熱状況】 【実験後の試験体】

Photo 12 加熱中および加熱後の状況

Specimen of During and After Fire Resistance Test

6. 耐火性能の検討

6.1 耐火実験の目的

スリムクリートは、高強度材料であるため火災時の爆裂現象への配慮が必要であるが、高強度コンクリートの分野で既に実用化されているPP（ポリプロピレン）繊維混入工法を適用することにより、爆裂発生の防止を可能としている。しかしながら、今回採用するスリムクリートブリッジでは、スリムクリートの特長を活かした薄肉断面によるプレストレスト構造としていることから、実大断面モデル試験体を用いて耐火実験を実施し、スリムクリートブリッジの耐火性能を確認した。

なお、本稿では紙面の関係により、今回実施した一連の耐火実験のうち、代表的な試験体における载荷加熱実験結果のみを次節以降に示す。

6.2 耐火試験体

本実験では、単純梁形式（試験体の全長4,400mm、支点間距離4,000mm）による対称2点集中载荷による加力方法を採用し、純曲げ区間となる载荷点内側の中央スパンの断面形状・寸法を実部材仕様と同一とした。

試験体の構成材料は、すべて実部材に用いる材料と同一仕様としており、さらに実部材には、箱抜きされた底版上部にインサート金物が埋設されるため、試験体にも同一仕様のインサート金物を埋設し、同インサートによる熱的影響を再現している。

PC鋼材は、実部材と同様に幅方向に6本（6-φ21.8）配置し、有効プレストレス力も277 kN/本×6本として、設

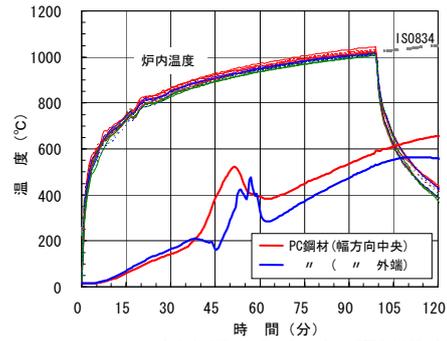


Fig. 16 炉内温度およびPC鋼材温度
Temperature of Inside Furnace and Tendon

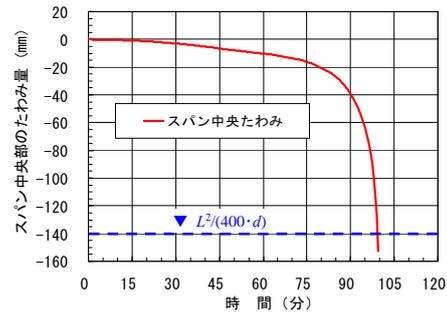


Fig. 17 スパン中央部のたわみ量
Vertical Displacement

計条件と同一とした。ただし、最外端2本のPC鋼材は、実部材では放物線配置としているが、本試験体ではすべて直線配置とした。

6.3 载荷加熱方法

6.3.1 加熱条件 载荷加熱実験は、大林組技術研究所が保有する汎用耐火炉を用いて実施した。加熱温度は、ISO834標準加熱温度曲線に従うものとし、加熱継続時間は試験体が荷重支持能力を喪失するまで継続することを基本とした。なお、加熱条件（加熱面）は、スリムクリートブリッジが吹抜け空間に設置されることを考慮し、試験体を耐火炉の内部に設置することで上下両面（4面）より同時加熱を行うことを基本とした。なお、本稿では割愛しているが、試験体のたわみ変形性状に対する加熱条件の影響を検討するため、下面側のみから加熱を行う実験ケースも設定している。上下両面加熱時の試験体のセットアップ状況をFig. 15に示す。

6.3.2 载荷条件 試験体は、Fig. 15に示すようにピンローラー支承を用いて単純支持とした。载荷荷重は、スリムクリートブリッジの実施工スパンが長大であり、曲げ応力が支配的となることから、試験体の等曲げ区間に作用する曲げモーメントが、実大スパン14m時に長期荷重によって生じる最大曲げモーメントと同等以上となるよう設定した。

6.3.3 測定項目 温度測定項目は、炉内温度および試験体内部のPC鋼材の温度（幅方向外端部1点・同中央部1点）とした。試験体の鉛直変位は、両支持点の直上2箇所および载荷点内側の純曲げ区間3箇所にて、各2点ずつ計

10点測定した。なお、両面加熱時には、炉外より変位測定用インバー線を内部に配した鋼管を挿入し、試験体上面にて鉛直変位を測定している。

6.4 実験結果

6.4.1 爆裂性状 炉内温度の測定結果をFig. 16に示す。同図より、炉内温度はISO834標準加熱温度曲線にほぼ一致しており、加熱制御は良好に行われている。目視観察の結果、加熱中を通じて爆裂の発生は確認されず、また加熱終了後の試験体表面を確認した結果からも爆裂による剥離等は一切生じていない。本結果より、スリムクリートにPP繊維混入工法を適用することで、爆裂をほぼ完全に抑制できることが確認された。試験体の加熱中および加熱終了後における状況をPhoto 12に示す。

6.4.2 PC鋼材温度 PC鋼材の温度測定結果をFig. 16に示す。PC鋼材温度は、加熱開始後5分経過時から漸増し始め、その後はほぼ直線的に温度が上昇する傾向を示している。その後、PC鋼材温度が200°Cを超える加熱開始後40分～60分の間、温度が一時的に急増する現象が生じているが、この原因は明らかではないが、シース管内に充填されたグラウト中の水分蒸発の影響によるものと推察される。温度測定値が再び安定した加熱60分以降は、PC鋼材温度が再び直線的に上昇し続けており、試験体が荷重支持能力を喪失した加熱100分後においては、最高で600°Cに達している。

6.4.3 たわみ変形 試験体のスパン中央部における鉛直変位の経時変化をFig. 17に示す。図中のたわみ量は、スパン中央部における鉛直変位から支持点の鉛直変位を差し引くことにより算出した相対変位であり、加熱開始時をゼロとして示している。スパン中央部のたわみ量は、加熱の開始とともに緩やかに増大し、その後は徐々に変位速度を増しながらたわみ量が増大しているが、加熱開始90分以降はたわみ量が急増し、ISO834の規定によるたわみ制限値140mm ($=L^2/(400d)$, L:支点間距離, d:有効せい) およびたわみ速度制限値6.2mm/min ($=L^2/(9000d)$) をそれぞれ加熱開始後99分、97分に超過している。

6.4.4 耐火時間 本実験では、加熱開始100分後に試験体が荷重支持能力を喪失し、実験を終了した。ただし、前述の通り、荷重支持能力を喪失する直前にISO834の規定によるたわみ制限値(加熱99分後) およびたわみ速度制限値(同97分後) を超過しており、1.2倍の安全率を考慮した本試験体の保有耐火時間は、81分 ($=97/1.2$) となる。

7. まとめ

常温硬化型高じん性高強度モルタル「スリムクリート」を開発し、大林組技術研究所新本館「テクノステー

ション」内スリムクリートブリッジへの採用を通して、構造性能および耐火性能の検討を行った。その結果、スリムクリートは、引張応力度を許容するPC構造として設計した部材に求められる構造性能を保有すること、および、PP繊維を混入することで十分な耐火性能を保有することが明らかとなった。

本報においては、スリムクリートの構造特性を中心に示しているが、スリムクリートは耐久性においても普通コンクリートから飛躍的に向上することが見込まれている。今後、構造性能および耐久性を活かして、様々な構造物への適用を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 佐藤清, 他: 複合アーチ型シールドトンネルにおける隅部セグメントの配筋に関する検討, コンクリート工学年次論文集, 第32回, pp.835-840, (2008)
- 2) 土木学会: 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー127, (2007)
- 3) 平田隆祥, 他: 高じん性繊維補強モルタルを用いた実規模橋脚基部の震動破壊形態の改善, 第65回年次学術講演会講演概要集, (2010)
- 4) 小松雄一, 他: 薄型高靱性セメントボードを使った既設高欄改修工法, 第64回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, pp.783-784, (2009)
- 5) 早川健司, 他: 有機短繊維を使用した湿式吹付け高靱性ポリマーセメントモルタルの基礎性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.379-384, (2009)
- 6) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー113, (2004)
- 7) 石川理都子, 他: 居住者の価値意識に基づいた床スラブの上下振動性能ランク, 大林組技術研究所報, No.72, (2008)
- 8) 柏侯明子, 他: 床振動に関する居住者意識に基づいた性能ランクの設定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.439-448, (2008)
- 9) 日本コンクリート工学協会: 協会規準JCI-S-002-2003 「切欠きはりをを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法」
- 10) 日本コンクリート工学協会: 協会規準JCI-S-001-2003 「切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」, 付属書(参考) 「コンクリートの引張軟化曲線の推定方法」
- 11) 日本建築学会: プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, (1998)