

論文 セメント系材料を使用した PC まくらぎに関する実験的研究

趙 唯堅^{*1}・前田 昌克^{*2}・関 雅樹^{*3}

要旨：枠型形状を有する新しい鉄道用 PC まくらぎの開発を行っている。材料選定にあたって、50N 級コンクリート、50N 級鋼繊維補強コンクリート、100N 級コンクリート、および 200N 級の超高強度繊維補強コンクリート (UFC) の 4 種類のセメント系材料を対象として、枠型 PC まくらぎ模擬供試体による耐荷性能比較試験を行った。その結果、UFC は他の 3 材料に比べ耐力およびひび割れ抵抗性が優れ、軌道沈下抑止や道床横抵抗力の増強などまくらぎとしての機能性・耐荷力・耐久性を確保しながら、軽量化による施工性の向上も可能な材料であることが分かった。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート(UFC)、枠型 PC まくらぎ、埋込栓、曲げ試験、引抜き試験

1. はじめに

東海道新幹線に代表されるバラスト軌道は建設されてから既に 40 年経っており、使用されている PC まくらぎは、将来、経年劣化による更替が予想される。しかし、供用中のバラスト軌道には近年開発・実用化されたスラブ軌道やラダーまくらぎ等の適用は困難であり、無破線、無徐行が可能な新規まくらぎの導入が望まれた。

従来の PC まくらぎは梁形状の横まくらぎであるが、軌道沈下抑止および道床横抵抗力増などの観点から枠型形状のまくらぎが有効であると考えられている。一方、従来の PC まくらぎに使用されているコンクリートの強度として 50N/mm² 程度は一般的であるが、最近では、超高強度繊維補強コンクリート(UFC)などが開発・実用化されているように、コンクリート材料の進歩は著しい。

著者らは、これまで新たな鉄道用 PC まくらぎの開発を行ってきた^{1)~3)}。開発は、道床横抵抗力の増強が期待できる枠型まくらぎを基本仕様とし、まくらぎの耐荷力・耐久性能と従来機械による敷設施工が両立できる最適な材料の選定から着手している。

本研究では、50MPa 級コンクリート、50MPa 級鋼繊維補強コンクリート、100MPa 級コンクリート、および 200MPa 級の超高強度繊維補強コンクリート（以下、それぞれ 50N、50N-SFRC、100N、および UFC と記す）の 4 種類のセメント系材料を対象として、同じ形状を有する枠型 PC まくらぎ模擬供試体を製作し、まくらぎの基本的な力学特性に着目して、種々の載荷条件による曲げ耐力比較試験および埋込栓の引抜き耐力比較試験を行った。

2. 超高強度繊維補強コンクリート (UFC)

超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high-strength Fiber reinforced Concrete, 以下 UFC) とは、反応性微粉

末を使用した無機系複合材料であり、優れた強度特性だけでなく、自己充填性、高靱性、高耐久性などを特徴とした新素材である。また、専用鋼繊維が容積比で 2% 配合されているため、原則として鉄筋を必要としない。

UFC の水セメント比は約 22% であるが、表-1 に示すように水結合材比では約 14% である。すなわち、水和反応限界付近の水分しか与えられていないことになり、生成物中の空隙を極限まで抑えた最密充填が実現される。また、専用の高性能減水剤を適用しているため、流動化後は容積比 2% の鋼繊維を投入しても、練り上がり時のモルタルフロー値で 200~300mm の高い流動性を有する。このため、UFC は高い自己充填性を有し、締固め不要である。打設後は、常温で 24~48 時間（初期養生）、その後 90℃ の蒸気養生を 48 時間（標準熱養生）実施する。標準熱養生後の材料特性を以下に示す。

- ・圧縮強度：200N/mm²（φ5×10cm 供試体による）
- ・曲げ強度：45N/mm²（4×4×16cm 供試体による）
- ・引張強度：11N/mm²
- ・弾性係数：50kN/mm²
- ・乾燥収縮：50μm/m（普通コンクリートの 1/10 以下）
- ・クリープ係数：0.4（普通コンクリートの 1/5 以下）

表-1 UFC の示方配合 (kg/m³)

水	粉体 (フレックス)	鋼繊維 (FM)	高性能 減水剤	合計
150	2254	157	30	2591

これらの特性により、鉄筋を配置することなく UFC を PC 部材に適用することが可能となっている。また、UFC は非常に緻密なため、硬化体の耐久性は極めて優れている。塩化物イオン拡散係数は普通コンクリートの

*1 大成建設（株） 土木技術開発部 課長 工博（正会員）

*2 東海旅客鉄道（株） 技術開発部 主幹研究員 工修（正会員）

*3 東海旅客鉄道（株） 技術開発部 部長 工博（正会員）

1/100 以下 ($0.0019\text{cm}^2/\text{年}$), 113 週間の中性化促進試験では中性化は認められない (500 年推定値 2mm 以下)。

なお, 2004 年 9 月に土木学会より「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)」⁴⁾ が発刊され, UFC 材料を用いた構造物の構造性能, 耐久性の照査方法および施工に関する諸規定が示されている。

3. 実験概要

3.1 供試体

図-1 に枠型 PC まくらぎ模擬供試体の形状寸法および鋼材配置を示す。耐荷性能比較検討のため, 形状寸法および鋼材配置は統一した。軌間幅は東海道新幹線の 1508mm に合わせ, 線路方向のピッチは 40 本/25m と仮定した。まくらぎの断面形状は 2 方向ともに等断面の台形形状とし, 断面寸法は, 軌陸車による敷設を考慮して施工可能な重量 450kg を上限値として設定した。このように設定した枠型まくらぎの重量は約 440kg である。

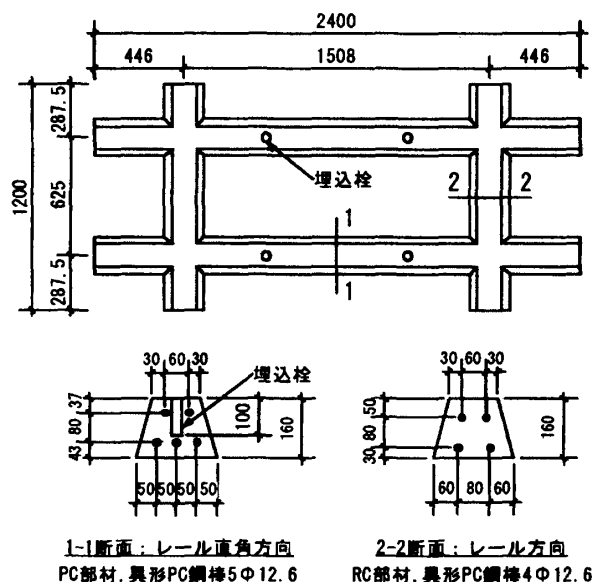


図-1 供試体の形状寸法および鋼材配置

材料の違いによる埋込栓 (レール締結用樹脂系インサート) の引抜き耐力を比較検討するために, 埋込栓 (JIS E 1118 の 102 形) を供試体に埋め込んだ。ただし, 供試体は曲げ破壊試験と兼用するため, 埋込栓の埋込位置は図-1 に示すように先行曲げ試験の影響が少ない場所を選んだ。また, 埋込栓が主鋼材と干渉しないように, 埋込長さは規格より 30mm 短い 100mm とした。

まくらぎの鋼材配置は部材軸方向鋼材のみとし, レール直角方向とレール方向はともに異形 PC 鋼棒 $\phi 12.6$ を使用した。ただし, レール直角方向はプレテンション方式による PC 構造, レール方向は無緊張の RC 構造とし

た。また, レール直角方向の断面に導入する有効プレストレスは, 材料強度に応じて 50N, 100N, 200N 級にそれぞれ 8.4, 10.6, 14.0N/mm² とした。使用鋼材の機械的性質を表-2 に示す。

表-2 使用鋼材の機械的性質

基本径 (mm)	公称 断面積 (mm ²)	耐力 (N/mm ²)	0.2%永久伸び 引張荷重 (kN)	最大 引張荷重 (kN)	伸び (%)
13.1	125	1275	160	178	5以上

表-3 コンクリートの示方配合 (単位: kg/m³)

種類	水セメント比 W/C (%)	単位水量 W (kg/m ³)	細骨材率 S/a (%)	粗骨材寸法 Gmax (mm)	スランプ SL (cm)	空気量 Air (%)
50N	43.0	170	48	15	18	2.0
100N	21.3	160	37	15	60*	2.0

*100Nの場合はスランプフローである

用いる 4 種類のコンクリート材料のうち, 50N と 100N コンクリートの配合は試験練りにより表-3 のように決定した。50N-SFRC は 50N の配合をベースに一次練り後に鋼繊維を投入し, 更に二次練りを行なった。50N-SFRC に添加する鋼繊維は薄板切断法により製造されたものである。まくらぎ 2 方向主鋼材のかぶりとあきを考慮して, 長さ 20mm, 断面寸法 0.5×0.5mm のものを使用し, 繊維混入率 (混入量) は過去の実績を参考して 1.0vol% (80 kg/m³) とした。また, 50N と 50N-SFRC, および 100N コンクリートに用いる粗骨材は鋼材のかぶりとあきを考慮して, 砕石 #1505 を使用した。

UFC は太平洋セメント (株) 製プレミックス品を使用した。専用鋼繊維 (直径 0.2mm, 長さ 15mm) の混入率は 2vol%, 配合は表-1 に示す。プレストレス導入時強度 (60 N/mm^2) に達するまで常温養生し, その後 90℃48h の標準熱養生を行った。

4 種類のコンクリートの硬化後特性について, ①圧縮強度と弾性係数, ②割裂引張強度, ③曲げ強度の 3 試験を「コンクリート標準示方書」⁵⁾ および「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)」⁴⁾ に準拠して実施した。

3.2 載荷実験方法

4 材料を適用した枠型まくらぎの比較試験項目は, 部材の曲げ耐力試験と埋込栓の引抜き耐力試験の 2 つである。曲げ耐力試験の載荷条件は, 枠型形状の特殊性を考慮して図-2 に示す 4 条件とした。条件 1, 4 は図-1 に示すような台形形状での載荷, 条件 2, 3 は台形をひっくり返した状態での載荷である。

供試体は各材料ごとに2体ずつ製作し、兼用して4条件の実験に供した。先行試験による損傷が後続試験に影響を及ぼさないように、試験部位の使い分けを図-3のようにした(赤破線は1体目、青破線は2体目)。曲げ耐力試験の荷重方法および評価基準として、条件1と条件2は原則的に「JIS E 1201 プレテンション式PCまくらぎ」に準じた。条件3は、条件2と同じ意味合いでレール方向に対して設定した。条件4のねじり試験については明確な基準はないが、部分的なバラスト陥没が発生した場合を想定した最も厳しい条件である。

荷重は単調荷重とし、荷重は門型フレームから反力をとって油圧ジャッキより行った。計測項目は荷重、支点に対する荷重点の相対たわみ、コンクリート引張縁ひずみ、およびひび割れ幅とした。曲げ耐力試験の荷重方法および試験状況を写真-1に示す。なお、ひび割れ発生荷重は目視によるひび割れ確認と、ひずみゲージの急変点とを照合して判断した。ひび割れ幅は最大と思われるひび割れ幅をクラックスケールにより計測した。

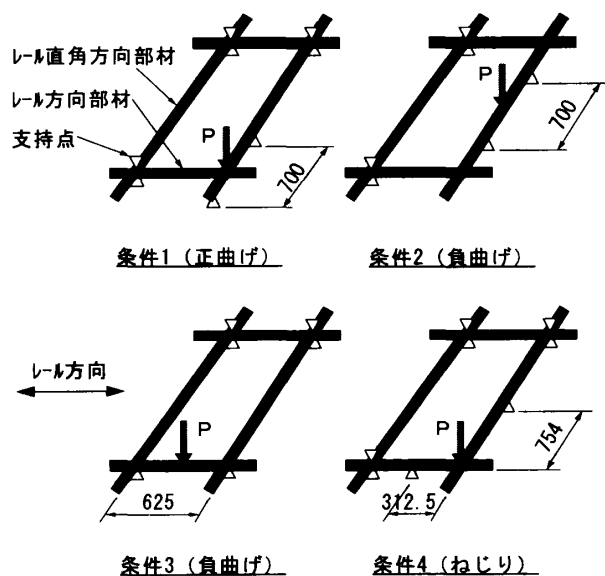


図-2 試験方法(荷重条件)

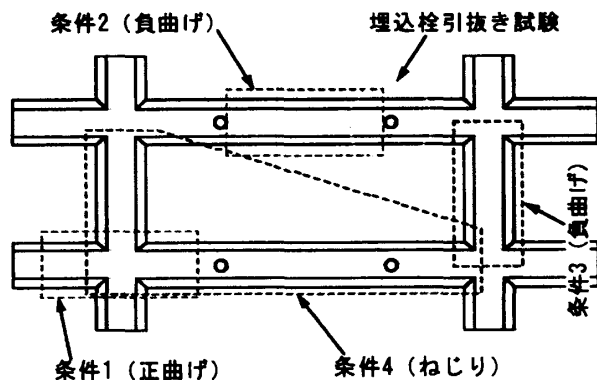
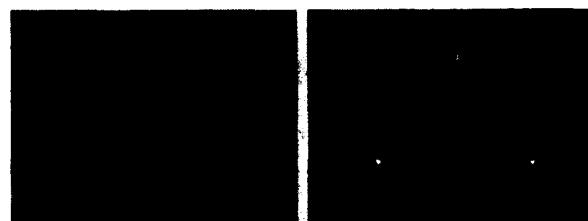


図-3 試験部位の使い分け



条件1

条件2



条件3

条件4

写真-1 曲げ耐力試験状況

埋込栓の引抜き耐力試験は、部材曲げ耐力試験終了後に同じ試験体を使用して、損傷を受けていない部位の埋込栓を選び、各材料ごとに3本ずつ実施した。図-4に埋込栓の引抜き試験方法と装置構成を示す。荷重は単調荷重とし、計測項目は荷重と拔出し変位(テンションバー付根部)とした。なお、試験終了後、破壊面の状況を観察した。引抜き試験の状況を写真-2に示す。

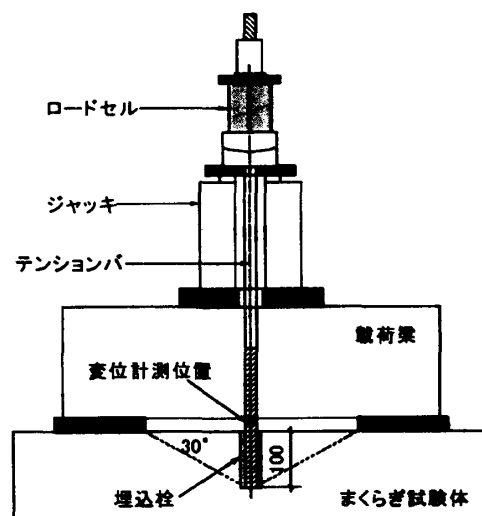


図-4 埋込栓の引抜き試験方法と装置構成

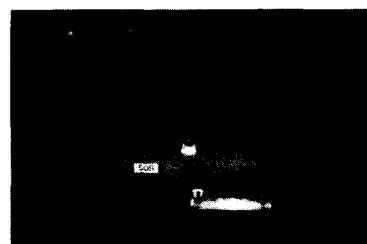


写真-2 引抜き試験状況

4. 実験結果および考察

4.1 材料特性試験

表-4に4材料の材齢28日(UFCは標準熟養生後)の諸試験結果を示す。これより、UFCの割裂引張強度や曲げ強度は他の3材料と比べ1桁大きいことが判る。

図-5に100×100×400試験体による4材料の曲げタフネス試験結果の比較を示す。50Nと100N級コンクリートでは、ひび割れ発生と同時に耐荷能力を失っている。50N-SFRCでは、曲げひび割れ発生後の脆性破壊は緩和されているが、ひび割れ開口とともに荷重は低下を辿る一方である。一方、UFCでは、曲げひび割れが発生した後も荷重がさらに大きく上昇し、曲げ強度はひび割れ発生応力の約2倍程大きい。ひび割れ強度の違いだけでなく、ひび割れ発生後に応力が上昇か下降かの違いはUFCと他の3材料との大きな差異である。

表-4 材料試験結果 (N/mm²)

材料区分 強度区分	50N	50N-SFRC	100N	UFC
圧縮強度 f_c *	68.3	57.8	118	203
弾性係数 E_c	37000	35600	42600	52500
割裂強度 f_t	3.3	3.66	4.09	11.2
曲げ強度 f_b **	5.51	5.88	7.25	37.1

* $\phi 10 \times 20$ cm供試体による、** $10 \times 10 \times 40$ cm供試体による。

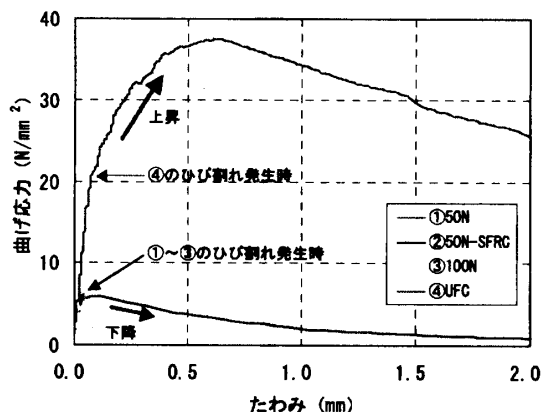


図-5 曲げタフネス試験結果

4.2 まくらぎの曲げ耐力試験

図-6に載荷条件1~4の荷重-変位関係、荷重-ひび割れ幅関係を示す。まず、荷重-変位関係では、各材料の弾性係数に応じて初期勾配が異なっており、ひび割れが発生してから材料種類によって剛性が異なっている。剛性の大小関係は50N, 50N-SFRC, 100N, UFCの順で大きくなっている。次に、載荷条件1, 2のPC部材に比べ、条件3はRC部材のため、荷重がピークに達する時のたわみは大きい。また、条件4では、2方向の部材スパンが異なるため、実験ではまずレール方向(短辺

方向)の中央支点上側にひび割れが発生し、次にレール直角方向(長辺方向)の中央支点上側にひび割れが生じた。破壊も同様の順序で起こった。また、ピーク荷重を過ぎた後の荷重低下については、条件1, 2に比べ条件3と4の方は緩やかである。これは、PCとRCの違い、および支持条件・載荷スパンの違いにより、破壊モードが異なったものと思われる。

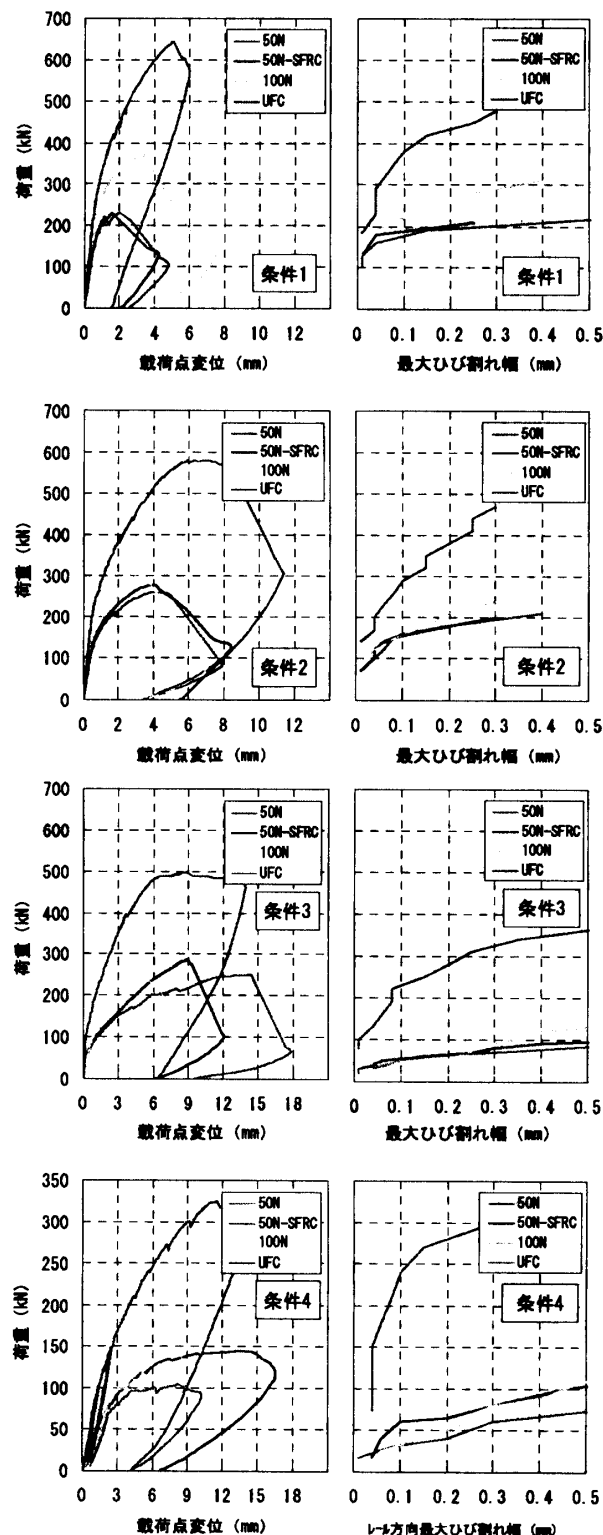


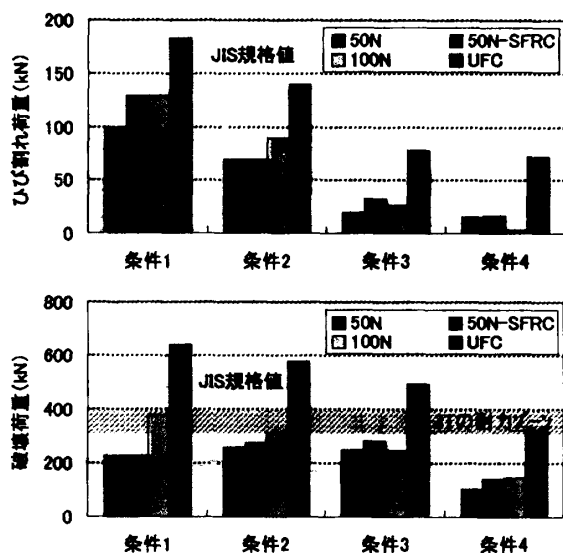
図-6 曲げ耐力試験結果 (条件1~4)

次に、荷重－ひび割れ関係では、どの荷重条件でも 50N、50N-SFRC、および 100N の 3 材料はひび割れ発生後、ひび割れ幅は急激に拡大している。それに対し、UFC では優れたひび割れ抵抗性を示し、同じ幅のひび割れを発生させるのに必要な荷重は、他の 3 材料に比べ約 2 倍大きくなる。言い換えれば、仮に巨大輪重や路盤陥没などの異常によってまくらぎにひび割れが生じたとしても、UFC の場合は非常に微細なひび割れに留まり、剛性低下が少なく、耐久性にも問題が生じないと推測される。

表－5 は実験のひび割れ発生荷重および破壊荷重を示し、図－7 はそれらを荷重条件ごとに 4 材料の比較を図示したものである。荷重支持条件は若干異なっているが、参考のために JIS E 1201 の荷重規格値も示した。また、条件 4 のひび割れ発生荷重は、レール方向とレール直角方向の両方を斜線で区切って表－5 中に示した。

表－5 ひび割れ発生荷重および破壊荷重 (kN)

項目	材料区分	試験条件		レール直角方向	レール方向	2方向
		条件1	条件2	条件3	条件4	条件4
		レール座面	中央断面	中央断面	1/4選かし	ねじり
		正曲げ	負曲げ	負曲げ		
JISひび割れ荷重		114	95	—	—	—
ひび割れ荷重 実験値	50N	100	70	20	16/70	
	50N-SFRC	130	70	33	17/65	
	100N	130	90	27	4/80	
	UFC	183	140	79	73/150	
JIS破壊荷重		190	171	127	—	—
破壊荷重 実験値	50N	231	261	250	104	
	50N-SFRC	229	278	285	144	
	100N	375	314	247	145	
	UFC	642	579	497	324	



図－7 荷重条件ごとに 4 材料の比較

表－5 および図－7 で分かるように、50N、50N-SFRC、および 100N 級コンクリートの 3 材料では、ひび割れ発生荷重は JIS 規格値をクリアできず、どの試験条件でも

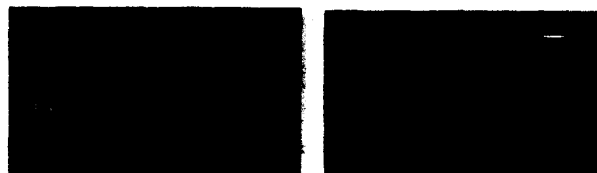
大差はなかった。また、重量制限で断面が小さい分、50N と 50N-SFRC の破壊耐力は既存まくらぎの実保有耐力（例えば 3T では約 300～400kN⁶⁾）を下回っていた。

一方、UFC の場合は、ひび割れ発生荷重は規格値を十分満足しており、破壊耐力はいずれの試験条件でも他の 3 材料に比べ約 2 倍以上であり、断面が小さくても既存まくらぎの実保有耐力を上回った。

表－6 に曲げ耐力試験の破壊モードを示す。荷重条件として、条件 1～3 はせん断破壊、条件 4 は曲げ破壊しやすい傾向にある。これは支持条件と荷重スパンの影響によるものと思われる。一方、使用材料について比べてみると、50N、50N-SFRC、および 100N の 3 材料はせん断破壊、UFC は曲げ破壊が多い。これは UFC の鋼繊維によるせん断補強効果が顕著であったからである。写真－3 に破壊状況の例を示す。

表－6 曲げ耐力試験の破壊モード

項目	材料区分	試験条件		レール直角方向	レール方向	2方向
		条件1	条件2	条件3	条件4	条件4
		レール座面	中央断面	中央断面	1/4選かし	ねじり
		正曲げ	負曲げ	負曲げ		
破壊モード	50N	せん断	せん断	せん断	せん断	曲げ
	50N-SFRC	せん断	せん断	せん断	せん断	せん断
	100N	せん断	せん断	せん断	せん断	曲げ
	UFC	せん断	曲げ	曲げ	曲げ	せん断



写真－3 曲げ耐力試験の破壊状況の例

4.3 埋込栓の引抜き耐力試験

表－7 に埋込栓の引抜き試験の結果を示し、図－8 に引抜き耐力を材料ごとに図示した。埋込栓の埋込長さが 100mm と規格のものより短いため、JIS E 1201 の破壊荷重規格値 (50kN) と単純に比較できないが、使用材料による違いの相対比較はできる。ちなみに、本実験では、配置スペースがないため、埋込栓の回りのコンクリートを補強するスパイラル筋は使用していない。

表－7 と図－8 に示すように、コンクリート強度が高いほど埋込栓の引抜き耐力は高い。特に、UFC の場合、平均引抜き耐力は JIS 規格破壊荷重の 2 倍以上もある。ただし、引抜き耐力の増加は材料強度の増加に比べて鈍い。これは、表－7 と写真－4 に示すように、コンクリート強度および補強繊維の有無によってコンクリート破壊面の形状や大きさが異なることに起因する。50N と

50N-SFRC の場合、コンクリート破壊面は浅くて広い。また、埋込栓は全長分抜出されている。一方、UFC では、破壊面は狭いだけでなく、埋込栓が中間付近でちぎれて破壊した。このことから、UFC の場合の引抜き耐力は埋込栓自体の強度にも影響されているものと推測される。なお、100N では、50N と UFC の中間的な破壊性状を示している。

表-7 埋込栓の引抜き試験結果

材料区分	試験名	圧縮強度* (N/mm ²)	引抜き耐力 (kN)	平均値 (kN)	破壊パターン
50N	50-1	68.3	72	63	コンクリート水平割裂破壊 +埋込栓抜出し
	50-2		63		
	50-3		54		
50N-SFRC	50S-1	57.8	69	66	コンクリート水平割裂破壊 +埋込栓抜出し
	50S-2		60		
	50S-3		68		
100N	100-1	118	73	82	コンクリート水平割裂破壊 +埋込栓抜出しor破断
	100-2		93		
	100-3		81		
UFC	UFC-1	202	115	108	UFCコン状破壊 +埋込栓破断
	UFC-2		114		
	UFC-3		94		

* 圧縮強度はダクトルを除き、材齢28日の強度試験値。

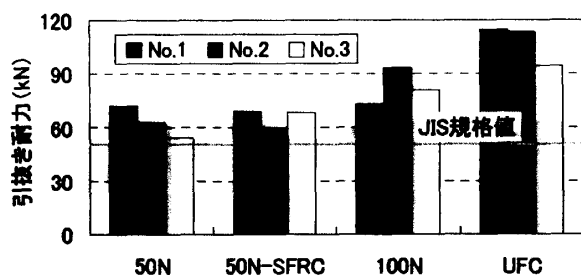


図-8 引抜き耐力の比較

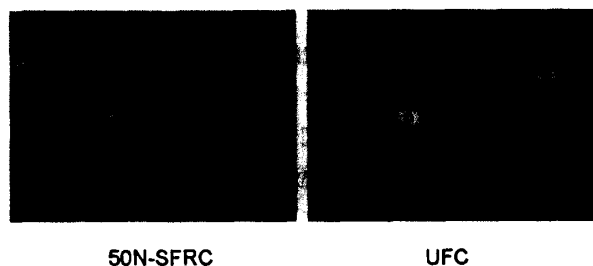


写真-4 引抜き試験の破壊面

5. まとめ

枠型形状を有する新しい PC まくらぎの開発にあたって、50N 級コンクリート、50N 級鋼繊維補強コンクリート、100N 級コンクリート、および 200N 級の超高強度繊維

補強コンクリート (UFC) の 4 種類の材料を対象に、模擬供試体の載荷試験により耐荷性能の比較検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 50N, 50N-SFRC, および 100N 級コンクリートの 3 材料では、ひび割れ発生荷重および破壊耐力の差は小さく、有意義の差は認められなかった。また、本論文の試験方法では、上記 3 材料のひび割れ発生荷重は JIS 規格値 (保証荷重) を下回っていた。
- (2) UFC の場合は、ひび割れ発生荷重と破壊耐力は他の 3 材料に比べ 2 倍以上大きい。また、ひび割れ発生荷重は JIS 規格荷重の約 3 倍、破壊耐力は JIS 規格耐力の約 2 倍である。さらに、巨大輪重が作用してひび割れが発生した場合でも補強繊維によるひび割れ幅の抑止効果は大きい。
- (3) UFC を使用した埋込栓の引抜き耐力は 50N-SFRC の 1.6 倍以上である。また、スパイラル筋を配置しなくても、JIS 規格破壊荷重の 2 倍以上の耐力を有する。

以上のように、UFC は、軌道沈下抑止や道床横抵抗力の増強などまくらぎとしての機能性・耐荷力・耐久性を確保しながら、軽量化による施工性の向上も可能な材料である。

参考文献

- 1) 前田昌克, 可知隆, 趙唯堅, 関雅樹: 超高強度繊維補強コンクリートを使用した新型まくらぎの基本性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, 2007 年 7 月
- 2) 趙唯堅, 水谷公昭, 関雅樹, 前田昌克, 可知隆: セメント系材料を使用した PC まくらぎ模擬供試体の性能比較実験, 土木学会第 62 回年次学術講演会概要集, 2007 年 9 月
- 3) 前田昌克, 可知隆, 関雅樹, 趙唯堅, 小尾博俊: 超高強度繊維補強コンクリートを使用したまくらぎの基本性能, 土木学会第 62 回年次学術講演会概要集, 2007 年 9 月
- 4) 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), 2004 年 8 月
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002 年 3 月
- 6) 日本鉄道施設協会: PC マクラギの耐用寿命の研究, 1987 年 1 月