U.D.C 624.012

CB パネル工法の適用範囲拡大に関する検討
—無機系プレキャストパネルの収縮, ひび割れ抑制に関する実験的検討—

松田　充弘*　　笠倉　亮太*　　羅　　超賢*　　黒岩　俊之*

要　約：　筆者らが開発した「CB パネル工法」は，生産性向上を目的とした耐震補強工法の１つであり，プレキャストパネルに難燃材料であるレジンコンクリートを使用している。不燃材料の使用が必要となる場合がある駅改札部や地下部等へも適用を拡大するため，無機系材料を使用したプレキャストパネルを開発した。無機系材料を使用したプレキャストパネルに用いるモルタルは，超高強度繊維補強コンクリートに準ずる材料であり，収縮によるひび割れ発生のリスクが懸念された。このため，プレキャストパネルに使用する材料の配合選定のための長さ変化試験と，選定した配合にて製作したプレキャストパネルによる実大施工試験と曝露試験を実施した。その結果，プレキャストパネルの収縮抑制効果が得られる配合を選定し，施工に起因するプレキャストパネルのひび割れ発生リスクが低減できていることを確認した。

ｷｰﾜｰﾄﾞ：　耐震補強，曝露試験，プレキャスト化，生産性向上

目　次：

1. はじめに
2. 配合選定
3. 施工試験
4. 曝露試験
5. まとめ

1. 研究の背景

CB パネル工法[1] の概要を図１に示す。本工法は，補強鋼材を兼ねた組立用の鋼材（以下，接続鋼材）とボルトにより既設柱の周囲にプレキャストパネル（以下，パネル）を配置し，既設柱との隙間に高強度繊維補強モルタル（以下，モルタル）を充填する巻立て補強工法である。RC 巻立て補強で行われている補強鉄筋の組立，型枠組立および脱型作業を省略し，大型揚重機を必要としないため，工期短縮と狭隘部での施工を可能とし，これまでに約 340 本の鉄道高架橋柱の施工実績がある[2),3)]。

本工法はこれまでパネルに難燃材料であるレジンコンクリートを使用していたが，不燃材料の使用が必要となる場合がある駅改札部や地下部等へも適用を拡大するため，繊維補強モルタルを使用したパネル（以下，無機系パネル）を開発した[4)]。レジンコンクリートを用いたプレキャストパネル（以下，従来パネル）と開発した無機系パネルの比較表を表１に示す。無機系パネルに使用したモルタルは，超高強度繊維補強コンクリート（以下，UFC）に準ずる材料であり，耐震補強後に収縮によるひび割れ発生のリスクが懸念された。このため，長さ変化試験による配合選定を行った上で，施工試験と曝露試験を実施し，施工時と長期材齢時のひび割れ発生を目視確認した。

図１　工法概要

表１　パネルの比較表

	従来パネル	無機系パネル
材質	レジン コンクリート	繊維補強 コンクリート
結合材	液状レジン	セメント系
製造方法	加圧プレス成型	押出し成形
繊維種類	ビニロン	ポリプロピレン
繊維径	440 μ m	5.6dtex*1
繊維長	24mm	4mm

＊1：単位長さ当たりの繊維重量、繊維径計測不可

2. 配合選定

2.1　長さ変化試験

収縮低減剤の種類を変数としたパネル試作品の長さ変化試験を実施し，収縮低減効果を確認した。また，無機系パネルは押出し成型にて製作しており，押出成形可能な練上がり温度に制限があったため，練上がり温度低減効果を確認した。

試作品に使用した繊維補強モルタルの配合，練上がり温度を表２に示す。試験体は基本配合である No. 1，収縮抑

＊技術研究所　社会基盤技術研究部　土木構造グループ

制を目的とした単位水量低減のため，粉体減水剤を加えたNo. 2，単位水量の低減と練上り温度低減のため液体減水材を用いたNo. 3であり，各々3体ずつ製作した。長さ変化測定はJIS A 1129 コンクリートの長さ変化測定方法（コンタクトゲージ法）を参考にパネルの蒸気養生終了後に実施した。測定は1日，3日，7日，14日，28日，56日，91日，120日，150日，217日である。

長さ変化試験の結果を図2に示す。基本配合であるNo. 1は試験開始から56日目程度で400μ程度に漸近している。一方，粉体減水剤を使用したNo. 2は56日目程度で270μ程度に漸近し，No. 1より収縮が抑制された。また，練上り温度低減として液体減水材を用いたNo. 3は275μ程度に漸近しており，No. 2と同様に収縮低減効果が確認された。No. 2は，表2に示す通り練上がり温度が53℃と高く，気温が高い場合は，押出成形できない可能性があったため，No. 2と同様に収縮抑制効果が確認され，練上がり温度が低減されたNo. 3の配合を選定した。

また過去の高強度繊維補強モルタルの直接引張試験[5]では，50μ程度で引張応力-ひずみ関係の勾配が変化しており，50μ程度で微細ひび割れが発生している可能性がある。図2より，製造後14日以降は，No. 3の長さ変化率の変動量が50μ以下となっていることから，製造後14日以降に実大施工試験を実施することとした。

2.2 曲げ試験

長さ試験にて選定したNo. 3の配合で製作した試作品3体に対し曲げ試験を行い，所定の強度を確保できているか確認した。図3に曲げ試験の概要を示す。試験体は，長さ900 mm，幅300 mm，厚さ15 mmとし，支間長700 mmとした。曲げ強度は平均35.6 N/mm^{2}となり，従来パネルの規格値20 N/mm^{2}以上の強度[1]を確保していることを確認した。

2.3 パネル出来形確認

押出成形後にパネルに反りが発生すると，パネル組立時にパネルにひび割れが発生することが懸念されたため，押出機の養生トレーにゆがみがないトレーを使用することで，パネル製造時の反りを抑制した。パネル製造時の反りは，パネル養生後に，図4に示すように，製品表面の短手方向全体に定規を当て端部から90 mm，435 mm，780 mmの3箇所中心部にデプス計測器等で測定した。反りの目標値は±1 mm以内とし，測定結果は反り−0.02～0.17 mmとなり，パネル製造時の反りが抑制されていることを確認した。

3. 施工試験

3.1 概要

パネル組立やモルタル充填等施工時のパネルのひび割れ発生の有無を確認することを目的として，実施工を模した施工試験を実施した。施工試験は，高架橋柱を模した800×800 mmの断面を有する模擬柱（木製）を作成し，模擬柱に対して，CBパネル工法による補強を行った。表3に充填するモルタルの配合，図5にパネル割付を示す。CBパネルによる補強は高さ1200 mmまでとし，モルタルの充填は，充填高さ1.2 mとした。

ひび割れ状況確認のため，パネル組立完了時とモルタル

表2 繊維補強モルタルの配合，練上がり温度

No.	水粉体比 %	単位量 (kg/m^3) 水	単位量 (kg/m^3) 粉体	練上り温度℃	備考
1	22.8	98	429	—※	標準配合
2	18.5	79	427	53	粉体減水剤
3	18.1	77	427	40	液体減水剤

※未測定

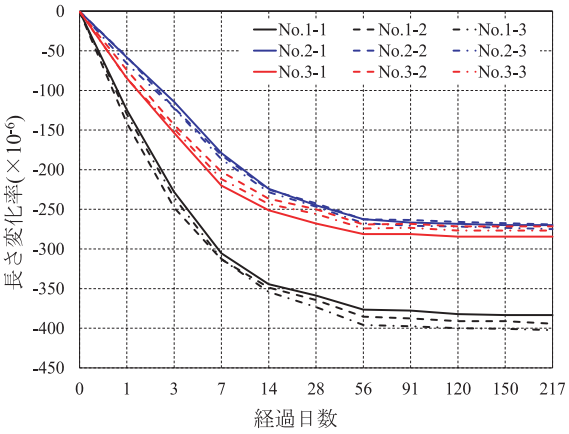


図2 長さ変化試験結果

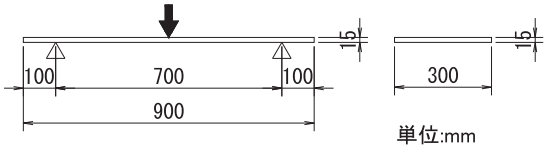


図3 曲げ試験概要

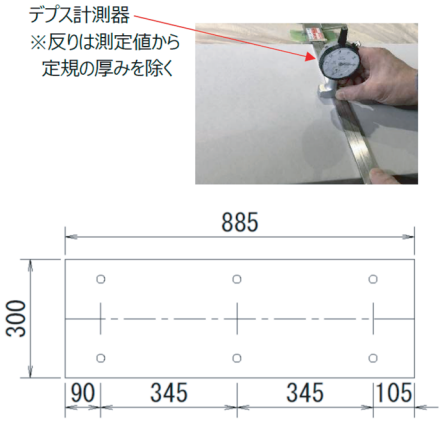


図4 反り計測位置図

表3 モルタルの配合

水粉体比 %	鋼繊維混入率 Vol.%	単位量(kg/m^3) 水	プレミックスモルタル	鋼繊維
11.0	1.75	238	2166	137

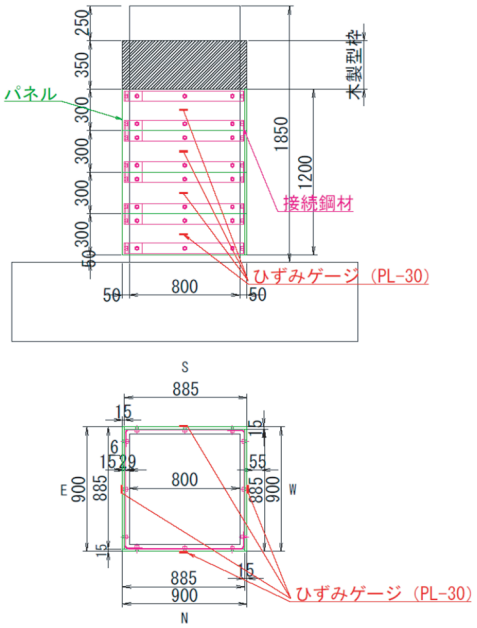


図 5　パネル割付図

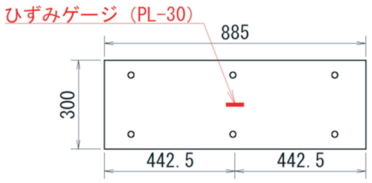


図 6　ひずみゲージ位置詳細図

充填完了時に，ひび割れの目視確認を行った。さらに，ひび割れ発生有無の確認のため，図 6 に示す位置にひずみゲージを水平方向に貼り付け，モルタル充填時からひずみ計測を開始した。

3.2　パネル組立状況

パネル組立完了時にひび割れを目視確認した結果，ひび割れは確認されなかった。このため，押出機の養生トレーにゆがみがないトレーを使用し，パネルの反りを抑制することで，組立時のひび割れが抑制できると考えられる。

3.3　モルタル充填状況

図 7 に No. 1 パネルのひび割れ写真，図 8 にひび割れの最終確認状況を示す。図 8 では，施工試験時に確認したひび割れを黒線，暴露試験時に確認したひび割れを赤線で示す。表 4 にモルタル充填開始時からのひずみ一覧，図 9 にモルタル充填後 12 時間までの各パネルのひずみ計測結果を示す。1 段目パネルは充填時にひび割れが発生したため，充填開始後 8.5 時間程度で計測を終了した。1 段目パネルにおいて，ひずみの急激な変化点の平均値である 603 μ をひび割れ発生ひずみとし，図 9 に赤点線で示す。

モルタル充填開始時からのひずみ変化は，図 9 より，充填開始時から全パネルのひずみが徐々に増加し，充填高さが 1.1 m となった際に 1 段目パネルの No. 1 のひずみが 616 μ に到達し，その後ひずみが急増して，図 7，図 8 に示す通り，1 段目パネルの No. 1 のパネル中央部でひび割れが発生したため，充填を終了した。その後，図 9 に示す通り，その他の 1 段目パネル（No. 2,3,4）のひずみは概ね一定となり，1 段目パネルの No. 4（約 2.6 時間後，ひずみ 558 μ），No. 2（約 4.6 時間後，ひずみ 640 μ），No. 3（約 7.6 時間後，ひずみ 596 μ）において急激なひずみの増加または，減少が発生し，図 8 に示すパネル中央部に鉛直ひび割れが確認された。モルタル充填から数時間後以内にひび割れ発生が確認されたことから，モルタル側圧によりひび割れが発生したと考えられる。

図 9 より，2 段目～4 段目パネルはモルタル充填後 12 時間以内にはひび割れ発生ひずみを超過せず，ひび割れは確認されなかったため，充填高さを制限することでモルタル側圧に起因するひび割れは抑制できると考えられる。

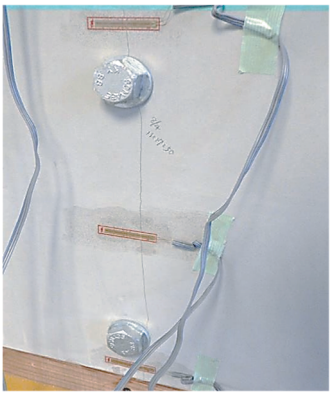
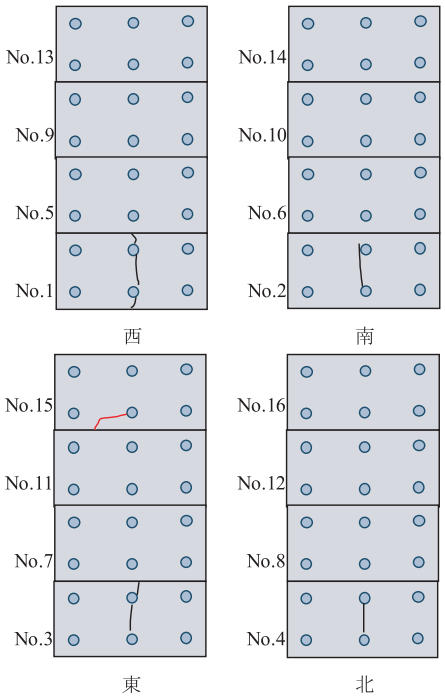


図 7　No. 1　ひび割れ写真



※施工試験時に確認したひび割れを黒線，暴露試験時に確認したひび割れを赤線で示す。

図 8　パネルひび割れ状況

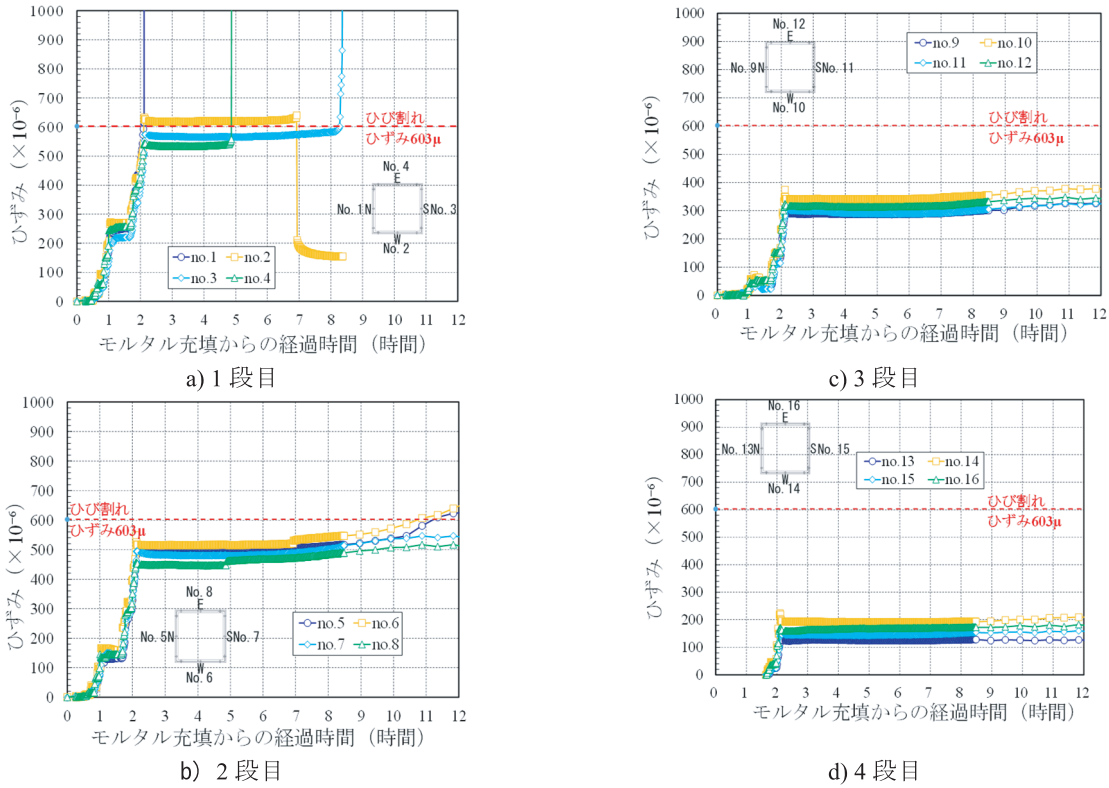
表 4　充填開始時からのひずみ（×10⁻⁶）計測結果

計測日		パネル段数、方位、No.															
		1 段目				2 段目				3 段目				4 段目			
		W	S	E	N	W	S	E	N	W	S	E	N	W	S	E	N
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
（施工試験）充填完了		616	640	596	558	456	522	459	455	285	342	278	320	122	195	144	165
暴露試験	充填後 1 日目	-	-	-	-	620	883	500	473	289	347	286	306	108	185	135	167
	充填後 14,28 日目※1	-	-	-	-	501	603	430	436	187	242	190	243	14	129	21	109
	充填後 168 日目	-	-	-	-	809	848	644	790	469	527	607	518	390	364	379	266

※　1 段目パネル値は，ひび割れが発生したと考えられる，ひずみが急増・急減したひずみである。

※　ひび割れ発生ひずみ 603 μ を超過する値を赤文字で示す。

※1　ひずみが最小となった日の値を示す。



a) 1 段目　　c) 3 段目

b) 2 段目　　d) 4 段目

図 9　モルタル充填後 12 時間までのパネルひずみ

表 5　応力算定条件

	単位	値	
		パネル	接続鋼材
モルタル単位体積重量 [1]	kN/mm²	24.9	
厚さ	mm	15	6
ヤング係数	kN/mm²	28.3※	200[1]

※　別途実施したパネルの曲げ試験から算定

表 6　最下段パネル発生応力

モデル	梁モデル	支持条件	発生応力計算値 (N/mm²)	計算値/材料試験値
1	鋼材無視	単純	43.5	1.22
		固定	14.5	0.41
2	重ね梁	単純	41.2	1.16
		固定	13.7	0.39

3.4　パネルの発生応力の検討

モルタル充填高さ 1100 mm 時のモルタル側圧と最下段パネルに発生する応力算定を行った。モルタルの側圧は液圧とした。パネルに発生する応力は以下 2 モデルで算定した。算定条件を表 5 に示す。

モデル 1：接続鋼材を無視し，パネルのみで側圧に抵抗すると仮定し，スパンは 690 mm とした。

モデル 2：図 5 に示す通り，接続鋼材は離散的に配置されており，パネル高さに占める接続鋼材の占有率を考慮し，厚み t=3（=6×150/300）mm の接続鋼材が高さ方向に一様に配置され，鋼材とパネルが重ね梁として側圧に抵抗すると仮定する。重ね梁のスパンは最縁端のボルト距離 690 mm とした。なお，パネルはボルト固定されているため，モデル 1，2 ともに支持条件を両端固定，単純支持のそれぞれについて計算した。

表 6 に最下段パネルに発生する応力を示す。また，材料

試験値との比（σ_{cal}/f_t）も併せて示す。接続鋼材を無視し，単純支持としたモデル 1 では，（σ_{cal}/f_t）は 1.22 となり，充填高さ 1100 mm ではひび割れが発生する結果となり施工試験の結果と合致した。また，両端固定とした場合は，（σ_{cal}/f_t）が 0.41 となり，施工試験のひび割れ状況と相違する結果となった。一方，重ね梁としたモデル 2 では，単純支持では（σ_{cal}/f_t）が 1.16，両端固定では 0.39 であり，支持条件によらず（σ_{cal}/f_t）はモデル 1 よりも小さくなった。なお，モデル 1，2 ともに単純支持はひび割れが発生する結果となったが，両端固定ではひび割れが発生しない結果となり，本工法のパネルのボルト固定状況は両端固定よりも単純支持に近い支持条件にあるものと考えられる。

4. 曝露試験

4.1 概要

施工試験で施工した模擬柱に対して，夏期から冬期にかけての実環境におけるひび割れ発生状況を確認するため，駅構内を想定した雨掛かりのない環境下にて曝露試験を実施した。ひずみ計測は，モルタル充填後 168 日継続するとともに 3 日，7 日，14 日，28 日，60 日，以降月 1 回程度ひび割れの目視確認を行った。

4.2 充填後 28 日目までの状況

図 10～図 12 にモルタル充填から 168 日目までの各パネルのひずみ計測結果を示す。また，ひび割れ発生ひずみと曝露試験実施時の 5 日間平均の気温と湿度[6] を併せて示す。

図 10～図 12 より，充填から 28 日目までの 2 段目パネル，3 段目パネルと 4 段目パネルのひずみは，モルタル充填後 1 日目で最大値となった。これは，モルタル側圧によりひずみが増加し，充填終了後もモルタルの水和熱によりモルタルが膨張したことにより，ひずみがさらに増大したと考えられる。モルタル充填後 1 日目以降は，充填後 14 日目または 28 日目までひずみが緩やかに減少してひずみが最小値（約 14 μ～600 μ）となった。図 13 に示す超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）[7]（以下 UFC 指針と記載）によれば，気中養生の場合，充填後からモルタルが収縮すると考えられ，側圧により生じたパネルのはらみ出しがモルタルの収縮により低減され，パネルのひずみが減少したと考えられる。この期間で 2 段目パネルの No. 5 は，ひび割れ発生ひずみ 603 μ を僅かに超過したが，ひび割れは確認されなかった。これは，1 段目パネルのひび割れ発生時のひずみが 558～640 μ で標準偏差が 30 μ であり，ひび割れ発生ひずみと同等でもひび割れが発生しなかったと考えられる。一方，2 段目パネルの No. 6 は，ひび割れ発生ひずみを大きく超過しているが，モルタル充填後 3 日目，14 日目においてひび割れは確認されなかった。モルタル充填後 3 日目時点でひび割れが発生していたが見落とし，ひずみの低下によりひび割れが閉塞した可能性がある。

その他の 2 段目パネルの内 No. 7，8，3 段目パネルと 4 段目パネルは，ひび割れ発生ひずみは超過しなかったが，

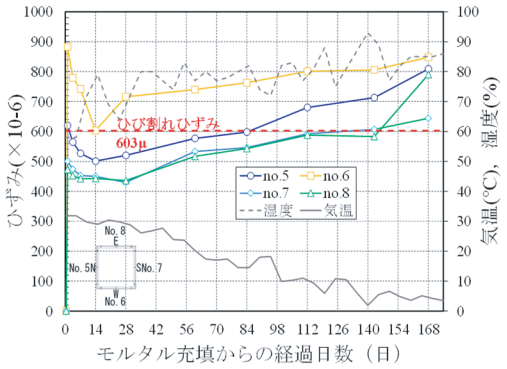


図 10　168 日目までのパネルひずみ（2 段目）

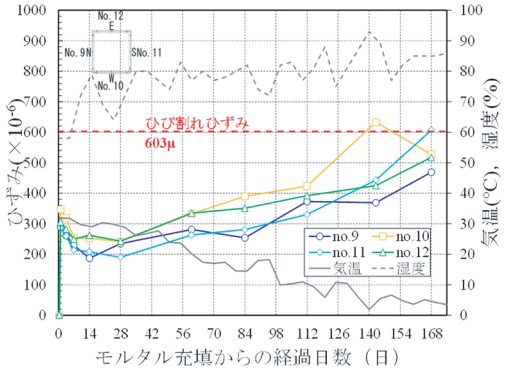


図 11　168 日目までのパネルひずみ（3 段目）

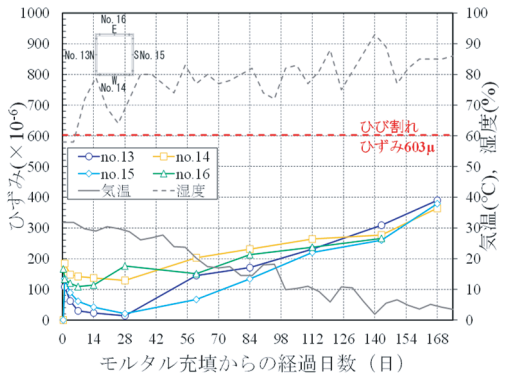


図 12　168 日目までのパネルひずみ（4 段目）

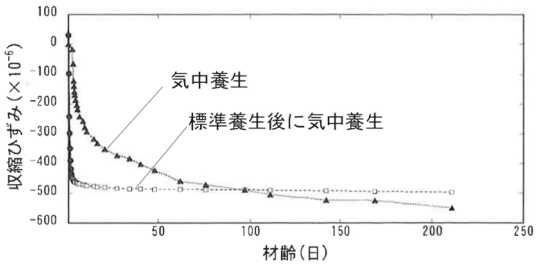


図 13　UFC の収縮量[7]

4 段目パネルの No. 15 は，図 8 の赤線で示す通り，ボルト周り斜め方向のひび割れが発生した。モルタルの収縮がボルト等により拘束され，ボルト周りに応力集中が発生しひ

び割れが発生したと考えられる。ひび割れ幅は 0.05 mm であった。コンクリート標準示方書[8] によれば，鋼材腐食に対するひび割れ幅の限界値は 0.005 c（c はかぶり mm）であり，既設柱のかぶりはモルタルを考慮すると 100 mm 以上となる場合が多いことから，発生したひび割れは耐久上有害とならないと考えられる。

4.3 充填後 28 日目以降の状況

2 段目パネル，3 段目パネル，4 段目パネルのひずみは充填後 168 日目まで緩やかに増加した。本工法で充填するモルタルは UFC に準ずる材料であることから，図 13 と同様な収縮挙動を示すと考えられる。このため，充填後 28 日目以降は，気温低下による温度収縮と合わせて，モルタルの収縮がボルト等により拘束され，パネルに引張力が作用し，パネルの引張ひずみが増加したと考えられる。なお，この期間においても，ひび割れは確認されてない。

5. まとめ

無機系パネルに使用したモルタルは収縮によるひび割れ発生のリスクが懸念されたため，長さ変化試験による配合選定を行った上で，施工試験と曝露試験を実施し，施工時と長期材齢時のひび割れ発生を確認した。本検討の範囲にて得られた知見を以下に示す。

1） 液体減水剤を使用することで，収縮，練り上がり温度を低減し，強度規格を満足する無機系パネルを製造できることを確認した。
2） 施工試験では，1 段目パネルにはモルタル充填後数時間以内に側圧に起因するパネル中央部に鉛直ひび割れが発生した。ひび割れが発生時の応力算定を行った結果，単純支持とした場合はひび割れが発生し，両端固定ではひび割れが発生しない結果となった。
3） 曝露試験では，一部に応力集中によると考えられるひび割れが発生したものの，有害なひび割れは発生しなかった。

謝　辞

本研究は，東急建設株式会社，ベルテクス株式会社との共同開発にて実施したものです。また，フクビ化学工業株式会社には多大なご協力を受け賜りました。ここに，本実験にご協力頂きました関係各位に深く謝意を表します。

参考文献

1）（公財）鉄道総合技術研究所：既存鉄道コンクリート高架橋柱の耐震補強設計指針，2020.
2）高橋泰成他：プレキャストパネルと高強度繊維補強モルタルを用いた耐震補強工法の施工，土木学会第 72 回年次学術講演概要集第 6 部，Vol 72, pp. 1205-1206, 2017.
3）鈴木元太他：プレキャストパネルと高強度繊維補強モルタルを用いた耐震補強工法の市街地への適用，土木学会第 74 回年次学術講演概要集第 6 部，Vol 74, 2019.
4）阪村真耶他：無機系プレキャストパネルを用いた CB パネル工法の現場適用，土木学会第 77 回年次学術講演概要集第 6 部，Vol. 77, 2022.
5）笠倉亮太：CB パネル工法の設計手法の高度化に関する実験的検討―補強構成部材がせん断耐力に与える影響―，東急建設技術研究所報 No. 44, 2019.
6）国土交通省 気象庁．“各種データ・資料 過去の気象データ検索”．過去の気象データ検索．2024. https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php?prec_no=57&block_no=47616&year=&month=&day=&view=，（参 照 2024-04-24）
7）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. 9
8）土木学会：2022 年制定 コンクリート標準示方書［設計編］，p 157, 2023. 3

EXPERIMENTAL STUDY ON SHRINKAGE AND CRACK SUPPRESSION OF PRECAST PANELS MADE OF ULTRA-HIGH-STRENGTH FIBER REINFORCED MORTAR

M. Matsuda, R. Kasakura
C. Luo and T. Kuroiwa

The authors developed a retrofitting method aimed at improving the productivity of retro fitting works. This method used resin concrete for the precast panels, so panels made of ultra-high-strength fiber reinforced mortar were developed. The ultra-high-strength fiber reinforced mortar had the risk of cracking due to shrinkage. Therefore, mix proportion of panels was determined based on shrinkage test, and construction and exposure tests were conducted in order to detect cracks under construction and real environments. As a result, it was confirmed that shrinkage of panels was suppressed by reducing the volume of water and using the liquid water-reducing agent, and the cracking risk of precast panels was reduced.