

報告 コンクリート素地仕上げ曲面天井 PCaRC 版のひび割れ制御

松井 亮夫^{*1}・佐藤 尚隆^{*2}・飛田 喜則^{*3}

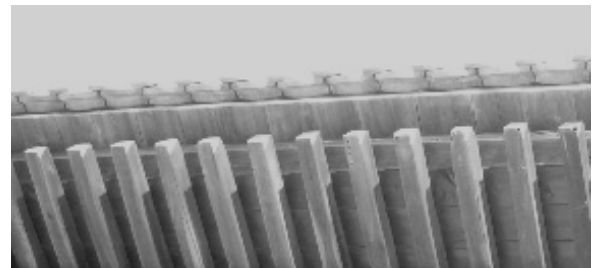
要旨：プレキャスト鉄筋コンクリート造曲面天井版の施工に関して，製造・運搬から取付けに至る過程でのひび割れの抑制について検討を行なった。一連の過程における施工方法の妥当性を検証するために有限要素法解析と実大施工実験を行なった。また，実施工では天井版のひずみ，変形およびひび割れを計測し，解析の妥当性と施工方法が適正であることを確認した。その結果，実施工において天井版のひび割れ発生率を 4%程度と小さく抑えることができた。

キーワード：PCa，素地仕上げ，天井，FEM 解析，ひび割れ

1. はじめに

対象建物は特別風致地区に建てられる，歴史的文化財の調査研究・修繕を行なうための管理事務所である。本建物の天井には，写真－1に示すような垂木をモチーフとしたリブ（以下，化粧リブと称す）を有するコンクリート素地仕上げのプレキャスト鉄筋コンクリート造曲面天井版（以下，PCaRC 版と称す）が採用された。その PCaRC 版の製作・施工にあたり，事前に製作・施工方法を検討し，コンクリートのひび割れ発生を制御することにした。

本報告では，PCaRC 版のひび割れ発生を制御する方法と，その妥当性の検証結果を報告する。



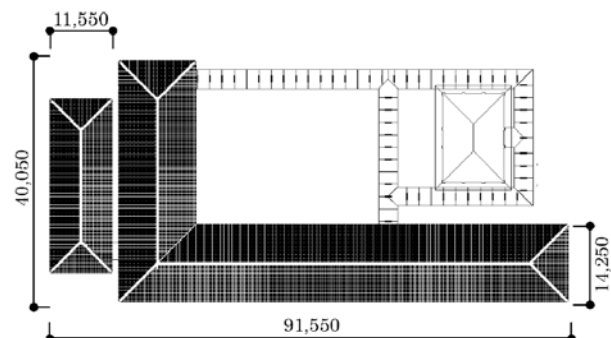
写真－1 古建築の垂木



図－1 建物パース

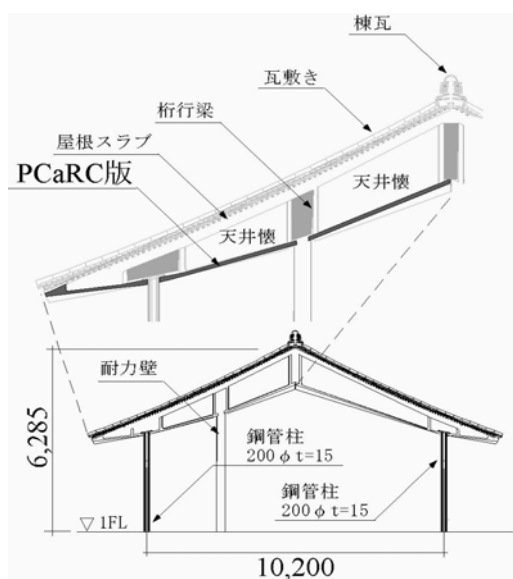
2. 建物概要

図－1に示すように本建物は特別風致地区の一角に立地し，地下1階を有する平屋建であり，大小2棟で構成されている。図－2，3に建物配置図および架構（張間方向）断面図を示す。建物の平面形状は L 型と I 型で，長辺の最大長さは約 80m である。構造種別は鉄筋コンクリート造であり，PCaRC 版，梁および屋根の鉛直荷重を支持する鋼管柱（200mmφ,t=15mm）と地震力に抵抗する耐力壁で構成されている。



図－2 建物配置図

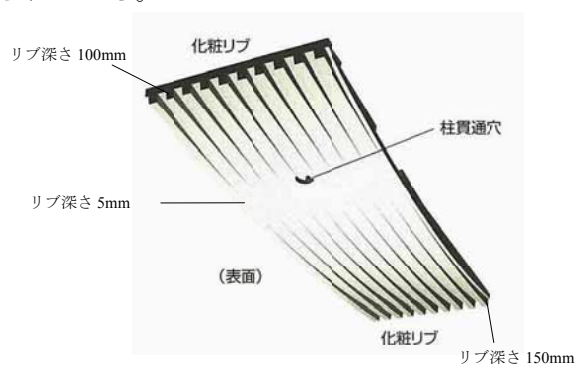
-
- | | | |
|-----------|-----------|-------|
| *1 (株)浅沼組 | 大阪本店建築部 | (正会員) |
| *2 (株)浅沼組 | 技術本部建築技術部 | (正会員) |
| *3 (株)浅沼組 | 技術本部技術研究所 | (正会員) |



図－3 架構（張間方向）断面図

3. PCaRC 版の特徴とその改良

図－4 に代表的なPCaRC版の天井面を示す。PCaRC版は設計基準強度 $F_c=30\text{N/mm}^2$ の鉄筋コンクリート造である。その形状は、長さ 7.2m×幅 2.25mで、最も薄い部分は 70mmとなっており、単純な平面ではなく微妙な曲率を持った曲面となっている。天井面側には棟から軒先にかけて深さが変化する化粧リブが配置されている。寄棟部以外のPCaRC版は棟を境に 2 分割したものであり、建物全体で総数 164 枚の版が割り付けられている。



図－4 PCaRC 版天井面

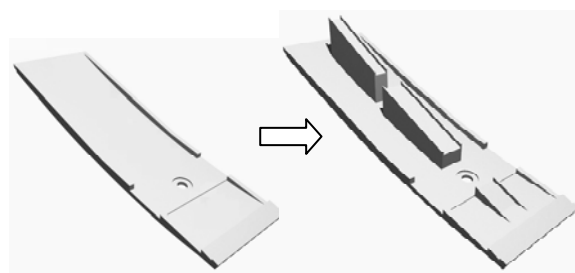
3.1 問題点と対策

PCaRC 版は化粧リブが付くものの、版の長さが 7m を超え、最小厚さが 70mm である。版上において上部躯体を施工しなければならないため、その過程においてひび割れを全く発生させないことは困難であると考えた。その対策としてプ

レストレスを導入して、コンクリートにひび割れを発生させない方法について検討したが、次の問題により採用しなかった。1 つめは、平版にプレストレス力を導入する場合に比べて、薄い曲面版では版断面内のひずみ制御が複雑になりひび割れが発生する危険性が高いこと、2 つめは、版の小口に圧着端の痕跡が残るという意匠的な問題である。事前に行なった有限要素法解析（以下、FEM 解析と称す）による結果から、補強を施さない PCaRC 版では施工過程で版がひび割れる可能性が高いことが明らかとなった。さらに、PCaRC 版の製作から、運搬、据付までの段階に作用する外力への対策が必要であった。そこで PCaRC 版自体の剛性を上げると同時に適宜補強材を取付けて版に過大な引張応力が生じないように制御し、ひび割れを発生させない方法をとることにした。

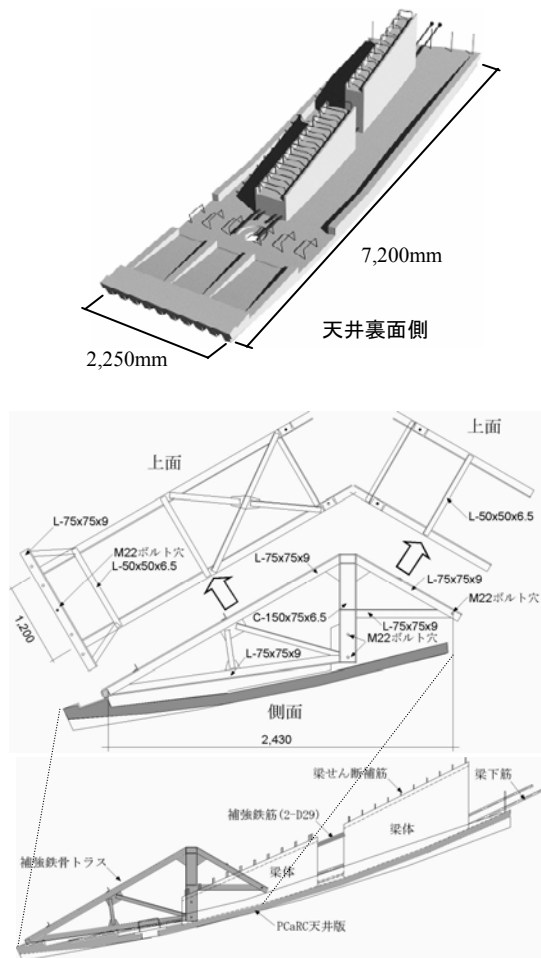
3.2 補強方法

PCaRC 版の曲げ剛性を上げるために、版に梁体を付けた。図－5 に梁体取り付け前後の版形状を示す。施工上の制約もあり PCaRC 版に部分的に梁体を取り付けたものである。



原 案 変更案
図－5 PCaRC 版の形状変更

また、梁体に取り付かない部分には補強鉄骨トラス、補強鉄筋を取り付けて補強を行なった。そして、可能な限り版厚を厚くすること（70→85mm に変更）とし、版自体の剛性を上げた。さらに、補強鉄骨トラスと補強鉄筋によって版の変形を抑え、ひび割れを発生させないよう PCaRC 版の天井面側を圧縮状態に保よう制御することにした。形状を変更した PCaRC 版および補強状況を図－6 に示す。

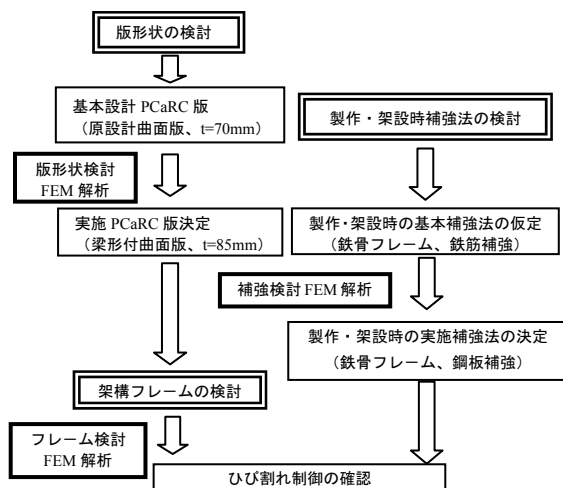


図－6 PCaRC 版の最終形状と補強材

4. ひび割れ制御に関する解析的検討

4.1 FEM 解析による検討手順

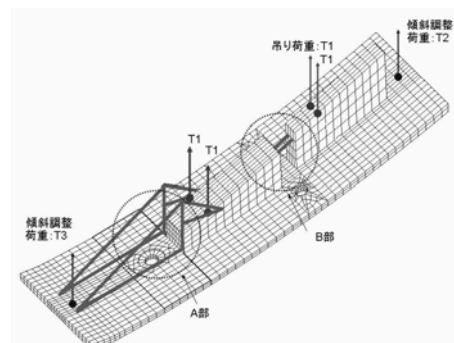
図－7にFEM解析による検討フローを示す。なお、ひび割れ発生を目安となるコンクリートの許容引張ひずみは、コンクリートの引張伸び能力から判断して 150μ ¹⁾とした。



図－7 検討フロー

4.2 PCaRC 版の解析的検討

補強鉄骨トラスと補強鉄筋による補強を計画し、補強された PCaRC 版の解析を行なった。図－8に補強を施した PCaRC 版の解析モデルを示す。PCaRC 版は無筋コンクリートの立体要素とし、補強鉄骨トラスおよび補強鉄筋は、線材としてモデル化した。A 部は補強鉄骨トラスによる補強部分、B 部は鉄筋による補強部分を示している。解析に用いた各部材の物性を表－1に示す。



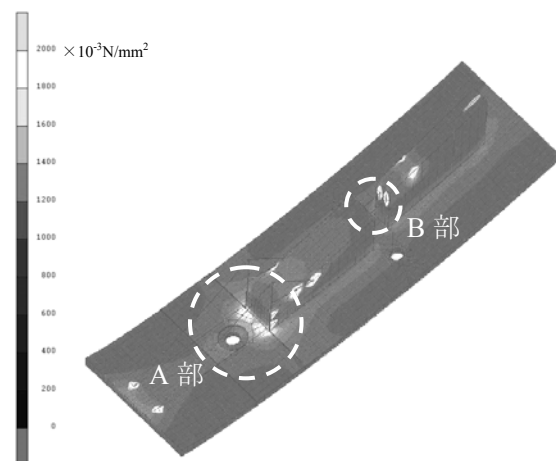
図－8 解析モデル

表－1 各部材の物性

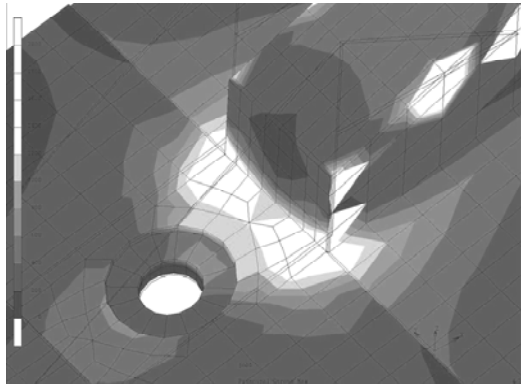
	ヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)	ポアソン比	密度 (g/cm^3)
PCaRC版	3.37	0.19	2.55
場所打ちコンクリート	2.81	0.20	2.35
鋼管柱	21.0	0.30	7.85

4.3 吊上げ状態での解析的検討結果

PCaRC 版の吊り位置は、版荷重の大部分を負担する梁体部の 4 点 (T1) と、施工上必要な版の傾斜調整用吊点の 2 点 (T2,T3) の計 6 点とした。解析による応力分布を図－9, 10に示す。

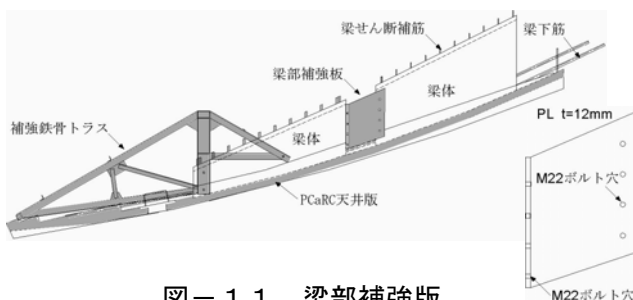


図－9 解析結果（応力分布）



図－１０ 解析結果（Ａ部拡大）

PCaRC版の解析結果より，補強鉄骨トラスによって，軒先の変形は 1mm程度に抑えられ，梁先端部分（Ａ部）で最大応力度は引張応力度 2.1N/mm^2 以下であった（ひずみ換算で 60μ 程度）。天井面側はほぼ圧縮側のひずみ（応力）となっているためにひび割れが生じにくく，補強鉄筋（Ｂ部）には大きな応力は作用していない。さらに補強鉄筋下部のPCaRC版には $1.57 \times 10^{-2}\text{N/mm}^2$ のせん断応力しか発生していないことからひび割れは発生しないと考えられた。しかし，補強鉄筋下部のPCaRC版部分には吊荷重の不均衡により過大なせん断応力が発生することが予測されたため，解析結果をふまえてＢ部の更なる補強のために梁側面に補強鋼板を追加することにした。図－１１に梁部の補強状況を示す。



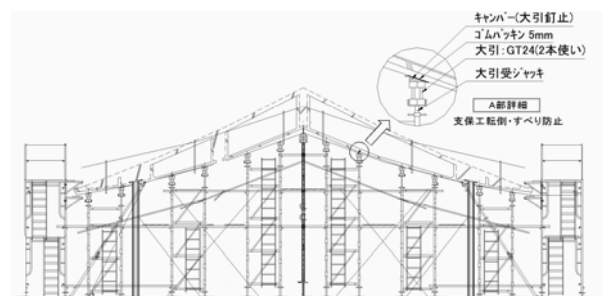
図－１１ 梁部補強版

4.4 フレーム架構としての解析的検討

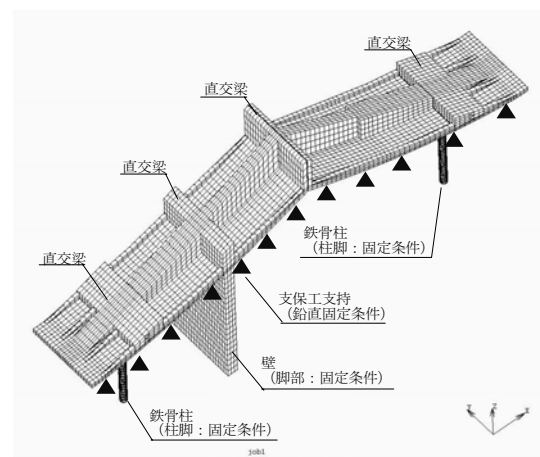
(1) フレーム架構の概要と解析ケース

PCaRC 版の施工計画では，まず鉄骨柱の建て方を行ない，図－１２に示すような支保工を組み立て，その上に２枚の PCaRC 版を設置する。その後，壁および梁の配筋・型枠を行ない，梁のコンクリートおよび屋根スラブコンクリート

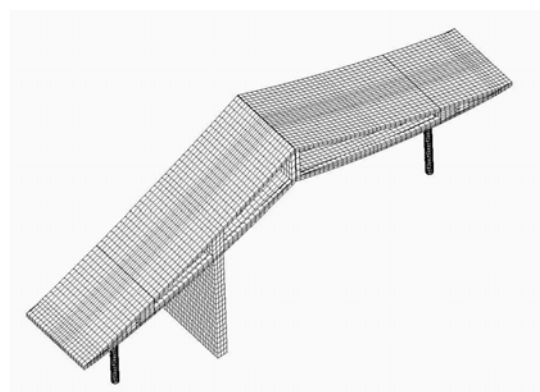
を打設し，４週間後に支保工の解体（ジャッキダウン）を行なう。この施工段階に応じて，FEM 解析を行ない屋根の各部に生じるひずみ等の変化について検討を行なうこととした。それらの解析ケースは，支保工に設置された PCaRC 版に直交方向の桁行き梁コンクリートを打設した時期を解析ケース１とし，解析ケース１から支保工による鉛直支持条件を外し，屋根スラブコンクリートの打設を行なった時期を解析ケース２とした。図－１３，１４にそれぞれの解析モデルを示す。



図－１２ 試験施工の支保工



図－１３ ケース１解析モデル



図－１４ ケース２解析モデル

(2) フレーム架構の解析結果

(a) 解析ケース 1

解析ケース 1 の結果の一例を図-15に示す。解析結果より、直交梁のコンクリート打設時には、ほとんどひずみや変位は発生しなかった。

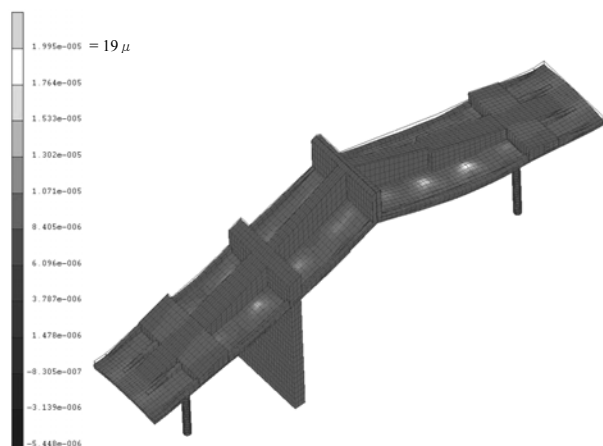


図-15 ケース 1 解析結果（ひずみ分布）

(b) 解析ケース 2

解析ケース 2 の結果の一例を図-16に示す。屋根スラブが打設され支保工が取り除かれたときの応力分布は、壁の上方の屋根スラブの値がやや大きい、その値はいずれもひび割れるような値ではなかった。

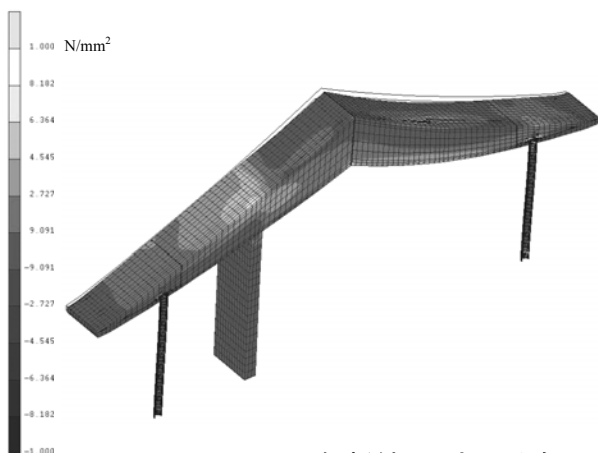


図-16 ケース 2 解析結果（応力分布）

5. 実大 PCaRC 版を用いた施工実験

PCaRC 版の天井面側にひび割れが発生しないかを確認するため、実大試験体を製作し施工実験を行なった。製作した実大試験体を用いて、実建物の構造体の 1 ユニット（2 枚の PCaRC 版、1 対の鉄骨柱と一枚の耐力壁からなる架構）を施工する建方施工実験を行なった（写真-2）。

計画した順序に従って施工を行ない、PCaRC 版上の梁体および屋根スラブのコンクリート打設時と支保工解体時における PCaRC 版のひずみと変位の計測を行なうことにした。表-3、4 に使用したコンクリートの調合計画と材料試験結果を示す。また、ひずみ計測点の位置を図-17に示す。



写真-2 実大施工実験状況

表-3 コンクリートの調合計画

W/C (%)	S/a (%)	W (kg/m³)	絶対容積 (L/m³)				単位質量 (kg/m³)				
			C	S1	S2	G	C	S1	S2	G	Ad
50.0	47.0	170	108	163	163	367	340	436	419	1001	2.890
使用材料	セメント(C)		早強ポルトランドセメント								
	細骨材(S1)		石灰砕砂(三重県藤原鉱山産)								
	細骨材(S2)		川砂(三重県松阪市高木町 櫛田川流域)								
	粗骨材(G)		碎石2005(三重県佐奈山産)								
	混和剤(Ad)		高性能減水剤:レオビルト8000S								

W/C:水セメント比, S/a:細骨材率

表-4 コンクリートの材料試験結果

試験材齢 および養生	圧縮強度 (N/mm²)	平均	静弾性係数 (N/mm²)	平均	ポアソン比	平均
材齢4日 部材同一養生	43.1	42.4	2.55×10^4	2.66	0.18	0.19
	41.5		2.79×10^4		0.20	
	42.6		2.64×10^4		0.19	
材齢7日 標準水中養生	50.0	51.1	2.78×10^4	2.98	0.20	0.21
	51.9		2.96×10^4		0.23	
	51.3		3.21×10^4		0.21	
材齢28日 標準水中養生	57.8	57.8	3.41×10^4	3.37	0.22	0.19
	57.7		3.20×10^4		0.18	
	57.9		3.49×10^4		0.18	

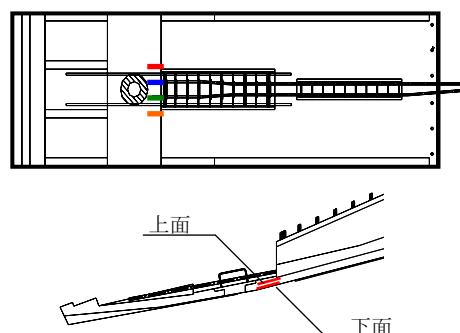
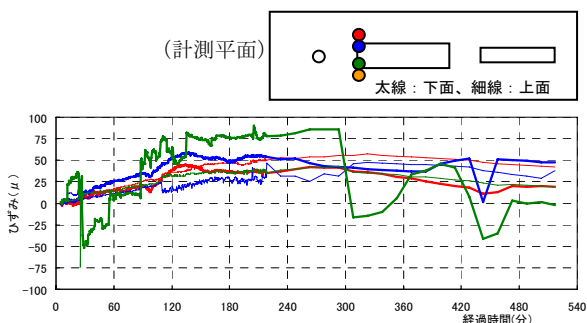


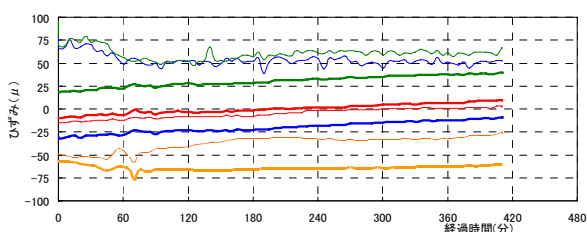
図-17 試験体および計測位置

図－１８に直交梁のコンクリート打設時のひずみを示す。コンクリートの打設に伴い PCaRC 版全体に引張りひずみが増加し、コンクリート打設終了時(240 分)には約 75 μ のひずみとなった。その後、ひずみは養生期間中に次第に安定し小さくなるものの、全体にやや引張り側となった。また、コンクリート打設時にはやや大きな変動がみられた。さらに経過時間 450 分くらいに大きな変動が観測されており、この原因は不明であるが、いずれも PCaRC 版の天井面側では圧縮ひずみとなり、ひび割れを生じさせるものではないことが確認できた。

図－１９に屋根スラブのコンクリート打設時のひずみを示す。PCaRC 版の全体でひずみの変化がほとんど見られなかった。また、コンクリートの打設時には梁の上筋にやや引張りひずみが生じているものの打設後にはひずみの変化がなかった。よって、屋根スラブコンクリート打設時には、ひび割れを生じさせるようなひずみが発生しないことが確認できた。



図－１８ 直交梁コンクリート打設時のひずみ



図－１９ 屋根コンクリート打設時のひずみ

支保工解体時には、支保工を取り除くごとに 0.2～0.3mm の変動が生じた。また、ほとんどの支保工が取り除かれた時、棟は 0.6～1.0mm 下がった。さらに、支保工解体後も継続して計測した結果、ひずみや変位に大きな変化が無く安定

していることも確認できた。これらの計測結果が解析の結果とおおむね一致しており、ひび割れに対して問題が無いことが確認できた。

6. おわりに

PCaRC 版の製作・施工においてコンクリートのひび割れを制御するために、FEM 解析と試験施工を行なった。その結果を反映した施工法を実施工で採用することにより、PCaRC 版総数 164 枚の中で、6 枚において PCaRC 版の天井面側にひび割れが確認され、ひび割れ発生率は 3.6% であった。主なひび割れは、発生が想定された梁際に生じており、0.3mm のもの 1 ヶ所、残り 5 ヶ所は 0.1mm 以下であった。報告の最後に、写真－３、４で PCaRC 版の仕上がり状態を示す。



写真－３ 軒先天井素地仕上げ



写真－４ 寄棟天井素地仕上げ

参考文献

- 1)鉄筋コンクリート造のひび割れ対策(設計・施工) 指針・同解説, 日本建築学会, p.90, 1990
- 2)鉄筋コンクリート構造設計規準・同解説, 日本建築学会, 1999