

[83] 炭素繊維補強セメント複合材 (CFRC) の建築構造物への適用

正会員 秋 浜 繁 幸 (鹿島建設技術研究所)

正会員 ○末 永 龍 夫 (鹿島建設技術研究所)

正会員 坂 野 正 (鹿島建設札幌支店)

1. はじめに

イラク アルジャヒードモニュメントは二つの同一形の半球ドームで構成されており、このドームの規模は、高さ40m、底辺部の直径45mである。ドームの構造体は亜鉛メッキされた鉄骨造であり、ドームの表面はターキッシュブルーの磁器タイル貼りとなっている。(写真-1参照)

イラク側の原案では、このドームの表面材が当初20cm×20cmの金メッキされた銅板仕上げとなっていたため、構造体の鉄骨や基礎は、すべて、この金メッキされた銅板仕上げを前提に設計が進められた。しかし、その後の各種検討の結果、コストや耐久性などの点から、前記の磁器タイル貼りに変更になったため、このタイルパネルは構造体の耐力上60%以下とすることが要求された。その他建設地のバグダッド市の夏期の高温低湿、冬期の低温(0℃以下になる)の気象条件下でも十分耐久性のあるものとの条件があった。また、このドームの水平断面の曲率は、高さ方向に連続的に変化しているため、ある高さのパネルを別の高さの所に転用するという互換性がないため、タイルパネルの種類は非常に多くなり、型枠に関する入念な品質管理が必要になることや、タイルパネルの裏打ちコンクリートの乾燥収縮が大きくなると、所定の曲率が変化してしまうという厄介な問題が生じる。このため、前述の各種要求条件に加えて、ドームの外装パネルとして、当然具備すべき基本的特性をも考慮して、同パネルの品質目標を設定して開発を進めた。

2. 開発製品の品質目標

- 1) 重量: タイル、埋込み金物込みで $< 60 \text{ Kg/m}^2$
 内訳
 - i) 磁器タイル(厚さ15mm) 33 Kg/m^2
 - ii) 裏打ちコンクリート $< 27 \text{ Kg/m}^2$
- 2) 耐力: パネル自身の耐力、及びパネルファスナーの耐力共に風荷重の 300 Kg/m^2 に耐えること。
- 3) 延性・靱性: 引張、曲げ変形にできるだけ追従可能なこと。
- 4) 耐久性: バグダッド市の気象条件下でも十分耐久性のあること。
 - i) 75℃の熱水養生28日間で強度劣化のないこと。
 - ii) ASTM C 666に基づく気中凍結・水中融解による300サイクル試験後の動弾性係数の低下率が10%以下。
- 5) 寸法安定性: 裏打ちコンクリートの乾燥収縮率が 6×10^{-4} 以下。
- 6) タイルの付着力: (60℃×6時間)～(-10℃×16時間)の熱サイクル40回繰返し試験、又は設計荷重による 10^6 回の曲げ疲労試験を行い、それぞれの試験の前後でタイルと裏打ちコンクリート間の付着力に変化のないこと。[参考文献⁴⁾参照]
- 7) 施工性: タイルパネルは重機なしで取付可能なこと。

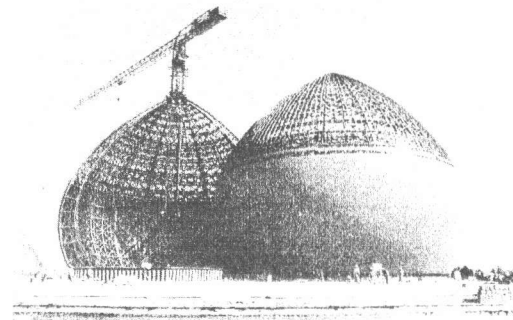


写真-1 建設中のイラクアルジャヒードモニュメントの外観

3. 材料選択

タイルパネルを構成する裏打ちコンクリートとしては、当初、普通コンクリート、軽量コンクリート、SFR

C等の各種コンクリートが検討された。しかし、タイルパネルを構造体に取り付けるためのパネルファスナーの引抜き耐力や、耐久性を考えると、前記のいずれのコンクリートを用いるにしても、コンクリートの厚さは、25mm以上必要との工学的判断に基づき、それぞれのコンクリートについて表-1に示すような性能比較を行った。この結果、品質目標のすべてを満足でき、かつ性能の優れたものとして、シラスバルーンを骨材とした軽量CFRCが選定された。また、このタイルパネルは国内で製造し、バグダッドへ輸送するため、輸送中及び取付け後のコンクリートの乾燥収縮によってタイルパネルにそりが生じ、所定の曲率が変化することを極力防止するため、すべてのパネルをオートクレーブで養生することとした。なお、オートクレーブ養生がCFRCの長さ変化率に及ぼす効果については後述する。

表-1 タイルパネル用コンクリートの性能比較

コンクリート種別	比重	重量 (kg/m ³) (板厚40mm)	耐久性	寸法 安定性	引張強度 (kg/cm ²)	伸び率 ($\times 10^{-3}$)
1普通コンクリート	2.3	9.1	○	○	2.0	1.50
2軽量コンクリート	1.8	7.8			2.0	2.00
3.SFRC 普通	2.4	9.3			3.0	3.00
4.SFRC 軽量	1.2	6.3			1.5	3.00
5軽量CFRC	1.0	5.8			4.0	4.00

4. CFRCの耐久性試験

モニユメントドームの内部は、熱計算の結果によると、夏期の日中には60~70℃の高温になり、また冬期には、外気温が凍結点温度以下になる。このため、この高温又は低温の温度の影響を受けて、タイルパネルの裏打ちコンクリートであるCFRCの物性が徐々に低下する恐れがないかどうかを確認する目的で以下に示す2種類の耐久性試験を行った。

- a) 75℃熱水中への浸漬試験
- b) ASTM C 666に基づく凍結融解試験

なおCFRCの補強材であるビッチ系炭素繊維の耐久性に関しては、300℃以下の温度では、機械的性質に変化のないことが確認されていたので(表-2参照)、複合材としてのCFRCの性質に関してのみ確認試験を行った。

4-1 供試体

i) 供試体の形状・寸法

- a) 熱水浸漬試験：幅×厚さ×長さ=4×1×16cm, b) 凍結融解試験：幅×厚さ×長さ=6×3×20cm

ii) 調合と力学的性質：表-3, 4参照

- iii) 養生方法：供試体は成型後24時間で脱型し、その後材令7日まで20℃・65%RH条件室にて養生した後、75℃熱水中への浸漬試験及び凍結融解試験へ移行した。なお、オートクレーブ養生供試体に関しては、材令1日で昇温速度53℃/時、最高温度180℃×5時間の高温・高圧蒸気養生を行った後、同じく材令7日まで20℃・65%RH条件室に静置した。

4-2 試験方法

i) 75℃熱水中への浸漬試験

前述した室内養生供試体及びオートクレーブ養生供試体共に、材令7日で曲げ強度試験を行った後、残りの供試体を75℃の熱水中に浸漬し、浸漬日数7日、14日、21日、28日、3カ月、5カ月で、それぞれ曲げ強度試験を行った。なお、曲げ強度試験はスパン10cmの中央集中載荷方式で行った。

ii) 凍結融解試験

凍結融解試験は材令8日目から3日間CFRC供試体を水中浸漬した後、ASTM C 666の気中凍結水

表-2 ビッチ系炭素繊維の物理的性質

比重	引張強度 (kgf/cm ²)	引張弾性率 (kgf/cm ²)	伸び (%)	固有抵抗率 (Ωcm)	硬化開始 温度(℃)	平滑割合 分量(%)
1.63	78.0	3800.0	2.1	180×10 ⁻³	310	<12.0

表-3 CFRCの調合

骨材の 種類	W/C (%)	繊維混入率 (容積比) (%)	炭素繊維 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	調整剤 (kg/m ³)
シラスバ ルーン	130	20	326	369	481	262	369

表-4 CFRCの力学的性質

繊維混入率 (容積比) (%)	比重	弾性係数 ($\times 10^5$ kg f/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	引 ひ ず み 率 ($\times 10^{-3}$)	引張弾性 (kgf/cm ²)
2.0	1.0	0.56	48	75	4.200	150

中融解法に準じて -18°C ～ $+10^{\circ}\text{C}$ で、80サイクルまでは1日2サイクルで、またその後1日8サイクルの試験を300サイクルまで行った。測定は供試体の重量と一次共鳴周波数の変化について行い、その他、目視による表面状態の観察も行った。

4-3 試験結果

i) 75℃熱水中への浸漬試験結果

浸漬期間5カ月までの曲げ強度の変化を図-1に示す。また、各試験時での代表的な曲げ応力(σ_b)～たわみ(δ)曲線の比較を図-2に示す。これらの図から明らかなように、各浸漬期間を通じての曲げ強度には若干の増減はあるが、全体としては熱水養生直前の値より、高い値を保持しており、熱水による強度劣化の傾向は認められず、高温での耐久性に問題のないことが明らかとなった。

ii) 凍結融解試験結果

気中凍結水中融解試験結果の一例として、オートクレーブ養生供試体の試験結果を図-3に示す。この耐凍融試験の結果、オートクレーブ養生供試体、室内養生供試体共に、凍結融解回数300サイクルでも物性の変化は少なく、質量変化率で10.0%以上、相対動弾性係数も95%以上と良好な耐久性を示した。なお、この凍結融解試験は、北大建築工学科建築材料研究室との共同研究によって行った。

5. CFRCの乾燥収縮試験

タイルパネルの裏打ちコンクリートであるCFRCの乾燥収縮率が大きいと、タイルパネルの製作・取付け後パネルに大きなそり、ねじれなどが生じ、所定の曲率が変化して、タイルの剥落事故や、鉄骨構造体への取付け上の問題、美観上の問題などが発生する。このため、CFRCの寸法変化を極力小さくする方法として、オートクレーブ養生法の採用が検討されたためこのオートクレーブ養生の効果を確認する目的で以下に示す3養生法についてCFRCの寸法変化を測定した。

5-1 供試体

- i) 供試体の形状寸法：幅×厚さ×長さ = $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$
- ii) 調合と力学的性質：表-3, 4 参照
- iii) 養生方法
 - a) 20°C ・65%RH条件室に静置
 - b) 脱型後直ちに前述したオートクレーブで養生を行い、その後 20°C ・65%RH条件室に静置
 - c) 脱型後、材令7日まで 20°C 水中養生を行った後 20°C ・65%RH条件室に静置

5-2 試験方法

寸法変化の測定はコンパレータ法による。

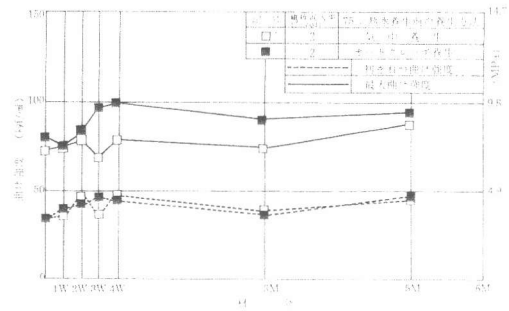


図-1 曲げ強度と75℃熱水養生材令の関係

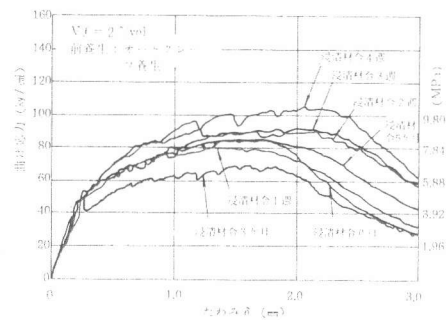


図-2 75℃熱水中に浸漬したCFRCの代表的曲げ応力～たわみ曲線の比較

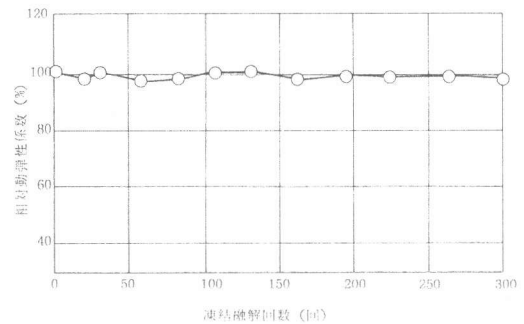


図-3 凍結融解試験結果(相対動弾性係数の変化)

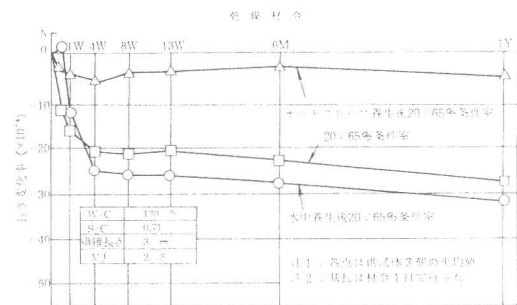


図-4 軽量CFRCの長さ変化率

5-3 試験結果

材令1年までのCFRCの寸法変化を図-4に示す。同図から明らかなように、オートクレーブ養生を行ったCFRCの供試体は、脱型後連続して20℃・65%RH条件室内に静置した供試体と比べて、材令1年でその寸法変化率が1/5弱と小さく、かつ脱型後2週間目から、材令1年までの寸法変化が、 $\pm 2 \times 10^{-4}$ 程度と、その他の養生方法に比べて、非常に安定していることが分かった。このため、以上の試験結果を基に、CFRCタイルパネルの製造に当たっては、すべてオートクレーブ養生で行うこととした。

6. タイルパネルの性能試験

タイルパネルの形状・寸法の決定に当たっては、パネル一枚当りの熱膨張・収縮量をできる限り小さくして、これを目地で吸収できるようにすること、またパネルの小運搬及び取付け作業が1人で可能なことなどの要求条件があった。このため、これらの諸条件を考慮して標準寸法を幅50×長さ100×厚さ4cm(CFRCの厚さ2.5cm…図-6参照)とし、この標準パネルについて以下の試験を実施して性能の確認を行なった。

6-1 供試体

供試体は全て表-5に示すステンレスメッシュ補強し、CFRC打設後24時間で脱型し、その後引き続き180℃10気圧で5時間のオートクレーブ養生を行った。試験時材令は7～10日である。

6-2 試験方法

曲げ耐力試験(静的加力)は、前記標準タイルパネルが正、負の風荷重を受けた場合の耐力を確認する目的で、中央集中荷方式で試験を行った。

6-3 試験結果

試験結果を図-5に示す。この耐力試験の結果、正圧、負圧のいずれの場合も標準パネルの耐力は設計荷重を大きく上回っており、また試験中タイルにきれつは発生したが剥離現象はおきなかったため、十分な安全を有していることが確認された。ただし、曲げ耐力及び剛性は、タイル面を圧縮側(正圧)にしたが、逆の場合より高い値を示した。

7. まとめ

イラク国バグダッド市に建設された大形ドームの外装用タイル打込みPCパネル(約1万 m^2)に、軽量CFRC(比重1.0)をはじめて適用した。この外装材へのCFRCの適用に当たっては、前述した耐久性試験、乾燥収縮試験、CFRCタイルパネルの耐力試験などの一連の性能評価試験を行って、同パネルがバグダッド市の厳しい気象条件下でも十分な耐力と耐久性のあること確認した上で適用に踏み切った。現在パネル施工後、春夏を経過したが1件のクレーム発生もないため、ここに適用事例として報告する。

参考文献

- 1) 秋浜, 末永, 坂野; 炭素繊維補強コンクリート(CFRC)の実験的研究(その1), 鹿島建設技術研究所年報第29号, PP81~88
- 2) 秋浜, 末永, 坂野; 炭素繊維補強コンクリート(CFRC)の実験的研究(その2), 同上 年報第30号, PP57~68
- 3) 秋浜, 末永, 坂野; 炭素繊維補強コンクリート(CFRC)の実験的研究(その3), 同上 年報第31号, PP67~74
- 4) 秋浜, 末永, 坂野; 炭素繊維補強コンクリート(CFRC)の建築構造物への適用(その1), 同上 年報第31号, PP57~66

表-5 ステンレスメッシュの機械的性質

メッシュの形状・寸法	メッシュの層数	補強率	引張強度(kg/cm)
ピン径25×25mm 網径3mm	1	0.7%	7.0

表-6 タイルの曲げ耐力試験内容

供試体番号	パネルの形状・寸法(mm)	スパン(mm)	パネルの厚(mm)	タイルの位置
1	1000×500×40	400	1000	片側部
2	1000×500×40	400	1000	引張側
3	1000×500×40	800	500	片側部
4	1000×500×40	800	500	引張側

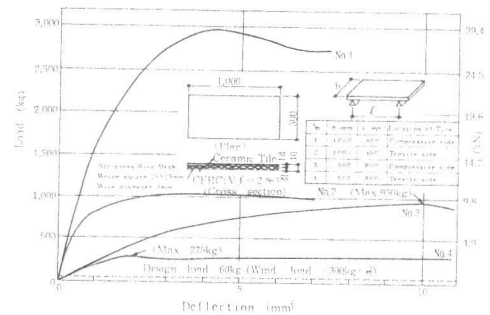


図-5 荷重～たわみ曲線

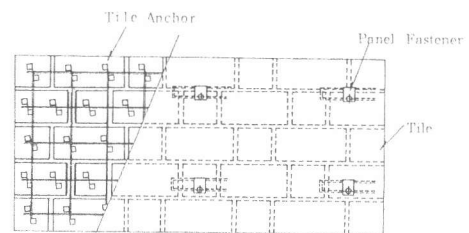


図-6 標準タイプパネル立面図