

高強度・高靱性 FRCC ブロックを用いた完全リユース可能な メゾンリー構造の開発に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON CONSTRUCTION SYSTEMS FOR COMPLETE REUSE USING UHP-HFRCC BLOCKS

伊藤 裕志 (ライフサイクル工学分野)
Hiroshi ITO

Abstract:

Reuse system of building has a great potential in both points of the economical and environmental views. However, such reuse system has not been developed yet for a practical stage. One of the reasons is difficulty of separation due to the bond connection of building elements, such as bonding between reinforcing bar and concrete in RC structures. In this study, "Complete Reuse using Ultra high performance-hybrid Fibre reinforced cement-based composites Blocks" (CR-UFB) that has a "jigsaw puzzle" like structure system using UHP-FRCC was proposed. Because the employed UHP-FRCC material has high tensile strength and ductility, masonry blocks could resist against and transfer tensile and share stress by dry-stacked interlocking connection. As the first step, FEM analysis and fundamental experiments of UHP-FRCC blocks were carried out in order to evaluate the mechanical properties. Moreover, LCCO₂ analysis was performed as an efficiency of environmental aspects of the proposed CR-UFB.

Keywords : CR-UFB (Complete Reuse using Ultra high performance-hybrid Fibre reinforced cement-based composites Blocks), UHP-HFRCC, Dry-stacked interlocking connection, FEM analysis, LCCO₂
超高強度・高靱性 FRCC を用いた完全リユース構造, UHP-FRCC, 乾式インターロッキング接合, FEM 解析, LCCO₂

1. はじめに

一般的な建築物のライフサイクルコスト(以下、LCC)は、建築費を初めとしたイニシャルコストと比較して保全、運用、修繕費といったランニングコストの方が大きい。今後、日本の人口は急激に減少することが予測されているため、長期間の建物使用を考える際には、単純な長寿命化を目的とした維持管理だけでなく、建物使用者の減少に合わせ建物規模を減らしていくような「減築」が LCC 削減に有効と考えられる²⁾。その際には、建材の完全なリユース技術が伴うことで、躯体部分の変化を必要とするリニューアルでも、コストに加えて環境負荷を最小限に抑えられる可能性がある。

Kwon ら³⁾の開発した超高強度繊維補強セメント系複合材料(以下、UHP-HFRCC)は、適切な繊維の複合化により引張応力下でも 20MPa 程度の高強度と高靱性が実現されている。そのため、鉄筋補強などの接着に依らない乾式接合のみで構造体を構成して、リユースの大前提となる分離解体が可能になると考えられる。本研究においては、UHP-FRCC をコンクリートブロックに適用した接着に依らない応力伝達機構からなる構造形式である、高強度・高靱性 FRCC ブロックを用いた完全リユース可能なメゾンリー構造(以下、CR-UFB; Complete Reuse using Ultra high performance-hybrid Fibre reinforced cement-based composites Blocks)

を提案し、適切なブロック形状とその力学特性を FEM 解析と実験により検討する。加えて、CR-UFB が実現した場合の環境負荷低減効果について検証する。

2. リユース型建築システム CR-UFB の提案

建築部材レベルでのリユースは、材料レベルでのリサイクルよりも環境負荷削減の効果が大きい。ここでは、完全リユースが可能な建築システムとして、UHP-FRCC をインターロッキングブロックに適用した CR-UFB を提案する。上述の UHP-FRCC の力学性能は補強鉄筋などを必要とせず面内・面外方向の相互に連結されるインターロッキングにより組積造の構造物としての耐震性を期待できると考えられる(図1)。

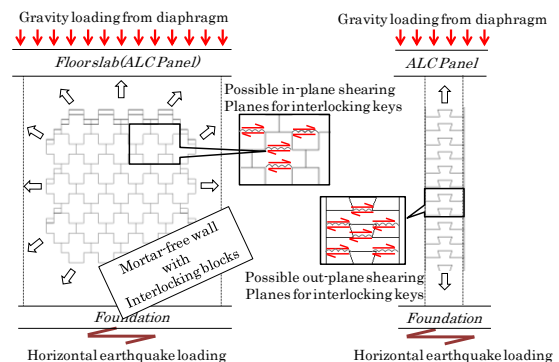


図1 構造形式 CR-UFB 概要 (左: 面内方向 右: 面外方向)

3. 適切なインターロッキングブロック形状の解析的検討

3.1 解析概要

CR-UFBに適用するコンクリートブロックについて、主にインターロッキング部分の形状について、耐荷性能の向上を目的に有限要素解析を行う。ここでは汎用の有限要素解析ソフトであるABAQUSを用いた。

3.2 解析条件

解析モデルを図2に、解析因子を表1にそれぞれ示す。解析対象は、図2に示す壁体接合部の一部をモデル化した。壁式構造の想定から、境界条件はモデルの底面をピン固定とし、鉛直上向きの変形を拘束し、モデルの上面を水平方向に0.14mm(1/1000)の変位制御として解析を行った。材料モデルは、混入される繊維がマトリックス内に完全にランダムに配向している均質な材料と仮定してモデル化し、UHP-FRCCの一軸引張試験結果³⁾を損傷塑性モデルとして導入した。その他の材料物性値を表2に示す。要素分割は面内方向に1.25mm、面外方向に2.5mmの4角形要素と設定した。

3.3 解析結果

面内方向の曲率 R/L_1 と寸法比 L_1/L_2 が最大主応力に及ぼす影響を図3に、面外方向の曲率 r/d と凹凸部貫入深さ d の影響を図4にそれぞれ示す。面内方向、面外方向ともに曲率の増加に伴い応力が分散されて最大値の減少がみられる。特に $r/d=0.25$ のモデルに関しては、 $d=35\text{mm}$ の段階に応力の重複が抑制されたことで大幅な主応力の低減に繋がったと考えられる。以下、最も応力低減が可能であったモデルに対して、ブロック組積体耐力の検討を行った。

4. ブロック許容耐力

補強ブロック造耐力壁の基本的強度を決定するものは組積体圧縮強度である⁴⁾。ここでは、UHP-FRCCブロック組積体(以下、組積体)の基本的な圧縮耐力を把握することを目的として、有限要素解析とこれに実験を行う。試験方法はASTM C90-75⁵⁾に準拠し、図5に示す組積体を対象とした。

4.1 解析条件

解析モデルを図6に示す。解析モデルは図5に示す組積体とし、面対称によりモデル化した。境界条件は、連続的なブロック壁の一部を想定し、面内水平方向の変形を拘束し、試験体底面をピン固定し、載荷面に10mmの変位制御とした。材料モデルについては3.2節と同様である。要素分割は35mmとし、載荷面および隅各部は10mmの4面体要素と設定した。

4.2 実験概要

試験概要を図6に示す。解析条件を再現するよう、壁式構造を想定し、試験体の両端に設置したL字アングルにより試験体の水平変位を拘束した。変位の測定に関しては、両端のアングルにそれぞれ設置した2本の高感度変位計で鉛直変位を、試験体面内外表面の各方向にはひずみゲージを貼ることで測定を行った。試験体本数は3体である。

4.3 試験結果(解析および実験)

試験結果を表3に、組積体の最終ひび割れ状況を写真1に、

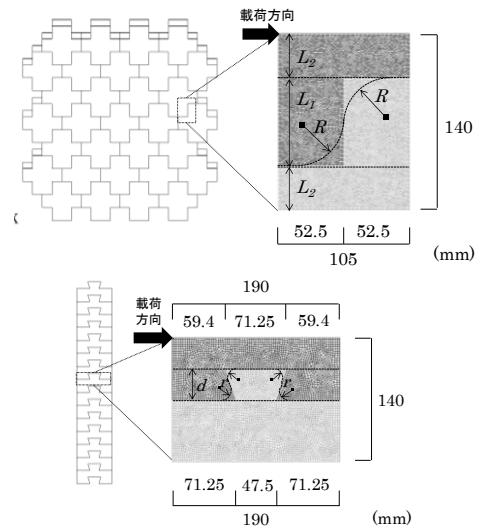


図2 解析モデル(上:面内方向 下:面外方向)

表1 解析因子

	解析因子	解析条件
面内方向	曲率 R/L_1 (-) (寸法比 L_1/L_2 は一定)	0, 0.2, 0.5
面外方向	凹凸部貫入深さ d (mm) (曲率 r/d は一定)	5, 15, 25, 35

表2 材料物性値

弾性係数 (GPa)	ポアソン比 (-)	比重 (g/cm^3)	圧縮強度 ³⁾ (MPa)
46.3	0.23	2.55	176

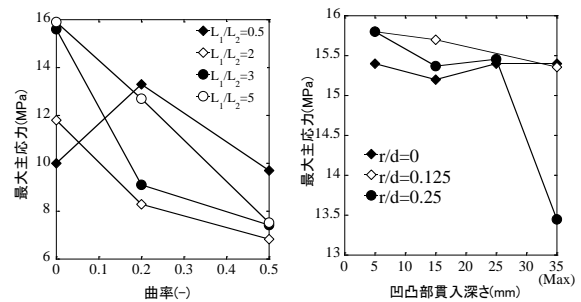


図3 曲率 R/L_1 と最大主応力 図4 貫入深さ d と最大主応力

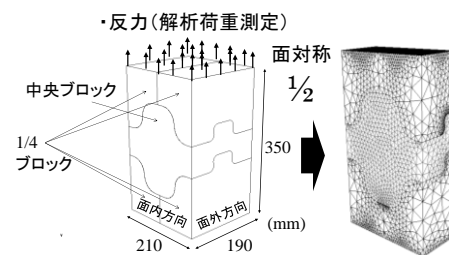


図5 組積体概要(解析モデル)

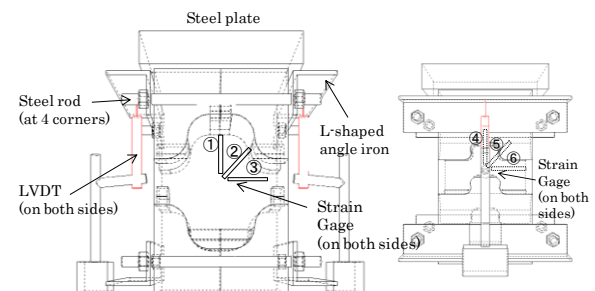


図6 試験概要(左:面内方向 右:面外方向)

解析結果より得られたミーゼス応力分布図を図7にそれぞれ示す。圧縮弾性係数はLVDTによって計測された応力-ひずみ曲線の傾きから、圧縮タフネスはJCI-SF5[®]に従い、ひずみに換算して0.75%となるまでの応力-ひずみ曲線下の面積を示す。最大荷重は367tonで最大荷重時鉛直変位は2.1mmであった。初期ひび割れは160tonの圧縮荷重を超えた範囲において、中央ブロック面内方向と上部ブロックの界面からの発生が目視で確認され、中央ブロックの場合は下方に、上部1/4ブロックは上方に伝播した。その結果、ひび割れ近傍のゲージ③のひずみ増加量がそれ以降単位時間当たり1.3倍程増加した。最大荷重の82%となる300tonを超えた段階において、面内側表面だけでなく面外側中央ブロック表面にも鉛直方向のひび割れが確認された。最終的に中央ブロックの両端が剥離される形で破壊に至った(写真1)。図6の応力分布が示す応力集中箇所と、写真1に示すひび割れ発生箇所とがよく一致していることを確認できる。初期ひび割れの発生要因としては、荷重方向に対して応力を負担する面積が比較的小さい領域に破壊が先行したためと考えられ、これは今回試験を行った3体の試験体に共通している。

また、日本建築学会の壁式構造関係設計規準集・同解説(メーソリ—編)4)では、暫定的にC種補強コンクリートブロック造耐力壁の短期許容圧縮応力度として、空洞ブロック単体の圧縮強度×組積係数(0.7)/設計用短期安全係数(1.5)より約3MPaと規定されている。逆算するとブロック単体の圧縮強度は約8MPaとなる。本組積体に関して、十字ブロック単体の強度を測定できないが、材料強度の176MPaと仮定して、組積係数の0.7を乗じ、短期安全係数の1.5で除すると短期許容圧縮応力度は約82.1MPaとなる。今回の実験結果として得られた90.3MPaの組積体強度はこの値を上回っている。十字単体ブロックの強度は、材料強度よりも小さくなること、今回の組積体が上下に1/4ブロックを合わせた全断面組積体でない2点を考慮すると、通常 mortar 組積を対象とした基準を満たしている。また、インターロッキングによる組積は組積係数を通常ブロック組積に用いられる0.7よりもやや大きい値となるものと推測される。

次に、解析および実験結果の鉛直方向の応力-ひずみ曲線の比較を図8に示す。解析結果の圧縮荷重は、試験体上面における反力を用いた。また、鉛直ひずみは図6に示す面内鉛直方向①のひずみゲージ貼り付け位置近傍に該当する要素から算出した。実験から得られたひずみゲージの挙動としては、図8に示すように最大強度に到達後、力の解放とともにひずみ方向が引張から圧縮に移す。解析結果は、ゲージ①の示す剛性・強度・終局後の挙動と概ね一致していることが確認できる。

荷重-変位曲線の各試験体との解析結果の比較を図9に示す。LVDT変位から算出した、初期剛性以外の剛性は解析値とほぼ一致したが、初期の段階では異なる挙動を示すことが明らかになった。これは接合部のギャップの影響に依るものと考えられ、理想的には解析値の剛性に基づいた挙動を描くと考えられる。

表3 組積体の圧縮耐力(実験・3試験体の平均値)

全断面圧縮強度 (MPa)	圧縮弾性係数 (GPa)	圧縮タフネス (N/mm ²)
90.3	27.1	0.32



写真1 組積体の最終ひびわれ面 (左: 面内 右: 面外)

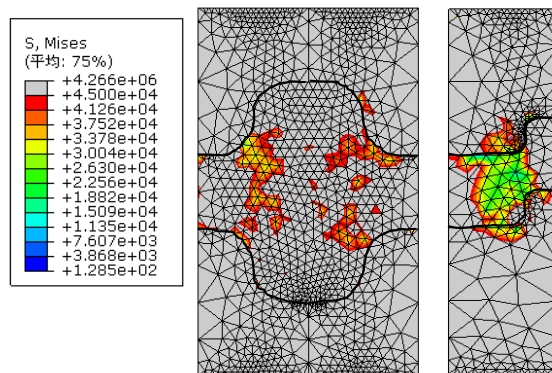


図7 ミーゼス応力分布図 (左: 面内方向 右: 面外方向)

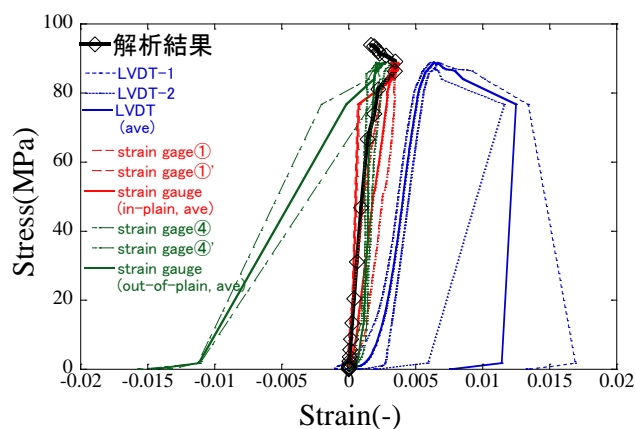


図8 鉛直方向の応力-ひずみ曲線

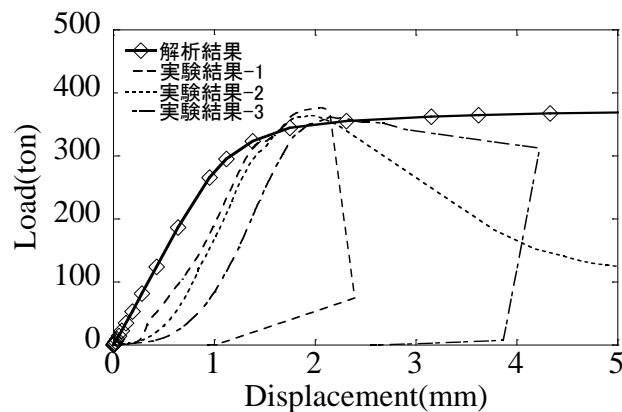


図9 荷重-変位曲線 (解析結果との比較)

5. 経時シミュレーションによるLCCO₂予測

ここでは、提案する CR-UFB（以下、提案モデル）の、通常の RC 造（以下、従来モデル）に対する環境負荷低減効果について LCCO₂ 解析を行い利点と傾向を分析する。

5.1 試算方法

表 4 に従来モデル提案モデルの諸条件を示す。対象建築物は文献 7) に示されている地上 3 階建て RC 造事務所ビル（延床面積 1732.5m²）とする。従来モデルが全層全スパン RC 部材であるのに対して、提案モデルは壁体を UHP-HFRCC インターロッキングブロックとし、床を ALC 床パネルのボルト接合による敷設とする。なお、基礎は対象外とする。

評価対象期間は 100 年間とした他、躯体部材の修繕に基礎資材の消費、その運送、現場施工にそれぞれ新築、改築時の 1% が毎年生じると仮定している 8)。提案モデルに関して改築周期を、日本の住宅平均耐用年数 9) に合わせ、35 年と設定し、改築の度に設備・内外装材の半分をリニューアルし、その他の部分は再利用するとした。改築の際には、竣工、あるいは最新の改築時からの人口減少率に合わせて延床面積を減らして再築することとする。リユース率は 100% とし、インベントリデータに土木学会のコンクリート委員会の提案する値 10) または産業連関表に基づく値 11) を用いて、発生要因毎に加算する積み上げ法により環境負荷を算出した。

5.2 試算結果

図 10 に従来モデル①建替 35 年周期②建替 50 年周期③建替 100 年周期と提案モデルの LCCO₂ シミュレーション結果を示す。100 年の期間において、従来モデルの累積 CO₂ と比較して、建替周期 35 年の場合は 7.2% の排出量減、建替周期 50 年の場合は 9.5% の排出量減、建替周期 100 年の場合は 18.8% の排出量減となった。建替 35 年周期の従来モデルと比較した場合、同率の人口減少分、床面積を減少させているため運用時 CO₂ に差はないが、建替・改築および解体の施工時の CO₂ 排出量が 77% 削減されており、改築が必ずしも LCCO₂ の増加に寄与しない結果を示した。

表 4 従来・提案モデル条件

従来モデル	提案モデル
RC 造	乾式 UHP-HFRCC ブロック組積造
延床面積：1732.5m ² *	延床面積：1732.5m ² *
修繕あり	同左
大規模改修あり(25 年周期)	大規模改修なし
建替あり (①35②50③100 年周期)	改築あり (35 年周期)

※初年度の面積。改築を行う度に、竣工時あるいは前回の改築時からの人口減少率に合わせて延床面積を減少させる。

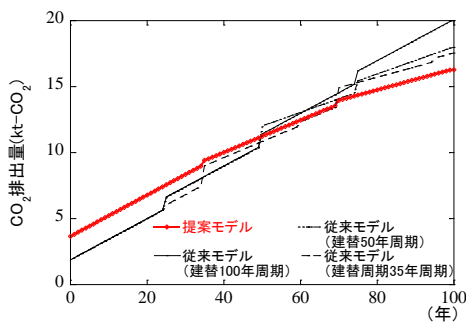


図 10 建替周期別 LCCO₂ 比較

5.3 提案モデル・改築回数別比較

5.3.1 試算概要

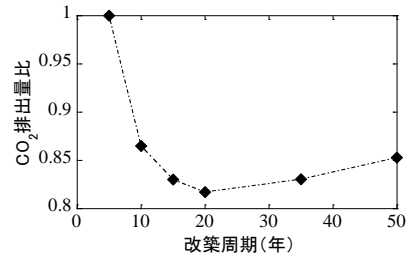


図 11 提案モデル・改築周期と CO₂ 排出量の関係

ここでは、提案モデルの改築周期を変動因子として、その頻度・回数による環境負荷の差分を算出する事を目的にシミュレーションを行った。

5.3.2 試算結果

提案モデルの改築周期と CO₂ 排出量比の関係を図 11 に示す。改築 20 年周期の提案モデルにおいて、最も CO₂ 排出量が低減された。改築回数の増加による床面積の減少により、運用時 CO₂ 排出量が減少し、35 年周期のモデルに対して全体で 1.6% 削減された。従来モデル 35 年周期、50 年周期、100 年周期に対し、それぞれ 8.7%、10.9%、20.1% CO₂ 排出量が削減された。この結果により、建物寿命が長いほど、環境負荷が削減できるという従来の考え方に限らず、今回の CR-UFB の様なリユース型建築システムの場合には人口減少率に合わせたタイミングの良い短周期の減築手法がより環境負荷に有利に働く可能性がある。

6. まとめ

- 1) 構造部材の完全リユースし、建築物を積極的に減築あるいはスクラップアンドビルドできる新しい構造形式として、繊維補強セメント系複合材料を用いた乾式インターロッキングブロックによるメーソンリー構造を提案した。
- 2) ユニット形状の適正化を目的とした、応力集中低減の観点からは基本的に曲率の増加に従い、最大主応力は低減される傾向にあり、適正な寸法で応力集中部の重複を抑制することで最大主応力は低減された。
- 3) 通常のコルタル組積と比較して、インターロッキングによる組積係数は大きく、安全側にあることが確認された。
- 4) 部材リユースによって、建替・改築段階での LCCO₂ 低減効果は大きく、人口減少率に合わせたタイミングの良い短周期の減築手法がより環境負荷に有利に働く可能性がある。

【参考文献】

- 1) 国立社会保険・人口問題研究所：日本の将来推計人口、2012
- 2) 志布聖也、西脇智哉、石山智、菊田貴恒：RC 造自治体庁舎建築物におけるライフサイクルコストの調査研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.2、pp.1501-1506、2011.7
- 3) Sukmin Kwon, Tomoya Nishiwaki, Takatsune Kikuta and Hirozo Mihashi: Development of Ultra-High-Performance Hybrid Fiber-Reinforced Cement-Based Composites, ACI Materials Journal, Vol. 111, No. 3, May-June 2014, pp.309-318
- 4) 日本建築学会：壁式構造関係設計標準集・同解説（メーソンリー編）
- 5) ASTM C90-75: Standard Specification for hollow load-bearing concrete masonry, 1975
- 6) JCI-SF5: 繊維補強コンクリートの圧縮試験及び圧縮タフネス計算方法、2004
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規程・同解説、2000
- 8) 井村秀文：建設の LCA、オーム社、2001
- 9) 住宅金融支援機構：利用者調査、2000
- 10) 土木学会コンクリート委員会コンクリートの環境負荷評価研究小委員会：コンクリートの環境負荷評価（その 2）、土木学会コンクリート技術シリーズ、No.44、2004.9
- 11) 日本建築学会：建物の LCA 指針、2013