

論文 インターロッキング型靱性組積ユニットを用いた組積壁による耐震補強方法の実現可能性

山内 成人^{*1}・真田 靖士^{*2}・中埜 良昭^{*3}・中村 友紀子^{*4}

要旨：高靱性セメント複合材料により作製したインターロッキング型組積ユニットを用い、これらを積み上げるだけの簡便な方法により組積壁を増設し、強度の上昇だけでなく靱性に富む耐震補強方法を提案した。本研究では増設壁のみを対象に静的破壊実験を実施し、増設壁部分の諸性能について検討した。その結果、靱性組積ユニットを用いた組積壁は壁面全域のユニットが一体となって水平力に抵抗する固有の性状、更に終局域であってもほとんど耐力低下を起こさない優れた変形性能を示したことから、本構法による耐震補強の実現可能性が確認された。

キーワード：補強技術，組積造，増設壁，繊維補強セメント複合材料，静的実験

1. はじめに

筆者らはこれまでに途上国での利用を想定した無補強組積造建築を鉄筋などの補強材を用いずに耐震化する手法について検討してきた^{1), 2)}。組積ユニットの形状をユニット同士の噛み合い効果（インターロッキング機構）が得られるように改良し製作した組積造壁の従来のものに対する優位性を確認した。しかし、上記ではレンガを組積ユニットとして用いたため強度、変形性能の改善に限界があった。従って、組積ユニットをレンガに限らず高強度、高靱性のものに変えることにより更なる性能の向上が期待される。また、組積造建築の長所の一つである施工の簡便性にも着目して、本構法による組積造壁が新たな耐震補強方法としての可能性を有しているのではないかと考えた。

そこで、本研究ではインターロッキング型靱性組積ユニットを用いた上記構法による増設耐震壁を提案する。増設壁部分を対象に静的破壊実験をはじめとする各種実験を行い、その諸性能について検討した。

2. 新しい耐震補強方法の提案

本研究で対象とする組積造壁は組積ユニット間のインターロッキング機構発現を意図しているため、ユニットに凹凸を確保する必要がある。本研究では既往の研究^{1), 2)}との関係から、組積造壁のプロトタイプとして図-1に示す壁を想定した。同図中には組積ユニットの形状も示す。

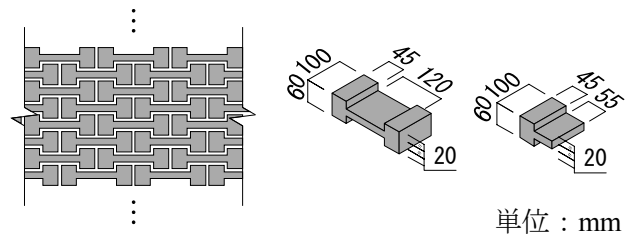


図-1 組積造壁のプロトタイプ

図-2に耐震補強方法の施工概念図を示す。既存鉄筋コンクリート（以下、RCと称す）架構中に反力要素を接着剤などで固定し、目地を介し（ドライジョイントとすることも考えられる）組積ユニットを積み上げるだけで増設耐震壁を構築する極めて簡便な施工方法を想定している。

*1 東京大学 生産技術研究所技術職員（正会員）

*2 東京大学 地震研究所助手 博(工)（正会員）

*3 東京大学 生産技術研究所教授 工博（正会員）

*4 新潟大学 工学部講師 博(工)（正会員）

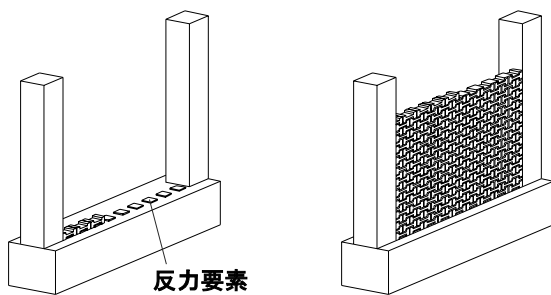


図-2 施工概念図

鉄骨ブレース設置や RC 耐震壁増設など、一般に作業が大掛かりとなる従来の耐震補強方法と比較すると、a)大型機械を用いずとも人力による資材の搬入が可能であり、且つ、b)主な作業は組積工事のみであるため、大幅に労働力・労働時間を削減でき、経済的に優れる、c)あと施工アンカー設置等を目的とした RC 躯体の穿孔などの作業が必要なく、騒音・振動・粉塵等が最小限に抑えられ、施工期間中であっても建物の使用が可能である、などの利点が期待される。

近年、靱性を有する小型ブロックを耐震補強に応用する研究が報告されているが^{例えば, 3), 4)}、本研究が提案する手法はブロック間の噛み合いを利用して補強鉄筋を用いずに建物に強度と靱性を付加することを意図している点に特徴がある（本研究では面内の性能のみを扱うが、ブロック間の噛み合いは面外の性能向上にも有効と考えている）。

3. 組積壁の静的載荷実験

3.1 実験計画

(1) 試験体

本研究では、上記補強方法の実現性の検証を目的に、その第一段階として、増設壁部分のみの面内性能について検討するため図-3 に示す試験体を計画した。ただし、既存フレーム内の増設壁はその拘束条件から、曲げ変形よりもせん断変形が卓越すると考えられるため、試験体はせん断破壊が先行する計画とし、試験体高さを低く設定した。ここで既往の研究^{1), 2)}より、不整形な組積ユニット、とくに脆性材料による組積ユニットにより構成された組積壁では壁体

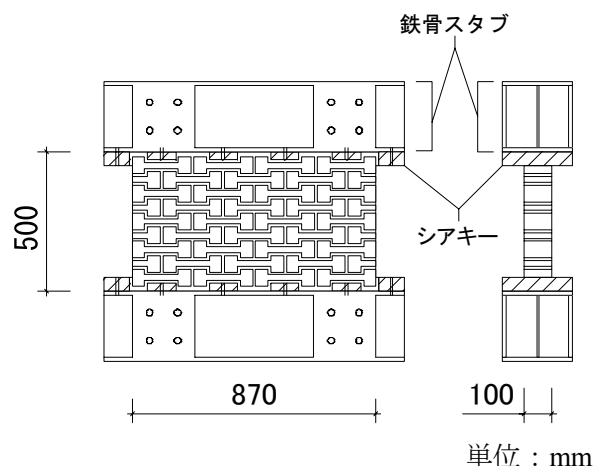


図-3 試験体詳細

内を伝達される応力の分布が不均一になり（組積ユニット隅角部に局所的な応力集中が生じる）、組積ユニットの局所的な破壊が連鎖的に進行し、各組積ユニット間のインターロッキング機構が総合して水平力に抵抗しない可能性が考えられた。そこで本研究では、脆性材料による組積ユニットとしてレンガを、靱性材料による組積ユニットとして繊維補強セメント複合材料（以下、FRCC）を用いた2種類の試験体を計画し、両者の性能の違いについて検討することとした。

図-3 中ハッチング部には組積ユニットとスタブとの滑りを拘束するためシアキーを固定した。目地幅は 10mm であるが、本実験と並行して実施した従来型の組積造壁試験体（本稿では扱わない）との関係から、上下鉄骨スタブと試験体の間の水平目地のみ 20mm とした。尚、上下鉄骨スタブ両端のシアキーと組積ユニットとの間にも 10mm の鉛直目地を設けた。

表-1 にレンガ、FRCC および目地モルタルの材料特性を示す。各引張強度は三点曲げ試験による曲げ強度に基づいて算定した。モルタルは 160×40×40mm の供試体⁵⁾、レンガ・FRCC は 210×100×60mm の供試体を対象に支点間距離をそれぞれ 100mm として加力した。尚、本研究では組積ユニットの靱性の有無のみをパラメータとするため、FRCC はその引張強度がレンガとほぼ同等、すなわち意図的に低強度となるよう

表-1 材料試験結果

	引張強度(N/mm ²)			
	レンガ	FRCC	モルタル (レンガ造)	モルタル (FRCC造)
No.1	8.23	7.28	0.84	0.94
No.2	6.39	7.31	1.41	1.50
No.3	8.24	7.84	0.98	1.41
平均	7.62	7.48	1.08	1.28

に、文献 6)を参考として予備的な材料試験を行い、セメント：砂：水=1.0：0.4：0.6 の配合のモルタルに体積比 1.0%のポリエチレン繊維を混入することにより製作した。また、実験実施時の材齢はモルタルが 11 日、FRCC が 16 日である。

また、参考までに FRCC に関しては上記の三点曲げ試験のほかに同じ材料、配合、材齢の供試体 3 体に対して JCI 規準⁷⁾による曲げ試験も行なった。これによると引張終局歪は 0.0128 と評価された。

(2) 載荷方法

実験は新潟大学 自然科学研究科管理棟環境開発実験室において実施した。載荷装置図を図-4 に示す。本実験では組積壁のせん断挙動について検討するため、試験体に作用するせん断力が最も厳しくなるよう加力点高さを試験体高さ中央とし、逆対称モーメントを強制することとした。軸力は 20kN(一般組積造住宅を想定し⁸⁾、軸圧縮応力度 0.23N/mm² で一定とし、試験体頂部変形角 (=試験体頂部水平変位/試験体高さ 500mm) 1/800, 1/400, 1/200, 1/100, 1/50 まで正負交番で各 1 サイクルずつ載荷した。

(3) 計測方法

図-5 に試験体の変位計設置位置を示す。アルミ製の変位計設置用治具を下部スタブに設置し水平相対変位 1 点、鉛直相対変位 2 点の計 3 点の変位を計測した。また変位計の受けを太矢印の位置で万力により固定した。荷重は水平ジャッキによる水平荷重 1 点、鉛直ジャッキによる鉛直荷重 2 点の計 3 点を計測した。更に、各サイクルピーク時、除荷時にクラックスケールを用いて最大ひび割れ幅を目視により計測した。

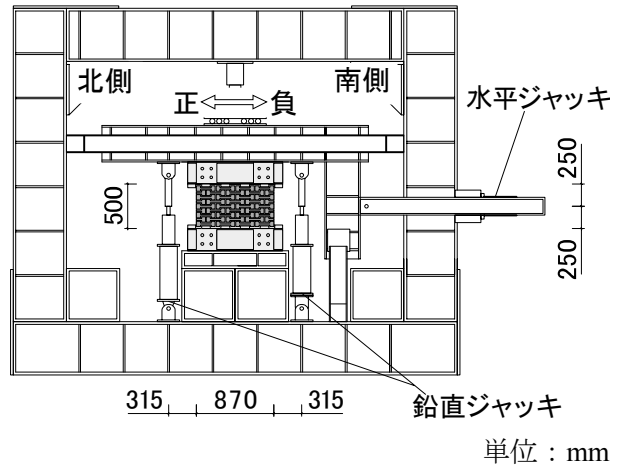


図-4 載荷装置図

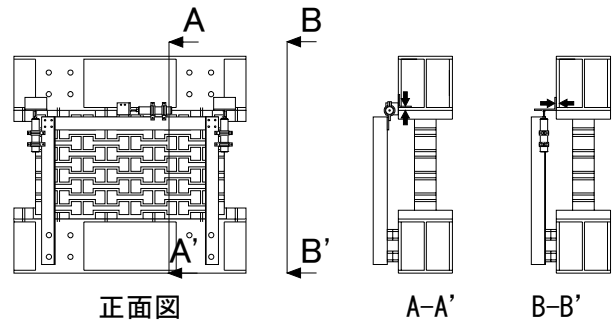


図-5 変位計取り付け詳細

3.2 実験結果

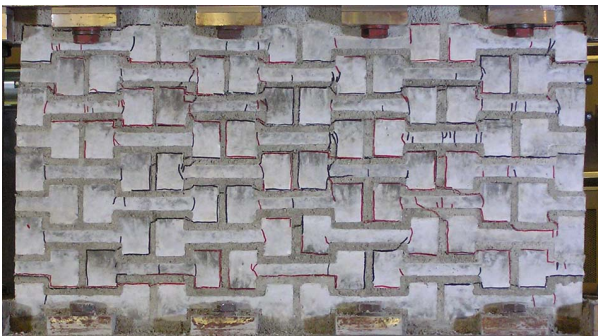
(1) 破壊経過

[レンガ造試験体]

±1/800 サイクルでは壁頭脚部に曲げひび割れ、組積ユニットの引張ひび割れがわずかに発生するのみであった。±1/400 サイクルでは壁面に階段状のせん断ひび割れが発生し始め、±1/200 サイクルでくびれ端部を貫通する損傷が発生した。このくびれ端部の損傷が個別に順次進行している現象を確認したことから、本構造では、壁面を構成する各組積ユニット間の水平抵抗が同時には得られず、局所的な応力集中と破壊を繰り返しながら損傷が進むことが明らかとなった。±1/100 サイクルでは、階段状のひび割れが壁面をほぼ横断し、後述するように大きく耐力低下した。写真-1(a)、図-6(a)にレンガ造試験体の最終破壊状況として-1/50 ピーク時の破壊状況を示す。図-6(a)には壁面を横断した階段状のひび割れを強調して示してある。

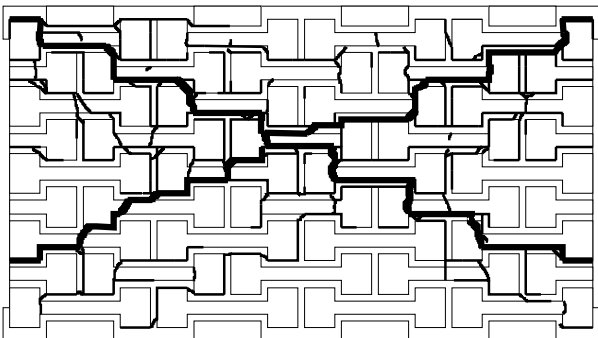


(a) レンガ造試験体

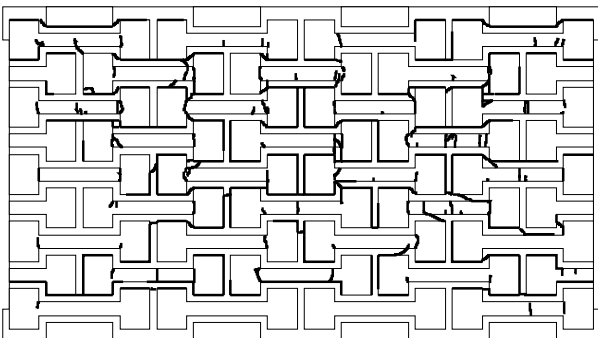


(b) FRCC 造試験体

写真-1 最終破壊状況



(a) レンガ造試験体



(b) FRCC 造試験体

図-6 最終破壊状況

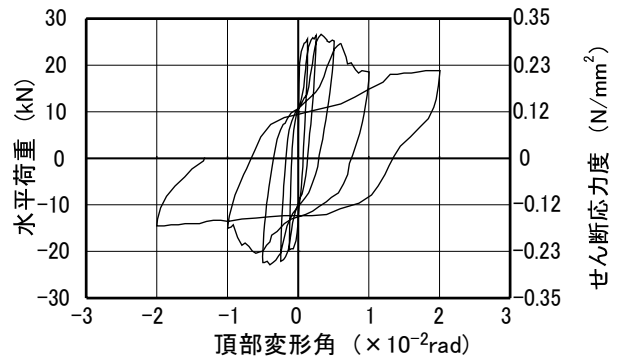
[FRCC 造試験体]

±1/200サイクルの終了時点までは組積ユニット自体に微細なひび割れが無数に発生するのみで、目地の損傷や目地と組積ユニットとの剥離は目視ではほとんど確認できなかった。±1/100 サイクルより目地と組積ユニットとの剥離や目地自体の損傷が顕著となったが、レンガ造試験体に見られた壁面を横断する階段状のひび割れは最終サイクル終了時まで発生しなかった。写真-1(b), 図-6(b)に FRCC 造試験体の最終破壊状況を示す。損傷がレンガ造試験体より広範囲、ほぼ壁面全域に及んでいることから壁体を伝達される力が広く分散されていたことが伺える。加力終了時点でも組積ユニット自体が分離するような致命的な損傷がみられなかったことからまだ十分に余力を残していたと考えられる。

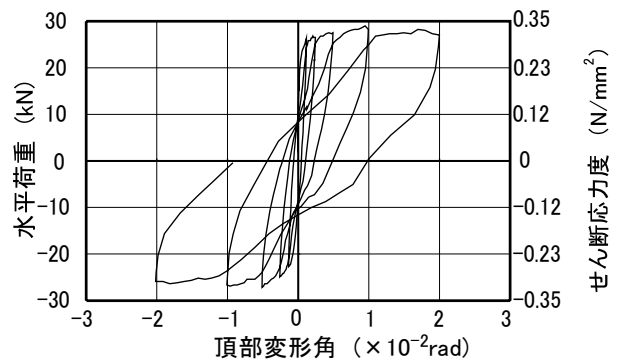
(2) 荷重変形関係

図-7に各試験体の荷重-変形関係を示す。

レンガ造試験体は+1/200サイクルで正側の最大耐力 26.46kN を記録し、-1/200 サイクルで負側の最大耐力-23.03kN を記録した。±1/100 サイ



(a) レンガ造試験体

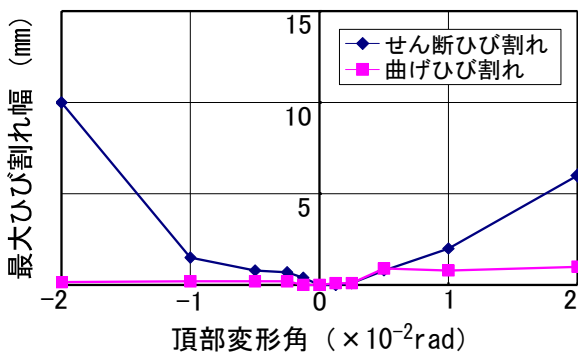


(b) FRCC 造試験体

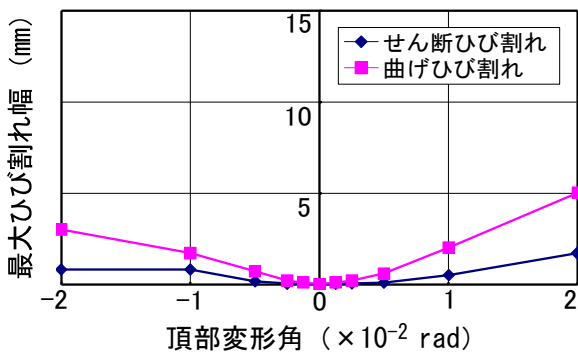
図-7 荷重-変形関係

クル途中で最大耐力の 1/2 程度まで大きく耐力低下し、その後は摩擦によって耐力を維持したものと考えられる。以上の結果は、脆性材料によるインターロッキング型組積造壁が、従来の組積造壁（一般のレンガなど、直方体の組積ユニットを用いる組積造壁）よりも、組積ユニット同士の噛み合い効果により耐力上昇が期待できることを意味している。

一方、FRCC 造試験体は+1/100 サイクルで 29.15kN、-1/200 サイクルで-26.95kN の最大耐力を記録した。図-7(b)より、最大耐力以降もほとんど耐力低下することなく±1/50 サイクルまで終始安定した紡錘型の履歴ループを描いたことを確認できる。後述するひび割れ幅の実験結果も総合し、本試験体は±1/200 サイクル以降、曲げ降伏による耐力の上限に達したものと判断される。尚、曲げ降伏時の耐力は理論的に（曲げ耐力=0.5ND、N：作用軸力、D：壁長さ）概ね評価できる。また、本構造を既存躯体に増設した場合を想定すると、増設壁は既存躯体によりせん断変形が強制されることとなるため、本



(a) レンガ造試験体



(b) FRCC 造試験体

図-8 ひび割れ幅—水平変位関係

実験結果のように曲げ降伏により耐力が頭打ちになることなく、さらに大きなせん断力を負担することも期待される。

(3) ひび割れ幅

図-8 に各試験体の各サイクルピーク時における最大ひび割れ幅の推移を示す。本実験では曲げ、せん断によるひび割れの区別を実験実施者の裁量によったが、概ね部材端での鉛直方向に開くひび割れを曲げひび割れ、水平方向に開くひび割れをせん断ひび割れとして扱った。レンガ造試験体では+1/200 サイクルで曲げひび割れが若干大きくなるものの、その後は一定となり終始せん断卓越型の挙動となった。一方、FRCC 造試験体はサイクル毎に僅かにせん断ひび割れが大きくなる、もしくは一定であるが、終始曲げ卓越型の挙動を示したことが確認できる。

4. 要素実験

4.1 実験計画

本研究では、増設壁の静的載荷実験と並行して、増設壁の局所的な性能を評価することを目的に、図-9 のように切り出した各要素試験体の要素実験も実施した。計画した要素実験は、組

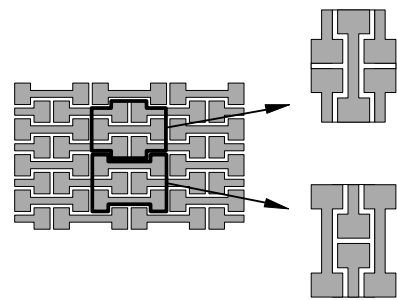


図-9 要素試験体の切り出し

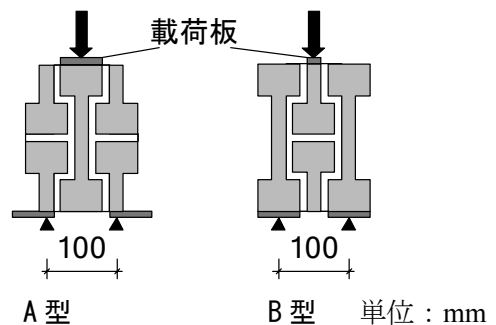


図-10 要素試験体と載荷条件

積ユニット間のせん断強度推定を目的とする 2 面せん断試験であり、試験体および載荷方法は 図-10 に示すとおりである。用いた試験体数は各 3 体で、各材料の特性は壁試験体の静的破壊実験時と同一のものである。

4.2 実験結果

表-2 に 2 面せん断実験の結果を、図-11 に要素試験体の特徴的な破壊状況をそれぞれ示す。平均的な強度は、FRCC 造試験体がレンガ造試験体を上回る傾向を捉えることができたが、本要素試験では横方向の拘束（壁試験体の軸力に相当する）を考慮していないため必ずしも静的破壊実験の結果を反映できていないと判断する。今後はこういった問題を踏まえ試験方法を修正することも視野に入れている。

表-2 要素実験結果

	レンガ造試験体		FRCC 造試験体	
	A 型 (N/mm ²)	B 型 (N/mm ²)	A 型 (N/mm ²)	B 型 (N/mm ²)
No.1	0.31	0.29	0.46	0.27
No.2	***	0.23	***	0.54
No.3	***	***	***	***
平均	0.31	0.26	0.46	0.4
A・B 平均	0.28		0.43	

***試験体の施工不良、更に FRCC は自作のため形状にばらつきがあり加力不十分のため除外

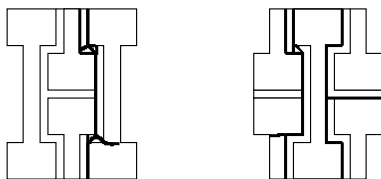


図-11 2 面せん断試験結果

5. まとめ

本研究では、インターロッキング型組積造壁を増設壁として耐震補強に応用する概念を提案するとともに、増設壁部分の面内性能を検証するため静的破壊実験を実施し下記の知見を得た。

1) 組積ユニットの材料として FRCC を用いた壁は、レンガを用いた壁の強度、変形性能と

もに上回った。

- 2) 本構造では壁体を構成する各組積ユニット間の噛み合いによる抵抗力が均一に得られず、局所的な応力集中を伴う。その結果、脆性材料による組積ユニットを用いた場合、ユニットの噛み合い部分（特にくびれ端部）の破壊が連鎖的に進行するため、各組積ユニット間の噛み合い効果が総合して得られない。それに対し、靱性材料による組積ユニットを用いた場合、噛み合い部分がひび割れ後も即座に耐力を失わないため、より広域に応力が分散され、より合理的な構造であることが指摘できる。
- 3) 靱性組積ユニットを用いた試験体は変形角 1/50 まで安定した性能を発揮したことから、優れた耐震補強要素としての可能性を有す。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金萌芽研究「途上国支援を目的とする補強材を要さない組積造建築の高耐震化技術の開発」（課題番号：17656173、研究代表者：真田靖士）による助成を受けた。また、本実験で用いた FRCC の製作には東洋紡より提供いただいたポリエチレン繊維を使用した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 真田靖士ほか：無補強組積造建築の一耐震化手法について、日本地震工学会大会-2004 梗概集, pp.58-59, 2005.1
- 2) 山内成人ほか：インターロッキング機構を利用した組積造壁の静的破壊実験（その 1, 2）、日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造IV, pp.835-838, 2005.9
- 3) 木村耕三ほか：FRP ブロックを用いた増設耐震壁工法の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造IV, pp.677-678, 2003.9
- 4) 三輪明広ほか：RPC ブロックを用いた耐震補強工法に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造IV, pp.559-560, 2005.9
- 5) 日本規格協会：JIS ハンドブック 2004 建築 II 試験・設備, 2004.1
- 6) 諏訪田晴彦ほか：構造物の高性能化に向けた高靱性繊維補強セメント複合材料の開発、日本コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.133~138, 2001.6
- 7) 日本コンクリート工学協会：繊維補強セメント複合材料の曲げモーメント-曲率曲線試験方法 JCI-S-003-2005, 2005
- 8) 日本建築学会：グアテマラ・北イタリア・ミンダナオ島・ルーマニア地震災害調査報告, 1979.2