平成 28 年度　修士論文

セルロースナノファイバーによる煉瓦壁の補強効果と振動特性変化

2017 年 2 月

首都大学東京大学院　都市環境科学研究科　建築学域

松野　淑

目次

1 章　序論

1.1 本研究の背景……4

1.1.1 煉瓦造建築物の現状

1.1.2 煉瓦造建築物に対する既存の耐震補強法

1.2 本研究の目的……8

1.2.1 現状の課題

1.2.2 本研究の目的

1.3 論文構成……10

2 章　CNF の種類と CNF 混入モルタル

2.1 はじめに……12

2.2CNF(セルロースナノファイバー)……13

2.3 本研究で扱う CNF の種類……14

2.4CNF 混入モルタル……15

2.5 まとめ……16

3 章　材料試験

3.1 はじめに……18

3.2 モルタルバー強度試験……19

3.2.1 試験概要

3.2.2 試験体作製

3.2.3 試験結果

3.3 煉瓦ユニット圧縮試験……31

3.4 組積プリズム試験……32

3.4.1 試験概要

3.4.2 試験体作製

3.4.3 曲げ試験

3.4.4 せん断試験

3.5 まとめ……41

4 章　固有値解析

4.1 はじめに……43
4.2 煉瓦壁のヤング係数算出……44
4.3 ロの字型モデルの構築……46
4.4 壁のヤング係数と 1 次固有振動数の関係……47
4.5 まとめ……52

5 章　結論

5.1 本研究の結論……54
5.2 今後の課題……55

APPENDIX

① 材料試験工程表
② 固有値解析の予備解析

参考文献

謝辞

1章 序論

1.1 本研究の背景

1.2 本研究の目的

1.3 論文構成

1.1 本研究の背景

1.1.1 煉瓦造建築物の現状

我国には，伝統的な煉瓦造建築物が多く存在する。それらの建物は明治初期の文明開化以降に建築されたものが多く，築 100 年以上の建物も少なくない。しかし，明治 24 年に発生した濃尾地震では紡績会社や公共の建物であった煉瓦造建築物に大きな被害が生じ，煉瓦造建築物の耐震性が問題視されることになった。その後，新しい構造として耐震性に優れた RC 造建築物や鉄骨造の建物が現れ始め，煉瓦造建築物は衰退していった [1)]。以降，煉瓦造建築物は新築されることは少なくなったが，震災の被害を免れ，現存する煉瓦造建築物も多い。近年では，地域の歴史や文化の象徴としてこれらの歴史的建築物を保存・再生しようとする自治体や団体も多く，煉瓦造建築物の耐震補強に関する先行研究は多く存在する [2)3)4)]。特に，補強効果が高く経済的な鉄骨造フレームや RC 造耐震壁などの増設が採用される例が多い。代表的な既存の煉瓦壁の耐震補強法について次節に述べる。

1.1.2 煉瓦造建築物に対する既存の耐震補強法

(1)　RC 造内壁補強

既存煉瓦壁の室内側に沿って RC 造の耐震壁を構築するとともに,木造の床を撤去して RC 床に置換している。この補強法は,煉瓦壁自体を変更することはないため,施工性も高く,コンクリートのみを材料とするため,経済性という観点から優れているといえる。しかし,RC 壁は重量が大きいため,基礎の補強が必要な場合がある点や,エフロレッセンス（白華）による煉瓦壁体の劣化を誘発する可能性があるなどの課題がある。

(2) 鉄骨ブレース付加補強 3)

曲げ系としての破壊性状を,控え柱と鋼板パネルにより線的に補強する方法。RC 造内壁補強と同様に,経済性,施工性に優れているが,補強架構の重量が RC 造内壁補強に比べて小さいため,基礎の補強は不要であり,加えて乾式工法のため施工期間が短いなど RC 造内壁補強にかわり,近年採用される事例が増えてきている。

(3)　免震構法 4)

東京駅などにも用いられている構法である。煉瓦造に限らず,RC 造,木造の歴史的建造物への適用例が増加しており,基礎部に免震装置を設置し,地震入力を低減する方法である。地下に免震装置を設置し,上部構造の変更が無いため,上部構造物を保存する上で非常に有効な方法であり,かつ,補強効果は他の補強法と比べても抜きん出ているが,経済性や施工性に課題がある。基礎部に免震装置を設置するには上部構造物と基礎の縁を切る必要がある。東京駅の工事では総重量 7 万 t の駅舎に対し,既存の基礎部から仮受け支柱に荷重を移し,仮受けで構造物を支えている間に,免震装置を設置し,免震装置に構造物を載せかえるという工事を行っている。この大掛かりな工事には 5 年以上の工期を要し,費用は約 500 億円と言われている。

意匠性や,補強効果という点では優れた補強法といえるが,この補強法をすべての煉瓦造建築物に用いるのは困難である。

(4)　壁面プレストレス導入補強

煉瓦造の外観,内観を保護するために考案された補強法である。煉瓦壁の上端から下端まで鉛直方向に貫通するように壁内部を削孔したのち,PC 鋼棒を挿入し,緊張して煉瓦壁にプレストレスをかけるという方法である。内外装に変化をもたらすことなく,また建物内部への工事の影響も少ないため,居ながら施工が可能なこともメリットに挙げられる。

(5)　アラミドロッド目地置換工法

本補強法法は,既存目地モルタルの表面を切削し，コの字および直線状のアラミドロッドを挿入後,目地モルタルを再充填する目地置換工法である。(図 1.3)アラミドロッドとは，ナイロンとほぼ同じ化学式で構成されているアラミド繊維を組紐上に編み，エポキシ樹脂をがんしんさせた連続繊維補強材であり，引張強度が鋼鉄の 5 倍程度等優れた性能を持つ素材である [5)]。

この補強法では，目地部のみを施工するため,建築物の意匠に影響を及ぼさず,また,アラミドロッドは非常に軽量な材料といえるので,基礎部の補強の必要も生じない。補強効果を明らかにした先行研究が存在する。水平方向曲げにおいては目地ひび割れ発生以後の脆性破壊を防ぐ役割を持つが,鉛直曲げに対しては,応力が生じるとコの字状のロッドが開き,十分な補強効果が得られないことが確認された。施工性,経済性には優れた方法といえるが,補強効果に課題が残る。また，著者は以前にアラミドロッドの配置を変更した補強法を提案し，実際に実験を行っているが，大きな性能の変化は確認できなかった。

(a) 既存アラミドロッド目地置換工法

(b) 変更アラミドロッド目地置換工法

図 1-1 アラミドロッド目地置換工法

1.2 本研究の目的

1.2.1 現状の課題

前節で述べたように現状いくつかの耐震改修事例は存在するが，その耐震改修方法には課題が以下の課題が残っている。

(a) 実際に確保できる耐震性が不明確で，評価法が未確立である場合が多く，耐震補強を行うに際して必要な煉瓦壁の構造的特徴が詳細には把握されていない。

(b) 国宝や重要文化財などの歴史的煉瓦造建築物の耐震補強においては，文化的価値の保存が最優先事項であるため，外観などを可能な限り変更しないことに対する要望が極めて高い。

1.2.2 本研究の目的

前節の課題を受けて，本研究では外観変更の少ない煉瓦壁の耐震補強法として目地置換工法に着目した。しかし，本研究では既存の補強方法のようにアラミドロッドを用いるのではなく，目地モルタル自体の性能を向上させることで目地置換を行うことを目的とした。

目地モルタルの材料特性を向上させるために本研究では新素材のセルロースナノファイバー(CNF)をモルタルに混入することを検討する。CNF の混入条件を変更させ，材料特性を向上させる条件を確認することを目的として目地モルタルの材料強度試験を実施する。その後，目地強度の変化が煉瓦壁全体の振動特性に与える影響を把握するため，既往の研究[6)]を参考にした煉瓦壁モデルを用い，固有値解析を実施する。

1.3 論文構成

本論文は第 1 章から第 5 章で構成されている。
第 1 章は，序論として，背景と目的，構成について述べている。我国に多く存在する歴史的な煉瓦造建築物に施す補強法に求められること，現状の煉瓦壁の性能評価法の課題を明確化することで，本論文の意義を示している。

第 2 章は，本論で扱う CNF の特徴に言及している。本論では，歴史的煉瓦壁を模擬するため，目地モルタルが通常より弱くなるように水セメント比を高くし，砂の重量費を大きくした。

第 3 章は，CNF 混入モルタルの材料特性の把握を目的とした一連の材料試験を実施した。CNF の混入割合を変化させたモルタルバー数種類に対して材料強度試験を行い，混入割合と材料強度の関係を把握した。また，目地置換工法に CNF 混入モルタルを使用することを想定して，普通煉瓦を用いた組積プリズム試験体を用いた材料試験を実施した。材料試験は，煉瓦 4 段積のプリズム試験体での曲げ試験，煉瓦 3 段積のプリズム試験体の中央煉瓦ユニットを押し抜く 2 面せん断試験の 2 種類とする。材料試験の結果より CNF 目地置換補強工法の補強効果について考察した。

第 4 章は，第 3 章で実施した材料試験に基づき煉瓦壁の材料特性を定義した。その各数値をパラメタとし，既往の研究において実測調査がなされた既存建物を対象とした固有値解析を実施した。ここでは，目地置換工法を施した煉瓦壁に関して，目地の材料特性が壁全体の振動特性に及ぼす影響を確認した。

第 5 章は，結論として第 3 章の材料強度試験，第 4 章の固有値解析の総括とともに，今後の課題について述べている。

2 章　CNF の種類と CNF 混入モルタル

2.1 はじめに

2.2CNF

2.3 本論で扱う CNF の種類

2.4CNF 混入モルタル

2.5 まとめ

2.1 はじめに

本章では，本研究に用いる CNF について言及する。また，CNF 混入モルタルの混入割合，作成条件等にも触れる。図 2-1 に本研究で用いるセルロースナノファイバーの一種 TEMPO 酸化 CNF 水溶散体(1.0%)を示す。

図 2-1　セルロースナノファイバー

2.2CNF(セルロースナノファイバー)

セルロースナノファイバー（CNF）は植物の細胞壁の約 50%を占める。植物の繊維をナノレベルまで細かく解すことで得られる植物由来の材料であり，環境にやさしい。また，鋼鉄の約 1/5 の軽さでありながらその 5 倍以上の強度を有する。加えて，弾性率は高強度繊維とされているアラミド繊維と同等の数値を示し,熱による変形もガラスの 1/50 程度と，優れた特性をもつ素材である [7]。（表 2-1）この特徴的な物性により，フィルター部材，エレクトロニクスデバイス，食品，医薬など様々な分野において利用が期待されている。建築分野に関する先行研究では，モルタルに CNF を混入する検討がなされ，降伏値，および揺変性が増加することが報告されている [8]。

表 2-1　その他繊維材との性能比較

補強用繊維	CNF	炭素繊維	アラミド繊維	ガラス繊維
密度(g/cm^3)	1.5	1.82	1.45	2.55
弾性率(GPa)	140	230	112	74
強度(GPa)	3	3.5	3	3.4
熱膨張(ppm/K)	0.1	0	-5	5

2.3 本研究で扱う CNF の種類

本研究で用いる CNF は以下の 3 種類の水溶散体とする。

[1] TEMPO(tetramenthylpiperridinel-oxyl)酸化 CNF
　　透明性の高いアニオン性 CNF/1.0%水溶散体

[2] カチオン化 CNF
　　カチオン性 CNF/1.1%水溶散体

[3] CM 化(カルボキシメチル化)CNF
　　高粘度のアニオン性 CNF/1.2%

アニオン性，カチオン性の科学的な違いは，表面電荷にある。アニオン性の物質は，カチオン性の物質と混ざると凝集が起こり，反対にカチオン性の物質はアニオン性の物質と混ざるとき凝集が起こる。また，上記 3 種類の CNF の化学式を図 2-2 に示す。また，この図は本研究で用いる 3 種類の CNF を提供していただいた日本製紙提供していただいた図を元に作成している [9]。

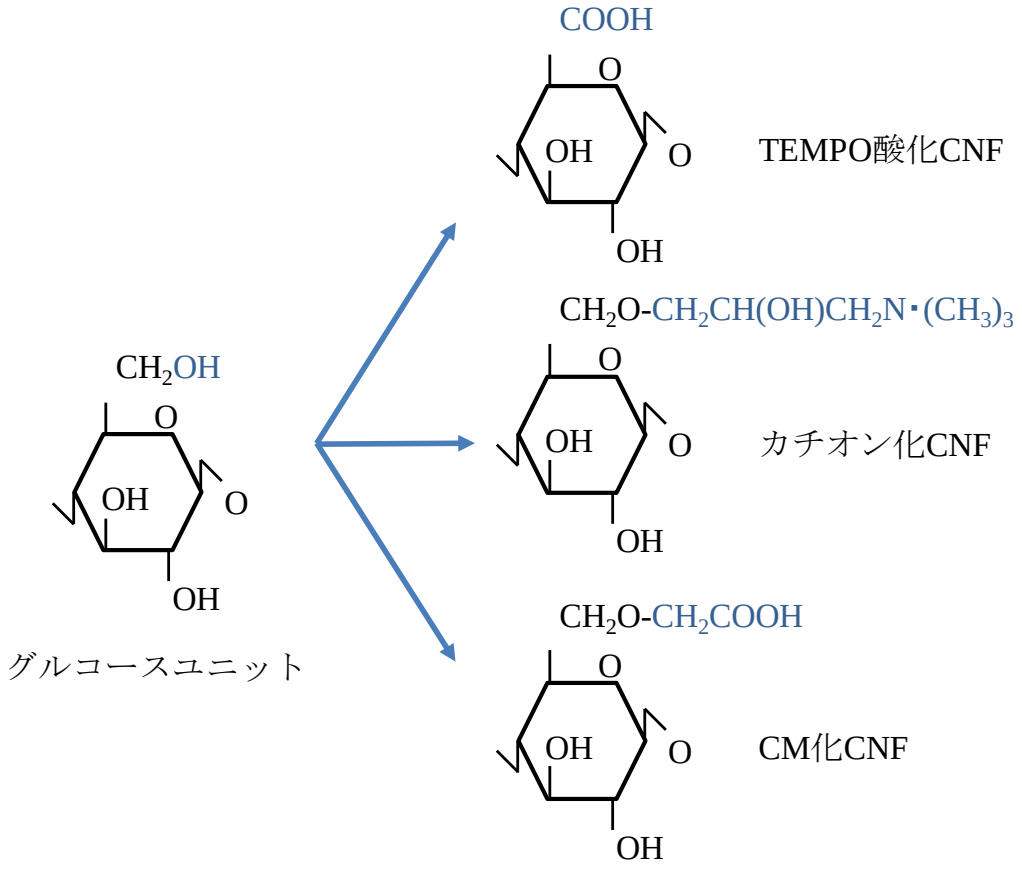


図 2-2　CNF 科学変性

2.4CNF 混入モルタル

本研究では，歴史的煉瓦壁を模擬するため，水セメント比を上昇させ，砂の重量比を大きく（水：セメント：石灰：砂=1:1:1:4.5）（質量比）して通常より弱くしたものを基本とする。CNF 混入モルタルは，基本モルタルの水を CNF 水溶散体で代替して作製する。また，試験体の養生期間は 4 週間とする。また，試験体作成の日程は APPENDIX に記載する。

2.5 まとめ

本章では，本研究で用いる CNF の説明及び CNF 混入モルタルについて言及した。

CNF は,植物の細胞壁の約 50%を占める繊維をナノレベルまで細かく解すことで得られる植物由来の材料であり，生産・廃棄に関する環境負荷が小さい。また，鋼鉄の約 1/5 の軽さでありながら，その 5 倍以上の強度を有するなどの特徴的な物性を持つ材料である。本件急では，TEMPO 酸化 CNF,カチオン化 CNF,CM 化 CNF の計 3 種類の水溶散体を用いた。

本研究で用いるモルタルは歴史的煉瓦壁を模擬するため，水セメント比を上昇させ，砂の重量比を大きくして通常より弱くしたものを基本としている。CNF 混入モルタルは，基本モルタルの水を CNF 水溶散体で代替して作製することとする。

3 章　　材料試験

3.1 はじめに

3.2 モルタルバー強度試験

3.3 煉瓦ユニット圧縮試験

3.4 組積プリズム試験

3.5 まとめ

3.1 はじめに

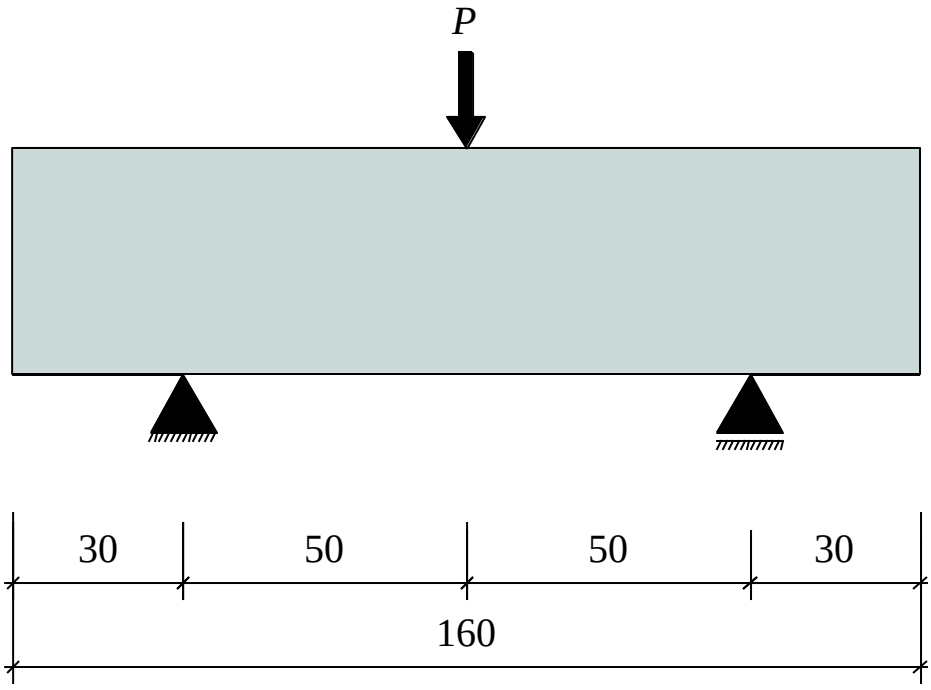
本章では，2 章で示した CNF を用いた材料試験について説明する。
材料試験は CNF 混入モルタルの材料特性を把握するためのモルタルバー試験，煉瓦単体で行う煉瓦ユニット試験を行った後，モルタルと煉瓦の付着性状等を把握するためのプリズム試験を行う。

3.2 モルタルバー試験

3.2.1 試験概要

JIS R5201 に基づきモルタルバーを作成する。モルタルバーの寸法は 40×40×160(mm)とし，図 3-1 のように 3 点曲げ試験を行った後，各試験片で圧縮試験を行う。ここでは，各 CNF の混入割合を変化させ，混入割合と強度の相関を理解することを目的としている。

図 3-1　モルタルバー曲げ試験図



3.2.2 試験体作製

試験体の作製手順を以下に示す。モルタルバー試験体の養生期間は 4 週間とし，試験体作製日時を APPENDIX に示す。

材料の軽量は電子秤及びボウル，バケツ等を用いた。砂，セメント，消石灰を先に混ぜ合わせ，均等になったところに水及び CNF 水溶散体を加える。型枠に詰める際は JIS R5201 を参考に，型枠の高さ約 1/2 まで詰め，突き棒を用いて全面に渡って突く。この工程をもう一度行う。突き数は各層 15 回を標準とするが，CNF 水溶散体の流動性の悪さ等の影響により突き固められない試験体があったため，場合によって対応した。試験体作製について以下に写真 2-1~2-4 で示す。

写真 3-1　使用材料

写真 3-2　材料の混合

写真 3-3　突いている様子

写真 3-4　養生中

TEMPO 酸化 CNF は混入の割合を 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0%の計 6 種類とし，カチオン化 CNF 混入モルタルは 0.55, 0.7, 0.8, 1.0, 1.1%の計 5 種類，CM 化 CNF 混入モルタルは 0.6, 0.8, 1.0, 1.2%の計 4 種類とし，各 3 体ずつの作成を基本としているが，試験体によっては 6 体，9 体作製している。試験体呼称は，CNF の種類を大文字アルファベットで記した後ろに CNF の質量比を数字で記したものをシリーズとし，各々の標本数を示す。また，CNF 混入割合が増えるに従い，水溶散体の流動性が低下して施工性が悪くなり，1.0%を超えると材料の混合作業が困難となった。そこで，水を追加して施工性を向上させた TEMPO 酸化 CNF 混入モルタルを別途作製し，材料強度への影響の有無を調べる。水を追加した試験体は大文字アルファベットの後ろに小文字の w を付して区別する。各試験体の配合率を表 3-1 に示す。

表 3-1　モルタルバー試験体一覧

試験体	標本数	質量比						水セメント比 W/C
		水	CNF 水溶散体		セメント	石灰	砂	
NOM	6	1	0	-	1	1	4.5	1.000
TEM0.5	9	0.5	0.5	1.0%水溶散体を使用	1	1	4.5	0.995
TEM0.6	3	0.4	0.6		1	1	4.5	0.994
TEMw0.6	3	0.5	0.6		1	1	4.5	1.094
TEM0.7	3	0.3	0.7		1	1	4.5	0.993
TEMw0.7	3	0.5	0.7		1	1	4.5	1.193
TEM0.8	3	0.2	0.8		1	1	4.5	0.992
TEMw0.8	3	0.5	0.8		1	1	4.5	1.292
TEM0.9	3	0.1	0.9		1	1	4.5	0.991
TEMw0.9	3	0.5	0.9		1	1	4.5	1.391
TEM1.0	6	0	1		1	1	4.5	0.990
TEMw1.0	3	0.5	1		1	1	4.5	1.490
CAT0.55	6	0.5	0.5	1.1%使用	1	1	4.5	0.995
CAT0.7	3	0.36	0.64		1	1	4.5	0.993
CAT0.8	3	0.29	0.71		1	1	4.5	0.992
CAT1.0	3	0.09	0.91		1	1	4.5	0.990
CAT1.1	6	0	1		1	1	4.5	0.989
CM0.6	6	0.5	0.5	1.2%使用	1	1	4.5	0.994
CM0.8	3	0.33	0.67		1	1	4.5	0.992
CM1.0	3	0.17	0.83		1	1	4.5	0.990
CM1.2	6	0	1		1	1	4.5	0.988

3.2.3 試験結果

曲げ試験の様子を写真 3-5,圧縮試験の様子を図 3-6 に示す。加えて各々の試験結果を表 3-2~3-5 に示す。

(a) 加力前

(b) 加力後

(c) 破壊断面

写真 3-5　モルタルバー曲げ試験の様子一例

(a) 加力前

(b) 加力後

(c) 破壊された試験体

写真 3-6　モルタルバー圧縮試験の様子一例

表 3-2　NOM,TEM シリーズ実験結果

試験体		重さ	密度	b	h	曲げ荷重	曲げ引張強度	圧縮荷重A	圧縮荷重B	圧縮強度A	圧縮強度B	ヤング係数
		(g)	(kg/mm3)	(mm)	(mm)	(kN)	(N/mm2)	(kN)	(kN)	(N/mm2)	(N/mm2)	(kN/mm2)
NOM	a	485	1.931	39.55	39.7	0.266	1.280	10.586	8.889	6.616	5.556	0.420
	b	495	1.907	40	40.55	1.099	5.013	16.379	15.790	10.237	9.869	0.780
	c	494	1.908	39.9	40.55	1.232	5.633	12.351	11.984	7.719	7.490	0.261
	d	500	1.927	39.95	40.6	0.799	3.640	10.653	5.326	6.658	3.329	0.311
	e	506	1.928	41.1	39.9	0.866	3.971	5.859	9.554	3.662	5.971	0.319
	f	504	1.911	39.95	41.25	0.999	4.409	8.456	8.722	5.285	5.451	0.495
TEM0.5	a	494	1.913	39.95	40.4	1.365	6.280	14.048	13.882	8.780	8.676	0.451
	b	495	1.917	40.1	40.25	1.398	6.456	14.448	12.617	9.030	7.886	0.318
	c	498	1.931	39.95	40.35	1.332	6.144	17.111	16.712	10.694	10.445	0.529
	d	481	1.879	40	40	0.699	3.277	5.792	5.992	3.620	3.745	0.232
	e	477	1.868	39.8	40.1	0.433	2.030	6.924	5.027	4.328	3.142	0.232
	f	475	1.858	40.1	39.85	0.499	2.351	8.456	8.356	5.285	5.223	0.273
	g	459	1.724	40	41.6	0.399	1.729	2.197	2.463	1.373	1.539	0.120
	h	457	1.725	40.2	41.2	0.366	1.609	2.131	2.131	1.332	1.332	0.123
	i	460	1.728	40	41.6	0.300	1.300	2.430	2.463	1.519	1.539	0.145
TEM0.6	a	495	1.861	40.05	41.5	0.799	3.475	5.293	6.192	3.308	3.870	0.208
	b	486	1.843	40	41.2	0.666	2.943	5.559	6.924	3.474	4.328	0.213
	c	493	1.856	39.85	41.65	0.866	3.758	5.726	9.521	3.579	5.951	0.206
TEM0.7	a	479	1.862	40	40.2	0.932	4.325	9.521	8.289	5.951	5.181	0.320
	b	483	1.868	40	40.4	0.699	3.212	7.723	10.320	4.827	6.450	0.121
	c	483	1.868	40	40.4	0.799	3.672	7.890	8.622	4.931	5.389	0.186
TEM0.8	a	478	1.881	40	39.7	1.232	5.863	9.887	7.956	6.179	4.973	0.277
	b	485	1.899	40.1	39.8	0.832	3.929	10.753	10.054	6.721	6.284	0.206
	c	478	1.884	40	39.65	0.899	4.289	9.321	10.220	5.826	6.388	0.334
TEM0.9	a	484	1.895	40	39.9	0.999	4.706	10.386	10.620	6.491	6.638	0.149
	b	485	1.871	40.3	40.2	1.198	5.518	10.187	8.689	6.367	5.431	0.289
	c	485	1.876	40	40.4	1.198	5.505	6.725	10.420	4.203	6.513	0.316
TEM1.0	a	503	1.917	40.05	40.95	1.332	5.950	12.084	13.582	7.553	8.489	0.378
	b	499	1.923	39.9	40.65	1.332	6.061	14.015	13.150	8.759	8.219	0.776
	c	492	1.886	40.05	40.7	1.165	5.268	14.481	13.516	9.051	8.448	1.541
	d	489	1.898	39.85	40.4	0.965	4.451	5.726	10.853	3.579	6.783	0.528
	e	496	1.877	40	41.3	0.965	4.243	11.618	10.653	7.261	6.658	0.492
	f	487	1.849	40	41.15	1.132	5.014	8.422	9.221	5.264	5.763	0.498

表 3-3　TEMw シリーズ実験結果

試験体		重さ	密度	b	h	曲げ荷重	曲げ引張強度	圧縮荷重A	圧縮荷重B	圧縮強度A	圧縮強度B	ヤング係数
		(g)	(kg/mm3)	(mm)	(mm)	(kN)	(N/mm2)	(kN)	(kN)	(N/mm2)	(N/mm2)	(kN/mm2)
TEMw0.6	a	470	1.714	40	42.85	0.399	1.630	2.763	2.064	1.727	1.290	0.132
	b	470	1.700	40	43.2	0.333	1.338	1.898	1.964	1.186	1.228	0.117
	c	457	1.692	40	42.2	0.333	1.402	2.930	2.463	1.831	1.539	0.126
TEMw0.7	a	435	1.703	40	39.9	0.200	0.942	1.864	2.131	1.165	1.332	0.149
	b	439	1.689	40.1	40.5	0.266	1.213	2.230	2.230	1.394	1.394	0.171
	c	439	1.690	39.9	40.7	0.333	1.511	2.031	1.864	1.269	1.165	0.129
TEMw0.8	a	424	1.632	40	40.6	0.333	1.515	1.265	1.232	0.791	0.770	0.141
	b	423	1.612	40	41	0.233	1.040	1.698	1.931	1.061	1.207	0.126
	c	419	1.645	40	39.8	0.133	0.630	1.265	1.798	0.791	1.124	0.138
TEMw0.9	a	401	1.540	39.9	40.8	0.166	0.750	0.000	1.365	0.000	0.853	0.128
	b	400	1.545	40.8	39.65	0.133	0.622	1.265	1.132	0.791	0.708	0.117
	c	403	1.586	40	39.7	0.133	0.633	1.132	1.265	0.708	0.791	0.128
TEMw1.0	a	402	1.590	39.8	39.7	0.166	0.794	1.764	1.498	1.103	0.936	0.129
	b	405	1.586	39.9	40	0.200	0.940	1.698	1.764	1.061	1.103	0.065
	c	402	1.602	39.9	39.3	0.200	0.974	1.398	1.332	0.874	0.833	0.123

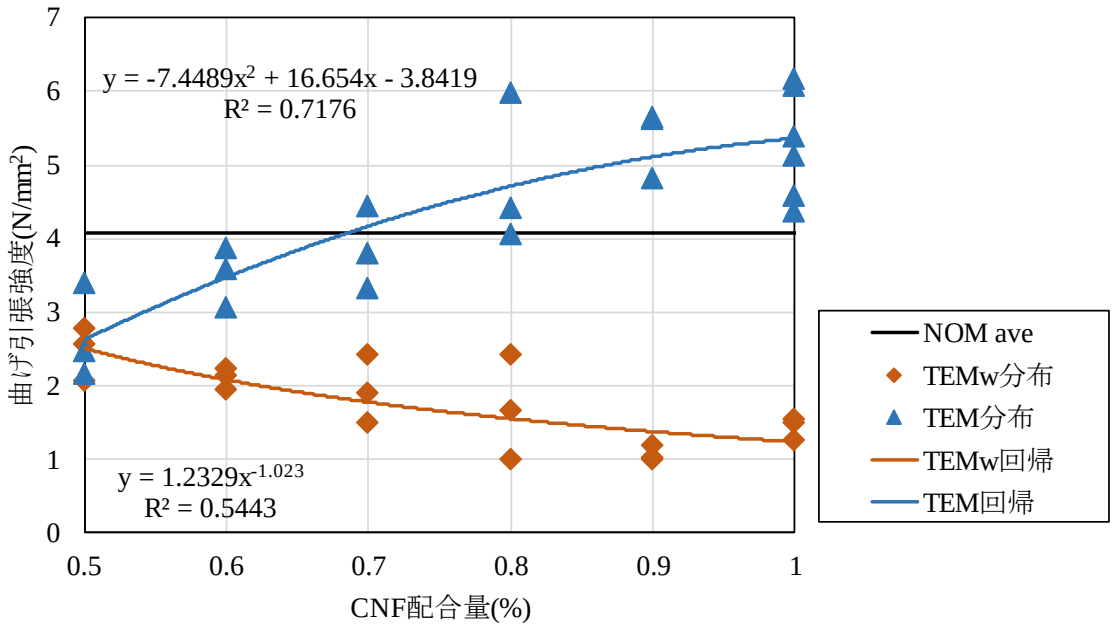
表 3-4　CAT シリーズ実験結果

試験体		重さ	密度	b	h	曲げ荷重	曲げ引張強度	圧縮荷重A	圧縮荷重B	圧縮強度A	圧縮強度B	ヤング係数
		(g)	(kg/mm3)	(mm)	(mm)	(kN)	(N/mm2)	(kN)	(kN)	(N/mm2)	(N/mm2)	(kN/mm2)
CAT0.55	a	489	1.896	39.75	40.55	1.065	4.888	9.721	9.488	6.076	5.930	0.393
	b	486	1.870	39.95	40.65	1.132	5.144	11.851	11.618	7.407	7.261	0.517
	c	491	1.894	39.85	40.65	1.198	5.458	12.550	13.249	7.844	8.281	1.555
	d	474	1.809	40	40.95	0.832	3.721	5.326	8.456	3.329	5.285	0.216
	e	471	1.804	40.05	40.75	0.666	3.004	8.389	7.956	5.243	4.973	0.439
	f	477	1.818	40	41	0.666	2.971	8.356	8.422	5.223	5.264	0.216
CAT0.7	a	475	1.839	39.95	40.4	0.799	3.676	9.221	10.786	5.763	6.741	0.226
	b	476	1.848	39.75	40.5	0.899	4.137	9.954	9.721	6.221	6.076	0.225
	c	475	1.837	40.1	40.3	0.899	4.141	10.153	8.589	6.346	5.368	0.264
CAT0.8	a	481	1.862	40.06	40.3	0.832	3.836	11.319	6.159	7.074	3.849	0.397
	b	474	1.847	39.85	40.25	0.766	3.560	11.152	10.386	6.970	6.491	0.246
	c	479	1.869	39.95	40.1	0.999	4.665	9.321	10.486	5.826	6.554	0.462
CAT1.0	a	480	1.852	39.95	40.55	1.032	4.713	12.417	8.589	7.761	5.368	0.521
	b	481	1.835	40.25	40.7	0.866	3.897	11.285	10.287	7.053	6.429	0.511
	c	482	1.839	40	40.95	1.065	4.763	10.320	10.886	6.450	6.804	0.337
CAT1.1	a	499	1.928	39.9	40.55	1.232	5.633	14.947	14.847	9.342	9.279	0.313
	b	501	1.933	39.75	40.75	1.465	6.658	17.244	15.080	10.778	9.425	0.619
	c	496	1.918	39.9	40.5	1.265	5.799	12.251	11.919	7.657	7.449	0.392
	d	470	1.807	39.85	40.8	0.200	0.904	8.689	9.987	5.431	6.242	0.000
	e	475	1.839	39.9	40.45	1.099	5.050	9.954	8.789	6.221	5.493	0.225
	f	478	1.828	40	40.85	0.999	4.490	8.655	9.388	5.409	5.868	0.191

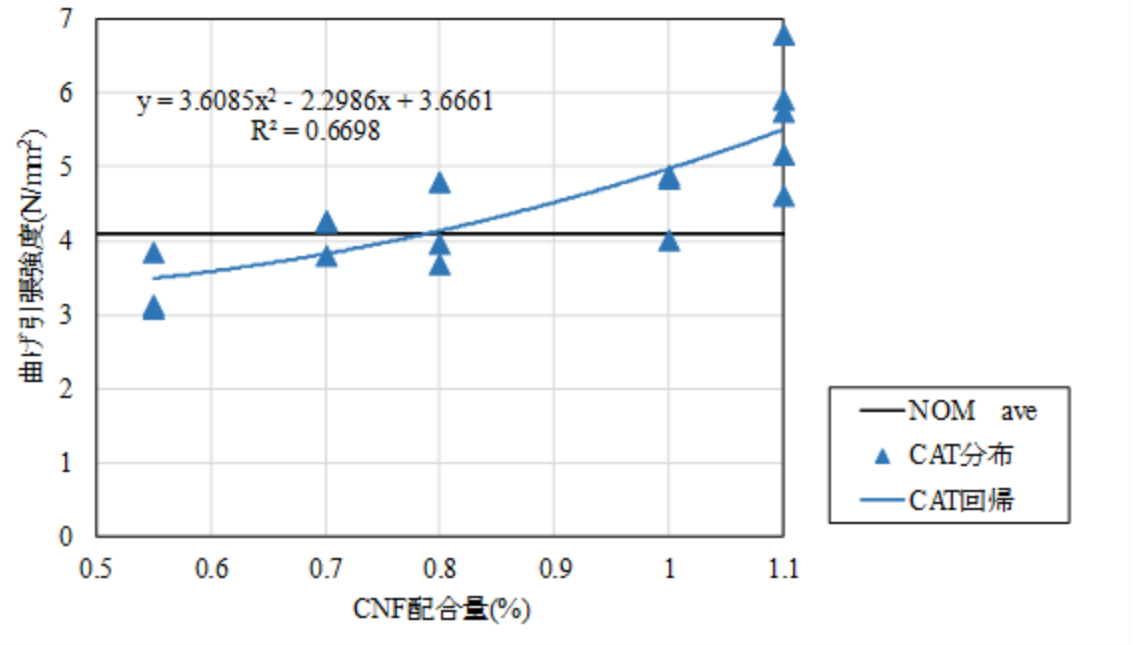
表 3-5　CM シリーズ実験結果

試験体		重さ	密度	b	h	曲げ荷重	曲げ引張強度	圧縮荷重A	圧縮荷重B	圧縮強度A	圧縮強度B	ヤング係数
		(g)	(kg/mm3)	(mm)	(mm)	(kN)	(N/mm2)	(kN)	(kN)	(N/mm2)	(N/mm2)	(kN/mm2)
CM0.6	a	483	1.899	39.8	39.95	1.065	5.030	13.682	14.714	8.551	9.196	1.640
	b	483	1.868	39.9	40.5	1.099	5.038	13.582	14.648	8.489	9.155	0.628
	c	483	1.911	39.65	39.85	1.065	5.074	14.814	15.480	9.259	9.675	0.415
	d	473	1.827	40.05	40.4	0.699	3.208	9.255	6.192	5.784	3.870	0.143
	e	471	1.840	40	40	0.666	3.122	7.191	5.460	4.494	3.413	0.271
	f	470	1.825	40	40.25	0.699	3.236	8.789	9.421	5.493	5.888	0.319
CM0.8	a	491	1.860	40	41.25	0.766	3.376	9.887	7.657	6.179	4.786	0.212
	b	499	1.879	40.1	41.4	0.799	3.488	9.388	9.821	5.868	6.138	0.209
	c	492	1.887	40	40.75	0.732	3.306	9.887	7.324	6.179	4.578	0.118
CM1.0	a	482	1.871	40	40.25	1.099	5.088	10.320	7.244	6.450	4.528	0.199
	b	482	1.871	40	40.25	1.132	5.241	10.187	10.120	6.367	6.325	0.798
	c	482	1.883	40	40	0.999	4.683	10.320	9.359	6.450	5.849	0.325
CM1.2	a	484	1.863	39.85	40.75	0.333	1.510	11.119	10.453	6.949	6.533	2.818
	b	482	1.821	40	41.35	0.999	4.382	6.558	10.120	4.099	6.325	0.245
	c	489	1.864	40.05	40.95	1.065	4.757	11.385	11.052	7.116	6.908	0.504
	d	480	1.856	40	40.4	0.832	3.823	8.888	9.787	5.555	6.117	0.225
	e	489	1.832	40.05	41.65	0.699	3.018	6.924	6.558	4.328	4.099	0.240
	f	477	1.824	40.05	40.8	0.666	2.997	8.456	5.626	5.285	3.516	0.437

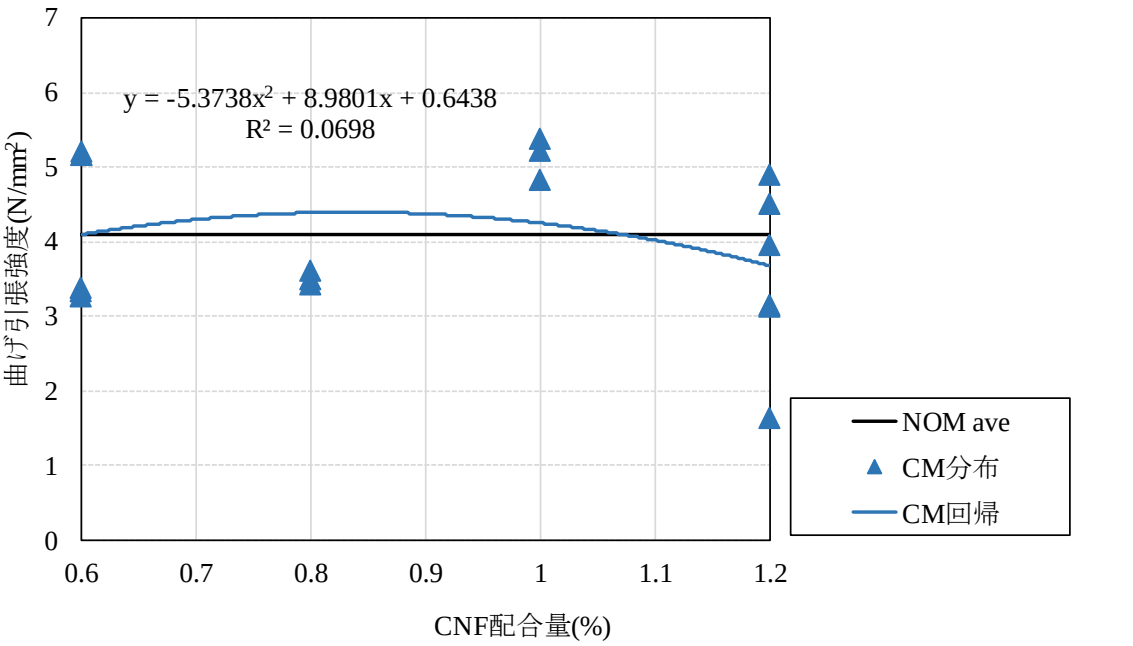
CNF 混入割合に対する曲げ引張強度の関係をシリーズごとに図 3-2 に示す。水を追加しない場合の回帰曲線を見ると，混入割合が約 0.8～1.0%の範囲内であれば，曲げ引張強度はどのシリーズも NOM シリーズ（非混入）の平均値を上回り，効率的に強度が発現されることが確認できた。また，表 3-2~3-5 より圧縮強度に関しても，混入割合約 0.8～1.0%の範囲内で，NOM シリーズの数値を上回り，効率的に強度が発現される傾向が見て取れる。



(a)　TEM,TEMw シリーズ



(b) CAT シリーズ



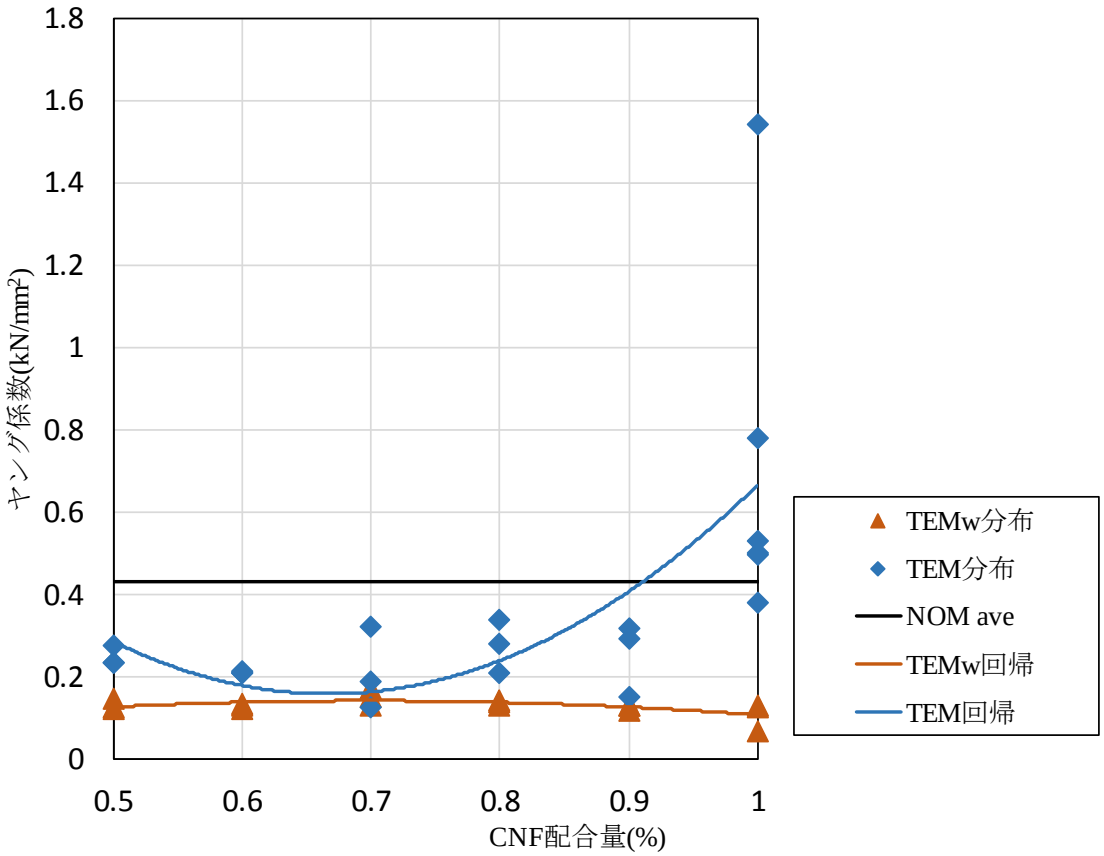
(c) CM シリーズ

図 3-2　CNF 混入割合に対する曲げ引張強度の分布

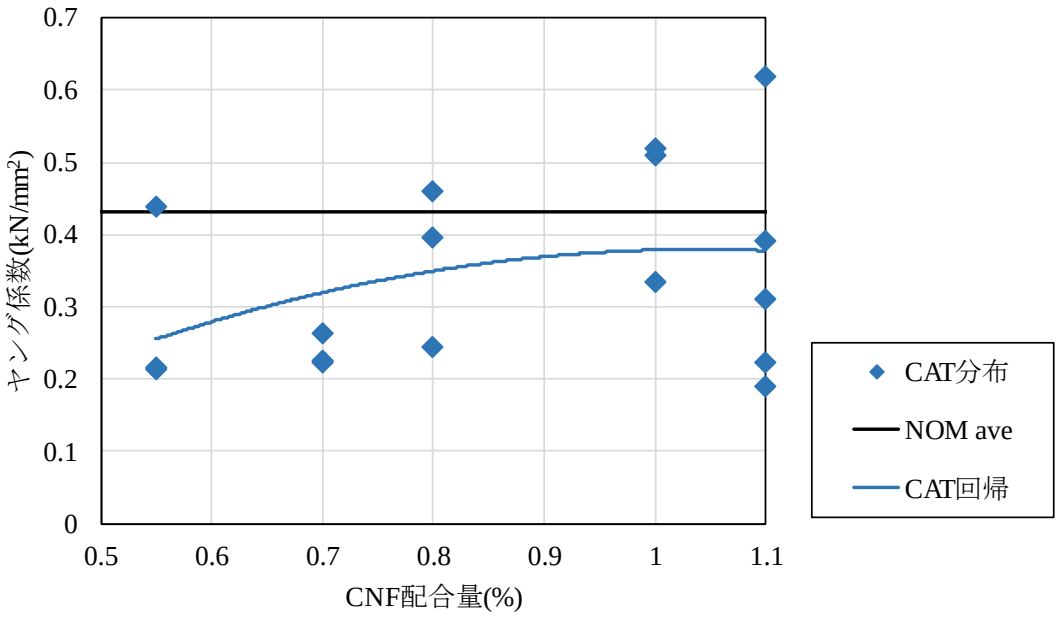
次に推定されたヤング係数を表 3-2~3-5 にまとめ，回帰曲線とともに描いたものを図 3-3 に示す。

TEM シリーズでは，混入割合が約 1.0%前後でヤング係数が高くなったものの，他シリーズでは大きな差異は見られなかった。

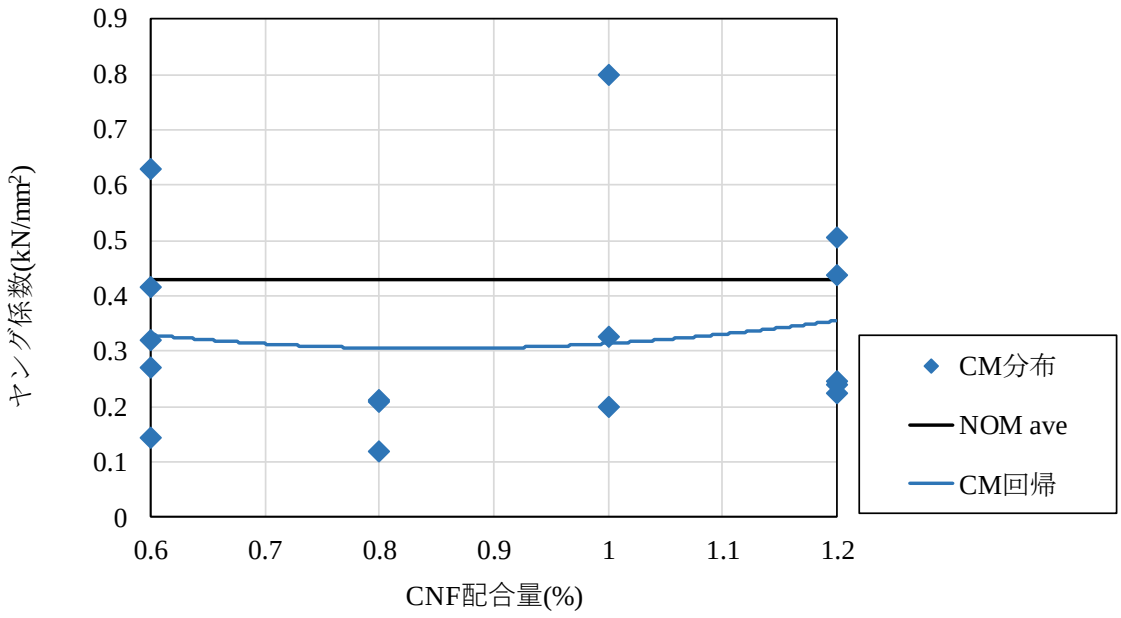
以上の結果より，CNF の混入割合は 1%程度が適していると推察できる。一方，水を追加した TEMw シリーズでは水を加えるほど曲げ引張強度及びヤング係数の値が低下した。



(a)　TEM,TEMw シリーズ



(b) CAT シリーズ



(c) CM シリーズ

図 3-3　CNF 混入割合に対するヤング係数の分布

3.3 煉瓦ユニット試験

次節以降で使用する煉瓦ユニットの材料特性を把握するため，JIS R 1250 に基づき，煉瓦単体の圧縮試験を実施した。ここでは，普通煉瓦 4 種を用い，3 体試験結果の平均値を求めた。密度は 194×10-5(N/mm^3)，圧縮強度は 37.2033(N/mm^2)，ヤング係数は 26917(N/mm^2)であった。

3.4 組積プリズム試験

3.4.1 試験概要

組積プリズム試験では曲げ試験とせん断試験を実施する。目地モルタルには CNF 非混入モルタルと TEMPO 酸化 CNF 混入モルタル，水を追加した TEMPO 酸化 CNF 混入モルタルを採用した。なお，TEMPO 酸化 CNF の混入割合は，前節のモルタルバー強度試験結果及び施工性を考慮して 1.0%とする。組積プリズム試験は煉瓦とモルタルの付着性状等の材料特性値を把握することを目的として行う。また、本研究は目地置換工法に CNF 混入モルタルを活用することを検討しているが、今回の材料試験では CNF 混入モルタルの特性を把握することを第一目的としているので、目地部のモルタルには全て CNF 混入モルタルを用いた試験体を作成する。

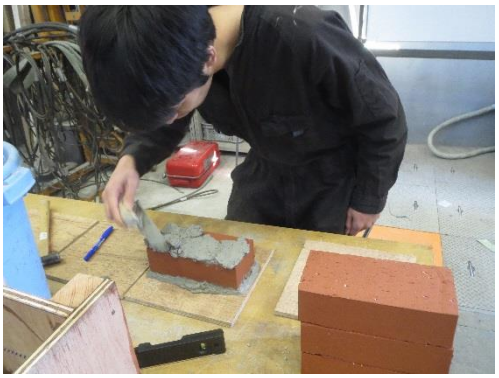
3.4.2 試験体作製

プリズム試験体はモルタルバー同様養生期間を 4 週間として作製した。作製日は APPENDIX に示す。プリズム試験体を作製する際の目地モルタルはモルタルバーと同様に作製する。煉瓦は事前に水につけておき十分水を含んだ状態にしておく。木板に土台となるモルタルを積み，その上に煉瓦を積む。プリズム試験体を積み上げる際、ガイドを作製し、平行に積むことを試みたがモルタル層を成らす際に出る余分なモルタルでガイドが押されてしまい、上手くいかなかったため、煉瓦を積んだ上に水準器を置き，平行に積み上げられるように注意しながらそれぞれ 3 段，4 段を積み上げる方式を用いた。

(a) 作製ガイド　　(b) 煉瓦を水につける

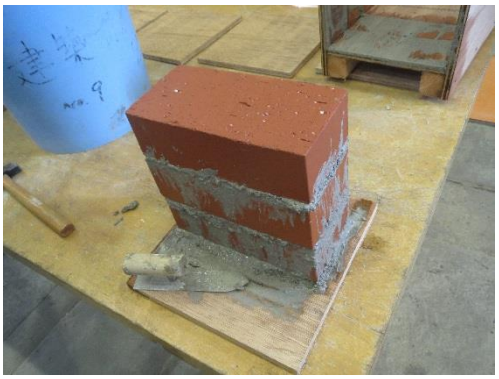
写真 3-7　試験体作製手順 1

(a)煉瓦を積む毎に水平を確認する



(b) 2 層目のモルタル

(c)完成後にも水平を確認する



(d)モルタルの水分量が多い試験体

写真 3-8　試験体作製手順 2

3.4.3 曲げ試験

煉瓦 4 段積のプリズム試験体を作成し，図 3-4 のように曲げ試験を行う。CNF 非混入モルタルの試験体を B0-a～B0-f と呼び，TEMPO 酸化 CNF 混入モルタルの試験体を BT-a～BT-f，水を追加した TEMPO 酸化 CNF 混入モルタルの試験体を BTw-a～BTw-c とする。加力部には鋼棒を用い、中心目地部だけに加力を行うようにする。鋼棒が滑らないよう、ゴム板を挟む。支点部は円柱状の鋼材でピン接合を模擬し、支点部も滑らないように鉄板を挟むものとする。

.

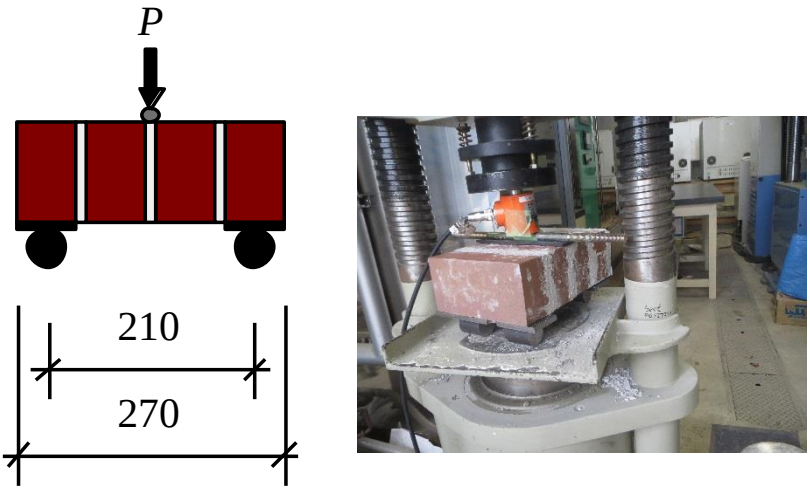
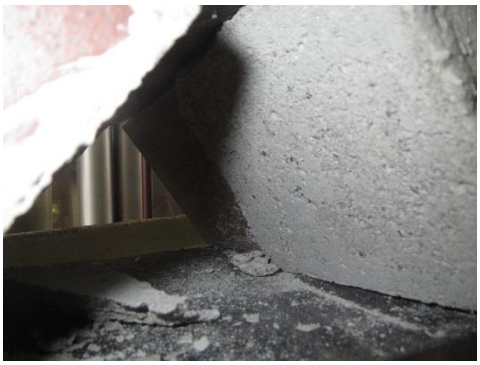


図 3-4　プリズム曲げ試験概要，様子

曲げ試験での破壊性状を写真 3-9 で示し、得られたデータを表 3-6 に示す。なお，試験体 BT-c は計測を失敗したため除いている。他の試験体では表 3-6 のように目地モルタルと煉瓦ユニットの界面で剥離して破壊した。目地破壊箇所を表 3-6 に示す。シリーズごとの曲げ引張強度の平均値を比較すると，BTw シリーズが最も高く，BT シリーズが最も低かった。BT シリーズの曲げ引張強度が B0 シリーズより低いのは，バラツキが大きく，極端に強度の低い試験体があったことに起因する。CNF 水溶散体は流動性に乏しいため，材料混合時にムラが生じた可能性や，試験体製作時に煉瓦とモルタルの付着性が低下した可能性が考えられる。なお，極端に低い値を除けば，B0 シリーズと大きな違いはみられない。B0 シリーズより BTw シリーズの値が高いのは，モルタルの流動性を上げたことで煉瓦とモルタル界面の接着度が上がったこと，著しく低い数値を示す試験体がなかったことが要因として考えられる。

(a)　加力前

(b)　破壊後

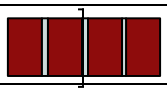
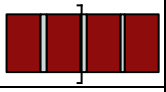
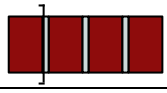
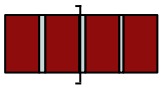
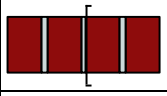
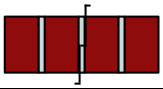
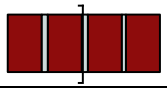
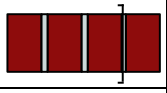
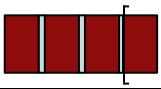
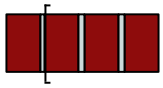
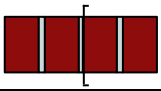
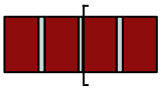
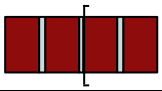
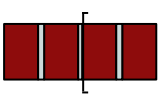


(c)　破壊断面 1

(d)　破壊断面 2

写真 3-9　プリズム曲げ試験での破壊性状

表 3-6　プリズム曲げ試験結果

試験体名		破壊目地	曲げ引張強度 (N/mm^2)	
CNF 非混入モルタル	B0-a		0.3235	平均 0.2777
	B0-b		0.3007	
	B0-c		0.1147	
	B0-d		0.3881	
	B0-e		0.2221	
	B0-f		0.3170	
TEMPO 酸化 CNF 混入モルタル (1.0%)	BT-a		0.3274	平均 0.1711
	BT-b		0.2103	
	BT-d		0.0480	
	BT-e		0.0433	
	BT-f		0.2265	
TEMPO 酸化 CNF 混入モルタル (1.0%)＋水	BTw-a		0.4296	平均 0.3570
	BTw-b		0.2036	
	BTw-c		0.4379	

3.4.4 せん断試験

煉瓦 3 段積のプリズム試験体を作成し，図 3-5 のように 2 面せん断試験を行う。横臥させた試験体の軸方向に圧縮力を与え，両側の煉瓦ユニットを固定したまま，中央の煉瓦ユニットを上から押し抜く。加力部は目地部の歪みや凹凸に対応するため、鉄板の下にゴム板を挟んでいる。支点部は曲げ試験で用いた円柱を立てて用い、曲げ試験とは違う支点条件で実験を実施するものとする。なお，圧縮力は約 5kN~20kN の範囲で試験体ごとに変化させて実施する。CNF 非混入モルタルの試験体を S0-a～S0-f と呼び，TEMPO 酸化 CNF 混入モルタルの試験体を ST-a～ST-f，水を加えた TEMPO 酸化 CNF 混入モルタルの試験体は STw-a～STw-c と呼ぶ。

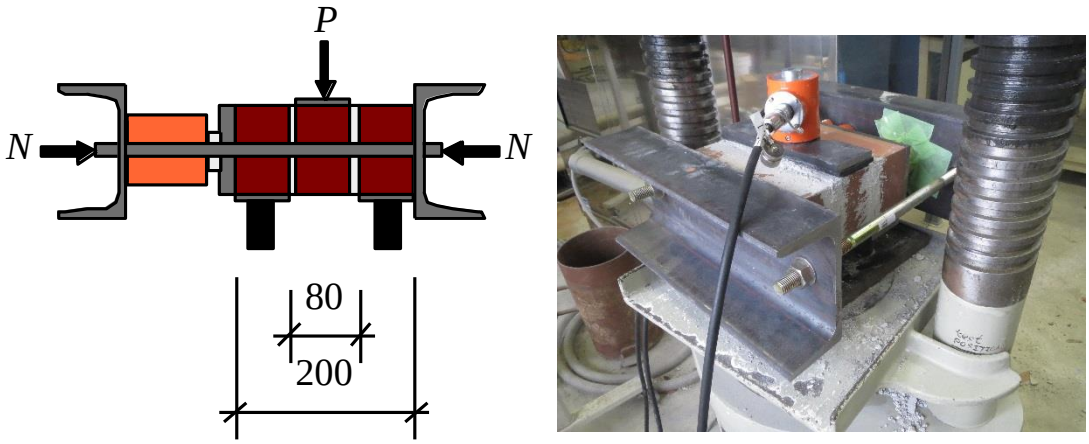
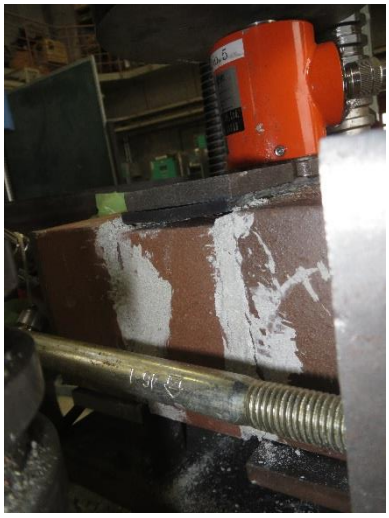


図 3-5　プリズムせん断試験概要，様子

破壊性状を写真 3-10、得られたデータを表 3-7 に示す。また，せん断面にかかる圧縮強度とせん断強度の関係を回帰曲線と共に図 3-6 に示す。全てのモルタルにおいて圧縮強度とせん断強度の相関が良く表れており，CNF を混入すると若干せん断強度が低下することがわかる。これは曲げ試験と同様に CNF 混入モルタルの流動性の低さに起因する材料混合時のムラや，試験体作成時の付着性能の低下が原因と考えられる。また，静止摩擦係数は S0 シリーズでは平均 1.2558 であったが, ST シリーズでは平均 0.9567, STw シリーズは平均 0.8962 となり，ST, STw シリーズはいずれも S0 シリーズよりも低かった。

(a) 中段煉瓦の圧壊



(b) 加力によるズレ

(c) 加力後試験体

(d) 大きな破壊をした試験体

写真 3-10　プリズムせん断試験での破壊性状

表 3-7　組積プリズム試験(2 面せん断)結果

試験体名		最大押抜力 (kN)	せん断強度 (N/mm^2)	最大軸力 (kN)	圧縮強度 (N/mm^2)	静止摩擦係数
CNF 非混入モルタル	S0-a	37.3405	0.8891	20.1193	0.9581	0.9280
	S0-b	29.8125	0.7098	15.1227	0.7201	0.9857
	S0-c	12.0582	0.2871	5.5961	0.2665	1.0774
	S0-d	65.5813	1.5615	23.1366	1.1017	1.4173
	S0-e	27.1979	0.6476	7.1906	0.3424	1.8912
	S0-f	25.1612	0.5991	10.1867	0.4851	1.2350
TEMPO 酸化 CNF 混入モルタル(1.0%)	ST-a	26.1659	0.6230	14.6809	0.6991	0.8912
	ST-b	16.3121	0.3884	10.4198	0.4962	0.7827
	ST-c	25.5334	0.6079	12.3839	0.5897	1.0309
	ST-d	23.9499	0.5702	14.5232	0.6916	0.8245
	ST-e	19.8861	0.4735	7.9944	0.3807	1.2438
	ST-f	10.8258	0.2578	5.5961	0.2665	0.9673
TEMPO 酸化 CNF 混入モルタル (1.0%)＋水	STw-a	22.0845	0.5258	12.4579	0.5932	0.8864
	STw-b	28.2469	0.6725	15.1227	0.7201	0.9339
	STw-c	15.3892	0.3664	8.8605	0.4219	0.8684

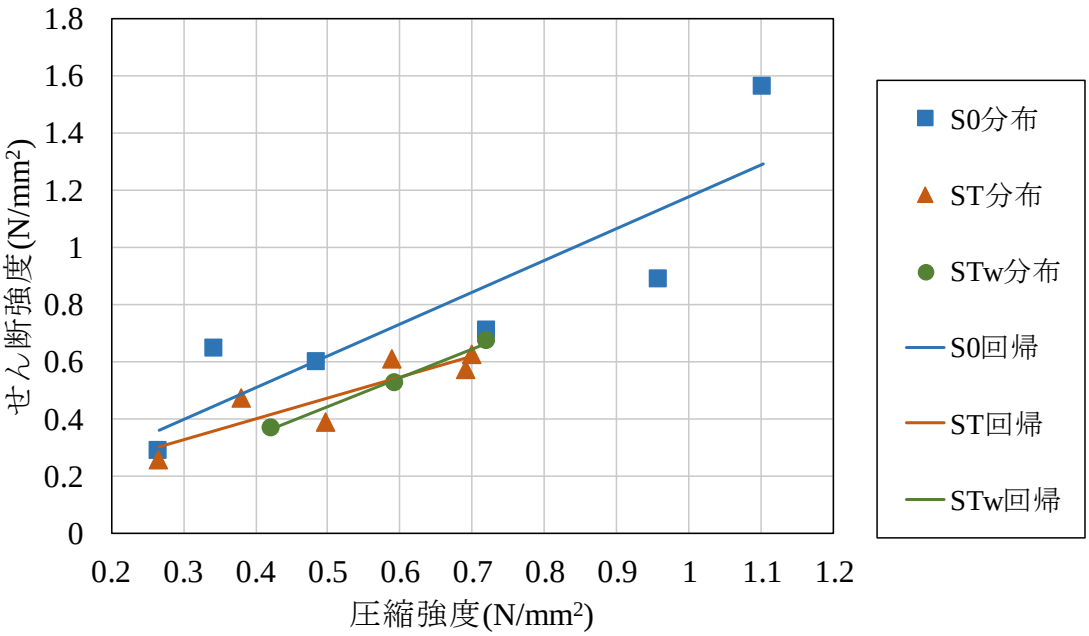


図 3-6　プリズム試験 圧縮強度-せん断強度関係

3.5 まとめ

本章では，CNF 混入モルタルの材料強度試験及び，煉瓦プリズムを用いた強度試験を実施し，材料特性値を把握した。

・3 種類の CNF を対象として混入割合を変化させたモルタルバーによる材料強度試験を実施した。どの CNF を混入した場合も混入割合が約 0.8～1.0%の範囲内であれば，曲げ引張強度や圧縮強度を効率的に発現できることが確認できた。また，ヤング係数については TEMPO 酸化 CNF の混入割合が約 1.0%で高くなるが, その他は非混入モルタルを下回った。

・煉瓦とモルタルの付着性状を把握するため，混入割合が約 1.0%の TEMPO 酸化 CNF を用いた組積プリズム試験を実施し，非混入モルタルよりも曲げ引張強度が低いことがわかった。CNF 水溶散体は流動性に乏しく施工性が低いため，水を追加すると曲げ引張強度が向上した。

以上の 2 点の結果より，本研究で用いた CNF 水溶散体は流動性が低いため，モルタルに混入した場合は材料特性に大きなバラつきが生じるが，モルタルの材料強度を向上させる可能性を示せたといえる。

4 章　固有値解析

4.1 はじめに

4.2 煉瓦壁のヤング係数算出

4.3 ロの字型モデルの構築

4.4 壁のヤング係数と 1 次固有振動数の関係

4.5 まとめ

4.1 はじめに

本章では，既往の研究[6)]で行われた実在煉瓦造建築物のモデル化を参考に解析モデルを作成し，目地置換に用いる材料特性値の変化が建物全体の振動特性にどのような影響を与えるかを確認するため，固有値解析を実施する。また，固有値解析に先立ち，3 章で述べたモルタルの材料特性値を用い際の煉瓦壁のヤング係数を推定する。なお，本研究の解析には 3 次元構造解析ツール SAP-4ver.8.0 を用いる。

4.2 煉瓦壁のヤング係数算出

3 章で行った材料試験結果に基づき，目地モルタルを置換した際の壁のヤング係数を算出する。図 4-1 のように煉瓦とモルタルを交互に積み上げた単純縦積みモデルを考える。各々を直列ばねに置換し，式(1)に示すフックの法則により求められる。得られた値を表 4-1 に示す。

$$E_a = T_a / \left(\frac{T_b}{E_b} + \frac{T_m}{E_m} \right) \qquad \cdots\cdots (1)$$

ここで各文字は以下のものを示すとする。

E_a：全体のヤング係数

T_a：全体の厚み

E_b：煉瓦ユニットのヤング係数

T_b：煉瓦ユニット部の厚み

E_m：モルタルのヤング係数

T_m：モルタル部の厚み

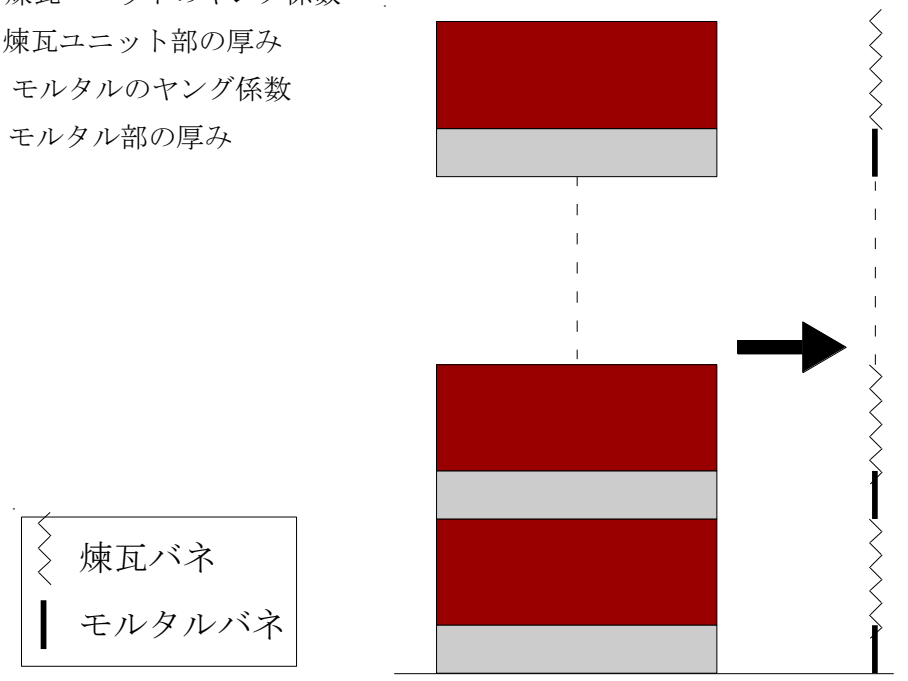


図 4-1　縦積みモデル

表 4-1　モルタル及び煉瓦壁のヤング係数

試験体名	ヤング係数 (N/mm^2)			密度 ρ
	煉瓦	モルタル	壁	(kg/m^3)
NOM	26917	431.0	2752.6	2014.3
TEM0.5		216.6	1446.4	1996.9
TEM0.6		208.9	1397.2	2005.1
TEM0.7		209.1	1398.5	2007.1
TEM0.8		272.2	1796.4	2010.2
TEM0.9		251.1	1664.5	2013.3
TEM1.0		702.3	4250.7	2011.2
TEMw0.6		125.1	851.9	1983.7
TEMw0.7		149.6	1013.4	1982.7
TEMw0.8		134.9	916.7	1972.4
TEMw0.9		124.2	846.0	1962.2
TEMw1.0		105.5	721.5	1967.3
CAT0.55		290.2	1908.0	2005.1
CAT0.7		238.3	1584.0	2004.1
CAT0.8		368.4	2383.1	2006.1
CAT1.0		456.2	2898.6	2004.1
CAT1.1		348.0	2260.6	2009.2
CM0.6		355.2	2304.0	2006.1
CM0.8		179.6	1208.8	2008.2
CM1.0		440.7	2809.0	2008.2
CM1.2		330.3	2153.5	2003.1

4.3 ロの字型モデルの構築

既往の研究[6]を参考に，図 4-2 に示す解析モデルを作成する。なお，本解析に先立ち，予備解析を実施しており，その結果は APPENDIX に示す。煉瓦壁は板要素としてモデル化し，メッシュ分割サイズは 0.5m とした。既往の研究では，開口率 16%を反映した煉瓦壁モデルで固有値解析を行った場合は固有振動数の低下率は 5%程度であったと記述している。これに基づき本論でも開口は無視できるものとした。壁厚は 1F で 0.57m，2F で 0.47m とし，屋根重量は考慮しない。壁は等方性材料とし，煉瓦壁のヤング係数は表 4-1 の値を用いた。密度 ρ は，表 4-1 の値と煉瓦ユニットの値を用いて算出している。ポアソン比 ν はコンクリートの基準値[10]を参考に 0.17 とする。

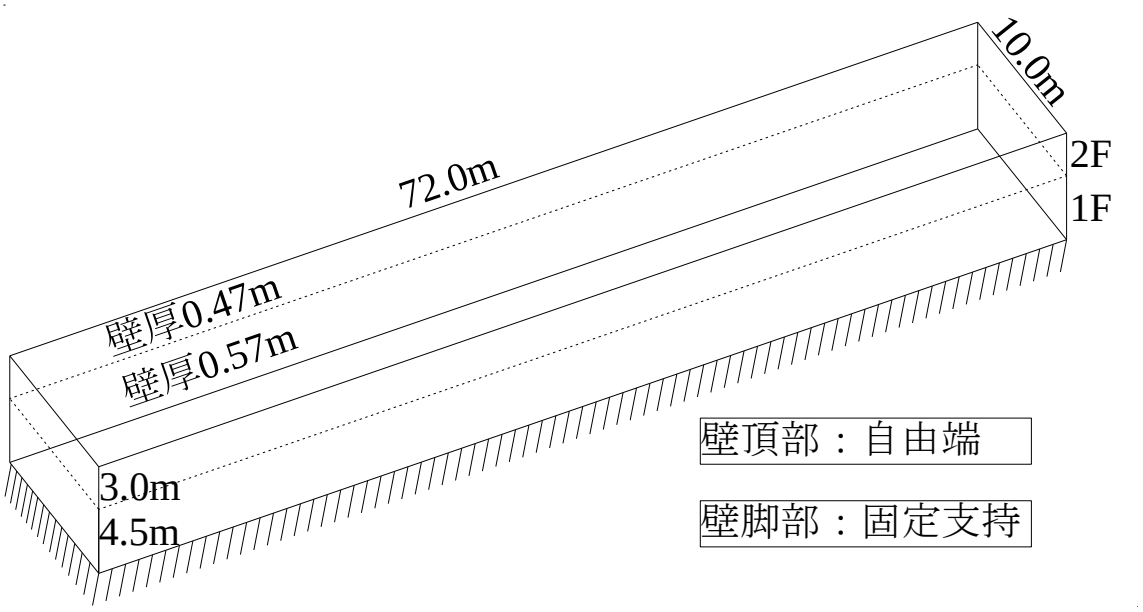
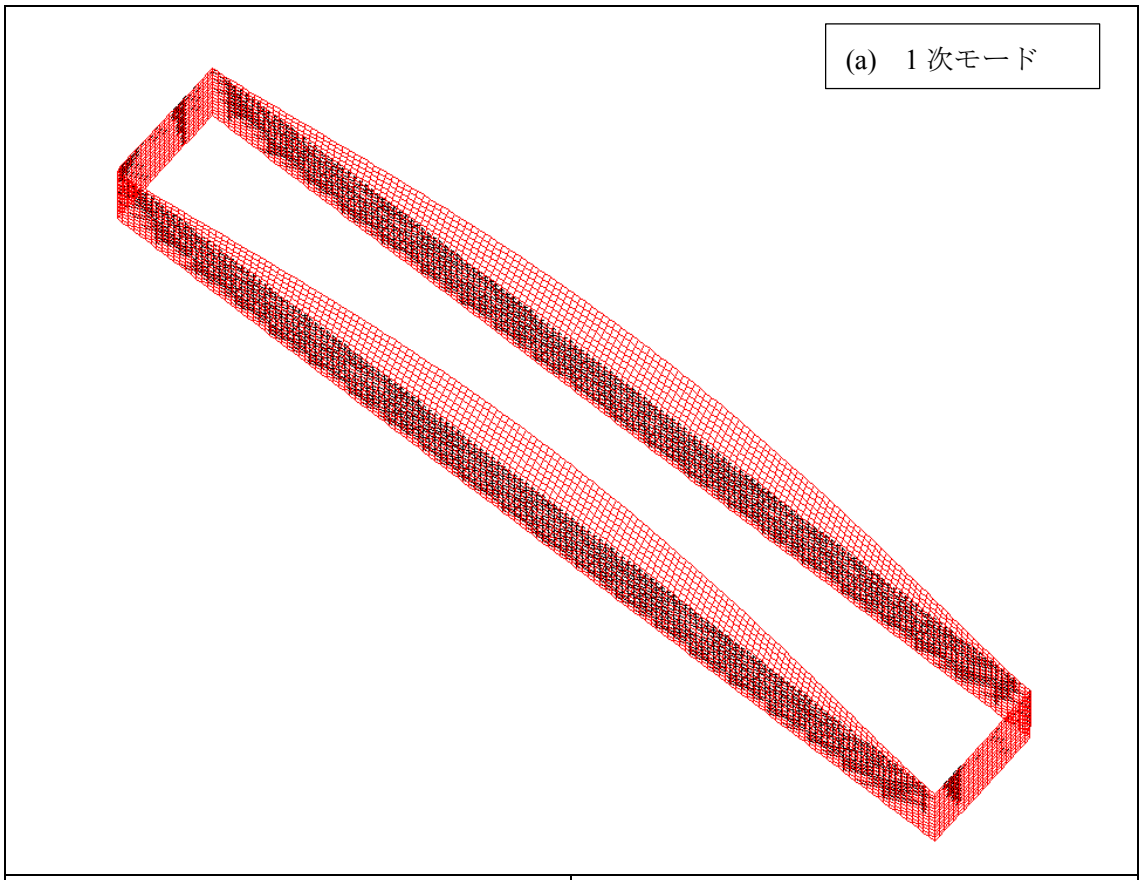


図 4-2　ロの字型基本モデル

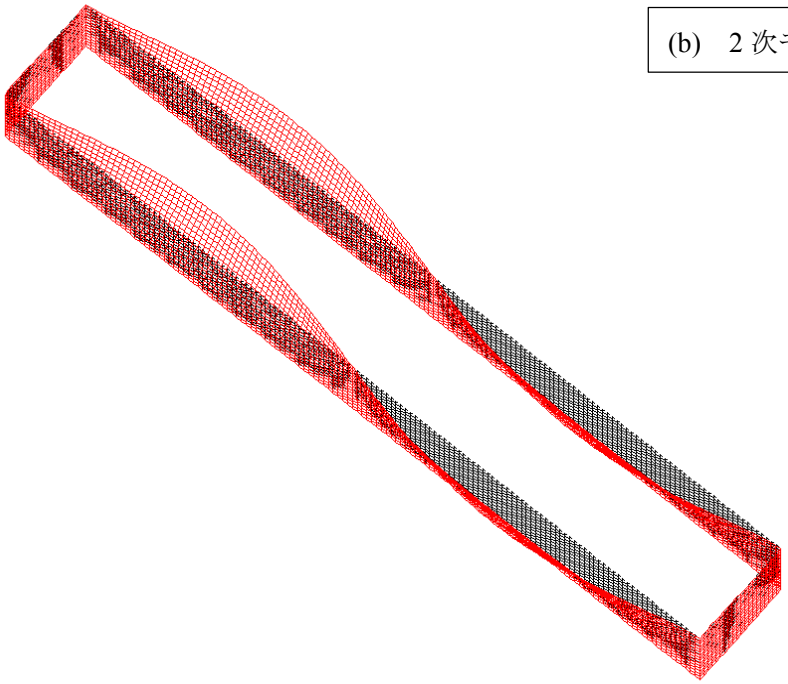
4.4 壁のヤング係数と 1 次固有振動数の関係

煉瓦壁のヤング係数の変化が固有振動数に与える影響を確認する。目地モルタルとして TEM1.0 を用いた場合の 1 次～3 次の振動モード形状をそれぞれ図 4-3 に示す。

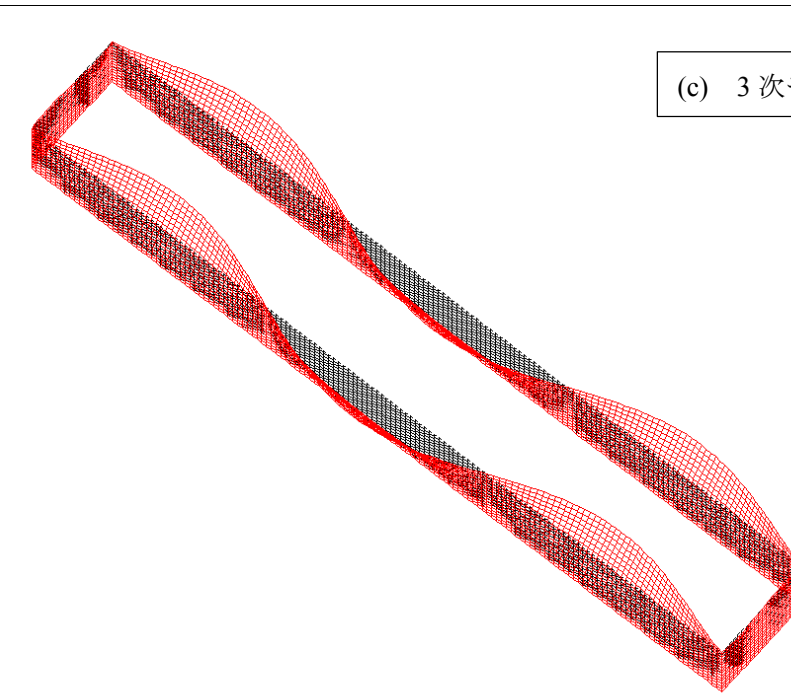
また, 壁頂部平面と長辺中央高さ方向の振動モード形状を, 1 次～3 次まで図 4-4 に示す。いずれも振動モード形状は次数を表現できており, 最大振幅は概ね等しい値を示した。他の場合の固有値解析も行い, 固有振動数を表 4-2 一覧にして示す。



固有振動数(Hz)	固有周期(sec)
2.699	0.3705

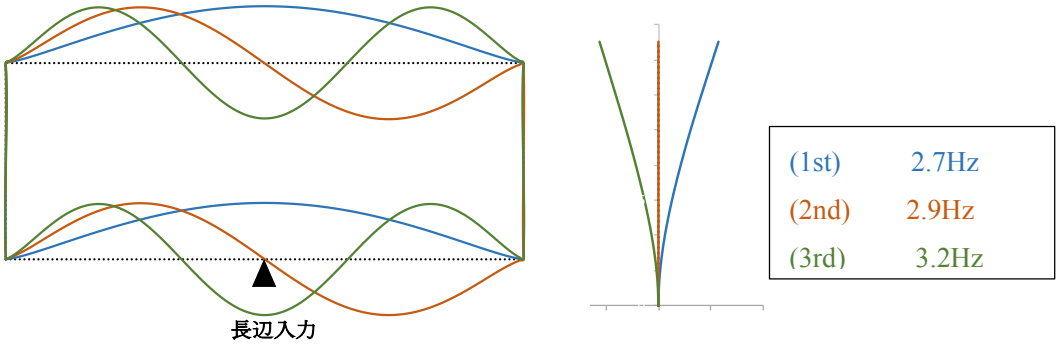


固有振動数(Hz)	固有周期(sec)
2.902	0.3446



固有振動数(Hz)	固有周期(sec)
3.235	0.3091

図 4-3　TEM1.0 の各振動モード



(a) 壁 頂　　(b) 長辺中央高さ　　(c)固有振動数

図 4-4　長辺面外入力に対する振動モード(TEM1.0)

表 4-2　各試験体における固有振動数

試験体名	固有振動数　(Hz)		
	1 次	2 次	3 次
NOM	2.2	2.3	2.6
TEM0.5	1.6	1.7	1.9
TEM0.6	1.6	1.7	1.9
TEM0.7	1.6	1.7	1.9
TEM0.8	1.8	1.9	2.1
TEM0.9	1.7	1.8	2.0
TEM1.0	2.7	2.9	3.2
TEMw0.6	1.2	1.3	1.5
TEMw0.7	1.3	1.4	1.6
TEMw0.8	1.3	1.4	1.5
TEMw0.9	1.2	1.3	1.5
TEMw1.0	1.1	1.2	1.3
CAT0.55	1.8	1.9	2.2
CAT0.7	1.6	1.8	2.0
CAT0.8	2.0	2.2	2.4
CAT1.0	2.2	2.4	2.7
CAT1.1	2.0	2.1	2.4
CM0.6	2.0	2.1	2.4
CM0.8	1.4	1.5	1.7
CM1.0	2.2	2.4	2.6
CM1.2	1.9	2.1	2.3

ヤング係数 E (N/m2)と密度 ρ (kg/m3)の比と長辺の固有振動数の関係を図 4-5 に示す。ヤング係数の上昇に伴い，固有振動数は 1～3 次全てで上昇する傾向が表せているが，上昇率は徐々に低下しているのが確認出来る。

既往の研究において，煉瓦壁を平面板と仮定した場合，1 次固有振動数 f (Hz)は式(2)のように表せることが示されている。

$$f = \frac{\sqrt{0.127\pi}}{4\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{T}{H^2}\left(1+\alpha\left(\frac{H}{L}\right)^2\right)\sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad \cdots\cdots(2)$$

ここで，壁長さを L (m)，壁厚を T (m)，壁高さを H (m)，ポアソン比を ρ としている。また，平面板の壁脚は固定支持で壁両端は単純支持とする境界条件であると考え，α=2.8 とする。以上を用いて，図 4-5 に既往の推定式(2)も併せて示す。固有値解析の結果と推定式が精度良く対応していることが確認できる。

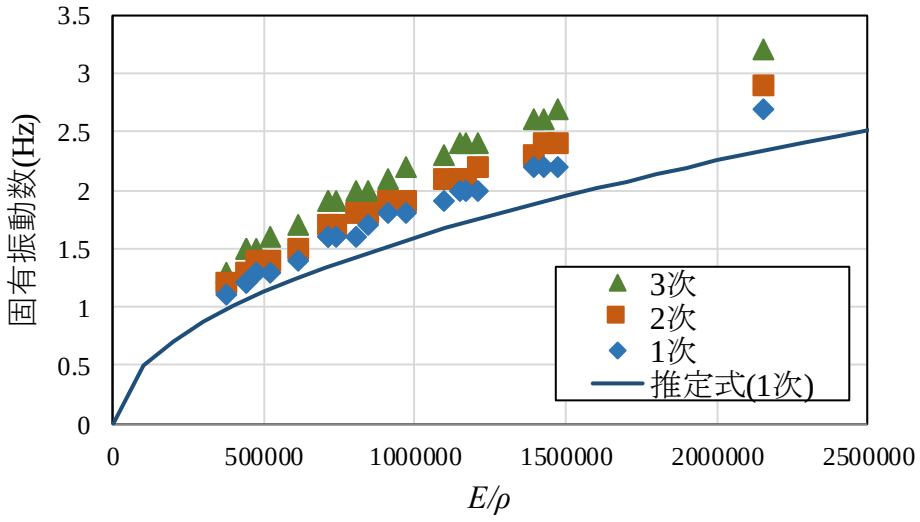


図 4-5　ヤング係数と密度の比−固有振動数関係

4.5 まとめ

本章では，既往の研究を参考に煉瓦壁の解析モデルを作成し，目地置換に用いる材料特性値の変化が建物全体の振動特性にどのような影響を与えるかを確認するため固有値解析を実施した。成果を以下に示す。

・固有値解析に先立ち煉瓦壁のヤング係数を推定した。

・煉瓦壁は板要素としてモデル化し，メッシュ分割サイズは 0.5m，壁厚は 1F で 0.57m，2F で 0.47m とし，屋根重量や開口は考慮していない。壁は等方性材料とし，ポアソン比はコンクリートの基準値を参考に 0.17 とした。この数値を基本とし，算出したヤング係数及び密度を変化させた際の固有振動数の変化を確認した。

・固有振動数はヤング係数の上昇に伴い，1～3 次全てで上昇することが確認できたが，上昇率は徐々に低下することが確認できた。また，既往の研究の推定式と比較しても今回の解析結果は精度よく対応していることが確認できた。

5 章　結論

5.1 本研究の結論

5.2 今後の課題

5.1 本研究の結論

本研究は，外観変更の少ない煉瓦壁の耐震補強法として目地置換工法に着目したものであり，目地置換工法に用いる材料として新素材である CNF をモルタルに混入することを検討した。CNF 混入モルタルの材料強度試験を行い，その材料特性を反映させた目地の強度変化が煉瓦壁の振動特性に与える影響を把握するため，既存のモデルを参考に固有値解析を実施したものである。

本研究の成果を以下に示す。

a) 3 種類の CNF を対象として混入割合を変化させたモルタルバーによる材料強度試験を実施した。どの CNF を混入した場合も混入割合が約 0.8～1.0%の範囲内であれば，曲げ引張強度や圧縮強度を効率的に発現できることが確認できた。また，ヤング係数については TEMPO 酸化 CNF の混入割合が約 1.0%で高くなるが，その他は非混入モルタルを下回った。

b) 煉瓦とモルタルの付着性状を把握するため，混入割合が約 1.0%の TEMPO 酸化 CNF を用いた組積プリズム試験を実施し，非混入モルタルよりも曲げ引張強度が低いことがわかった。CNF 水溶散体は流動性に乏しく施工性が低いため，水を追加すると曲げ引張強度が向上した。

c) 板要素を用いて既存の煉瓦造建築物をモデル化し，固有値解析を行った。モルタルのヤング係数の増減により，煉瓦壁の固有振動数も変化することを示した。また，既往の 1 次固有振動数推定式との対応も確認した。

5.2 今後の課題

本研究で用いた CNF 水溶散体は流動性が低いため，モルタルに混入した場合は材料特性に大きなバラつきが生じるが，モルタルの材料強度を向上させる可能性を示せた。今後は，再現性及び流動性の改善や他の材料との付着性等を解消することが課題である。

モルタルの流動性を向上させる手法として，混和剤を混入する方法がある。AE 減水剤などの混和剤を混入することで，モルタルの水セメント比を上昇させること無くモルタルの流動性を向上させることが出来るので，混和剤の活用も考慮したモルタルの調合を検証することが CNF 混入モルタルの再現性及び流動性の改善に繋がると考えられる。

なお，本研究の一部は，文献 11）～15）として公表済である。

APPENDIX

1.材料試験工程表

2.固有値解析の予備解析

1.材料試験工程表

本研究で実施した材料試験の工程表を示す。
モルタルバー作業工程表においては以下のような割り振りで実施している。()内は試験体数を示している。
第 1 回：NOM(3),TEM0.5(3),TEM1.0(3),CAT0.55(3),CAT1.0(3),CM0.6(3),CM1.2(3)
第 2 回:NOM(3),TEM0.5(3),TEM0.6(3),TEM0.7(3),TEM1.0(3),CAT0.55(3),CAT0.7(3),CAT0.8(3),CAT1.0(3),CAT1.1(3),CM0.6(3),CM0.8(3),CM1.2(3)
第 3 回：TEM0.8(3),TEM0.9(3),CM1.0(3)
第 4 回：TEM0.5(3),TEMw0.6(3),TEMw0.7(3),TEMw0.8(3),TEMw0.9(3),TEMw1.0(3)

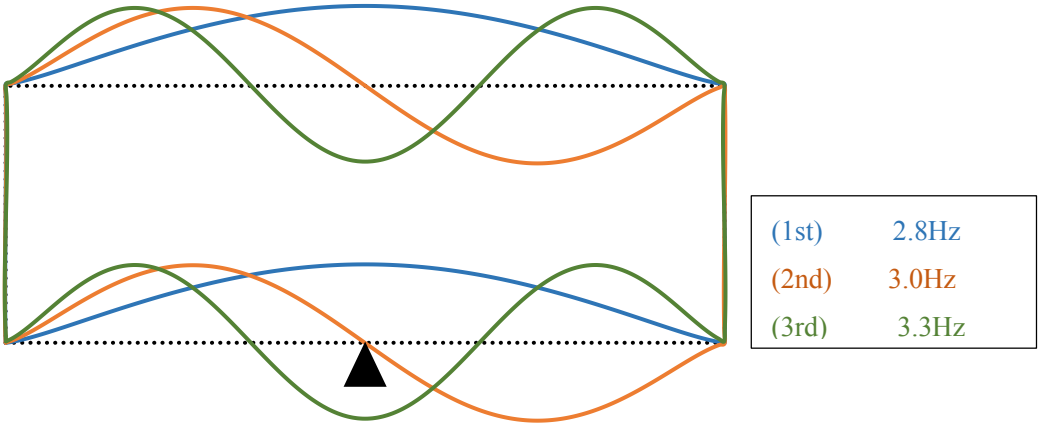
プリズム作業工程表では以下のような割り振りで実施している。()内は試験体名を示している。
第 1 回：B0-(a~c),S0-(a~c),BT-(a~c),ST-(a~c)
第 2 回：B0-(d~f),S0(d~f),BT-(d~f),ST-(d~f)
第 3 回：BTw-(a~c),STw-(a~c)

また、作業工程表にない煉瓦ユニット圧縮試験は H28 年 12 月 16 日に実施している。

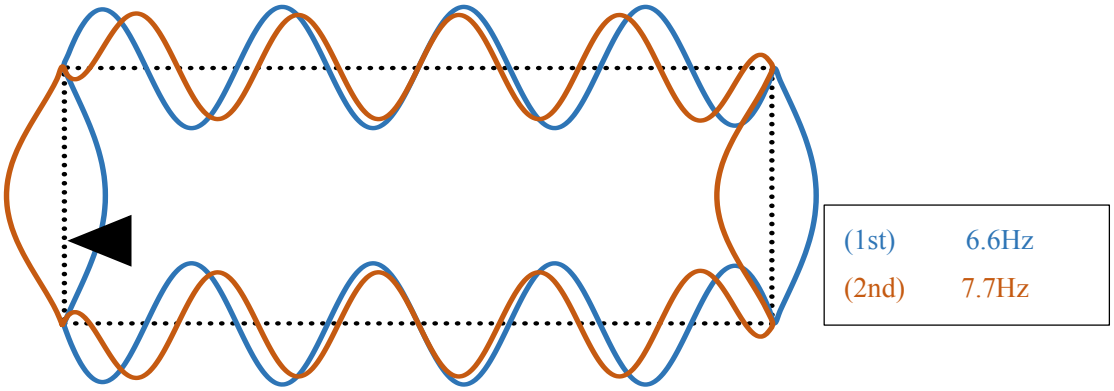
2.固有値解析の予備解析

本研究でロの字型モデルを構築するにあたり、モデル化の正誤確認のため、既往の研究を再現した。4 章で定義したものと同様の解析モデルとし、煉瓦壁は板要素としてモデル化した。壁厚やポアソン比は 4 章と同様とし、屋根重量や開口は考慮しない。壁の弾性係数$\mathrm{E} = 4.09 \times 10^9 N/m^2$,密度$\rho = 1{,}760 \mathrm{kg}/m^3$とする。

固有値解析を行った結果を図 A に示す。固有振動数において既往の研究と若干異なったが、長辺及び短辺方向で概ね類似の結果となった。このことより今回用いたモデル化の正当性を確認した。



(a) 長辺入力



(b) 短辺入力

図 A 面外入力に対する振動モード

モルタルバー作業工程表(H27年6月~H28年9月)

H27年	6月																7月															
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
第1回実験	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木
試験体作成				○																												
曲げ，圧縮試験																																○

H27年	10月																									11月										
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
第2回実験	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木
試験体作成	○								○																												
曲げ，圧縮試験																													○								○

H27年	11月		12月																																
	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
第3回実験	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水
試験体作成		○																														
曲げ，圧縮試験																														○		

H28年	8月																	9月														
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
第4回実験	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木
試験体作成				○																												
曲げ，圧縮試験																																○

プリズム作業工程表(H28年2月~H28年9月)

H28年	2月																						3月																					
	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
第1回実験	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土
試験体作成	○																																								
曲げ，せん断試験																													○												○

H28年	4月				5月																																				
	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
第2回実験	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土
試験体作成	○			○																												
曲げ，せん断試験																													○			○

H28年	8月																9月																
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
第3回実験	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土
試験体作成				○																												
曲げ，せん断試験																																○

参考文献

1）地震防災あなたとあなたの家族を守るために：http://www5d.biglobe.ne.jp/~kabataf/index.htm 2014.12.08 参照

2）多幾山法子・長江拓也・吉田亘利・前田春雄・喜多村昌利・荒木慶一：歴史的練画像の保存・再生に向けたステンレス鋼挿入耐震補強,歴史都市防災論文集 vol.1

3）赤木久眞・中野時衛・守屋慎一郎：
歴史的建造物の耐震診断と耐震補強の動向-煉瓦造および鉄筋コンクリート造の事例-

4）鹿島建設株式会社：http://www.kajima.co.jp/welcome-j.html　2015.01 参照

5）フェイベックス株式会社：
http://www.fibex.co.jp/seihin/aramidrod.html 2014.12 参照

6）多幾山法子，田井利幸，林康裕：歴史的煉瓦造建築物の無補強壁の面外方向振動特性の評価：日本建築学会構造系論文集第，673 号，pp.475-482,2012

7)京都大学生存圏研究所：http://vm.rish.kyoto-u.ac.jp/W/LABM/cnf 2014.12 参照

8）コンクリート添加剤として使用される材料：
http://www.ekouhou.net/disp-A,2013-506615.html（2014.12.15 参照

9)日本製紙グループ：http://www.nipponpapergroup.com/（2017.1.20 照）

10)渡邉史夫，窪田敏行：エース鉄筋コンクリート構造，朝倉書店，pp.6,2006.4

11)井立直人，松野淑，原光平，多幾山法子：新素材による目地置換工法を用いた煉瓦壁の補強効果と振動特性変化 (その 1)新素材を用いた補強方法の提案と実験概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅳ，pp.769-770，2015.9

12)原光平，松野淑，井立直人，多幾山法子：新素材による目地置換工法を用いた煉瓦壁の補強効果と振動特性変化 (その 2)曲げ試験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅳ, pp.771-772，2015.9

13)松野淑，井立直人，原光平，多幾山法子：新素材による目地置換工法を用いた煉瓦壁の補強効果と振動特性変化 (その 3)常時微動計測と固有値解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅳ, pp.773-774，2015.9

14)松野淑，多幾山法子:新素材による目地置換工法を用いた煉瓦壁の補強効果と振動特性変化(その 4)セルロースナノファイバー混入モルタルの材料特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 IV，pp.311-312,2016.8

15)Noriko Takiyama, Fukashi Matsuno, Takeru Kumagai, Naoto Idate, Kohei Hara and Katsuhiro Kobayashi: Conversion of Historic Masonry Constructions and Structural Characteristics of Walls by Intramural Reinforcement, Proceeding of The 2nd International Conference on Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Histrical Builsings and Structures (REHAB2015), Porto, Portugal, July, 2015

謝辞

本論文をまとめるに当たり,実に多くの方々のご協力を頂戴しました。

首都大学東京都市環境学部　准教授　多幾山　法子　先生には,研究室配属後たくさんのご指導を賜り,研究に対する理解を深めることが出来たと同時に,研究に関すること以外にも数多くのことを学ばせていただきました。研究内容の理解が乏しく，また，些細なミスが多い筆者が本論文をまとめることが出来たのも多幾山先生のご指導によるものです。ここに深く感謝します。

日本製紙の方々には,試験体作製において大変お世話になりました。本研究で用いている材料を無償で提供していただいたおかげで必要な分の試験体をスムーズに作製することが出来ました。また，新素材を扱うにあたり著者が把握出来ていなかった材料特性等の質問にも迅速に答えていただきました。

解析ソフトの発売元であるソフトウェアセンターの方々には，解析において大変お世話になりました。著者と多幾山先生だけでは解決できなかった解析上の問題を解決するための助言を多く頂きました。

研究室のみなさんには,この 2 年間大変お世話になりました。研究室の同回生には,研究のことや研究以外のことでも気軽に声をかけていただいたり,それぞれの研究でご多忙にもかかわらず実験に協力いただいたことに大変感謝しております。また，研究室の後輩たちは，手際の悪い先輩である著者の実験手伝いなども進んで手伝っていただき，研究室での活動でも気軽に声をかけていただき，楽しい時間を過ごさせていただきました。

最後に大学に進学させていただいた両親をはじめとする,家族や友人にはいつも心の支えになって頂いたおかげで本論文を書き終えることが出来ました。ここに感謝の意を記し,謝辞とさせていただきます。

2017 年 2 月