

組積造建物の耐震補強効果検証のための 実験システムと数値解析手法の構築

目黒 公郎¹・藤枝 拓海²

¹東京大学生産技術研究所教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1東京大学生産技術研究所B棟)

E-mail: meguro@iis.u-tokyo.ac.jp

²中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻

(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1東京大学生産技術研究所B棟)

E-mail: fujieda@risk-mg.iis.u-tokyo.ac.jp

本研究では、組積造建物の様々なパターンの挙動を容易に検証できるツールを構築する事を目的とし、ミニチュア模型と小型の電動式振動台を製作する事によって様々なパターンを簡易的に実験できるシステムと地震時の組積造の挙動を精度良く再現する数値解析手法の構築を行った。構築した実験システムを用い幾つかの実験を行い、PPバンド耐震補強法の効果や木造屋根の拘束効果、アーチ屋根組積造の耐震性の評価を行った。数値解析では組積造の動的非線形解析を行い、振動台実験で見られる様なクラックの進展を精度良く捉えられる事を確認した。本研究で開発した実験システムと数値解析手法により、様々なパターンの挙動を容易に検証できる環境が整った。

Key Words : 組積造, 耐震補強, 振動台実験, PPバンド補強, 動的非線形解析

1. はじめに

焼成レンガや日干しレンガ（アドベ）、石やブロックなどを積み上げて造る組積造は長い歴史をもった構造形式であり、現在でも世界各地で利用されている。地震の多発する地域にも広く分布し、世界の人口の約6割もの人口が住んでいる。組積造は地震に弱く、世界の地震による犠牲者の多くは、組積造建物の崩壊によって発生している。組積造建物の耐震補強は世界規模で地震防災を考えた場合に最も重要な課題と言える。

このような状況を踏まえ、目黒らは世界中で手に入る安価な材料（PPバンド荷造紐）を用いた簡単な耐震補強法とその普及策を提案している。そして、これまでに縮小と実大模型を用いた振動台実験^{1), 2)}を行い、補強効果を検証している。しかし、組積造は多種多様であり未検証な点も少なくないため、様々なパターンの挙動を容易に検証できるツールの構築が求められている。そこで本研究では、そのツールとして、ミニチュア模型と小型振動台を用いた組積造建物の耐震補強効果を簡便に検証する実験システムと地震時の挙動を精度良く再現する数値解析手法の構築を行った。

2. 実験システムの構築

本研究で扱う耐震補強法は、通常は荷造り紐として利用されているPPバンドを用いる工法である。PPバンドは安価で軽く、引張強度が非常に高い材料で、世界中のどこでも一定の品質のものが入手できる。このバンドをメッシュ状にして、壁や屋根を両側から挟み込み、両者を紐や針金などで連結し、アドベや石、レンガなどが地震時に壁から崩落する事を防いで建物の一体性を保持するものである。無補強の壁はクラック発生直後に面内・面外共に耐力を失うが、PPバンド補強壁では、クラックの発生直後に耐力が一瞬低下するが、PPバンドメッシュの効果ですぐに耐力は回復し、強度が向上すると共に変形能も大きくなる。縮小・実大模型の実験から、補強なしのケースに比べ、PPバンド補強では遥かに大きな加振にも耐える事が確認されている。

3. 実験システムの構築

(1) 供試体の概要

実験供試体として、木造屋根とアーチ屋根の2パターンの組積造建物（いずれも実物の1/12スケール）を用意した。レンガの代用物としてはアクリル製のブロックを、モルタルの代用物としては、

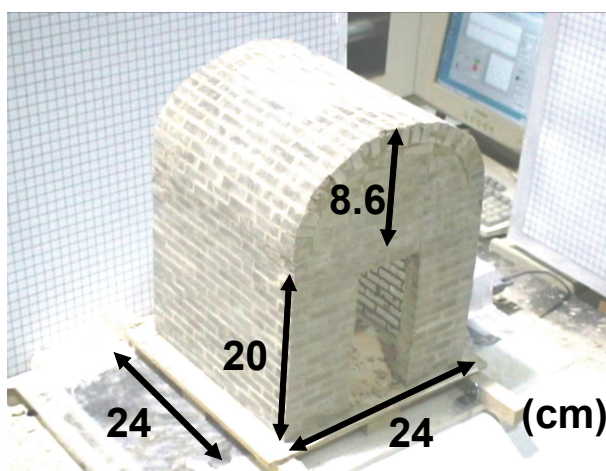
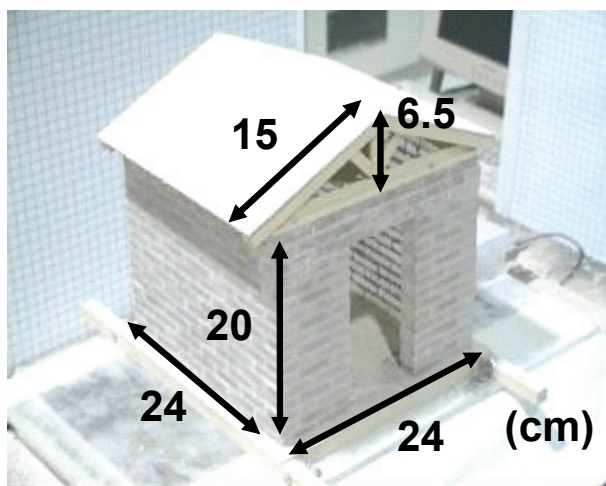


図-1 実験供試体

砂と炭酸カルシウムと水を重量比20:5:6で混ぜ合わせたものを使用した。これらの選定理由は、繰り返し再利用が可能なこと、材料特性が実際の材料と似ているためである。モルタルの配合は製作した小型振動台で得られる加振力の範囲内で供試体が壊れ、破壊過程が実際の組積造と一致するものを試行錯誤的に求めた。一連の実験を行う前に、これらの材料を使用した場合に、組積造のクラックが進展していく様子が再現できる事を確認した。本研究で用いるPPバンドメッシュは、供試体サイズを考慮して市販のPPバンドを細かく加工（幅0.75mm、厚さ0.3mm）して、メッシュピッチが20mmになるように作成した。交差部は高周波振動による摩擦熱で溶接する方法で接合した。タイバーは引張も圧縮も持つ金属材料（真鍮）とした。

(2) 電動式小型振動台による起振方法

本研究では、既存の手動式小型振動台に改良を加え、持ち運び可能な小型の電動式振動台を製作した。改良ポイントとしては、電動で稼働し、周波数の制御と測定が可能で、供試体を載せる台が変更できる点である。入力波としては、1方向加振で、振幅を

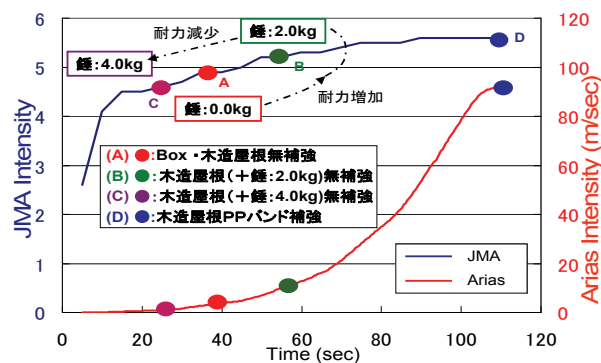


図-2 検証 (1), (2) 結果

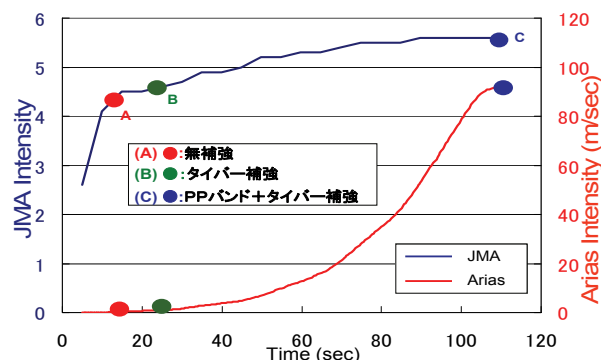


図-3 検証③結果

5mm又は15mmの一定とし、周波数を2Hzから6Hzまで、10秒間で1Hz上昇させ、その後10秒間保持する状態を繰り返す波を用いる。

(3) 実験結果と考察

まず検証①として、木造屋根組積造の無補強、PPバンド補強の2つのパターンを比較し、PPバンド耐震補強の効果を検証する。次に検証②として、木造屋根の重さによる組積造への影響を検証するため、木造屋根なしの組積造 (box)、木造屋根ありの組積造、木造屋根に錘を載せた組積造の3パターンの挙動を比較する。最後に検証③として、アーチ組積造の無補強、タイバー補強、PPバンド+タイバー補強の3つのパターンの挙動を比較する。

検証①の結果としては、無補強のものは気象庁震度階(JMAI)5-で崩壊したが、PPバンド補強されたものはJMAI6-でも崩壊しなかった。次に、この組積造がレンガで造られていると仮定し、その重さに相当する錘を屋根に載せた上で繰り返し载荷実験を行った。結果は、最終的に横倒しになるものの一体性を保持するため、甚大な人的被害を発生させる脆性崩壊はしなかった。検証②の結果としては、屋根なし無補強(box)と木造屋根無補強のものを比較すると、ほぼ同じ地震外力で破壊した。この実験結果からは、木造屋根の重さによる顕著な拘束効果は見られなかった。そこで木造屋根の重さを増加させていったところ、錘が0.5kg、1.0kgの時には影響が見られず、2.0kgの錘を追加したときに強度増加が確認された。

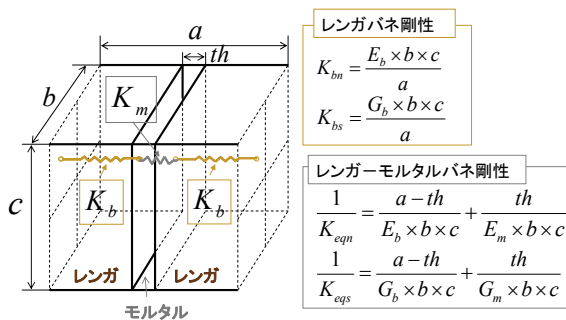


図-4 レンガ-モルタルバネの概念

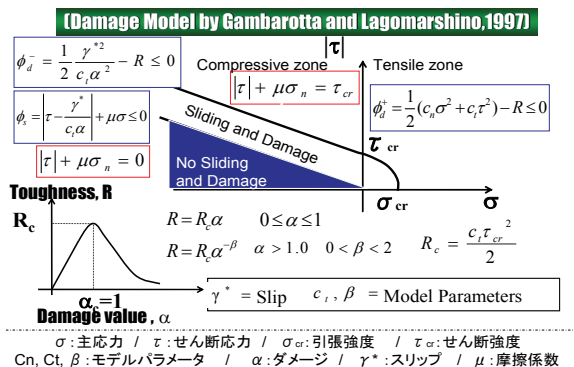


図-5 材料構成則

さらに重くしていくと、垂直応力の増加によるせん断強度向上の一方で、屋根部分に作用する慣性力の影響が大きくなり、耐震性が低下した（図-2）。検証③の結果としては、無補強のものがJMAI4で崩壊し、タイバー補強のものがJMAI5で崩壊、そしてPPバンド+タイバー補強は、JMAI6でも崩壊しなかった。これによりPPバンド+タイバー補強が効果的な耐震補強工法であることが分かる。

4. 数値解析手法の構築

(1) 三次元応用要素法（3D-AEM）

応用要素法³⁾では対象構造物を矩形状の有限個の要素に分割し、その要素同士を接線方向とせん断方向の二種類のバネで接続する。各バネに非線形の特性が適用され、そのバネを介して周囲の要素と力のやり取りを行う。各要素は6自由度を持ち、各バネの剛性行列は12×12の行列となる。組積造はレンガとモルタルの2つの材料から構成されるため、レンガ内部とモルタル表面の2つのタイプのバネでモデル化する。それぞれのモデルを図-4に示す。

(2) 組積造モデル

組積造の材料構成則には、Gambarotta L.⁴⁾によって提案されているモデルを適用する。このモデルは繰り返し荷重下での組積造の複雑な非線形挙動を少ないパラメータで合理的に表現する事が出来るモ

表-1 材料特性

	ヤング係数 (MPa)	せん断係数 (MPa)	引張強度 (MPa)	せん断強度 (MPa)	摩擦係数	β	Ct (MPa)
モルタル	0.5E+03	0.25E+03	0.16	0.22	0.6	0.9	30E+03
レンガ	15E+03	7.5+03	12	4.20	0.75	0.8	0.75+03
PPバンド	9.375+03	4.687+03	NA	NA	NA	NA	NA

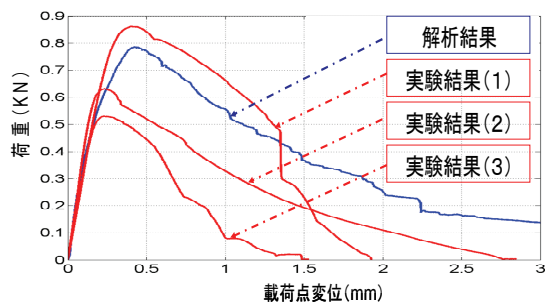


図-6 荷重-変位関係（無補強）

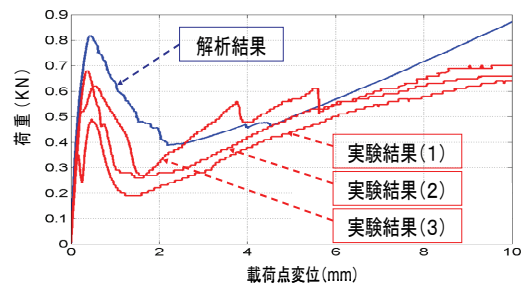


図-7 荷重-変位関係（PP バンド補強）

デルである。このモデルは、モルタル自体の損傷状況とレンガとモルタルの界面損傷状況を考慮する事が出来き、それぞれモルタルダメージ α と摩擦すべり γ^* の2つの変数で表現する（図-5）。これらの変数はモール・クーロンの摩擦面と破壊力学に基づくR-curveから得られる。

(3) PPバンドメッシュモデル

PPバンドメッシュは梁要素でモデル化した。材料特性としては、引張側を線形弾性とし、圧縮側は力を受け持たないものとする。要素の両端ではモーメントを受け持たないモデルとなっている。各梁要素の両端には、法線・せん断・回転方向のバネを設け、組積造の要素と接合する。PPバンドメッシュを固定する金具が存在する場合には3方向すべてのバネでAEM要素と接続する。存在しない場合にはPPバンドメッシュと組積造の接触のみを考慮し、法線方向バネのみ接続する。

(4) 数値解析例

Sathiparan(2005)によって行われた組積造面外方向壁の変位載荷実験¹⁾を基に、三次元応用要素法の精度の検証を行う。供試体寸法は475x235x50mmでPPバンドメッシュは幅6mm、厚さ0.32mm、ピッチ40mmとなっている。境界条件は供試体両端のスチール棒による単純支持、荷重条件は中央部分のスチール棒

による線的な変位載荷である．数値解析には表－1に示す材料特性を用い，PPバンドメッシュの剛性は9.375GPaとする．図－6と図－7に無補強とPPバンド補強の実験と数値解析から得られた荷重－変位関係を示す．実験結果と解析結果を比較すると無補強の場合もPPバンド補強の場合も，共に良い一致を示している．

5. 動的非線形解析手法の構築

(1) 概要

本研究では地震被害を対象としているので，地震時の組積造構造物の挙動を詳細に把握する事が重要となる．現在の静的解析では地震時の構造物の挙動を把握するには限界があり，荷重条件をより正確に扱う事の出来る動的解析に拡張する必要がある．そのため，非線形動的解析手法の構築を行った．

(2) 時間積分手法

本手法の時間積分手法にはニューマーク β 法を拡張したHHT法（Hilber-Hughes-Taylor method）を用いる．この手法の特徴はニューマーク β 法より効果的な数値減衰を持つ手法で，大きな時間刻みを用いた場合に大きな数値減衰が表れ，固有周期の短い高次モードに対してより大きな効果を発揮する．組積造のレンガとモルタルのように構造物に大きな剛性差がある場合に生じる高次モードの卓越を抑制し，安定的な数値解を得るのに非常に有効な手法である．

(3) 数値解析手法の妥当性の評価

Sathiparan(2005)によって行われた1/4スケールモデルを用いた振動台実験¹⁾を基に，構築した数値解析手法の妥当性の検証を行う．供試体の寸法は950x950x720mmで，PPバンドメッシュは幅6mm，厚さ0.24mm，メッシュピッチ40mmである（図－8，9）．入力波は周波数帯が2Hzから35Hzで，加速度は0.05gから1.4gに至る範囲の正弦波の入力を段階的に行う（図－10，表－2）．数値解析には表－3に示す材料特性を用いる．妥当性の評価方法は，無補強・PPバンド補強共に，加振スケジュール表（表－2）のNo. 19, 23, 27, 28のケースで実験と解析の加速度応答を比較し，さらにNo. 29で加速度応答，変位応答，クラックパターンを比較する．

(4) 解析結果

無補強・PPバンド補強共にNo. 19, 23, 27, 28, 29の実験と解析の加速度応答を比較すると，応答性状，応答値，周期に良い一致が見られた．今回は紙面の制約からNo. 29の結果（図－13，14）を示す．No. 29の変位応答（図－15，16，17，18）は，こちらも応答性状，応答値，周期に良い一致が見られる．無補強のNo. 29のクラックパターンを見ると実験のクラックパターンと非常に類似しており，クラックの進展を精度良く捉えられている事が分かる（図－11）．PPバンド補強のクラックパターンを見ると実

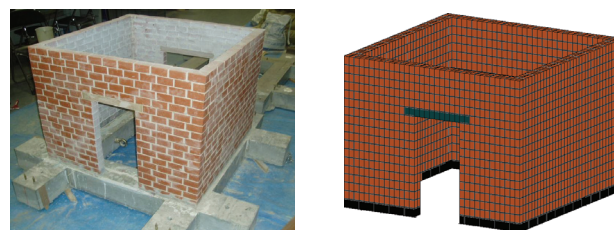


図-8 左：実験供試体，右：解析モデル（無補強）

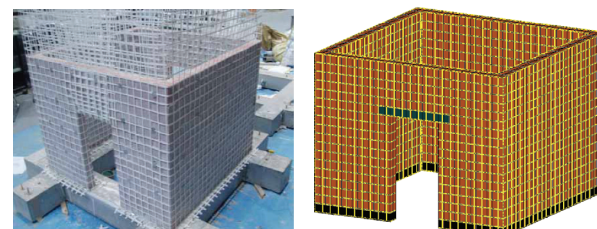


図-9 左：実験供試体，右：解析モデル（補強）

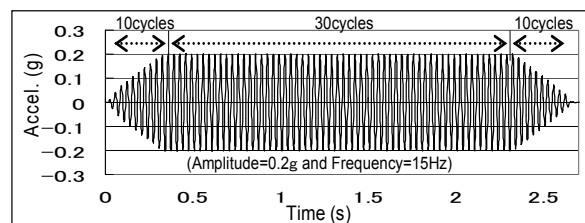


図-10 入力波形

表-2 加振スケジュール

Amplitude	Frequency							
	2Hz	5Hz	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
1.4g		59	58	57				
1.2g		56	55	54	53			
1.0g	62	52	51	50	49			
0.8g	61	47	44	41	38	35	32	29
0.6g	60	46	43	40	37	34	31	28
0.4g	48	45	42	39	36	33	30	27
0.2g	26	25	24	23	22	21	20	19
0.1g	18	17	16	15	14	13	12	11
0.05g	10	09	08	07	06	05	04	03
sweep	01.02							

表-3 材料特性

	ヤング係数 (MPa)	せん断係数 (MPa)	引張強度 (MPa)	せん断強度 (MPa)	摩擦係数	β	Ct (MPa)
モルタル	0.05E+03	0.025E+03	0.075	0.085	0.75	0.9	30E+03
レンガ	15E+03	7.5E+03	12	4.20	0.75	0.8	0.75E+03

験で見られる様な強度の増加が確認でき，クラックの開口が抑制される様子を再現出来ている（図－12）．これらの結果から構築した数値解析手法の妥当性を検証できたと言える．

6. 結論と今後の課題

組積造建物の耐震補強の効果を簡便に検証できる実験システムと数値解析手法の構築を行った．今後の

課題は数値解析手法の精度の向上とそれらを用いた設計ガイドラインの提案である。

参考文献

- 1) Navaratnarajah Sathiparan: Experimental study of retrofit of masonry building by pp-band mesh, Master degree thesis, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, 2005.
- 2) K.N.Nesheli, N.Sathiparan, R.Guragain, P.Mayorca, F.Ito, H. Kagawa, T.Tsugawa and K.Meguro : Full-Scale Shaking Table Tests on 5th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, 2006.11.
- 3) Hatem Sayed Tagel-Din: A New Efficient Method for Nonlinear, Large Deformation and Collapse Analysis of Structures, Doctor degree thesis, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, 2005.
- 4) Gambarotta L. and Lagomarsino S: Damage Model for the Seismic Response of Brick Masonry Shear Walls, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, pp. 423-439, 1997.

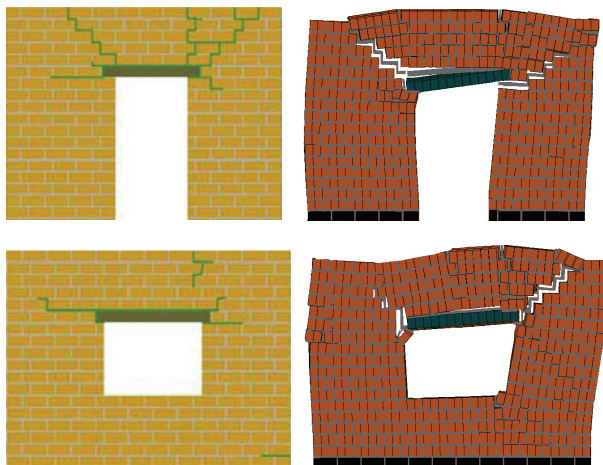


図-11 無補強クラックパターン（応答倍率：50 倍）
（左：実験結果，右：解析結果）

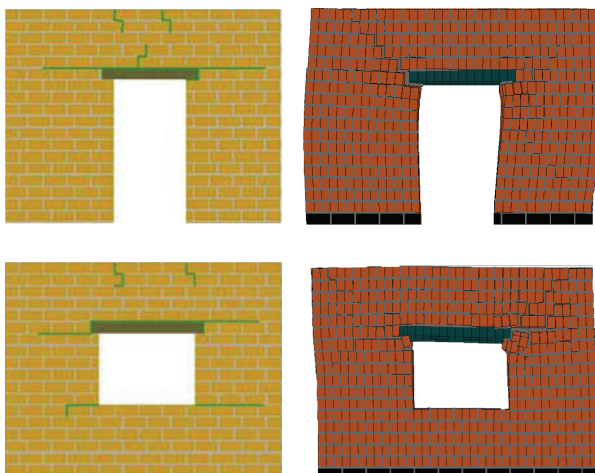


図-12 補強クラックパターン（応答倍率：50 倍）
（左－実験結果，右－解析結果）

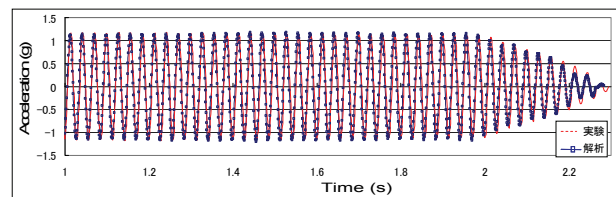


図-13 時間－加速度（無補強：1s-2.3s）

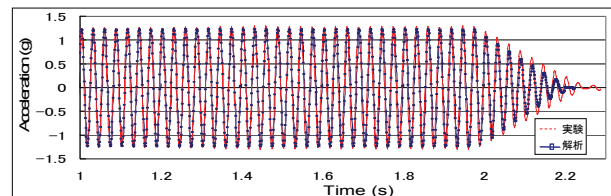


図-14 時間－加速度（P Pバンド補強：1s-2.3s）

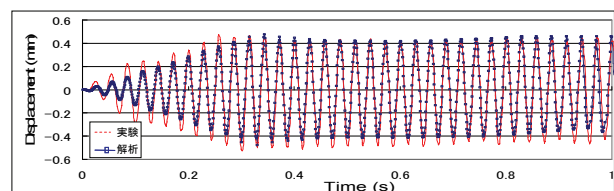


図-15 時間－変位（無補強：0s-1s）

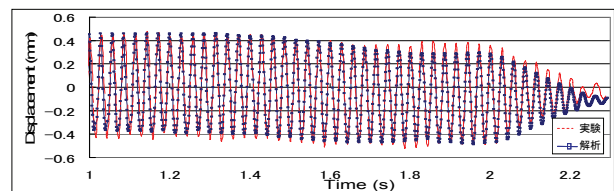


図-16 時間－変位（無補強：1s-2.3s）

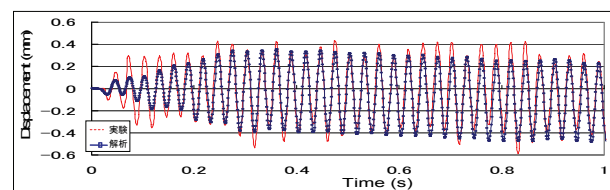


図-17 時間－変位（P Pバンド補強：0s-1s）

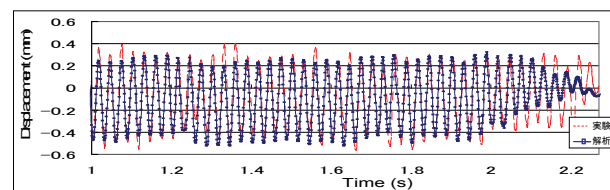


図-18 時間－変位（P Pバンド補強：1s-2.3s）