

ネパール中部地震における 組積造建築物の被害とその対策法

松原 仁¹・崎山 将²・広瀬 孝三郎³・藍壇 オメル⁴

¹正会員 琉球大学准教授 工学部環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

E-mail:matsbara@tec.u-ryukyu.ac.jp

²学生会員 琉球大学大学院理工学研究科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

E-mail:k158479@eve.u-ryukyu.ac.jp

³学生会員 琉球大学大学院理工学研究科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

E-mail:k148653@eve.u-ryukyu.ac.jp

⁴正会員 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

E-mail:aydan@tec.u-ryukyu.ac.jp

2015年4月25日に発生したネパール中部地震では、多くの人命や建造物が失われた。特に、単に石を積み上げただけ、あるいは粘土のような接着性の低い材料をモルタルとした組積造建築物の被害は甚大であり、現地における早急な対策が求められている。例えば、現地に先進国で使用されているような高価な鉄筋コンクリート構造物を持ち込み、普及させていくことも考えられるが、コストや材料調達の面で問題が生じる。本研究では、古より受け継がれてきた連続梁付組積造に習い、材料はネパール国内（山岳地帯を含む）で容易に調達でき、かつ、極めて簡便な手法にて組積造建築物の耐震性を増加させる方法について検討する。また、連続梁付組積造の有効性を検証するために、簡単な振動実験システムを開発し、本手法の力学的な妥当性を検討する。

Key Words : Gorkha earthquake, dried masonry, traditional masonry, experimental verification

1. はじめに

2015年4月25日、ネパールの首都カトマンズの北西約77 kmの地点を震源地とする巨大地震が発生した (Mw 7.8)。震源の深さは約10~15 kmであり、1934年にネパールを襲った巨大地震 (Nepal-Bihar地震) の後から数えると過去最大の地震となる^{1),2)}。アメリカ地質調査所 (USGS) によると³⁾、ネパールの首都カトマンズで得られた最大加速度は、周期4.8秒でピーク値385gal (EW成分) となり、最大相対変位応答は約300 cmであった。図-1に本震と余震 (Mw > 6) の位置とメカニズム解⁴⁾を示す。同図から明らかなように、これらの地震は、本震、余震を問わず、ヒマラヤ逆断層帯 (ヒマラヤ衝上断層帯) の一部が動いたことによるものであることは明白である。

この地震の特徴は、(1) 山岳部において極めて多くの斜面崩壊が生じたこと、(2) 斜面崩壊は巨石の落下を招き、斜面下の民家や生活拠点に大きな被害を及ぼしたこと、(3) カトマンズ盆地を中心として、多くの地割れが発生したこと、(4) 大規模な地盤液状化現象が起こった

こと、そして、(5) 平野部、山岳部を問わず、多くの組積造構造物 (歴史的建造物を含む) が崩壊したこと、をあげることができる (図-2、図-3を参照)。

組積造は、レンガや石を積み上げた構造形式であり、比較的単純な工程で施工することが可能であることから、古より世界各国で採用されている。当然ながら、発展途上国においても、工法の単純さと材料の入手が容易なことから幅広く用いられている手法である。しかしながら、

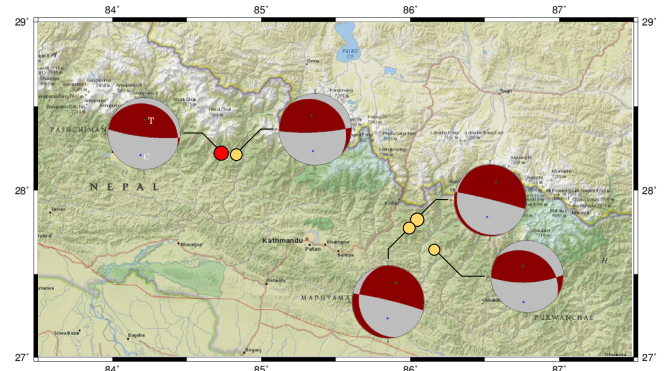


図-1 ネパール中部地震の本震と Mw>6 の余震の位置とメカニズム解、赤丸：本震の位置、黄丸：余震の位置



図-2 ネパール中部地震で発生した被害事例 ((a): 斜面崩壊, (b) (c): 落石による被害, (d): 道路の亀裂・陥没, (e): 大規模亀裂・液状化)



図-3 組積造構造物の崩壊事例 ((d)は斜面から石を採取している様子)

水平荷重に極めて脆弱であるという特徴を有しており、地震が発生すると、特に、マッドモルタルを接着剤に用いた構造や石やレンガを単に積み上げただけの組積造壁体は、小さな揺れであっても全体倒壊に至る可能性が高くなる。2015年ネパール中部地震においても同様であり、図-3に示すように、耐震補強されていない組積造建築物の多くが倒壊するに至った。この倒壊の原因は、これらの組積造建築物の多くが、工学的な専門知識を有さない人によって、短期間に造られていたために、地震荷重に対する材料強度が不十分であることに他ならない。また、歴史的な組積造建築物の地震リスクに関しては、事前の警鐘も存在していたが⁵⁾、対策が間に合わなかったのが

実情となっている。

以上のような現状のもと、目黒ら⁶⁾⁷⁾は、PP-bandと呼ばれるポリプロピレン製の紐を組積造壁体に巻きつけることで、組積造住宅のせん断抵抗を増加させることに成功している。これは、PP-band工法と呼ばれ、安価かつ施工が簡単であることから、今後の実用化が期待されている。一方、組積造壁体にワイヤーメッシュを巻きつけ、セメントモルタルで結合させる工法も提案されている⁸⁾⁹⁾。本手法を既存の建物に適用することにより、地震荷重に対して高い強度を発揮することが実験的にも確かめられており、実際の建物に適用されている。

以上のように、特に、発展途上国で多く見られるNon-

engineered structure型の組積造建築物における耐震補強技術は数多く提案されているが、ネパール中部地震における被害事例のように、組積造建築物の地震被害は後を絶たない。その原因のひとつは、前述の耐震補強技術を例にとると、PP-bandやワイヤーメッシュ等、現地で高価で容易に調達できない材料をベースにしていることが考えられよう。最も理想的な耐震補強手法は、(1) 現地で調達できる材料を用い、(2) 高度な技術を導入せず（現状とさほど変わらない手法で）、(3) 高度な工学的知識を有する人材がいなくとも、施工できるものである。

そこで本研究では、古から伝わる手法を用いた伝統的な組積造建築物、すなわち、過去の巨大地震に耐えた組積造建築物の特徴を抽出し、それらとネパール中部地震で崩壊した組積造建築物の特徴とを比較する。そして、簡単な振動実験によって、組積造簡易モデルの振動特性について検討する。

2. 組積造構造物の被害と伝統的構造

ネパール中部地震では、山岳部を中心として多くの組積造構造物が倒壊した。これらの構造は、図-3に示すように、近隣で調達できる石材を積み上げただけの構造（石造建築）や、レンガなどのブロックを接着性の低い

マッドモルタルにて接着した構造（レンガ構造等）であった。これらの構造に地震力のような繰り返し荷重が作用すると、石やブロックが不連続体に近い形で個々に振動し、最終的には建物全体として早い段階で大規模崩壊に至る、というものである。力学的に言えば、石・ブロック間の引張耐力の不足、という点に尽きる。

一方、コンクリート構造物や組積造とコンクリート構造を組み合わせたような建物の被害は極めて少なかった（図-3(e)は象徴的である）。当然ながら、これらの近代的な建築物は、山岳部で多くみられる簡単な石造建築物よりもコストがかかることから、本地震にて発生した組積造建築物の被害は、貧困に起因するのが大きいと考えられた。

さて、組積造の起源は古代文明（エジプト文明等）にも遡ることが知られている。メソポタミアやエジプトで見られるピラミッドが現代にまで残っていることを考えると、組積造の伝統的な積み上げ方法を学ぶことは、現代の組積造建築物の耐震性を考える上で極めて有効であると考えられる。そこで、ここでは、過去に発生した巨大地震（1995年阪神淡路大震災、1998年Adana-Ceyhan地震（トルコ）、1999年Düzce地震（トルコ）、2001年Gujarat地震（インド）、2002年Cay-Eber地震（トルコ））で倒壊に至らなかった組積造建築物を観察し、その構造的特徴を抽出する。

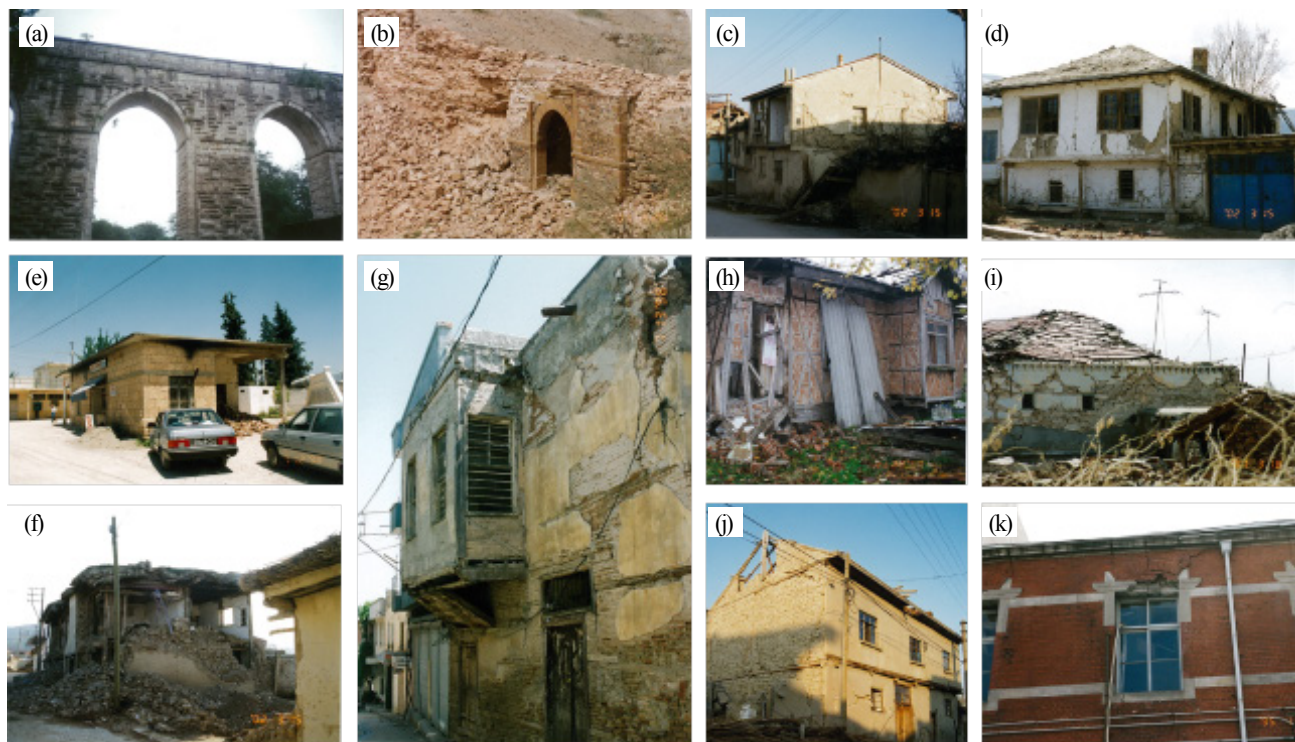


図-4 伝統的な組積造構造物の事例（(a)：石積水道橋（1854, 1889, 1999 年 Marmasa Sea 地震で無被害）(b)：Anjar（2001 年 Gujarat (Kutchh)地震で連続梁有りの部分のみ被害小）(c), (d), (e), (g), (h), (i)：トルコ、インドの伝統的な石積構造（全体倒壊には至らず）(k)：日本のレンガ構造（連続梁有りのために被害小）(f) 連続梁なし構造（2002 年 Cay-Eber 地震時、壁は全体的に崩壊している）^{10)~14)}（写真は藍壇）

図-4に過去に発生した地震によって崩壊に至らなかった組積造構造物の例を示す。ただし、図-4(f)は組積造壁体全体が崩壊した例を示している。図-4(a)はオスマン帝国に建造された水道橋であるが、地震の被害は見当たらない。この構造の特徴は、単一な形のブロック間に少し大きめのブロックが挿入されている点にある。同図(c)を見ると、単一ブロックで構成されている部位は完全に崩壊しているものの、幾つかの連続梁が導入されている部分は原型を留めていることが分かる。また、同図(c), (d), (e), (g), (h), (i), (j)に関しては、ブロックの間に木製の連続梁が導入されており、古い建物であるにも関わらず、全体的な崩壊には至っていない。同図(k)は石製連続梁とレンガ構造の組み合わせ構造であるが、壁体の一部に亀裂が入っているものの、構造物全体としては無傷に近い。同図から分かるように、亀裂の進展が連続梁によって抑止されているのである。これは、同図(g)の壁面亀裂の進展仕方を見ても容易に想像できる。また、同図(h)は、トルコの伝統的な組積造建築物であるが、組積造の間に斜材の存在も確認することができる。一方、同図(f)では壁体に連続梁状のものは一切なく、壁体全体が完全に崩壊していることが分かる。

以上より、古から伝わる組積造建物の特徴を次のようにまとめることができる。

- (1) 単一サイズの石やレンガを積み上げるだけでなく、それよりも大きめのサイズの石やレンガが所々（隅角部、力が集中する場所に挿入されている。
- (2) 石やレンガの間に連続梁が挿入されている。
- (3) 連続梁が導入されていない部位は、地震時に崩壊している場合が多い。
- (4) 現地で調達できる材料で構成されている。

3. 簡易振動実験による連続梁付組積造の有効性評価

前章において、伝統的な組積造建築物の壁体には石積み、あるいはレンガ積み等の間に、それよりも大きめの連続的な部材（石、木）が挿入されていることを見た。そこで本章では、単純な石積み構造を模擬し、連続部材の有無と構造物全体における振動特性の関連性について実験的に検討する。

(1) 実験概要

本研究では、図-5に示すような小型の振動台システムを開発した。本システムは、9つのブロック（5×5×15 cm）を正方格子状に組み、ブロックの短軸方向に振動を与えるものである。その際、振動台と上部ブロックの加速度を測定するために、図-5に示す位置に加速度計を

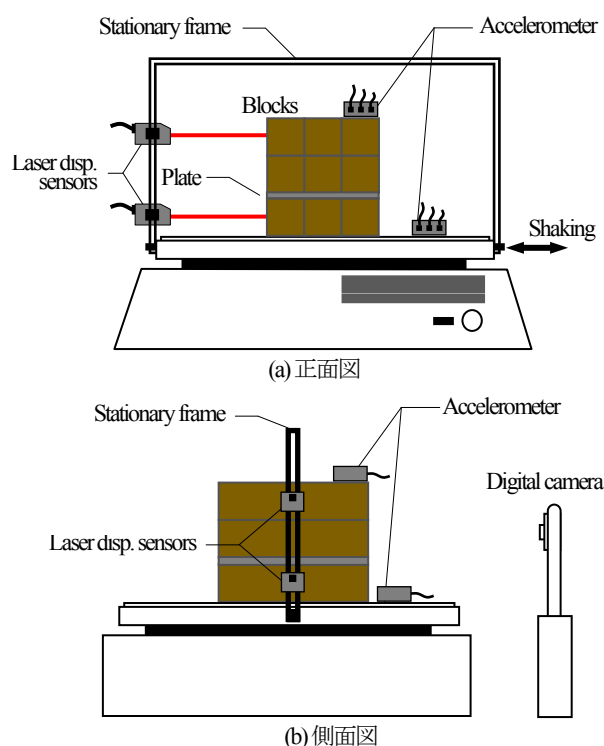


図-5 簡易的な小型振動台システム

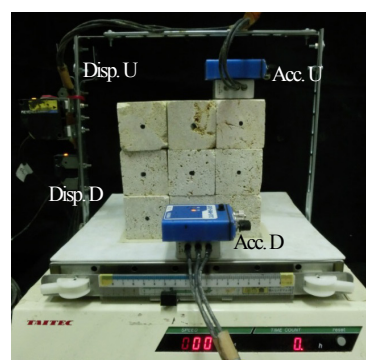


図-6 実験装置の様子

表-1 ブロック・板の静的摩擦角

対 象	方向	摩擦角 (°)
ブロック-ブロック	-	28.3
ブロック-板 (3 mm)	木目に直行	26.7
	木目に並行	26.5
ブロック-板 (19 mm)	木目に直行	32.0
	木目に並行	24.3

設置した。また、ブロックの振動方向の変位量を測定するために、振動台に固定フレームを組み、2台のレーザー変位計を設置した。また、ブロックの全体的な変形挙動を観察するために、システム正面にデジタルカメラを設置し、撮影した。実験装置の実際の様子を図-6に示す。

本研究で用いたブロックは琉球諸島に広く分布している琉球石灰岩である。また、ブロック間に挿入する連続梁には、市販の板（厚さ：3 mmと19 mm）を用いた。以後、この板を連続板と称す。ブロック同士、ブロックと板の間の静的摩擦角を表-1に示す。

(2) 実験結果

本研究では、1) 単純石積みモデル、2) 単純石積みモデルの第1層と第2層の間に厚さ3 mmの連続板を挿入したモデル、3) 単純石積みモデルの第1層と第2層の間に厚さ19 mmの連続板を挿入したモデルの3つのモデルを用意した。

振動経過時間の進展に伴うブロック変形の様子を図-7, 8, 9に示す。図-7より、連続板なしの場合は、振動開始後、15秒程度からブロック同士に接触振動が発生し、約60秒後には端部のブロックが転倒モードにて崩壊した。一方、図-8, 9より、連続板ありの場合は、板の厚さに関わらず、連続板なしの場合に見られた転倒モードは現れなかった。しかし、19 mm厚の連続板を用いた場合は、板とブロックとの間ですべり挙動が発生した。

連続板なしの場合と連続板ありの場合の加速度波形とフーリエスペクトル値、およびブロックの変形の様子を

図-10, 11, 12に示す。図-10より、ブロックの変位はブロック頂部の上下方向加速度が生じた地点から大きくなり、ブロック頂部の振動方向の加速度が非線形挙動になるとすぐに倒壊している様子が分かる。また、振動台の特徴周波数は2 Hzと5 Hz付近に集中しており、この傾向はブロック頂部でも同様であった。

一方、図-11, 12より、連続板ありの場合、変形は板厚に関わらず約45秒付近から生じている。変位の幅は、ブロック厚が大きい程小さくなっていることが分かる。また、ブロック頂部の振動方向加速度に関しては、連続板なしの場合と同様に非線形的な挙動が見受けられるが、崩壊するには至っていない。さらに、ブロック頂部における加速度の周波数特性に着目すると、連続板なしの場合と比較すると、高周波の部分にいくつかの特徴周波数が出現していることが分かる。これは、板厚が小さい程顕著であり、連続板なしの場合とは全く異なる結果である。

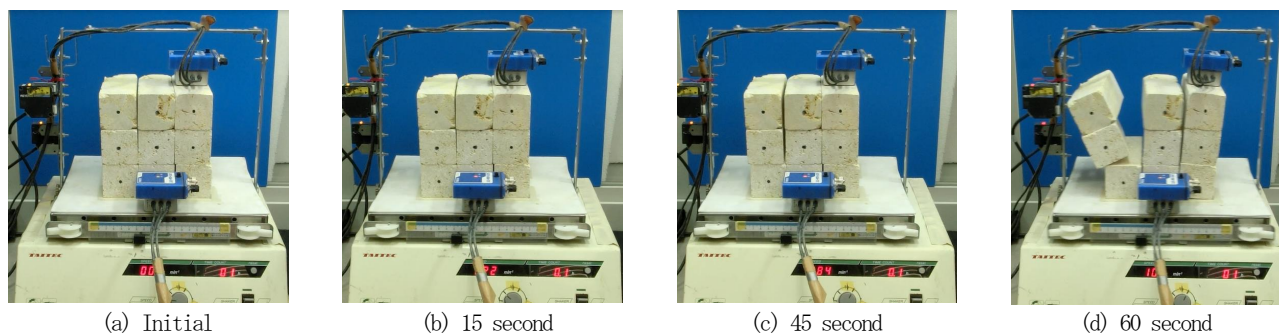


図-7 簡易石積みモデル実験の様子（連続板なし）

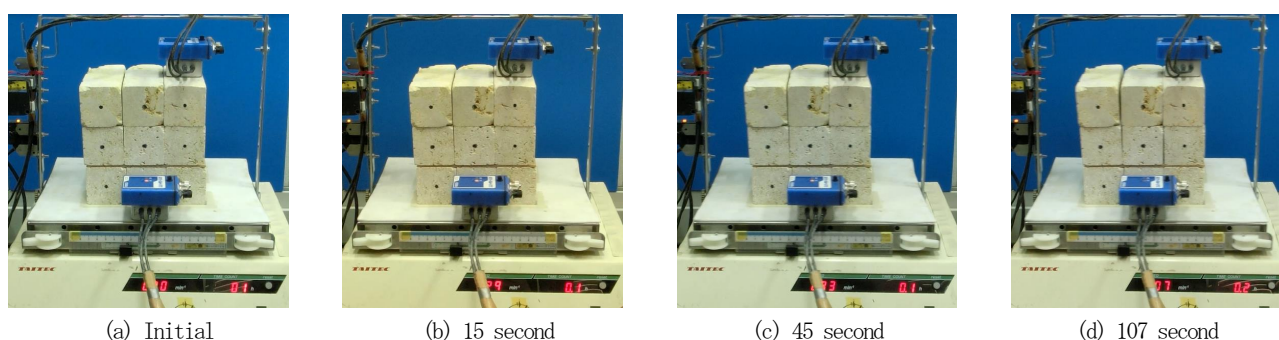


図-8 簡易石積みモデル実験の様子（3 mm厚連続板あり）

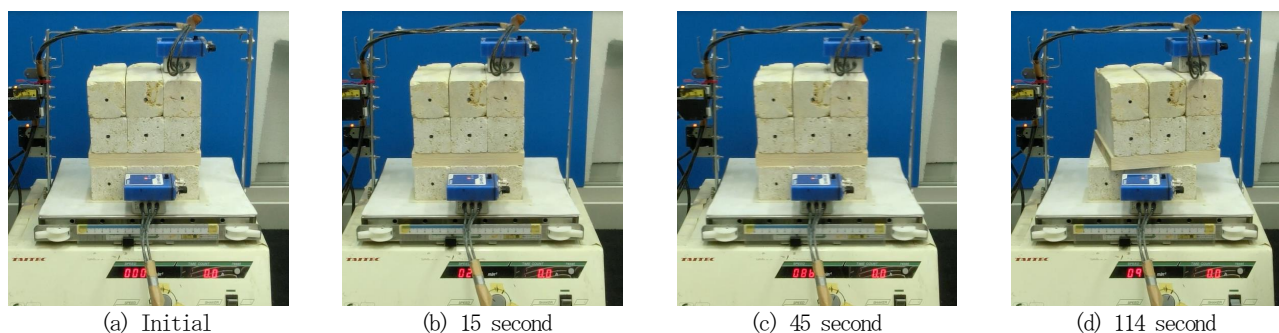


図-9 簡易石積みモデル実験の様子（19 mm厚連続板あり）

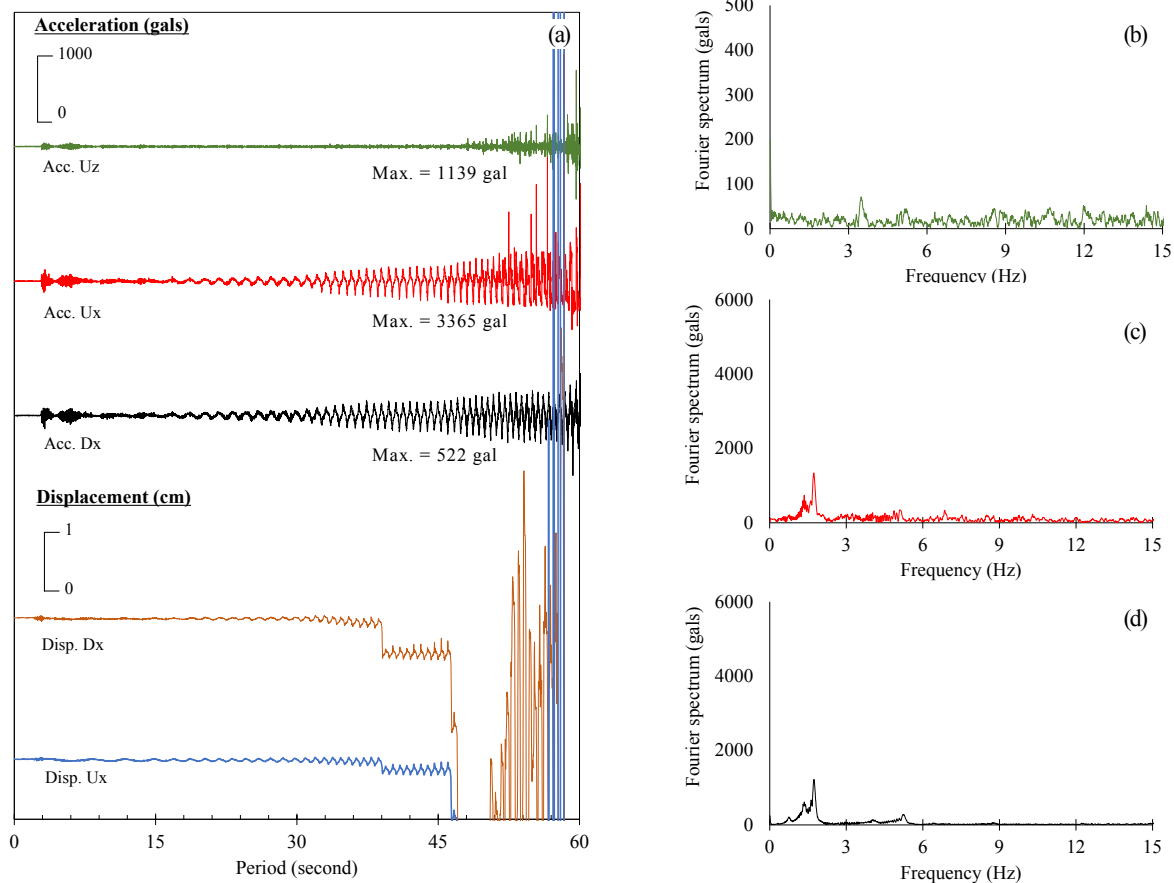


図-10 加速度とブロック変位 (連続板なしの場合, (a):加速度, 変位の経時変化, (b), (c), (d):それぞれ, Acc. Uz, Acc. Ux, Acc. Dx のフーリエスペクトル)

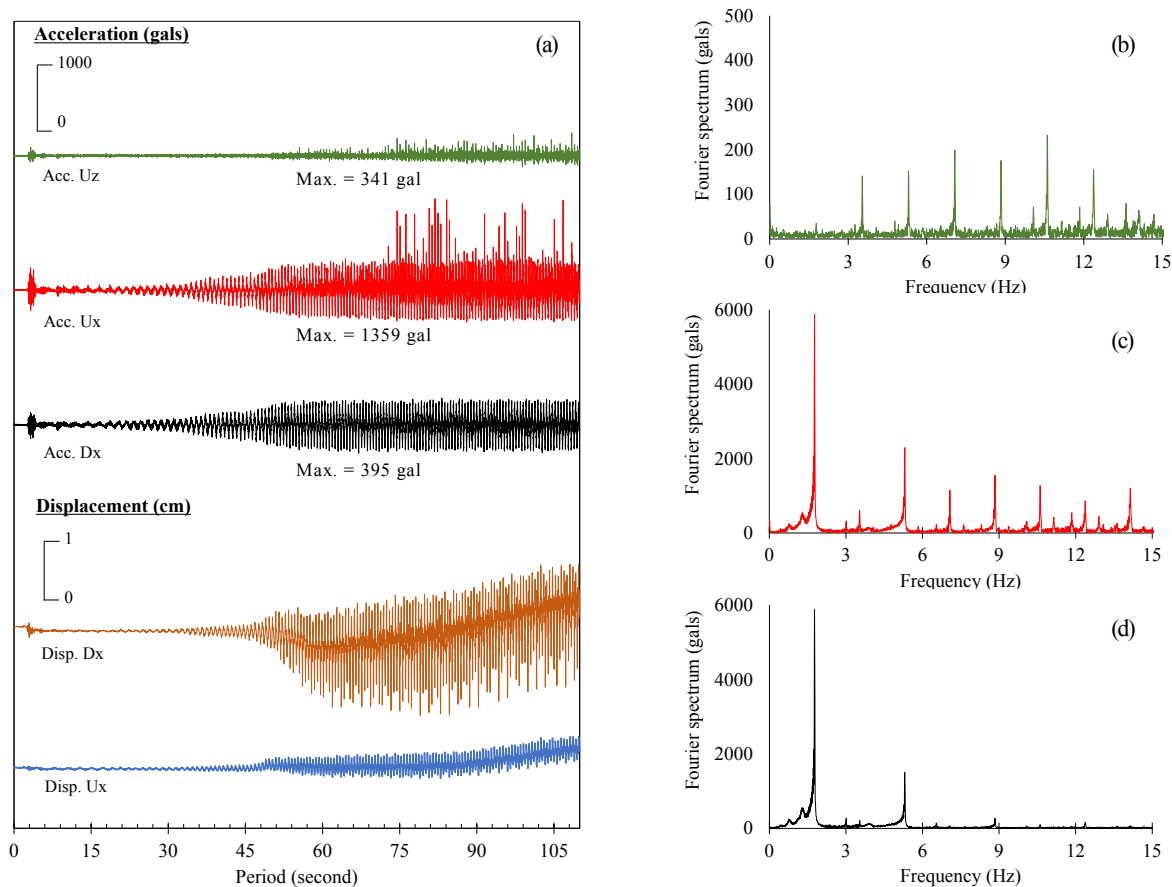


図-11 加速度とブロック変位 (3 mm 連続板ありの場合, (a):加速度, 変位の経時変化, (b), (c), (d):それぞれ, Acc. Uz, Acc. Ux, Acc. Dx のフーリエスペクトル)

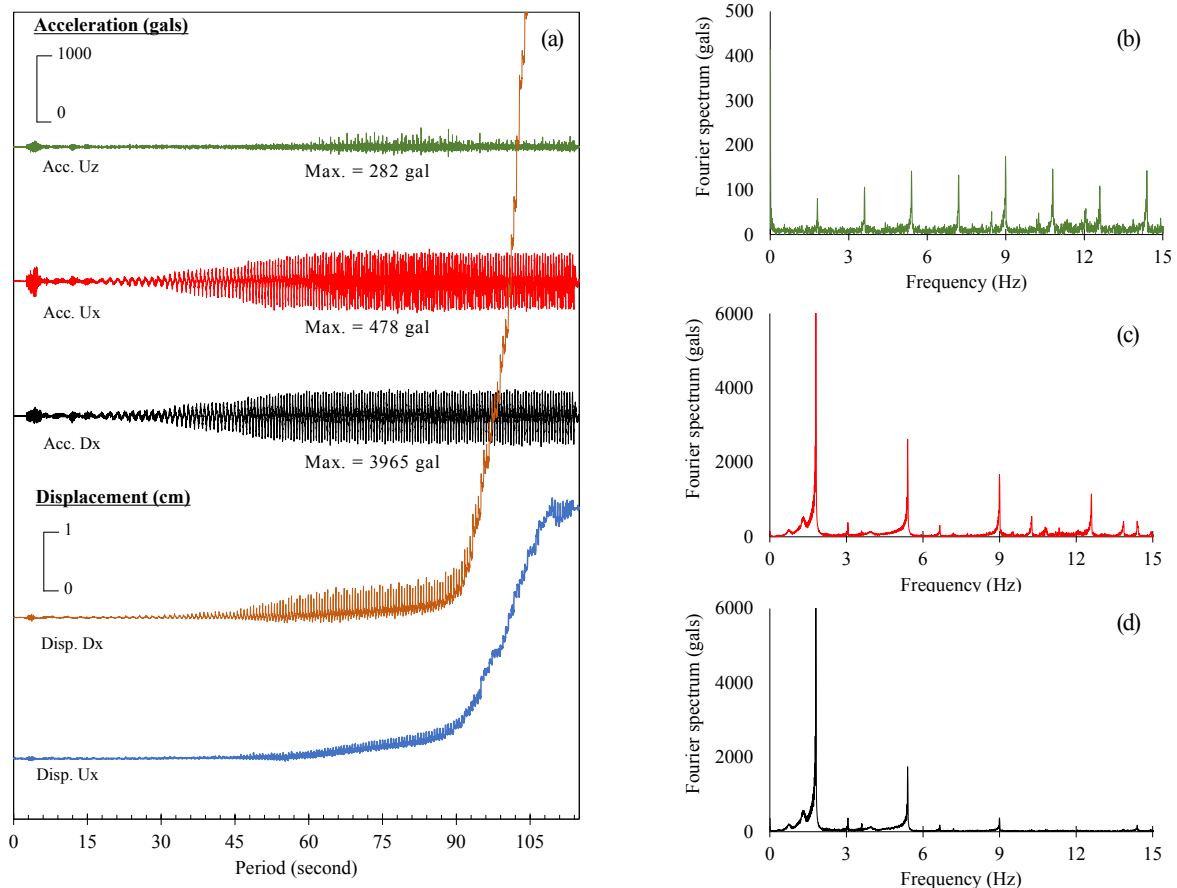


図-12 加速度とブロック変位 (19 mm連続板ありの場合、(a):加速度、変位の経時変化、(b), (c), (d):それぞれ、Acc. Uz, Acc. Ux, Acc. Dxのフーリエスペクトル)

次に、ブロックの転倒モードとすべりモードの発生時刻を得るために、これらを同時に計測するためのモデル実験を行った。具体的には、振動台の一部に長手方向にブロックを立て、同時に、2つのブロックを重ねたモデルを作成し、繰り返し振動を与えた(図-13を参照)。

図-13に振動実験の様子、図-14に振動台の加速度とブロック変位の関係を示す。これらの図より、長手方向に立てたブロックは、振動開始直後から横揺れ振動をはじめ、約55秒で転倒した。一方、ブロック間のすべりは約55秒あたりから始まり、70秒後には大きくずれる結果となった。

(3) 考察

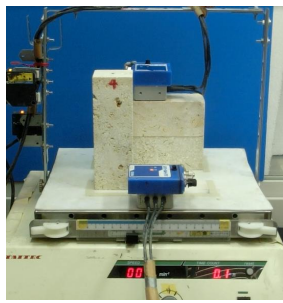
組積造建築物の振動倒壊は、ブロックの転倒モードとすべりモードが同時に発生することで引き起こされるものである。このとき、振動の初期段階ではブロックの転倒モードによる崩壊が主な要因として作用するが、振動後期になるとブロック間のすべりモードも卓越してくる(図-14を参照)。図-7, 8, 9より、このような石積み構造モデルの振動は、ブロック間に連続板を挿入することによって明らかに抑制される。ブロック頂部の加速度の非線形性の開始時期の変化は顕著でないが、連続板を挿入することで、構造物全体としての倒壊は抑制され、

非線形的な変形挙動が比較的長い時間持続する、という特徴を呈することになるのである。この時、ブロックの変形は、連続板の厚さが大きくなる程抑えられる傾向にあることは興味深い。また、特徴周波数の分布性状は連続板の有無で全く異なっており、オリジナルの組積造モデルに連続板を挿入することで、幾つかの長周期成分が卓越化ようになる(図-10, 11, 12)。このことから、組積造に連続板を挿入することで、組積造全体としての固有振動数が変化し、結果として反共し合うことで最終的な全体倒壊を遅らせていると考えられる。

以上のことから、組積造建築物を組み立てる際、均一な形の石やレンガの所々に、それよりも大きめの板を挿入することで、構造物全体としての耐振性能は確実に増加することが考えられる。なお、本研究では、連続板のサイズとブロックサイズの比や連続板の材質の影響については言及しておらず、今後検討すべき事項であることをここに記しておく。

4. おわりに

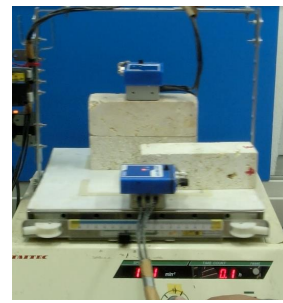
本研究では、伝統的な組積造建築物に焦点を当て、ネパール中部地震で大きな被害があった組積造構造物を比



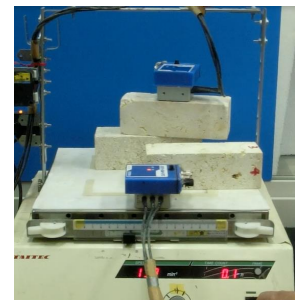
(a) Initial



(b) 45 second



(c) 60 second



(d) 72 second

図-13 転倒モードとすべりモードの同時振動実験の様子

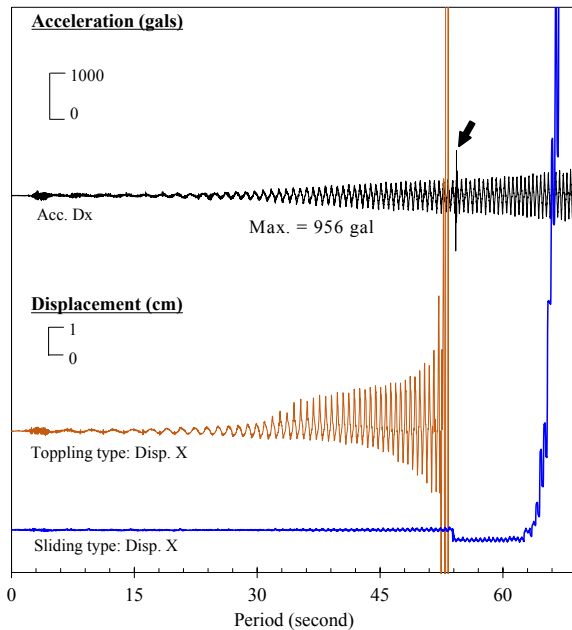


図-14 加速度とブロック変位の関係

較することで、現地で調達できる材料を用い、高度な技術を導入せず、高度な工学的知識を有する人材がいなくとも、施工できる組積造用の耐震工法について検討した。その結果、均一な形の石やレンガの所々に、それよりも大きめの板や石を挿入することで、構造物全体としての耐振性能は確実に増加することが考えられた。この連続梁付組積造は、伝統的な組積造建築物で多く見られるものであり、古からの経験知の偉大な産物であると言えよう。

連続梁の材質の違いが構造物全体の振動挙動に及ぼす影響、石やレンガの積み方の違いと振動特性の関連性、組積造の隅角部における振動挙動等、本研究における課題は多いが、特に、ネパール山岳部における組積造構造物の緊急的な耐震補強技術のひとつとして、提案したい。

謝辞：本研究は、土木学会ネパール地震緊急被害調査団（本隊）の調査を通して得られた情報を元に実施したものである。関係各位に感謝の意を表す。また、各種実験では琉球大学工学部環境建設工学科の岩崎竜馬氏に助力頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Ömer AYDAN and Resat ULUSAY: A quick report on the 2015 Gorkha (Nepal) earthquake and its geo-engineering aspects, http://www.iaeg.info/wp-content/uploads/QuickReport_2015NepalEarthquake_Aydan_Ulusay_IAEG.pdf
- 2) Roger Bilham: Earthquakes in India and the Himalaya: tectonics, geodesy and history, Vol. 47(2-3), pp. 839-858, 2004.
- 3) Strong-Motion Data, www.strongmotioncenter.org/
- 4) Earthquake mechanism, <http://earthquake.usgs.gov/>
- 5) 古川愛子, 清野純史, 谷口仁士, 鈴木祥之, 土岐憲三, 辰巳雅俊, H.R. Parajuli: ネパール・カトマンズにおける歴史的組積造建造物群の構造分類と地震リスク評価, 歴史年防災論文集, Vol. 7, 2013.
- 6) Paola MAYORCA and Kimiro MEGURO: Proposal of an efficient technique for retrofitting unreinforced masonry dwellings, Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver B.C., Canada, Paper No.2431, 2004.
- 7) 櫻井光太郎, Navaratnarajah SATHIPARAN, 目黒公郎: PP-band 工法による不整形石積み組積造壁の耐震補強に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1, Vol. 65(1), pp.388-392, 2009.
- 8) 峠貴道, 後藤康明, 北野敦則, 城攻: RC 枠組礎石造壁体のせん断抵抗に対する柱断面形状および補強方法の影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, 2008.
- 9) Hiroshi IMAI: A study of disaster mitigation for non-engineered construction in developing countries: bridging the gap between experiments and practices, 三重大学博士論文, 2014.
- 10) Aydan, Ö., Ulusay, R., Kumsar, H. and Tuncay, E.: Site investigation and engineering evaluation of the Düzce-Bolu Earthquake of November 12., 1999. Turkish Earthquake Foundation, TDV/DR 09-51, p.220, 2000.
- 11) Hamada, M., Aydan, Ö, J. Kiyono: Damage to civil engineering structures. In A comprehensive Survey of the 26th January 2001 Earthquake (Mw 7.7) in the State of Gujarat, India. Report to Monbusho (Grant No. 12800019), 105-115, 2001.
- 12) Ulusay, R., Aydan, Ö., Erken, E., Kumsar, H., Tuncay, E., Kaya, Z.: Site Investigation and Engineering Evaluation of the Cay-Eber Earthquake of February 3, 2002. Turkish Earthquake Foundation, TDV/DR 012-79. pp.213, 2003.

- 13) Aydan, Ö., R. Ulusay, H. Kumsar, H. Sönmez, E. Tuncay: A site investigation of June 27, 1998 Adana-Ceyhan Earthquake. Turkish Earthquake Foundation, TDV/DR 99-003, 1999. structures through shaking table tests. Fifth National Conference on Earthquake Engineering, , Istanbul, Turkey, Paper No: AE-041(CD), 2003.
- 14) Aydan, Ö., Y. Ogura, M. Daido N. Tokashiki: A model study on the seismic response and stability of masonry (2015.9. ** 受付)

DAMAGE OF MASONRY DWELLINGS IN 2015 GORKHA EARTHQUAKE AND THEIR COUNTERMEASURE

Hitoshi MATSUBARA, Sho SAKIYAMA, Kosaburo HIROSE and Ömer AYDAN

More than a quarter of the Nepal's population have been affected by the 2015 Gorkha earthquake in Nepal. In particular, the earthquake caused great damages of the masonry dwellings, so that some measures would need to be taken quickly. In this work, to make a suggestion for earthquake-resist masonry dwellings, we focus on the traditional masonry techniques succeeded from ancient times, and compare characteristics of the traditional cases with Nepal's cases. As a result, the traditional cases of masonry with some beams were robust resistance than Nepal's cases. In addition, we conducted some vibration experiments in order to obtain dynamical characteristics of the traditional masonry structures.