

2015年ネパール ゴルカ地震で被災した塔状寺院の修復

Restoration of two multi-tier pagodas hit by the 2015 Gorkha earthquake in Nepal

信州大学・工学部建築学科・助教 遠藤 洋平

(研究計画ないし研究手法の概略)

概要: 本研究では、世界遺産パタン市歴史地区にある塔状寺院(パゴダ)、Kumbeshwar temple(クンベルシャー寺院)の修復計画への利用を目的とした耐震解析を行った。クンベルシャー寺院は2015年ゴルカ地震で大きな被害を受けた(Figure 1)。被害を見ると、耐震的に非常に脆弱であると言える。構造物の脆弱性は主に組積壁の強度の低さから来る。一方で組積壁は内部で木造梁で繋がれている。Figure 1bはクンベルシャー寺院内部を見上げた画像である。これらの梁の組積造壁への構造的寄与を把握することで、より正確に耐震強度を推測することが出来る。上記を踏まえて本研究は2段階からなる。第1段階として、この木造梁と組積壁の間の摩擦挙動を把握した。第2段階として、クンベルシャー寺院の耐震解析を行った。



Figure 1 – Kumbeshwar temple in Patan, Nepal damaged/collapsed after the Gorkha earthquake: (a) Kumbeshwar temple.

研究方法:

第1段階/ 本研究では木造梁と組積壁の摩擦挙動に注目した。レンガ、木材から小規模の試験体にせん断試験を行った。木造梁がパゴダ全体の挙動に及ぼす影響を考慮する必要性を申請者のこれまでの研究で指摘している[1] [2]。

第2段階/ TNO DIANA を使用し有限要素解析を行う。本研究では第1段階で行った実験結果を元に、過去に作られたモデルに改良を加えた。新しいモデルを使用し、クンベルシャー寺院の耐震強度を明らかにした。

参考文献

- [1] Endo Y, Hanazato T (2018) Seismic assessment of a masonry multi-tier pagoda hit by the Nepal 2015 earthquake. *International Journal of Architectural Heritage*, 18 pages
- [2] Endo Y, Hanazato T (2018) Seismic behaviour of a historic five-tiered pagoda in Nepal. SAHC2018 11th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions. Cusco, Peru, 8 pages

(実験調査によって得られた新しい知見)

第1段階においてはネパールのパゴダに使用されているものと似た材料(レンガ、泥目地、木材)を。国内で探すことから始めた。入手した土(荒木田土)の粒子サイズにより、ネパールの文化財に使用される材料と似ていることを確認した(Figure 2a)。レンガは複数のタイプを購入し、ネパールの文化財に使用されるものと似た比重、表面のざらつきのもの(ベルギーレンガ)を使用することとした。またセランガンバツ(sal)と呼ばれるネパールにて構造材料として一般的によく使われる木材を取り寄せ、圧縮、引っ張りなどの基本的な材料特性を調べた(Figure 2b)。ここまでの実験結果の一部はすでに発表されている(発表論文参照: Endo et al. 2020a)。

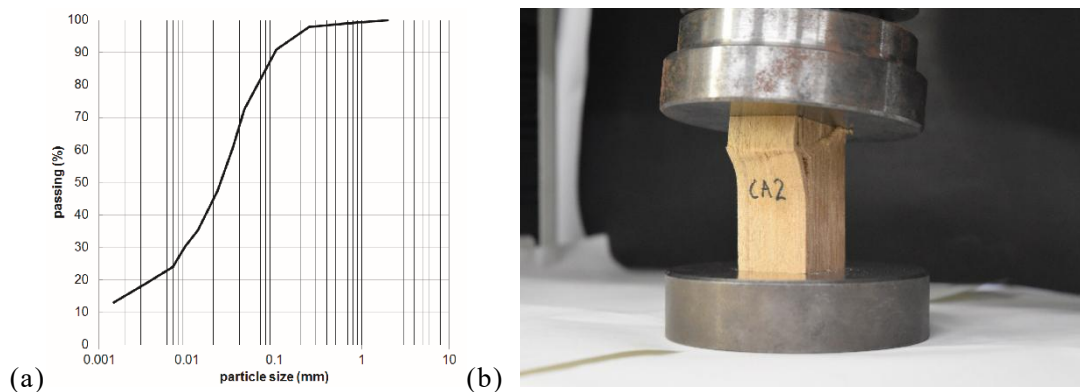


Figure 2 – Characterisation of materials: (a) Particle size distribution curve of the earthen mortar and (b) compression test of sal timber.

せん断試験では、Figure 3a に示す泥目地組積体・木材からなる小規模の試験体を作成した。同試験は、欧州の基準 Eurocode にあるレンガ・目地間の摩擦挙動を調べる手法を応用したものである。異なる予圧をかけた試験体を用意することにより、Figure 3b にあるように摩擦角度、付着力の値を明らかにすることに成功した。

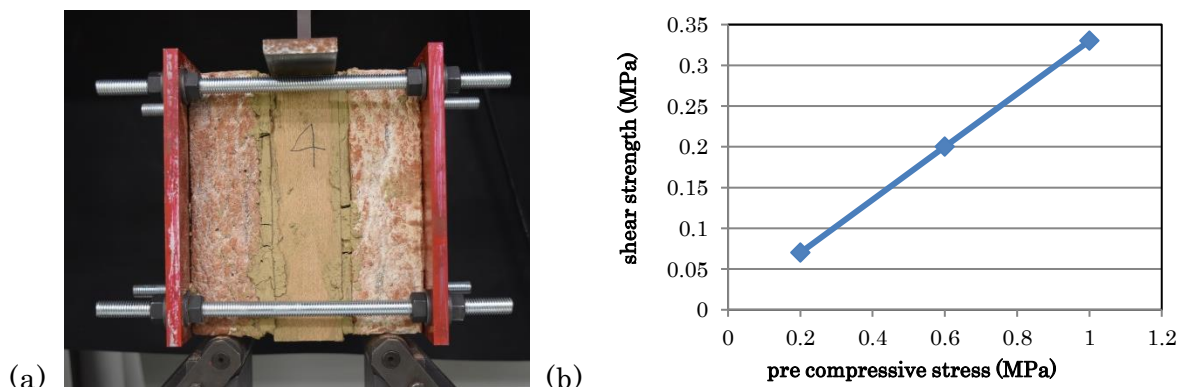


Figure 3 – Initial shear strength test: (a) failure of a specimen and (b) normal and shear stress relation.

上述の値を考慮し有限要素法にて、クンベルシャー寺院の非線形静的・動的解析を行った。木梁と組積壁間が固定されたモデル(RiC model)と、木梁と組積壁間の摩擦挙動を考慮したモデル(FI model)に静的及び動的に水平地震力をかけた。静的な解析においては RiC model は FI model と比較して大幅に耐力を大きく見積もっている(Figure 4)。また損害状況

を比較すると、摩擦挙動を考慮した際により現実的な結果が得られることがわかった (Figure 5)。ここまでの研究成果(実験・解析)は国際会議(Structural Analysis of Historical Constructions)にて発表する(発表論文参照: Endo et al. 2020b)。2年おきに開かれる同会議は文化財の保存修復の分野において最も大規模なものである。毎回 500 人前後が参加する。2020 年 9 月にバルセロナにて行われる。また 2022 年は同会議を報告者が主催者となり京都で開催する予定である。

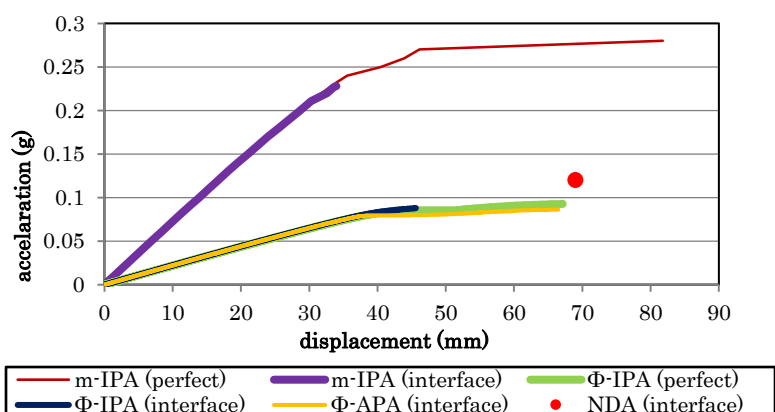


Figure 4 – Seismic analyses of Kumbeshwar temple: displacement-base shear acceleration relations.

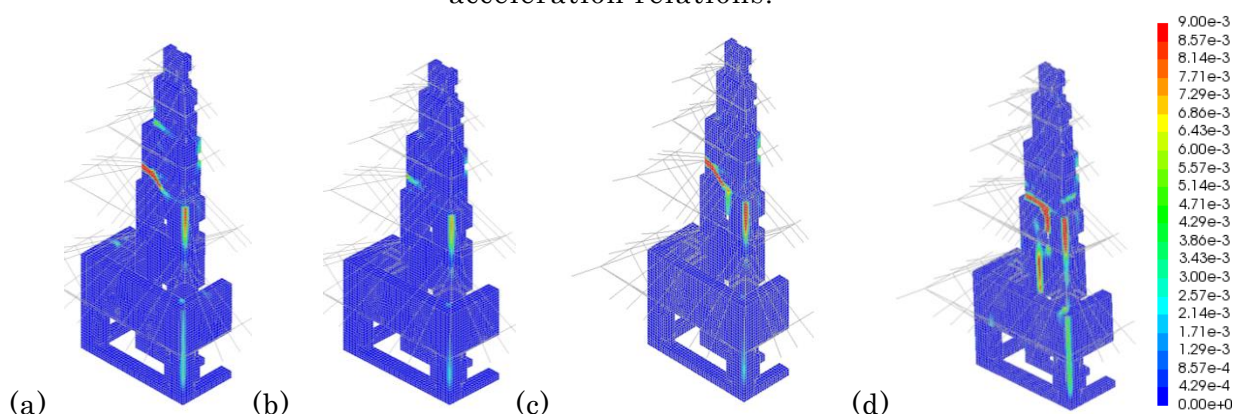


Figure 5 – Tensile strain distributions close to the ultimate state: m-IPA of RiC model of Φ-IPA of RiC model (a), of FI model (b), APA of FI model (c) and NDA of FI model (d).

(今後の研究展望)

今年度は試験に適切な材料の入手のため、時間と費用が大幅に割かれた。その結果当初の実験計画を全て遂行することはできなかった。しかし当初の予定通り 2 編の研究論文を発表することが出来た。2021 年度は当初の予定通り、今年度使用した材料により大きな規模の試験体を作成し、木梁の繰り返し載荷試験を行う。サステナビリティの観点から土材料への興味は近年高まっており、さらにゴルカ地震で被害を受けたネパールの文化財に関する研究は依然として注目が高いテーマである。これらを考慮し来年度以降の研究成果は impact factor の高い著名な海外学術雑誌(construction and building materials, engineering structures など)に投稿する。また当実験結果を利用し、より詳細なパゴダの耐震解析を行う。その内容は、同様に海外学術雑誌(engineering failure analysis, international journal of architectural heritage)に投稿する予定である。

(発 表 論 文)

Endo Y, Yamaguchi K, Hanazato T and Mishra C (2020a). Characterisation of mechanical behaviour of masonry composed of fired bricks and earthen mortar. *Engineering Failure Analysis*, doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104280

Endo Y, Kondo Y, Iwanami G (2020b) Adaptative pushover analyses of a heritage structure: application to a multi-tiered pagoda temple, 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC 2020, Barcelon Spain, September 16-18 (10 pages)