

地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS)

研究課題別中間評価報告書

1. 研究課題名

ブータンにおける組積造建築の地震リスク評価と減災技術の開発 (2017年4月～2022年4月)

2. 研究代表者

1. 日本側研究代表者：青木 孝義 (名古屋市立大学 大学院工学芸術研究科 教授)
2. 相手国側研究代表者：Jigme Thinlye Namgyal (内務文化省 防災管理局 局長)

3. 研究概要

ブータンでは、首都をはじめとする一部の市街地で地上5階建てまでの鉄筋コンクリート建築と、2階建てまでの煉瓦建築が多くみられるほか、ほとんどの民家と公共施設が版築あるいは割石積みで建てられている。本研究課題では、ブータンにおける地震観測網の充実やトレンチ調査等により、当地の地震研究により得られた地震ハザード評価の結果をふまえ、ブータンの伝統建築である組積造建築（版築ならびに石積構造）の耐震化指針と減災教育マニュアルを作成し、技術者・施工者向けの講習や住民教育を通して、国民の防災意識の向上に貢献し、地震に強い地域づくりを支援する。このプロジェクトで開発される技術は、従来の土や石を建築材料とした脆弱な構造の住宅が崩壊することによって発生する災害を克服するモデルとして、他の国々にも普及を目指す。本研究課題は以下の3つの研究題目で構成される。

研究題目1：地震リスク評価（地震観測強化、震度観測強化、活断層マップの作成、地震増幅度マップの作成、ハザードマップの作成）

研究題目2：耐震化技術の開発（常時微動計測、材料実験、実大試験体静的・動的実験、構造解析、耐震診断法、耐震補強キットの開発）

研究題目3：耐震化技術の普及

4. 評価結果

総合評価：A（所期の計画と同等の取組みが行われている）

現在のプロジェクトの進捗はほぼ予定通りであり、地震ハザードの評価、耐震化指針のための構造実験、減災教育のためのバーチャルリアリティ環境の構築が進んでいることが評価できる。

地震ハザード評価に関しては、平成21年度採択のSATREPS防災フィリピン課題の研究成果である震度計が実装されつつある。日本側研究者の指導により相手国研究機関が震度計を製作することが可能となっており、製作から維持メンテナンスまですべて相手国機関が独自に運用できるよう技術移転が図られている。また、ブータン北部標高4000mのヒマラヤ山麓での高感度地震計の設置を共同で実施しているほか、南部の主要なヒマラヤ活断層の調査やトレンチ調査、ドロー

ンを活用した地形解析により、当地の活断層の理解が図られている。このように、本研究項目が地震科学の発展に貢献することが期待できる。

耐震化技術の開発に関しては、今後の実装を強く意識して、現地で調達可能で低コストの材料や部材をベースに技術開発を進める方針となっていることは評価できる。しかし、科学技術に大きく寄与する先進的な研究成果が創出される余地は少ないと思われ、いかに適正技術の追求を科学技術への貢献につなげるかアウトプットの工夫が必要であろう。また、相手国の文化財保護の観点で、より建造物の外観にふさわしい素材を使用した耐震化技術の実現可能性も綿密に評価していく必要がある。そのためには、相手国研究機関とのコミュニケーションを更に図り、ニーズをより取り入れた研究方針とすることが望ましい。

耐震化技術の開発においては、実験用地の決定と承認に時間を要したものの、実験施設が完成するに至り、これまで数回の静的載荷実大実験が実施された。また、一軸振動台も設置され、これまで1/6スケールの構造体の加振実験が行われた。後者においては、スケールを小規模としたことで、短納期低コストで現地建設業者が構造体を施工することが可能となった。このことは、耐震化データの精緻化や再現性確認のための試験を多数実施しうる状況が整うことにつながり、JICAの経費のみならず、相手国機関が独自に予算を確保しつつ試験を今後追加実施することを期待したい。

耐震化技術、地震ハザードのそれぞれにて、両国の研究者が連携してプロジェクトを推進している様子が確認された一方で、相手国研究代表機関である防災管理局の取り組みやプロジェクトへの関与が不足していると思受けられる。バーチャルリアリティの開発への協力はあるものの、本来ならば、研究成果の統合化に向けた議論や社会実装に向けたシナリオの具体化が求められるところである。プロジェクトの体制として、防災管理局本来のミッションに協力する日本人研究者の配置が不足しており、防災に資する取り組みを強化できるような運営体制の改善が必要であろう。

4-1. 国際共同研究の進捗状況について

各研究項目が順調に進捗していると評価できる。わが国の先進的な地震ハザード評価、耐震建築技術に比べると、全般的にレベルは低いものの、ブータンの現状に照らせれば重要度やインパクトは高いと言える。

組積造建築の耐震性評価については、当初の準備に遅れがみられたものの、実大実験等が始まり予定通りの進捗となった。振動実験についてはスケールダウンしたことでかえって小回りが利き、再現実験など進捗を加速させる素地が整った。実験結果も悪くなく、手戻りや再検討することなく進捗するものと思われる。石積、版築構造の耐震性評価と耐震補強方法が確立されれば、他国の同種建築物にも適用できある程度のインパクトは期待できる。

地震防災としての科学技術的インパクトよりも、キャパシティの低い地域における伝統的建造物を含む構造物や住居をいかに保全・補強していくかといった課題は、従来の耐震工学とは異なる新しいアプローチで考える必要がある。その意味では、振動実験のような視覚に訴える手法を

用いること、安価で簡単な補強で強度を上げることが可能であることを示すなど、様々な工夫がみられる。

地震ハザード評価においては、当初は限定的にならざるを得ないと想定された活断層分布調査において、空中写真の立体視による活断層評価の専門家の協力を得たことから、全国規模で活断層分布図の作成が進み、望ましい展開となっている。ただし、高感度地震観測によるブータン国内の地震活動度の評価が、地震観測データのオンライン伝送の不調により想定通り進んでいない。通信回線の変更等、今後の改善に期待したい。

4-2. 国際共同研究の実施体制について

各研究グループ内はそれぞれのミッションに向かってよくまとまっている。個々の研究者がプロジェクトに取り組む意欲は優れていると見受けられるが、相手国のプロジェクト参加者は限られており、防災減災に関わるより多くの技術者を取り込む必要性があろう。たとえば耐震化技術では、開発した技術体系の実用性に関する評価や助言を得るため、相手国の施工業者をプロジェクトにさらにコミットさせることも有益である。

それぞれの研究成果を総合化し、最終目標にまとめ上げるという観点からは、研究代表者のリーダーシップはやや物足りないところがある。この点は相手国の研究体制においても同様である。また、研究成果を今後まとめていく上で、それぞれのグループが各自の研究題目に専念してしまっていることが懸念材料である。それぞれの研究者が自分の担当テーマの学術的な価値を高めるだけでなく、研究表者がそれらをうまくコントロールしながら、研究成果を統合化することをより意識して全体をとりまとめることに留意する必要がある。

研究費は概ね適切に利用されており、各研究グループで効率的に効果的に執行していると言える。相手国への機材供与においては、経費の制約からスペックを見直し、たとえば振動台はスケールダウンしたものを調達した。その結果、多くの再現実験を今後実施しうる素地を整えることにつながった。ただし、プロジェクト終了後に日本人研究者が離れた場合に、ブータン人の技術者が自立的に高度な操作を必要とする機材の使用を継続できるのか不明であり、今後の技術移転の取り組みを確実に実施する必要がある。

4-3. 科学技術の発展と今後の研究について

各研究グループ内での個別研究の方向性は適切であり、実施体制も整っている。ブータンの伝統的組積造建築を対象とした耐震化技術という研究開発テーマにおいて、世界水準の成果を創出する見込みは高く、類似の住居環境にある地域に与えるインパクトは高いと思われる。

歴史的建造物などの文化財に対する補強方法においては、セメントモルタル等による被覆はどこにでもある補強方法であるため、科学技術的な価値やイノベーションを遡及する研究成果を創出することが強く求められる。その一方で、その技術がニーズに対して適正であるのか、相手国のステークホルダーと議論を重ねる必要がある。また、実用性を考慮すれば、材料自体の劣化による強度の低下等も研究対象に入れるなど、この地域に特有な材料工学の展開の視点が必要とな

る。

日本では、版築や石積などは多くの文化財でも見られる構造であり、世界遺産に登録されているような重要な建造物の基礎、寺社なども含まれる。日本とは異なる自然資源を用いた技術の高度化が目指されると、ブータン周辺地域の同様な技術を必要とする国への技術移転が見込まれる。

リスクマップ、耐震ガイドライン、教育コンテンツのアウトプットは間違いなく出ると思うが、それぞれがうまく関連して相乗効果が創出され、ブータン国の民間建築構造物の耐震化が進むまでには至らないことが懸念される。各グループの成果を防災の観点から総合化し、実効性のある社会実装につなげられるかが今後の課題となるであろう。

実証実験によって相手国における技術への理解を促進するなど工夫を図っているが、現段階で得られている技術を普及させていくためにはプロジェクト終了後を見据えたさらなる工夫が必要となろう。

また、本プロジェクトでは、全般的に若手研究者が少ないながらも、たとえばVR技法を使った防災教育では若手研究者や学生が主体となって研究開発を進めており、期待できるところもある。SATREPS において若手研究者に必要なことは、単にこれまでの方法に則って研究を進めるのではなく、新しい考え方、方法で研究を独自に進めていける能力であり、また、海外の研究者と協調していく能力である。本プロジェクトの場合、最新の耐震技術の開発を求められているわけではなく、この地域にあった技術の開発が重要であることから、本研究課題の特質や進め方など相手国研究者と綿密に議論しつつ新しい分野を切り開いてく力を養っていくことが望まれる。

また、社会実装としての防災減災の実現に向けて、日本とは経済格差の大きな地域、文化的基盤が異なる地域での減災を考えるため、人文・社会科学の専門家をプロジェクトに加えることも検討すべきであろう。

4-4. 持続的研究活動等への貢献の見込みについて

ブータンは小さな国であることから、相手側研究機関や研究者に多くは望めないのではないかとこの恐れがプロジェクト発足当初にはあったが、中間評価段階では人的交流が進み、相手側の自立性・自主性が顕著に表れ始めた。残りの期間でさらなる充実が期待できる。より広い視野での防災管理の中に伝統建築の保全や補強を位置付けつつ、両国の研究者が対等に交流することが今後も重要となる。また、相手国は学術的・人材的な基盤が必ずしも十分とは言えないが、日本への留学、もしくは、ブータンから近いアジアの研究拠点などへの留学支援がなされることが望まれる。さらに、このプロジェクトの柱となっている耐震化技術を含む工学的な視点、地震にかかわる理学的な視点のほか、防災教育の普及については社会科学的な視点が必要となることを、留学を含めた人的交流のキーポイントとして捉えることが望まれる。

研究成果の持続的な発展の可能性については、地震災害危険度に関する成果の普及、建物の耐震性向上に向けた政策、および住民の意識の向上などが進む見込みがかなり高いと期待できる。

地震ハザードに関しては、活断層調査やドローンを用いた観測等で得られた結果を様々な成果物に展開していくことが期待される。耐震化技術は、安価な耐震技術を体系化し、普及させる方

法がみつければ、当地の脆弱性への対応策に貢献することにつながると考えられる。ただし現段階では、通常の耐震実験や強度の理解に留まっており、今後は文化財保護やこの地域の経年劣化した材料の特性把握といった、この地域にしかない建築物に根差した新しい研究に繋がっていくようさらなる工夫が求められる。

5. 今後の課題・今後の研究者に対する要望事項

- ・この課題の難しいところは、一方では組積造建築を主体とする美しいブータン集落の保存、他方ではそれ故に脆弱で耐震性に劣ることから地震災害を受けやすいという2面性である。こうした文化面と生活実用面を両立させるには、どのような方策が必要かをブータン側に常に問いかける必要があるのではなかろうか。ブータン側の考え方を取り入れつつ研究開発成果の社会実装を目指していただきたい。
- ・今回の研究開発成果を受けブータン国内の民間建築の耐震化が進展するのか、疑問の余地がある。現状想定しているリスクマップのレベルでは開発した耐震化技術と統合し、社会実装の道筋をつけることさえも、困難ではなかろうか。むしろ、DOCが政策とするであろう文化遺産の保護を重視し、たとえば「このエリアのこの建築物だけは文化遺産として残しておく。そのための耐震化は国費で賄う」といった意思決定ができる道筋をつけることを目指した方がよいと思われる。これにより、成果としては小さいが確実な成功事例を出すことが持続性の面でも有用かもしれない。
- ・研究開発成果を相手側の政策に反映するには時間が必要であるため、プロジェクト終了後も継続して研究活動が実施できる体制を整えておく必要がある。相手側のリーダーを育成することも重要であるが、それと同時に、日本の民間企業などのリソースを活用し易い仕組みにしておくなど、工夫の余地が残されているのではなかろうか。
- ・メインの補強方法となる金網メッシュ+モルタルセメントについては、厚さが20cmと薄く、その品質が作業員（施工者）の力量に大きく左右される。補強技術の仕様だけを規定するのではなく、施工法についても詳細に記述し複数の管理項目を設けることが必須であろう。
- ・現地土を使用したマッドセメントをあきらめ、モルタルセメントを採用したとのことだが、相手国の文化的景観に重要な素地の色合いを損なうモルタルセメントでよいのか、相手側と良く話し合って欲しい。街並みの色合いを再現するのにより好適なマッドセメントについて、技術の実用可能性や評価をさらに詰める余地があると思われ、それこそが、技術で課題を解決し、技術で現地ニーズを満足させることにつながるのではなかろうか。
- ・補強方法の金網メッシュ+モルタルセメントの施工費用は単位面積あたりの金額としては是非算出してほしい。建造物のサイズにより金額が変わりうるため、普及の道筋をたてる方針が大きく変わることも予想される。

以上

成果目標シート

研究課題名	ブータンにおける組積造建築の地震リスク評価と減災技術の開発プロジェクト
研究代表者名 (所属機関)	青木 孝義 (名古屋市立大学・大学院芸術工学研究科)
研究期間	H28採択(平成28年10月1日～令和3年3月31日)
相手国名/主要相手国研究機関	ブータン王国/内務文化省災害管理局、内務文化省文化局、経済省地質鉱山局、公共事業省技術支援局

付随的成果

日本政府、社会、産業への貢献	<ul style="list-style-type: none"> 開発途上国における脆弱住宅の減災への活用 日本企業による成果の事業化
科学技術の発展	<ul style="list-style-type: none"> 版築・石積建築の構造特性・耐震性能の解明と耐震診断、補強技術の開発 ブータンヒマラヤのサイズモテクトニクス解明
知財の獲得、国際標準化の推進、生物資源へのアクセス等	<ul style="list-style-type: none"> 版築・石積建築の実験データ 版築・石積建築の構造解析手法と耐震診断法 版築・石積建築の補強技術 震度観測システム
世界で活躍できる日本人人材の育成	<ul style="list-style-type: none"> 国際的に活躍可能な日本側の若手研究者の育成(国際会議への指導力、レビュー付雑誌への論文掲載など)
技術及び人的ネットワークの構築	<ul style="list-style-type: none"> ブータン及び日本におけるワークショップ開催 修士課程、博士課程留学生の受け入れと短期研修生の受け入れ
成果物(提言書、論文、プログラム、マニュアル、データなど)	<ul style="list-style-type: none"> 耐震診断法マニュアル 版築・石積建築の耐震化指針 技術者講習・住民教育マニュアル 地震動予測地図

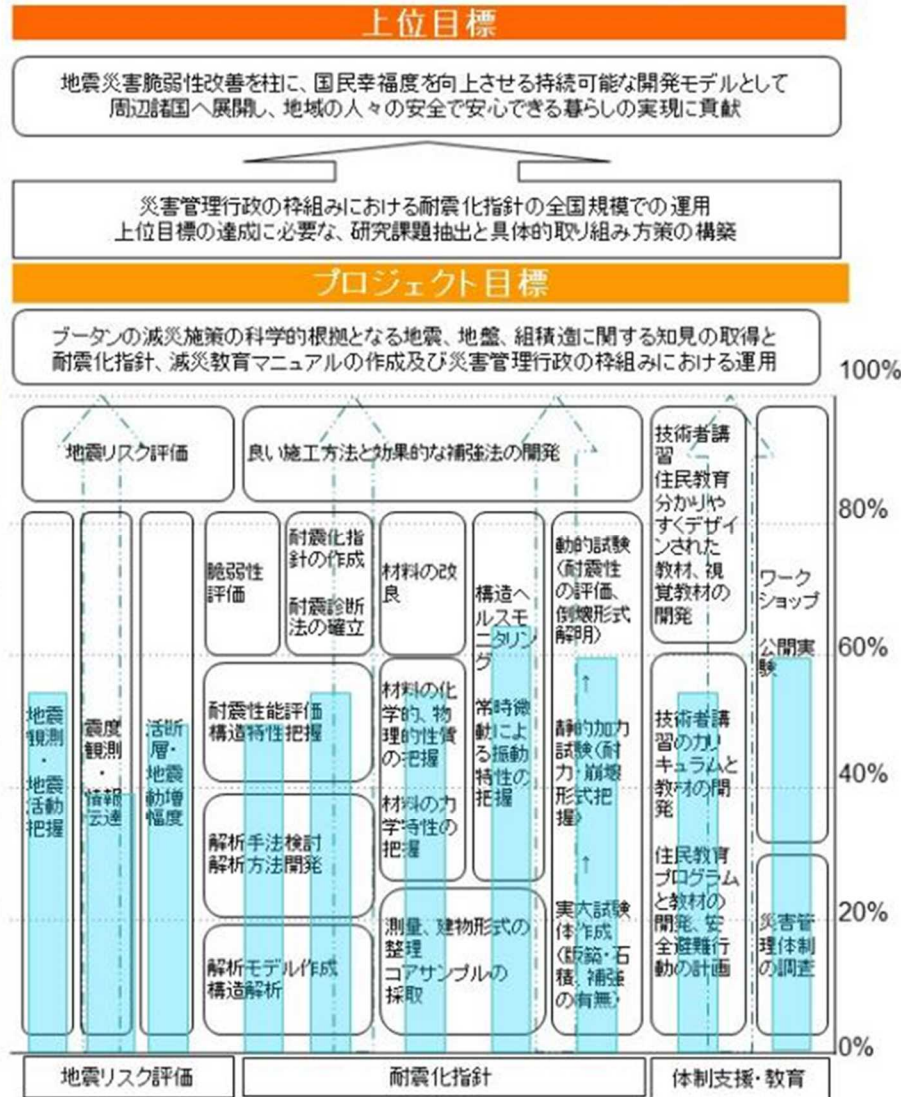


図1. 成果目標シートと達成状況 (2020年2月時点)