

ネパールにおけるノンエンジニアド住宅の構造性能向上に対する投資対効果の検証 Cost-benefit analysis on structural performance improvement of non-engineered houses in Nepal

迫田恵子・○西嶋一欽

Keiko SAKODA, ○Kazuyoshi NISHIJIMA

This research aims at proposing a methodology to evaluate cost-benefit of investments for improving structural safety of non-engineered houses using the concepts of structural reliability and Life Quality Index (LQI), a social indicator that assess the efficiency of safety measures for the life safety and quality. The proposed methodology is an integrated approach of engineering and sociology. It consists of two steps: (i) quantifying anticipated structural safety level by safety measures based on the structural reliability concept; and (ii) assessing the social benefits out of planned investments for safety measures, using LQI. As a case study, the proposed approach is applied to evaluate the cost-benefit of the safety measures guided in the Minimum Requirements (MR), a set of technical guidance for the post-earthquake housing reconstruction in Nepal. The result showed that the safety measures indicated in MR worth implementing over the estimated cost, considering the anticipated increase of the life expectancy.

1. 背景・課題

開発途上国で続くノンエンジニアド住宅¹の地震被害に対して、各国政府は住宅再建に際し、住民らが遵守すべき技術指針を策定してきた（例：インドネシアのキーリクワイアメント²）。しかしこれまで策定された技術指針は、目標とする安全性を明示的に設定していない場合や、災害後の時間的・経済的制約により、目標とする安全性の妥当性が工学的に検証されていない場合がある。従って、技術指針を遵守した場合の住宅の安全性および投資規模の妥当性が明らかでない。

2. 研究目的

本研究の目的は、災害後のノンエンジニアド住宅再建に際し、技術指針が求める安全性及び構造性能向上に関する投資対効果の評価手法を提案することである。具体的には、特定の技術指針に従い設計されたプロトタイプを対象に、確定論的構造解析及び構造信頼性解析を行い、その結果をLife Quality Index (LQI)³に基づく安全性に対する投資基準原則に適用することで、社会・経済的制約を踏まえた安全性への投資対効果の妥当性を評価する方法論を提案する。方法論の妥当性を検

証するため、本研究では、ネパール地震（2015）後の住宅再建事業にて作成された技術指針であるミニマム・リクワイアメント（以下、MR と称す）を対象とした。

3. 提案手法に沿った MR の評価

本研究で提案する手法およびそれに沿った MR の評価方法を以下に示す。

- (i) 構造信頼性理論に基づく MR の安全性評価
 - ①MR に基づくプロトタイプ住宅の設計
 - ②ハザードモデルの構築およびハザード評価
 - ③FEM 解析による破壊判定基準の設定
 - ④FEM 解析結果に基づく脆弱性評価
 - ⑤安全限界に対する破壊確率の算定
- (ii) LQI に基づく安全性への投資対効果の評価
 - ⑥MR の求める安全性に対するネパールの経済・生命指標を踏まえた投資対効果の評価

4. 評価結果

- (i) 構造信頼性理論に基づく MR の安全性評価
 - ①MR に基づくプロトタイプ住宅の設計

ネパール政府作成の再建住宅カタログ^[4]掲載の最も簡素なデザイン SMC-1.1（石造・セメントモルタル）を模したデザインとし、構造は石造・泥モルタルとして代替した。
 - ②ハザードモデルの構築および評価

ネパールの National Building Code 策定のために実施された確率論的ハザード評価^[5]で求められた、地震動強度および超過確率の関係を利用した。
 - ③FEM 解析による破壊判定基準の設定

¹ 工学的知見や専門家の関与なく、建設される住宅を指す。^[1]

² ジャワ島中部地震(2006)後に作成された技術指針。^[2]

³ 良好な健康・経済状態で過ごせる人生の長さを反映した社会的指標であり、出生時平均余命及び、一人当たり GDP によって成る。リスク対策がもたらす便益評価に利用することができる。^{[3][8]}

代表的被害例に基づき、面内・面外崩壊を想定し、壁ごとに、想定地震動に応じた荷重が泥モルタルのせん断・引張耐力を上回る面積の割合が30%を超過した場合、「破壊」と判定した。

④FEM 解析に基づく脆弱性評価

以下の条件下、FEM 解析を行った。

- 地震荷重：確率論的ハザード評価^[5]に基づき算出された地震動の強さ 9 パターン
- 地震動入力方向：X, Y の 2 方向
- 泥モルタルの材料諸元：引張・せん断強度それぞれ 3 パターン（文献調査^{[6][7]}）

表 1：FEM 解析に基づく破壊判定結果

RP (yrs)	Mud mortar strength (N/mm ²)									
	S	0.05			0.10			0.15		
		T	0.003	0.004	0.005	0.003	0.004	0.005	0.003	0.004
10	0.09	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF
30	0.20	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF
50	0.26	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF
100	0.38	F	F	F	NF	NF	NF	NF	NF	NF
150	0.45	F	F	F	NF	NF	NF	NF	NF	NF
200	0.50	F	F	F	NF	NF	NF	NF	NF	NF
500	0.70	F	F	F	F	F	F	NF	NF	NF
1000	0.87	F	F	F	F	F	F	F	F	F
2000	1.00	F	F	F	F	F	F	F	F	F

RP: Return Period, BSC: Base Shear Coefficient

S: Shear strength, T: Tensile strength

⑤安全限界に対する破壊確率の算定

確率論的ハザード評価^[5]及び脆弱性評価(表 1)より、年破壊確率は $8.5 \times 10^{-3} \approx 10^{-2}$ と算出された。

(ii) LQI に基づく安全性への投資対効果の評価

⑥MR の求める安全性に対するネパールの経済・生命指標を踏まえた投資対効果の評価

投資対効果は LQI の式(1)により評価できる^[8]。

$$(-\Delta g) \leq \frac{g}{K} \frac{\Delta e}{e} \quad (1)$$

ここで $-\Delta g$ は構造性能向上への投資額 (MR により導入された補強材への投資分) を一人あたり年間投資額に換算した値、 g は一人あたり年間収入、 K は労働時間と余暇時間の割合を指し、 $K = w / (1 - w)$ と表す (w は労働時間)^[3]。 $\Delta e / e$ は構造性能向上による余命変化の割合を示し、構造性能向上による死亡率の変化 ΔM との関係 $\Delta e / e = 68.5 \Delta M$ と表せる⁴。

$-\Delta g$ は構造性能向上に必要な費用約 US\$1,400、耐用年数 30 年、平均世帯人数^[10]を考慮し、一人あたり初期投資額 US\$10 となる。 g は世帯支出額より US\$493 と換算した。一人年間労働時間 w は、55 年間、年 46 週間、週 42 時間労働する想定で算出した。 ΔM は⑤で導かれた破壊確率、住宅被害数と死亡者のデータ^[11]より、0.00014 と算出した⁵。これにより、式(1)は $10 \leq 22$ となり、MR が目指す構造性能向上は実施に値すると評価できる。

⁴ 係数 68.5 は年代別死亡率^[9]に基づき、生命表作成し算出した。

⁵ 地震による死亡者は建物の倒壊により死亡したと仮定し、調査結果^[11]に基づき、住宅一棟倒壊時の平均死亡率を算出した。また本研究では、無補強時の年破壊確率は暫定値を利用した。

5. 考察

本研究では破壊確率及び実際の地震動に照らし合わせた倒壊実被害件数の割合が一致していない。設定した破壊条件の精緻さの欠如及び従前の建物とモデル住宅の違いが理由として考えられる。今後これらを改善した解析の精度向上が必要である。

6. 結論

ノンエンジニアド住宅の技術指針が求める安全性について、投資対効果の妥当性を評価する方法論を提案した。またネパールの事例に方法論を適用した結果、技術指針が求める構造性能向上のための施策は投資対効果が高いことが分かった。

参考文献

- [1] UNESCO (2013). Guidelines for Earthquake Resistant Non-engineered Construction, pp. 8, 35.
- [2] The World Bank (2015). Building Regulation for Resilience, pp. 99.
- [3] J.S. Nathwani, N.C. Lind, M.D. Pandey (1997). Affordable Safety By Choice, pp. 55-67.
- [4] Ministry of Urban Development, Government of Nepal (2015). Design Catalogue for Reconstruction of Earthquake Resistant Houses
- [5] UNDP/UNCHS (1993). Seismic Hazard Mapping and Risk Assessment for Nepal
- [6] National Society for Earthquake Technology (2009). A Report on Assessment and Analysis of Existing Building for Pull Down Test
- [7] R.R. Parajuli and Kiyono (2015). Ground Motion Characteristics of the 2015 Gorkha Earthquake, Survey of Damage to Stone Masonry Structure and Structural Field Tests
- [8] M.D. Pandey, J.S. Nathwani (2004). Life quality index for the estimation of societal willingness-to-pay for safety, Structural Safety 26, pp. 181-199.
- [9] Central Bureau of Statistics, Government of Nepal (2003). Population Monograph of Nepal 2003, Volume 2, pp. 68.
- [10] Central Bureau of Statistics, Government of Nepal (2016). Annual Household Survey 2014/2015, pp. VII.
- [11] 日本建築学会 (2017). 2015 年ネパール・ゴルカ地震被害調査報告書, 7 章

謝辞

ノンエンジニアド住宅を対象とした FEM 解析に関するご助言を頂きました北茂紀氏に心より感謝申し上げます。