

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04588

研究課題名(和文)既存木造住宅の耐震補強設計評価ツールの開発と費用対効果の検証

研究課題名(英文)Development of evaluation tool on structural and cost performances of seismic reinforcement projects applied to existing timber houses

研究代表者

田端 千夏子(Tabata, Chikako)

三重大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30508544

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、木造住宅の耐震補強を促進するため、コストパフォーマンスの良い補強設計を行う理論ツールを開発することである。そこで、耐震補強評点を座標表示し、補強による性能向上をベクトルとして可視化し、さらにコスト次元を導入して、補強前後の仕様に応じてベクトルを除去/付加していく過程や減築の効果を視覚的に表現することで、性能向上と補強の合理化を実現できる補強設計ツールを確立、その有効性を実例に基づき示した。また各種仕様の補強効果データやコストデータをコンパクトな形で収集整理することができた。今後はBIMなどの設計支援システムに本理論ツールを実装することでより実際の段階に進むことが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、木造住宅の耐震補強の促進と、建築主や設計者の合理的判断や意思決定を促すため、補強設計の費用対効果を視覚的に把握するための設計ツールである。この方法は、耐震補強設計の効率化や国土強靱化施策等の適正化に資するものとして広く活用可能であり、社会的有用性・有益性の高いものである。建築主や設計者にとっては、個別の住宅の状況に応じて、また予算に応じて、従来の補強方法を比較検討することに役立つ。また近年開発されている多様な耐震補強技術の情報を設計ツール上で提供することにより、設計者の技術の向上が図られる。同時に、開発者にとっては、技術の空白域を把握し、開発の指針を得るために活用できるものである。

研究成果の概要(英文)：The research aimed to push forward seismic diagnosis and retrofitting projects in Japanese timber houses, to provide design tool which visualize seismic diagnosis scores in coordinated system and each of performance advance caused by applied elements as a vector. Seismic retrofit would be efficient through an ideal combination of reducing dead load and applying extra rigidity of building frame. This logic was visualized as a design tool ready to be used by the designers.

The feasibility of the design tool has proven through elaborated testing went through 140 examples of real retrofit designs collected from practitioners, and even 12 examples out of them prove cost estimation testing. Basic data of seismic performances of popular seismic elements were collected and listed through the research. The logical proposal of the design tool is now getting into the application phase to be built into the BIM system to be used by practitioners.

研究分野：木質構造・構法

キーワード：耐震診断 診断評点 ベクトル 既存住宅 コスト 性能 意思決定

1. 研究開始当初の背景

既存木造住宅の耐震診断には、補助金交付などの政策的助成が全国で行われており、建築主はほぼ自己負担なく受診できるが、実際の補強工事となると大半の住宅で 100 万円を越える水準となり、公的助成を利用したとしても、多額の費用がかかってしまう。補強が必要と診断された住宅の工事実施率が依然として低くとどまっている理由はここにある。政府の掲げる耐震化率 90% を達成するには、このハードルを乗り越える必要がある。

端的に言えば、補強工事金額を低く抑えながら、耐震性を効率的に上昇させる補強方法の開発が強く求められるのだが、これを達成するためには、耐震補強の「質」を考慮することが特に重要である。補強計画においては、建築主の生活環境や経済状況を考慮の上、合理的・経済的な補強方法がより幅広く検討できれば、設計において適切な意志決定ができるようになる。そのためには、補強工事に用いる各種仕様（部位・材料・寸法・施工方法）ごとにその耐力向上効果や必要コストを調査・整理するとともに、合理的な補強工事を計画するための理論的枠組みが必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、木造住宅の補強前後の耐震性能を評価・検討する手段として 1) 評点座標系を提案し、補強前後の耐力向上や補強コストを視覚的に表現できる方法を確立すること、さらに 2) 耐震補強にともなう耐震効果の向上を実例収集分析により明らかにし、補強仕様ごとの耐震性能の向上とそのコストパフォーマンスを把握するとともに、3) 各種補強仕様の補強効果を検証することを通じ、木造住宅の耐震補強のさらなる効率化・適正化を図ることである。以上により、合理的・経済的な補強方法の検討方法や、設計者の意志決定を促す手段を提案することである。

3. 研究の方法

(1) 評点座標系の提案

一般に耐震診断の評点は、保有耐力を必要耐力で除した無次元数と定義されているが、本研究ではこれを必要耐力と保有耐力で表される座標（評点座標）にとらえ、必要耐力と保有耐力をクロスさせたグラフ上に、建物の補強前および補強後の評点を置き、前者から後へベクトルを結ぶ。これを「補強ベクトル」と呼ぶ。図 1 にその概念を示す。

グラフ中直線 $y=x$ は評点 1.0 を表現する。すなわち耐震補強とは、この線の下側三角で表される「耐力不足域」にある評点から出発し、それを上側三角の領域のどこかに投射することを意味する。

図 1 の補強後 A は、耐力要素を追加する方針で行なった補強である。耐震要素の付加は必然的に荷重・必要耐力の増加を伴うので、補強ベクトルは右上がりになる。

一方、補強後 B は、上部の軽量化や上階の減築による「補強」である。必要耐力（評点における分母）が低下・減少することは、耐力要素の追加・増加が僅少でも、結果的に評点の向上を図ることもできる。このように評点を座標とし、補強をベクトルとして表現することにより、補強の質や効果が視覚的に表現でき、保有耐力の補充による補強と、必要耐力の減少による「補強」の性質の違いが共通基盤の上で表現できる。

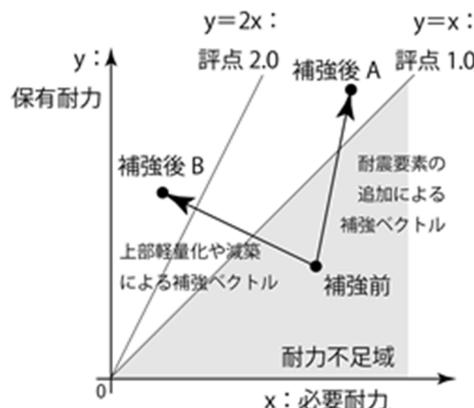


図 1：必要・保有耐力の評点座標系にプロットした補強ベクトル

(2) コスト次元の導入

図 2 は、図 1 を底面とし、高さ方向 z 軸に単位床面積あたりのコストをとった 3 次元グラフである。

補強ベクトルの全体を、各部に適用された個々の補強ベクトルの和と考える。補強の仕様（どのような耐震要素を補い、どのくらいの重量変化があるか）によってそれぞれの補強には特有のコスト成分があって、積み上がって全体のコストが算出される。以上のモデル化により、建築士が採用する各部仕様と、全体としての補強設計の方針

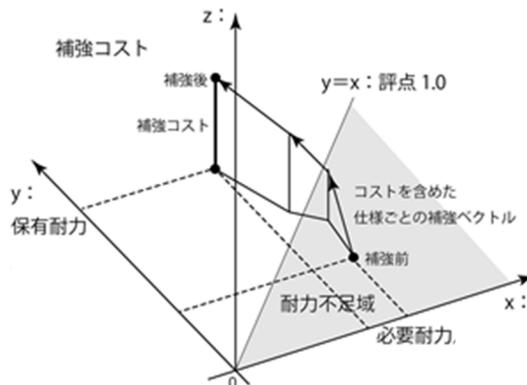


図 2：補強コストを加味した補強ベクトルと仕様ごとの分解ベクトル

の違いとそのコストとの関係が分析できる。以上が本研究の基本的な着想である。

4. 研究の成果

(1) 理論の精密化

上に述べた本研究の着手時の構想は、補強設計の実際に適用するために理論上の整理が必要であった。以下に要約して説明する。

- 補強ベクトル \vec{R} (補強後評点座標 - 補強前評点座標) : 設計全体の評点の推移
- 仕様変化ベクトル \vec{E} : 特定の補強要素にかかる部分ベクトル。 \vec{R} は \vec{E} の総和である。
- 仕様ベクトル \vec{e} : 仕様変化ベクトル \vec{E} を、追加する要素の仕様ベクトル \vec{e}_b と除去する要素の仕様ベクトル \vec{e}_a の差とする。耐震改修では旧来の壁などを除去した上で新しい壁などを付加することが普通であるから、置き換えの対象となった仕様の性能差によって、補強効果が生じたとする。
- 特性ベクトル \vec{p} : 個々の仕様ベクトルは、それぞれの仕様の特性ごとにベクトルの方向が定まっている。これを要素の単位長さあたりまたは面積あたりの(耐力成分、重量成分)としたものを、(その仕様の)特性ベクトルという。すなわち仕様ベクトル \vec{e} は、 a をスカラー(当該要素の単位量 : 長さや面積)として $a \cdot \vec{p}$ で表される。
- コスト成分の2次元化 : 個々の仕様の特性ベクトルにコスト項を追加するのは、前項(2)で説明した通りであるが、これを、付加の際のコスト \vec{c}_{ap} と、除去の際のコスト \vec{c}_{el} の2次元とする。これにより各部仕様の特性が、付加される要素、除去される要素の区別なく同列に整理できる。
- 除去される要素のコスト項を転置させる行列演算の導入 : コスト項目の次元を入れ替える操作を行列として定義し、個々の仕様の特性ベクトルから建物全体の補強までを演算する環境を成立させる。

以上の理論拡充については、国際会議発表論文で詳細に説明している。この内容は、本設計方法のBIM化と、仕様データベース構築、耐震補強の理論化や応用にとって本質的に重要と考えている。また、いったんこの計算法がコンピュータソフトウェアに組み込まれば、そのユーザ(設計者)は個々の詳細について考慮する必要はなく、直感的で自在な運用が可能になる。

(2) 実例収集と理論適合性の検証

以上の理論的枠組みを検証するために、過去の補強実例を収集して検証した。実例として使用した資料は、2013年度に三重県内で実際に耐震補強設計/工事が行われた事例140棟である。このうち、工事見積書が得られた住宅12棟(平屋4棟、2階建て8棟)については、補強費

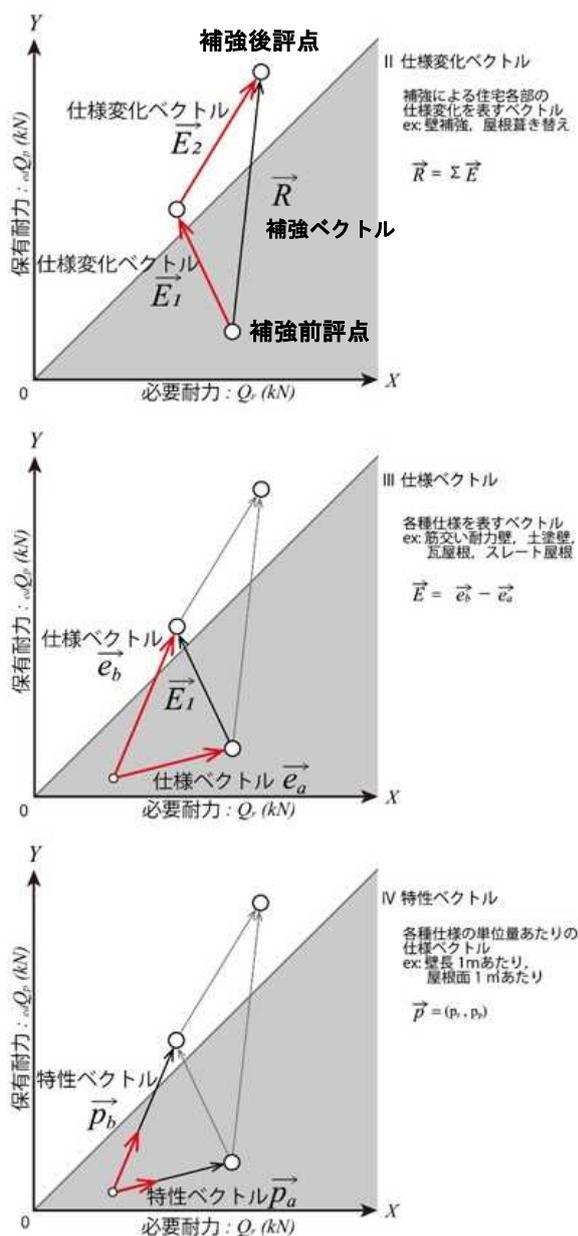


図3 耐震補強各段階でのベクトルのノックダウン

用の内訳について整理し、建設物価データとの整合性を検証した。補強設計資料については、三重県の耐震診断/補強関連団体から提供を受け、見積書等は設計者・建築主から提供を受けたが、特に工事見積書については、近年の情報開示の実情から、直近の事例における定量的母集団を得ることは一段と困難になっている。

補強設計の事例を用いて理論へのあてはめを行なった結果、壁補強だけの事例では補強ベクトルはほぼ垂直になる（耐力向上を主成分とする補強）のに対し、屋根の減量をともなった事例では補強ベクトルは横方向に傾く（耐力向上に加え必要耐力減少をともなう補強）ことが明瞭に観察できた。

事例の補強費用は、124 万から 468 万の範囲にあり平均 248 万円であった。全 12 棟中 3 棟は土葺瓦からの葺き替え（必要耐力の減少による補強）を行っていた。この場合、工事費用総額の約半分は屋根工事分の費用であった。

補強コストに関しては、工事見積書の積算内容から部位ごとのコストを引き出し、不明部分を逆算するなどして、適合性を検討した。さらに事例 140 棟で採用された補強仕様の整理/分析を行った。その結果、実態に対する理論の適合に特段の齟齬は観察されず、また逆算によって得られた補強の単位コストは、当時の建設物価データとも大きな齟齬が観察されなかった。理論の実地応用の可能性はあるものと結論された。

本研究によって算定した耐力壁および屋根の仕様別の特性ベクトルを図 4 および図 5 に示す。以上を用いて補強費用の算定シミュレーションを実施した。少数の母集団に基づく暫定的な知見ながら、本理論には補強設計の方針を表現する十分な性能があることが確認できた。

以上の検証から、各部位別の補強コストはおおよそ積算可能であった。一方、全体の総工費は不定常となる（ばらつく）場合があり、この要因は間接経費に地域差があることで、とくに過疎地域で高めになるようである。とくに仮設工事費は今回の事例によると、約 17~63 万の範囲で平均 41 万円、総工費に占める割合は 12~28.2% の範囲で、平均で 17.3% であった。

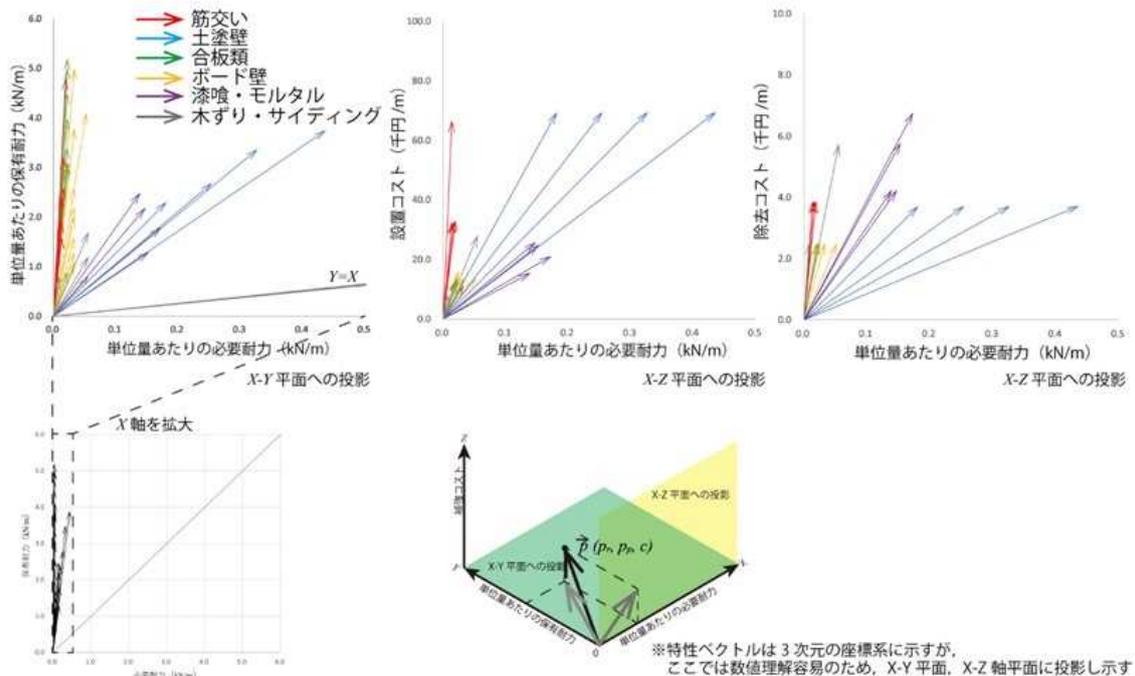


図 4 特性ベクトル（耐力壁）

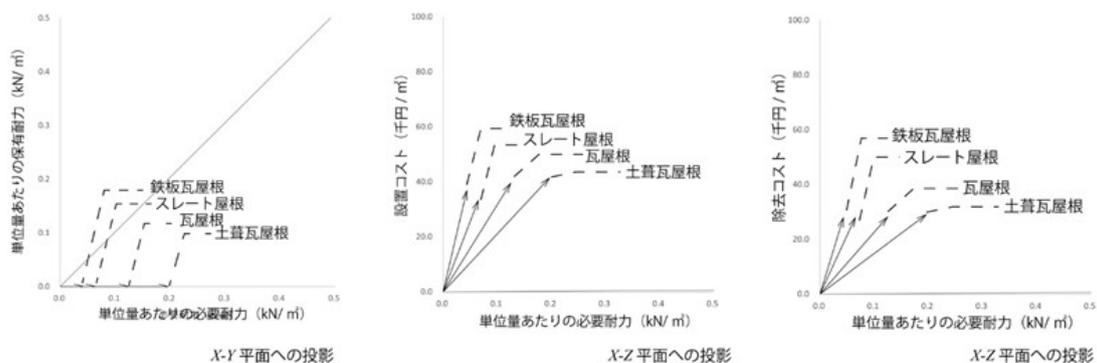


図 5 特性ベクトル（屋根）

(3) 実務者からの意見収集

診断・補強計画を行った実務者からは、様々な意見が得られた。設計実務の上では、原設計図書の不存在や不正確さ、水平構面の補強の重要性や評価方法の不十分（評点への反映されにく）さ、和室や伝統構法における補強の困難さ、基礎補強の困難さと費用流出、近年の材料費や人件費高騰の問題などである。技術開発上は、床や天井仕上げをさわずに安く補強できる構法や屋根構面補強にもなる太陽光パネル開発の要望などもあった。また、制度上の意見として、行政機関によって補強工事確認の水準に差があること、補強工事補助金の事後交付（建築主が一時的に工事資金の全額支出をする必要がある）でなく差額払いの要望や、「現に居住している」住宅のみを対象としていることによって空き家対策が進まない（社会ストックの活用に結びつかない）などの意見があった。

(4) 理論面での今後の展開

本研究で得られた知見から、本理論の今後の発展を展望すると、おおむね次の通りである。

- ・ 個々の仕様の除去コストの収集・整理：建設物価は一般に設置方向のコストだけを体系的に収集しているが、補強工事で除去される要素の除去コストを体系的に収集し整理する必要がある。
- ・ 評点座標系は、現状では通常 X 方向、Y 方向、各々 1 階、2 階の 4 面がある。3 階建ではさらに 2 面増加する。これらを統合し、直感的に設計者に理解させるアイデアが必要である。これによって、屋根減量や上部減築による補強が、4 面すべての補強に同時に寄与する有利さが、設計者に明確に意識されることにつながるものと考えられる。
- ・ 自動ないし半自動による最適設計の実現：合計コストを標的とした目的関数を設定し、繰り返し計算をさせると自動的な最適設計が可能であると考えられる。しかし実際の補強設計には、機能上の要求や、間取り自体の変更が伴うことが多いので、自動最適化はあまり重要ではない。むしろ半自動的に有効な提案を示唆するような設計支援が適切であると考えられる。特性ベクトルの耐力充足領域への接近合理性および鉛直方向の傾きをインデックスにした提案、ないし多数事例の経験学習によるアルゴリズムの適用などが考えられる。
- ・ 本理論の 3 次元的表現を 2 次元画面に投影する技法の追求：上記の事例研究から明らかになったように、補強設計の方針は、耐力向上を目指すものと、屋根減量を組み合わせるもののふたつに明瞭に分かれている。このことから、純粋な耐力向上と純粋な屋根減量それぞれの特性ベクトル鉛直成分の傾きをもとに、評点座標の 2 次元平面上に、等コスト線（補強前の評点座標を中央点とする等高線のような長短軸の比をコストの逆比とした楕円形の線）を、描くことができる。設計者がこれを参照して、等コスト線と評点 1.0 の傾きとの接点を目指して設計すると、コストパフォーマンスの良い設計が得られる。これは 2 次元のコンピュータ画面に表示できるので、直感的な設計試行が可能になる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shimizu Daisuke, Tabata Chikako, Tomioka Yoshito	4. 巻 2023
2. 論文標題 A STUDY ON COORDINATED EXPRESSION OF THE SEISMIC DIAGNOSIS SCORE AND ITS APPLICATION TO RETROFIT REINFORCEMENT PROJECTS UNDER COST CONTROL FOR JAPANESE TIMBER HOUSES	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of World Conference on Timber Engineering (WCTE) 2023	6. 最初と最後の頁 4087-4092
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.52202/069179-0531	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Daisuke Shimizu, Chikako Tabata, Yoshito Tomioka
2. 発表標題 A STUDY ON COORDINATED EXPRESSION OF THE SEISMIC DIAGNOSIS SCORE AND ITS APPLICATION TO RETROFIT REINFORCEMENT PROJECTS UNDER COST CONTROL FOR JAPANESE TIMBER HOUSES
3. 学会等名 World Conference on Timber Engineering (WCTE) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	富岡 義人 (TOMIOKA Yoshito) (50237111)	三重大学・工学研究科・教授 (14101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------