

論文 歴史的建造物の耐震改修を考慮した経済性能評価に基づく要求スペクトル

片貝 勇介*1・高橋 典之*2・青木 孝義*3

要旨：2011年の東日本大震災や2016年の熊本地震により歴史的建造物を含む多くの建築物が地震被害を受け、復旧支援技術に関する情報整備の必要性が高まっている。本研究では、RC造に組積造を内包するような混積造歴史的建造物を対象として、供用期間中に発生が予想される中小地震を含めた入力地震動シナリオを用いて、修復費用・補修費用・収益の観点から算出されるライフサイクル耐震費用を算出し経済性の観点から要求される構造特性の検討を行った。

キーワード：歴史的建造物、ライフサイクル地震動、ライフサイクルコスト、経済性能

1. はじめに

現存する歴史的建造物は、当時の技術力・建築的知識だけでなく生活・習慣・建物の果たした役割など多くの文化的価値を継承するものとして、現在まで取り壊されずに受け継がれてきた貴重な資料である。同時に、地域のシンボルとして親しまれ景観の形成や地域活性化に貢献するポテンシャルを有しており、保存再生を求める声が少なくない。一方で、建設時の設計基準が現行基準を満たさないことや、供用期間中の様々な外力による劣化は不可避であり、歴史的価値を維持しながら合理的に建物の補修・補強を進める手法が確立されているとはいえない現状である。そのため、建築主の経済的な事情から取り壊されてしまう事例も数多く存在する。

そこで本研究では、歴史的建造物の保存再生・活用にあたり合理的な建物の補修・補強方法の選択に資する情報を提供すべく、耐震改修による補強効果を考慮した歴史的建造物の経済性能評価について検討する。具体的には、組積造を躯体の一部に用いた歴史的建造物の構造特性を分析し、保存・再生にむけた意思決定時から先の供用期間中に発生が予想される入力地震動シナリオ（ライフサイクル地震動シナリオ¹⁾）に対し、耐震改修後の構造強度の増大と改修費用、供用期間中の補修費用、収益費用を考慮したパラメトリック解析を通して、歴史的建造物の経済性能を評価する。評価結果に基づき目的の性能を満たす要求スペクトルを求め、構造特性の観点から保存・再生に資する情報を提供する手法を検討する。

2. 対象とする構造物

検討対象とする構造種別の選択においては、熊本県荒尾市にある万田坑事務棟の予備調査結果を参考とした（写真-1、写真-2）。



写真-1 実地調査した歴史的建造物（万田坑事務棟）



写真-2 万田坑事務棟内部

万田坑事務棟は、写真-1のように一見すると煉瓦造（梁間11.68m、桁行11.34m、建築面積128.51m²、外壁厚さ一枚組積・柱型付き）に見えるが、実際にはRC造の柱、梁と、鉄骨造の大梁が建物中心部分の架構を形成し、外周部に煉瓦造の組積壁が組み合わさった混合構造である。上記の事例のように、現存する組積造を含む歴史的建造物には混合構造が大半を占めているため、本論文では検討対象構造種別を（煉瓦造などの組積造壁を含む）混合構造とした。なお、当該構造を持つ歴史的建造物（文化財登録制度において登録有形文化財の選定対象となる竣工後50年以上を経過した建造物）のうち3階建て以下の構造物を対象に、後述する構造特性分析とそれに伴う評価パラメータ設定を行った。

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (学生会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 准教授 博(工) (正会員)

*3 名古屋市立大学大学院 芸術工学研究科 教授 工博 (正会員)

3. 経済性能評価

本研究で用いる建築物の経済性能評価フローの概要を図-1に示す。以下、図-1のフローに従い説明する。

3.1 入力地震動強さの設定

図-2は、上述した万田坑事務棟の所在地（熊本県荒尾市）を例に確率論的地震動予測地図 J-SHIS²⁾より求めた地震ハザード曲線である。文献2)より対象地域における地盤増幅倍率は1.07と設定した。本論では地震調査研究推進本部策定地震ハザード曲線を用いて地震動発生超過確率と入力地震動強さの関係を定めることとする。

3.2 ライフサイクル地震動シナリオの作成

文献3)より地震ハザード曲線に(1)式を適用し供用期間年最大地震動の非超過度数の組合せ(表-1)を作成する。

$$F_x(x_i) = 1 + \frac{\ln(1 - P_i)}{N} \quad (1)$$

ここに、 $F_x(x_i)$ ：観測値の大きい順に*i*番目の非超過度数、 P_i ：地震動の大きい順に*i*番目の*N*年超過確率、*N*：観測値個数（供用期間年数）である。図-2、表-1から求められる工学的基盤における工学的基盤最大速度の組合せに地盤増幅率を乗じて地表面最大速度（PGV）の組合せとし、供用期間を通じランダムな順序で地震動が発生するものとする(図-3)。なお、後述する時刻歴応答解析の際は、国土交通省告示1461号の設計用応答スペクトルに適合する模擬地震動に倍率を乗じ、PGVに応じた入力地震動を作成した。模擬地震動の位相特性は文献1)、3)を参考に、神戸海洋気象台1995(NS)、El Centro 1940(NS)、八戸港湾1968(EW)、東北大学1978(NS)の4種類を用いて検討し、すべての算出結果の平均をとることとした。

3.3 構造物の地震応答モデル

歴史的建造物のうち、局所的に激しく劣化している場合や極端に不整形な構造物では適切かつ詳細な解析モデルを用いる必要があるが、本研究では歴史建造物の継続使用を念頭に耐震改修後の構造特性をパラメトリックスタディすべく、1自由度系への縮約が可能な架構であると仮定する。文献4)に基づき復元力特性をBi-linear型、履歴則にBi-Linear+Slip型モデルを用いた非線形時刻歴応答解析により地震応答を求める。降伏後剛性を初期剛性の0.1倍とし、減衰は内部減衰5%の瞬間剛性比例型とする。

4. 構造特性パラメータの設定

4.1 固有周期の設定

万田坑事務棟の現地調査および文献5)、6)より検討対象となりうる建築物の固有周期データを集計した。表-2より検討対象建築物の固有周期が0.14~0.25[s]に分布していたことから、パラメトリックスタディにおける固有周期パラメータを0.1~0.25[s]までの0.05[s]刻みで定めた。

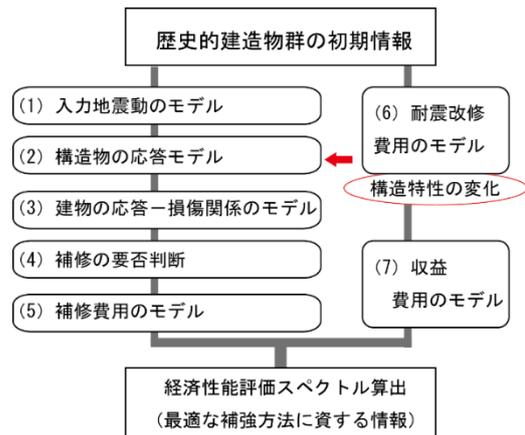


図-1 経済性能評価フロー

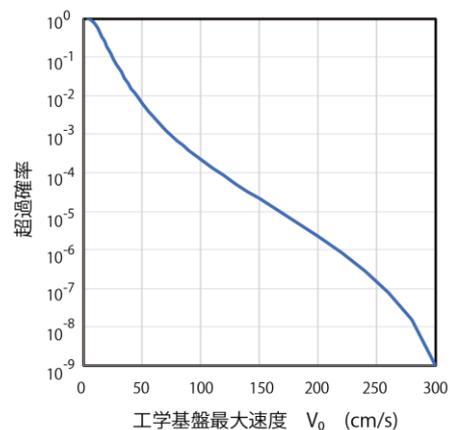


図-2 熊本県荒尾市における地震ハザード曲線²⁾

表-1 ライフサイクル地震動の非超過確率組合せ³⁾

地震の大きさ順	<i>i</i> =1	<i>i</i> =2	<i>i</i> =3	<i>i</i> =4	...	<i>i</i> =50
非超過確率	0.998	0.978	0.958	0.938	...	0.018
再現期間 <i>r</i> (<i>i</i>)[年]	475.0	45.2	23.7	16.1	...	1.02
50年超過確率[%]	10.0	69.2	87.8	95.5	...	100

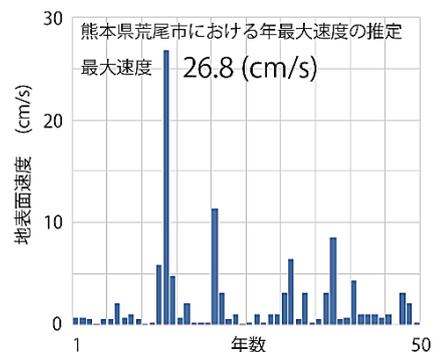


図-3 年最大 PGV のシナリオ例

4.2 終局塑性率の設定

煉瓦造を含む建築物は、面外破壊に伴う耐力低下により一般的に高い靱性能は期待できない。一方、面内に組積体

がとどまる場合で、補強煉瓦造壁体付き架構の塑性率が7～9となる実験結果も報告されている⁷⁾。そこで本論文では、パラメトリックスタディにおける塑性率を1～9まで対象とし、無補強の場合は終局塑性率を1～3と設定した。

4.3 ベースシア係数の設定

文献8)～14)より、検討対象となりうる建築物のベースシア係数を文献15), 16)に従い算出集計した。表-3より耐震改修前の弱軸方向のベースシア係数が0.22～0.65に分布していることから、無補強の場合のベースシア係数を0.1～0.7までの0.1刻みと定めた。

表-2 歴史的建造物の高さおよび1次固有周期の関係

建物名	最高高さ[m]	長辺周期[s]	短辺周期[s]
聖ヨハネ教会	12.98	0.227	0.244
札幌電話交換局	11.5	0.143	0.167
工部省品川硝子製造所	8.04	0.112	0.208
内閣文庫	16.3	0.139	0.139
名鉄岩倉変電所	9.13	0.133	0.145
聖ザビエル主天堂	18.1	0.167	0.217
万田坑 事務棟	約 9.3	0.136	0.137

表-3 歴史的建造物のベースシア係数 C_B

建物名	竣工年	長辺方向	短辺方向
山形旧議事堂 (改修後)	1916	0.65	0.95
函館ハリストス正教会	1916	0.43	0.22
碓氷峠旧丸山変電所 (機械室)	1912	0.22	0.49
碓氷峠旧丸山変電所 (蓄電室)	1921	0.2	0.44
赤レンガ倉庫・牛津町会館 (明治)		0.18	0.39
同志社クラーク記念館	1894	0.27	0.28
東京駅・中央棟 (鉄骨煉瓦造)	1914	0.62	0.66
万田坑 事務棟	1908	0.38	0.4

5. 損傷のモデル

文献 15), 17), 18)より壁体部損傷発生変形角 (中央値) 0.06%, 架構終局変形角 (中央値, 未改修時) 0.14%とした fragility 曲線を作成し、修復費用算出にあたり規準化改修費用に乗じる係数として損傷係数 D を定めた (図-4)。なお、損傷発生変形角より応答が小さい場合は補修等せず、剛性低下したまま次の地震動を受けるものとする。

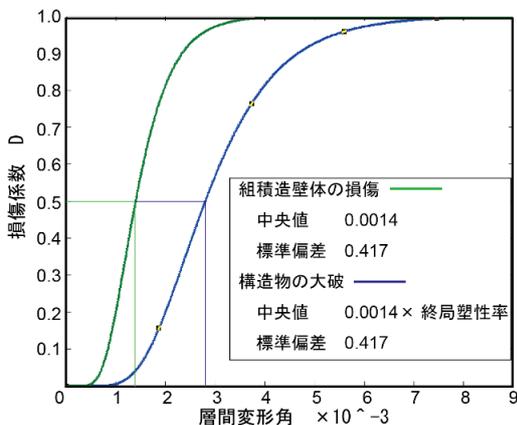


図-4 損傷係数 D と層間変形角の関係

6. 耐震改修による構造特性変化

本論文では耐震改修案として、(a)ステンレスピン挿入等による壁体拘束補強、(b)補強鉄骨・耐震プレート増設、(c)免震レトロフィットの3つの適用を想定する。文献4), 5), 7)～15)を参考に、各耐震改修方法による構造特性変化のレベルを設定した (表-4)。

表-4 耐震改修による構造特性の変化

	固有周期	ベースシア係数	終局塑性率	減衰
原状	0.1～0.25	0.1～0.6	1～3	5%
(a)	0.1～0.3	0.15～0.8	2～6	5%
(b)	1.5～0.4	0.3～1.2	6～9	5%
(c)	3.0	免震層上部特性は原状のまま		20%

7. 経済性能評価モデル

7.1 規準費用の設定

修復費用、収益費用、耐震改修費用を規準化すべく、国土交通省建築着工統計調査2017年10月¹⁹⁾に基づき新築工事平均費用 (70万円/坪) を算出し (表-5)、これを規準値として改修費用、修復費用、収益費用を規準化する。

表-5 2017年10月の国土交通省建築着工統計¹⁹⁾

建築着工統計調査 (2017年10月)	全建築物計
工事費用予定額 (万円)	240,908,763
床面積合計 (坪)	3,515,175
新築工事平均費用 (万円/坪)	70

7.2 修復費用の設定

文献 8)～14)より、歴史的建造物の修復費用に関するデータを分析した (図-5)。図-5より修復費用は坪あたり116.7万円と算出され、規準化修復費用係数 B は116.7万円/坪を規準費用70万円/坪で除した値 $B=1.67$ となる。この規準化修復費用係数 B に、必要な修復量を表す損傷係数 D を乗じることで規準化した修復費用係数が算出される。

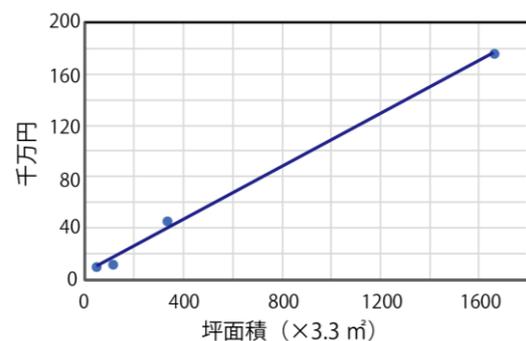


図-5 歴史的建造物の修復費用単価の分析

7.3 収益費用および耐震改修費用の設定

経済活動に伴い変動する収益を適切にモデル化することは大変難しい。そこで本論文では、簡便に収益の大小が経済性能に与える影響をとらえるべく、文献20)を参考に収益費用を定めた。

(1) 収益用建築物の価値評価

収益用建築物の価値を評価する DCF (Discounted Cash

Flow) 法に基づき、供用期間中の収益の総和を価値 V として次式で求める。

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{(1+r)^i} + \frac{V_s}{(1+r)^n} \quad (2)$$

ここに、 n : 所有期間 (年), V_s : n 年後の売却価格, a_i : i 年目における年純利益, r : 割引率である。式(2)の第一項は n 年間の純利益の総和を表し、第二項は n 年後の所有する総資産の価値を評価するため、 n 年後の売却収益となっている。また、 n 年後の価値を考慮し、それぞれの項に割引率を用いて現在価値への補正を行っている。割引率は経済的リスクの大きなものほど大きくなるが、文献 20) を参考に本論文では 4% とした。なお、本研究において V_s は文献 20) より次式で求めた。

$$V_s = \frac{a}{r} \quad (3)$$

ここに、 a : 年間純収益の供用期間における平均値である。また、実際に活用されている歴史的建造物の収益調査から本研究では a_i を一律に規準化価格で 0.05 と定めた。

(2) 経済性能指標

建設 m 年後 ($m \leq n$) に地震による規準化修復費用 $B \times D$ が生じた場合、収益用建築物の価値 V' は式(4)で求まる。

$$V' = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{(1+r)^i} + \frac{V_s}{(1+r)^n} - \frac{BD}{(1+r)^m} \quad (4)$$

また、事業の収益性分析においては、式 (5) に示す資本収益率が用いられる。

$$\text{資本収益率} = \text{収益} / \text{投資} \quad (5)$$

資本収益率は投資した資本の経営期間内における収益性を示す指標であり、1 よりも大きいと投資額以上の収益があることを意味する。これを踏まて、初期投資を A とすると、経済性能指標 I は式 (6) により評価できる。

$$I = \frac{V'}{A} = \frac{1}{A} \left[\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{(1+r)^i} + \frac{V_s}{(1+r)^n} - \frac{BD}{(1+r)^m} \right] \quad (6)$$

なお、歴史的建造物建設時の建設費用は分からないことも多いことから、継続使用に対する意思決定段階 (現在) において式(6)の初期投資 A を初期建設費用ではなく現状維持に最低限必要な費用とみなし (表-6)、対応する耐震改修費用を文献 (6, 8)~(14), (19) を参考に算出し、これを前述の規準費用で除して規準化費用を定めた (表-7)。

表-6 本研究における初期投資 A

	初期投資 A
応急処置時	面外転倒防止補強費用 A
恒久改修時	耐震改修費用 A

表-7 耐震改修費用の規準化

	費用面積平均	規準化費用
面外防止費用	35 万円/坪	0.5
(a)	112 万円/坪	1.6
(b)	160 万円/坪	2.28
(c)	350 万円/坪	5

8. 必要強度スペクトルおよび要求スペクトル算出結果

継続使用を決定した時点での歴史的建造物に対して、耐震改修無し、耐震改修案(a), (b), (c)の計 4 通りの初期投資状態を想定し、前章までの手法に従い既往の調査から平均的な計算変数を適用して経済性能指標を試算した。

縦軸にベースシア係数、横軸に終局塑性率をとり、経済性能指標値 I の等高線を「必要強度スペクトル」として描いた図を図-6~図-9 に示す (ただし、経済性能指標 I の下限値を -5 とし、-5 以下の値は表示していない)。図-6 の終局塑性率 1.5 以下の範囲では等高線に傾きがあり終局塑性率が大きくなるにしたがって経済性能指標が等しい必要ベースシア係数の値は小さくなっているが、図-6 の終局塑性率 1.5 以上の範囲、図-7、図-8、図-9 は何れも等高線に傾きがなく終局塑性率の大小による経済性能指標の変化は殆ど見られず、ベースシア係数によって経済性能指標が支配されていることが読み取れる。この原因として、5 章で用いた損傷モデルにおいて煉瓦造壁は耐震改修に拠らず設定した層間変形角以上の応答変位により損傷し、架構は耐震改修によって終局塑性率が向上するものとしているが、ライフサイクルを通して必要となる修復費用は煉瓦壁の損傷修復によってほぼ決まっていたためと考えられる。ただし、終局塑性率 1.5~2 以下の領域においては終局塑性率による経済性能指標の変化が読み取れる。

万田坑事務所棟を例に、構造特性の変化について表-4 で定めた改修工法の適用が建物全体に対して中程度に適用されるものと仮定し、図-6~図-9 の赤丸で囲まれた領域になった場合を想定すると、このとき最も経済性能指標値が大きくなる (収益がある) のは、耐震改修案(b)「補強鉄骨・耐震プレート増設」を施した場合であり、経済性能指標はおおよそ 1~1.2 となり、投資額以上の収益を得られる可能性がある。

次に、上述の「必要強度スペクトル」において終局塑性率の影響があまり見られなかったことを踏まえ、終局塑性率の値を一意に定め、縦軸にベースシア係数、横軸に降伏点変位をとり、経済性能指標値 I の等高線を「要求スペクトル」として描いた図を図-10~図-13 に示す。図-10~図-13 より、固有周期 0.2 秒程度のときに経済性能が等しくなる必要ベースシア係数が小さくなり、終局塑性率が大きくなるほど経済性能が等しくなる必要ベースシア係数が小さくなることが読み取れる。

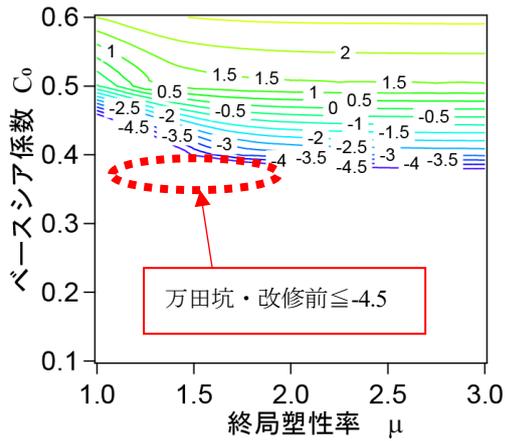


図-6 耐震改修無し 固有周期0.15秒

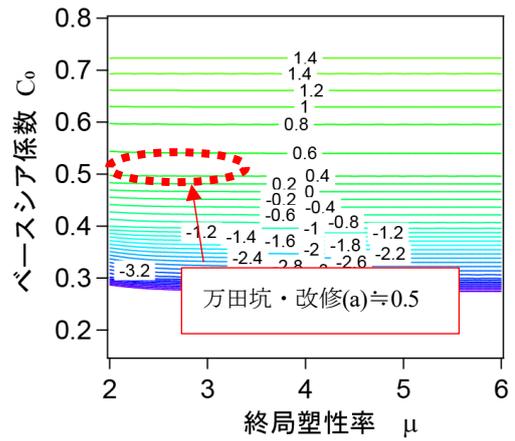


図-7 耐震改修(a) 固有周期0.15秒

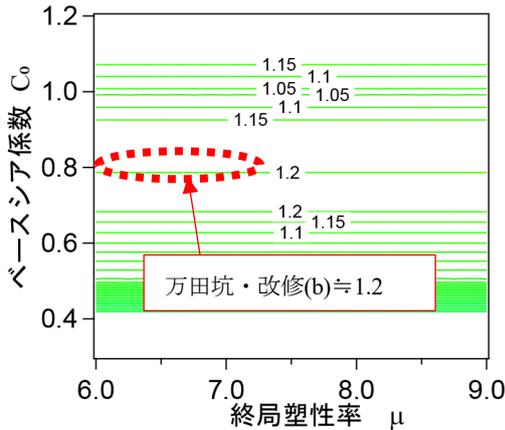


図-8 耐震改修(b) 固有周期0.15秒

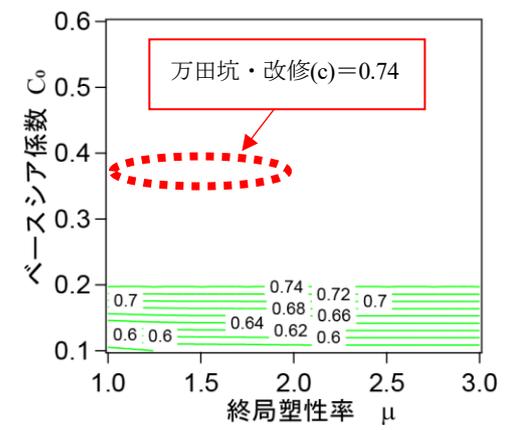


図-9 耐震改修(c) 固有周期3秒

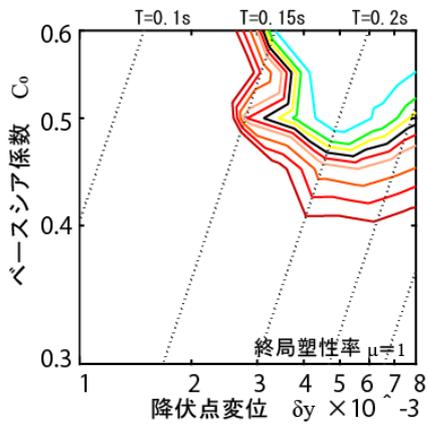


図-10 耐震改修無し 終局塑性率1

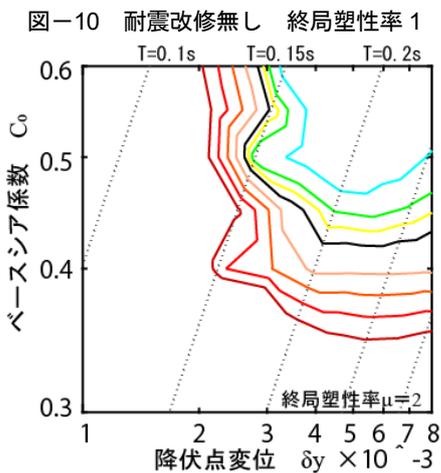


図-11 耐震改修無し 終局塑性率2

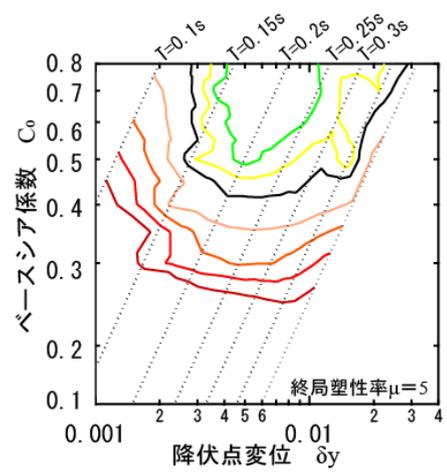


図-12 耐震改修(a) 終局塑性率5

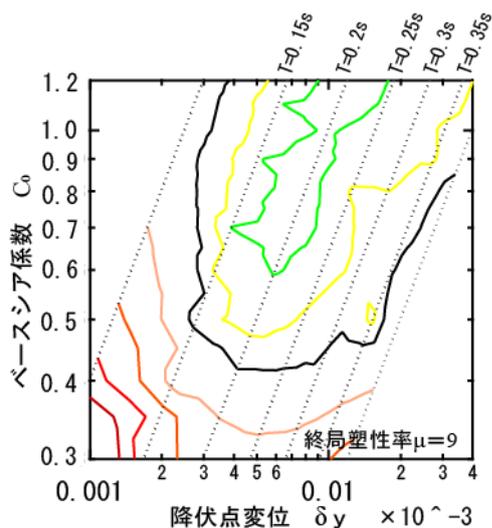


図-13 耐震改修(b) 終局塑性率9

9. まとめ

煉瓦造などの組積造壁を含む混構造歴史的建造物を対象に、供用期間中に発生が予想される中小地震を含めた入力地震動シナリオを用いて、修復費用・補修費用・収益の観点からライフサイクル耐震費用を算出し、経済性の観点から要求される構造特性の検討を行った。適用例として万田坑事務棟について検討したところ、最も経済性能指標値が大きくなる(収益がある)のは、耐震改修案(b)「補強鉄骨・耐震プレート増設」を施した場合であり、経済性能指標はおおよそ1~1.2となり投資額以上の収益を得られる可能性が示唆された。なお本研究では、歴史的建造物の歴史的・文化的価値の評価については、有識者がこれを主張してもオーナーの経済的事情により取り壊される事例が少なくない現状を鑑み、純粋な収益用建築物としてオーナーにとっても保存再生へのインセンティブとなり得る経済性能評価のみを検討している。今後、異なる耐震改修方法による経済性能評価のほか、文化的価値のインセンティブ化などを含めて検討を進める予定である。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費基盤研究(S)(課題番号:16H06363)の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋典之, 塩原等: RC 構造物の耐震修復性能評価におけるライフサイクル影響係数, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1741-1746, 2004.7
- 2) 防災科学技術研究所: J-SIS 地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 3) 佐藤真俊, 高橋典之: ライフサイクル地震動を用いた RC 造建築物の経済性能設計に関する研究, コンクリ

ート工学会年次論文集, Vol.37, No.2, pp.709-714, 2015.7

- 4) 多幾山法子, 長江拓也, 前田春雄, 喜多村晶利, 吉田亘利, 荒木慶一: ステンレスピン挿入による歴史的組積造建造物の耐震改修, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.635, pp.167-176, 2009.1
- 5) 藤井智規, 福和伸夫, 千賀英樹, 飛田潤, 吉田明義: 常時微動計測による博物館明治村の近代建築物の振動性状データベース構築, 日本建築学会技術報告集, Vol.13, No.25, pp.59-64, 2007
- 6) 日本旅客鉄道株式会社: 重要文化財東京駅丸の内駅舎保存・復元工事報告書, 2013.7
- 7) 吉村浩二, 金京奏: 枠組煉瓦組積造壁体の耐震性向上に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.571, 167-176, 2003.9
- 8) 文化財建造物保存技術協会: 重要文化財山形県庁舎及び県会議事堂保存修理工事報告書, Vol.1, 1991, Vol.2, 1995
- 9) 文化財建造物保存技術協会: 重要文化財函館ハリストス正教会復活議事堂保存修理報告書, 1989
- 10) 文化財建造物保存技術協会: 重要文化財碓氷峠鉄道施設変電所(旧丸山変電所)保存修理報告書, 2002.7
- 11) 京都府教育庁指導部文化財保護課: 重要文化財同志社クラーク記念館修理工事報告書, 2008
- 12) 文化財建造物保存技術協会: 重要文化財旧神戸居留地十五番館保存修理工事報告書, 1993
- 13) 京都府教育庁指導部文化財保護課: 重要文化座同志社礼拝堂修理工事報告書, 1990.12
- 14) 京都府教育庁指導部文化財保護課: 要文化財同志社彰栄館保存修理工事報告書, 1981
- 15) 岩田芳範, 岩田道敏, 八巻一幸, 山内俊幸: 既設レンガ部材の力学的性状について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, 1997
- 16) 社団法人北海道技術協会: 煉瓦造建築物の耐震診断基準 改訂第二版, 2015.5
- 17) A.A. Akbarzade M.and A.A. Tasnimi: Nonlinear Analysis and Modeling of Unreinforced Masonry Shear Walls Based on Plastic Damage Model, JSEE 2010, Vol.11, No.4
- 18) 吉川弘道, 大滝健, 前田欣昌, 中村孝明: 地震リスク解析におけるフラジリティ曲線と地震損失関数, コンクリート工学, 45 巻, 2007
- 19) 国土交通省, 建築・住宅関係統計データ, http://www.mlit.go.jp/statistics/details/jutaku_list.html (閲覧: 2017年12月)
- 20) 衣笠秀行: 経済損傷指標に基づく収益用建築物の耐震性能評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.636, pp.401-408, 2009.9