

令和 2 年 4 月 22 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06631

研究課題名（和文）都市の高層ビル群の修復費を考慮した被害評価

研究課題名（英文）Damage Assessment of Urban High-Rise Buildings Considering Repair Cost

研究代表者

岡野 創（Okano, Hajime）

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40416863

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：地震による経済的な損失のうち最も直接的な建物の修復費の評価法の研究を行った。

地震時の建物の修復費の評価は、地震応答評価 損傷評価 修復費評価という流れとなるが、各要素の評価における変動を考慮するために、本研究ではまず、3次元骨組み解析プログラムと連動してモンテカルロシミュレーションにより を実行するシステムを構築した。次に、損傷評価で用いることを目的として、実験データを収集して部材フラジリティの検討を行った。さらに、修復費評価で用いることを目的として、損傷作業を想定して修復費の見積を行うとともに、その変動幅も把握するために、ゼネコン等にアンケート調査を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震活動の活発化により大都市圏の超高層建物が設計用地震動を大きく超える地震動を受ける可能性があることが懸念されているが、の対策の要否や効果を判断するためには、大地震による建物の被害を経済的な指標によって予測する手法を確立する必要がある。

また、建築部材の降伏後の破壊現象については力学的にも研究段階にあり、現状では実験データの収集等を通じて実態を把握しておくことが学術的にも重要と考えられる。

修復費については、修復手順を含めて公表されているデータが少なく、標準的な作業手順や修復費を検討して、整備公表する価値は高いと考えられる。

研究成果の概要（英文）：An evaluation of repair cost of building damaged by earthquake which is most direct economic loss in earthquake damage is dealt with.

The repair cost of building impacted by earthquake is evaluated by the following procedure, firstly evaluate the earthquake response of structure, secondly evaluate the damage state to the specific earthquake response, and finally evaluate the repair cost to the specific damage state. In order to take into account considerable variabilities underlying in each evaluation step, evaluation system by Monte Carlo Simulation method is developed, in which 3D frame response analysis is incorporated. The damage of component to the specific response is evaluated by component fragility. The component fragilities are studied based on statistical investigation of experimental data. The repair costs of component to the specific damage state are studied by detailed estimation, and questionnaire survey to constructors is carried out to grasp variabilities repair costs.

研究分野：耐震工学

キーワード：地震被害 経済的損失 モンテカルロシミュレーション 部材フラジリティ 修復費 修復可能性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震では6,000人を超える死者と40,000人を超える負傷者が発生し、経済的にも10兆円を超える損害が発生したとされるが、この地震で観測された地震動の強さは中層建物の損傷に關与する周期帯で設計時に考慮される強さの3倍に及んでいた。その後、日本全国に整備された地震観測網により2000年以降に発生した大地震の地震動が記録されたが、兵庫県南部地震時に神戸で観測されたのと同様かそれ以上の地震動が繰り返し観測されている。これに対応して、今後発生する大地震により、地点によっては大都市圏で設計用地震動を大きく超える地震動が発生すると予測されている。したがって、現行の設計用地震動を大きく超える予測地震動に対する高層ビルの損傷とそれに伴う経済的被害を予測することは重要な課題と言える。

一方、現行の建物は、特に建築年代の新しい建物については、崩壊を防ぐことを目的とする設計用地震動を超えると直ちに崩壊するようには設計されているわけではなく、設計思想としてさらに余裕を持たせていることも事実である。しかしながら、設計用地震動に対する応答を超える領域で、どの段階から損傷がどのような損傷が発生するかは定量的には明らかにされておらず、損傷を定量的に予測する手段が確立していないのが現状である。

これに対して米国では、2000年代前半から死者(Death)、修復費(Dollar)、修復期間(Down time)を評価尺度に掲げた性能設計の研究が組織的に行われ、10年超をかけて成果がまとめられている(FEMAP-58)。日本でも、これに対応する研究が建築研究所を中心として行われたが、研究期間が短く研究対象も限定されていることから、実用的に適用できる段階には達していない。

2. 研究の目的

地震による被害は、死傷者と経済的な損失に分けられるが、建物の崩壊による死傷者の発生は超高層ビルでは比較的可能性が低いこと、その予測には応答解析等で技術的に困難を伴うことから今後の課題として残し、本研究では経済的損失の評価のみを扱う。地震による経済的被害は、修復費と修復期間に伴う経済的損失に大別される。修復期間の評価では工程を考慮する必要があるため、修復費の評価に比べてより複雑である。そこで、本研究では地震時の経済的損失として修復費に焦点をあてて、評価法の構築と評価に必要なデータの整備を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

地震を受けた建物の修復費の予測は、地震応答→損傷→修復費の段階を踏んで評価することになるが、各段階の評価には不可避的なばらつきが伴う。地震応答は、構造物が損傷を受ける非線形領域では確率的な変動が避けられない。応答に対する損傷の評価では、破壊現象の予測にはばらつきを伴うことは広く認識されている。損傷に対する修復費については、データは得られていないが、ある程度の変動を伴うことは避けられないと考えられる。このように、修復費の予測では多数の変動要因を考慮する必要があるが、各段階で変動を考慮した安全側の評価を行うと、総合的には過度に安全側の非現実的な評価となってしまう。この問題を回避しつつ、多数の変動要因を考慮するために、FEMAP-58が提唱するモンテカルロシミュレーション(以下、MCS)を導入した確率的評価法を導入する。

損傷の評価は部材レベルで行う。部材の損傷限界の変動を考慮するために損傷限界は確率的にフラジリティとして表現する。フラジリティのパラメータは、原則として部材実験に基づいて設定する。

修復費については、部材の損傷度毎に対応する修復作業を想定し、見積積算により修復費を算出する。また、ゼネコンにアンケート調査を行って修復費の変動幅を検討する。

4. 研究成果

4.1 修復費の評価システムの構築

図1に本研究で作成した修復費の評価システムのフローを示す。

地震応答解析には3次元骨組みモデルを採用した。実設計等では地震応答解析には現在でも質点系モデルが用いられることも多いが、強非線形領域では質点系モデルの精度が低下すること、計算機の速度の向上により3次元骨組みモデルによる応答解析が比較的短時間でできるようなっていることから、応答解析に3次元骨組みモデルを用いることにした。地震応答の変動を考慮するために、同一の地震動強度を持つ地震動を複数用いて地震応答解析を行い、応答値の統計量を求める。

修復費の評価はMCSにより多数回試行するので、MCSの試行回数だけ応答値の組が必要となるが、MCSで必要とする回数の地震応答解析を行うことは効率的とは言えない。そこでFEMAP-58で提案されているように、応答値の統計量、具体的には平均値と共分散に適合する応答値を生成してMCSに用いる。

試行毎の修復費の評価は、以下のように場合分けされている。まず、修復可能かどうかを判定する。これは、残留変形が大きすぎる場合や、建替費に対する修復費が高すぎる場合に、修復を行わず建替える場合があることを考慮するためである。建替を行う場合は、撤去費+建替費が修復費となる。次に、過大な残留変形により特別な対策が必要かどうかを判定する。修復が可能な場合については、部材毎の修復費を評価して積算する。残留変形対策が必要な場合は、残変形対策費+修復費が、残留変形対策が不要ない場合は修復費が最終的な修復費となる。

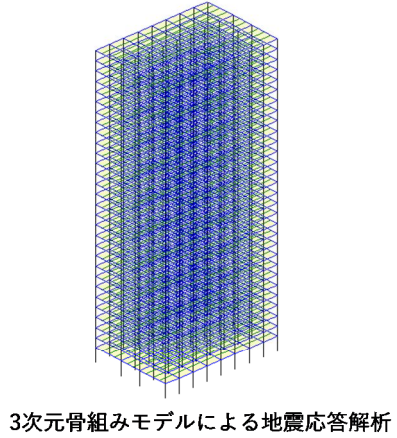
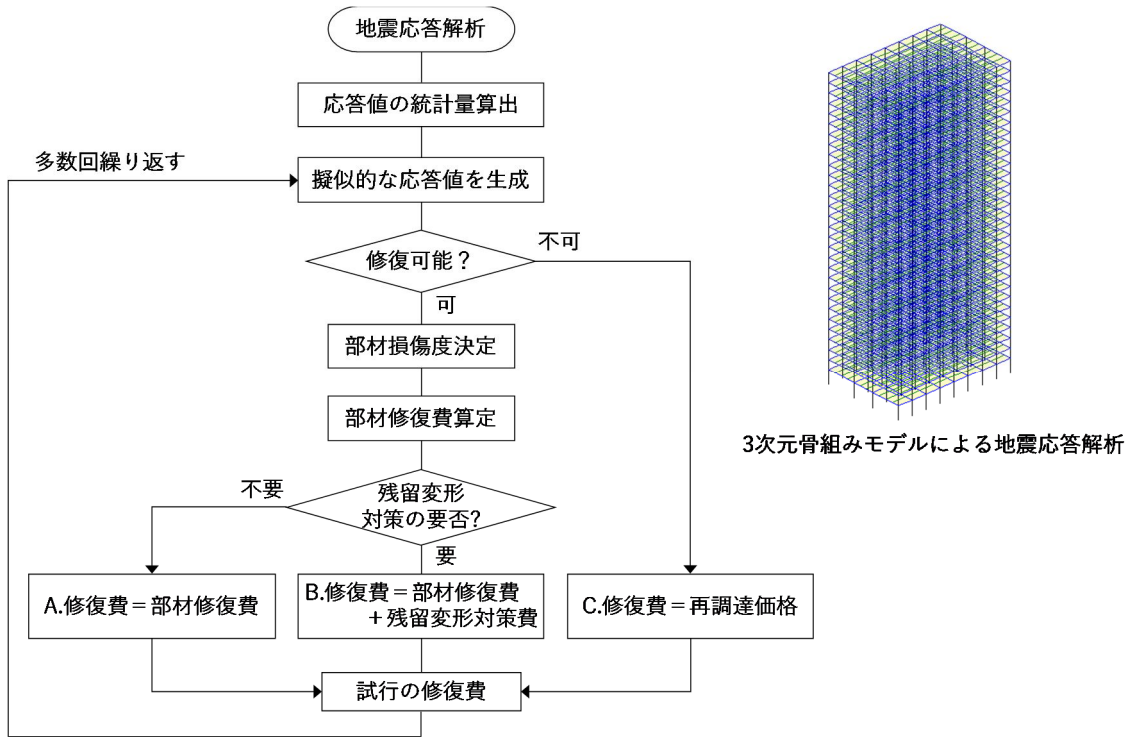


図 1 モンテカルロシミュレーションによる修復費の評価フロー

4.2 部材フラジリティの評価

部材の損傷を根拠に基づいて定量的に推定するためには、実験データに基づいて設定した部材フラジリティを用いる必要がある。多岐に渡る建築部材のフラジリティを本研究内で全て評価することは困難であるが、主要部材の実験データを収集してフラジリティを設定したので、以下に事例を紹介する。

S 造モーメントフレームでは、梁端の溶接部が破断することから図 2(a)に示すような柱梁接合部の実験データを収集してフラジリティを検討した。梁端の破断の説明変数としては、従来から材端変形角、塑性率、累積塑性率（累積塑性変形倍率）などが用いられている。また、近年では、低サイクル疲労則に基づく線形累積損傷度 D_f を用いることも提唱されている。これらの説明変数について、破断限界の中央値と対数標準偏差を図 2(c)～(f)に示す。

(c) 材端変形角

θ_u	旧来型	改良型	ノンスカラップ
中央値	0.042	0.043	0.039
対数標準偏差	0.333	0.392	0.191

(d) 塑性率

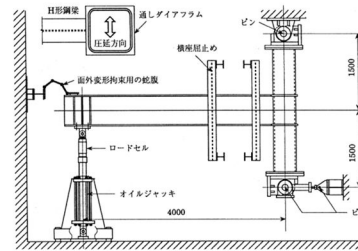
μ	旧来型	改良型	ノンスカラップ
中央値	4.99	5.19	5.37
対数標準偏差	0.267	0.276	0.198

(e) 累積塑性率

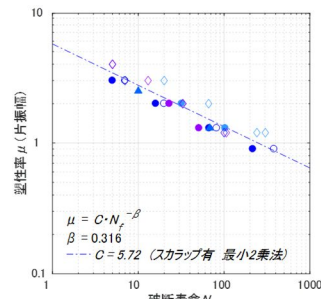
η	旧来型	改良型	ノンスカラップ
中央値	37.7	43.3	69.0
対数標準偏差	0.554	0.583	0.346

(f) 線形累積損傷度

D_f	旧来型	改良型	ノンスカラップ
中央値	1.18	1.49	0.89
対数標準偏差	0.853	0.945	0.646



(a) 柱梁試験体



(b) 定振幅繰り返し試験

図 2 S 造モーメントフレームの終局限界変形角の評価

RC 造モーメントフレームでは、現状では柱梁接合部が弱点となっており、塩原（2008）から

接合部破壊に関する新しいモデルが提案されている。そこで、図 3(a)に示すような柱梁十字架構の実験データを収集して RC 造モーメントフレームのフラジリティを検討した。図 3(b)に楠原ほか(2010)に基づいて算定した接合部降伏余裕度と 95%耐力低下時の変位角の関係を示す。

以上のような分析に基づいて設定した RC 造モーメントフレームのフラジリティの諸元を表 1 に示す。このうち、柱梁十字架構の実験データに基づいて設定したのは損傷限界であり、それ以外の損傷限界はひび割れ損傷モデルを用いて設定した。

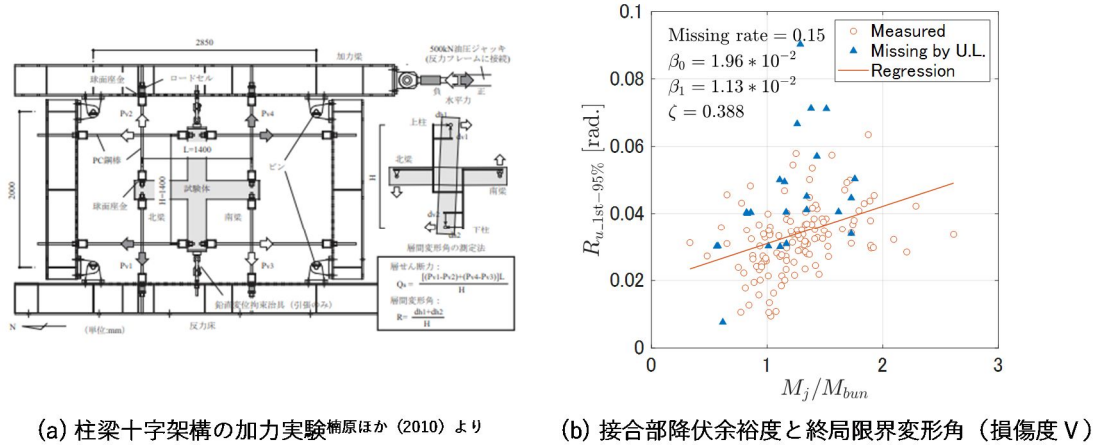


図 3 RC 造柱梁十字架構の実験データに基づく終局限界変形角の評価

表 1 RC 造モーメントフレームのフラジリティ諸元

(a) 損傷度 ~

損傷度	ひび割れ幅(mm)	変形角(%)	ひび割れ長さ(m)
0			80
0.1		0.25	
0.2		0.75	
0.6		1.25	
1		1.75	
1.5		2.25	
2		2.5	

(b) 損傷度

終局変形角	条件	中央値(%)	
$R_{u,1st-95\%}$	0.75 $M_j/M_{bun} < 1.0$	0.50	2.50
	1.0 $M_j/M_{bun} < 1.25$	0.40	3.25
	1.25 $M_j/M_{bun} < 1.5$	0.40	3.50
	1.5 $M_j/M_{bun} < 1.75$	0.40	4.00

4.3 修復費の評価

修復費の評価では、損傷状態に対応する修復量を推定し、修復費を見積算する必要がある。修復費については米国の先行研究である FEMA P-58 においても評価値はデータベースに記載されているものの、その根拠は公開されておらず、参考となる情報が少ない。

そこで、対象とした部材は限られるが、損傷状態に対応する修復量を想定し、見積算により修復費を評価した。また、修復費の変動幅を把握するために、ゼネコンにアンケート調査を行った。以下に、その事例を示す。

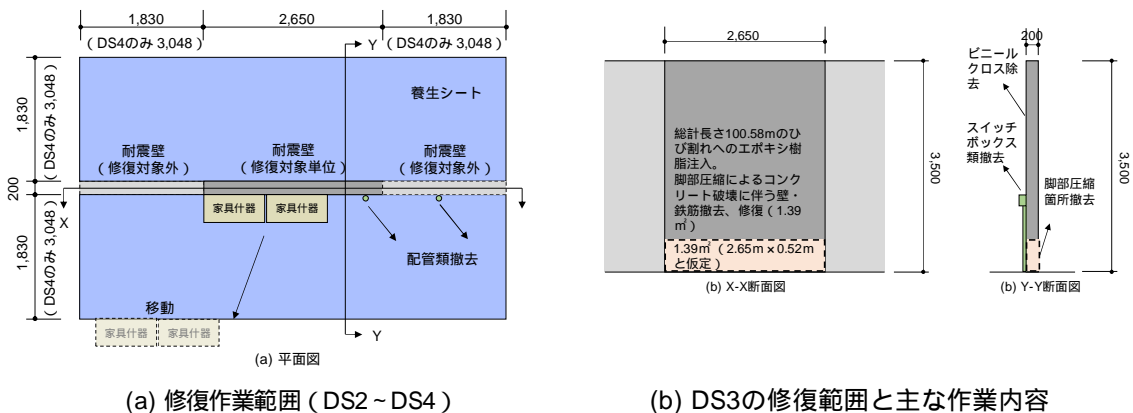
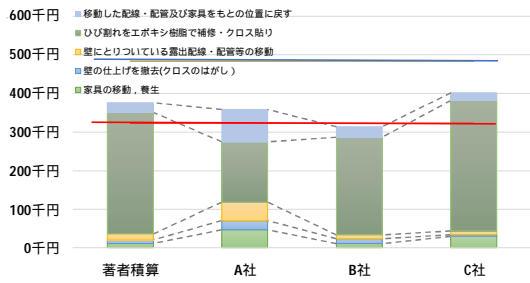
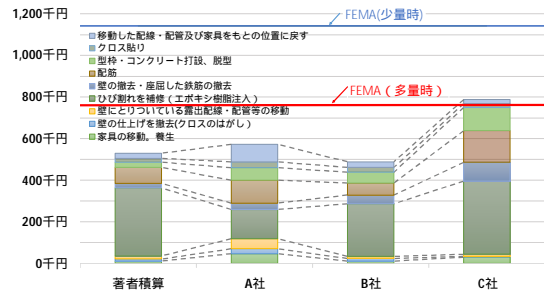


図 4 耐震壁の修復



(a) DS2修復費の比較



(b) DS3修復費の比較

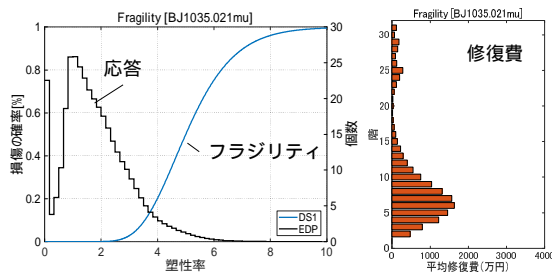
図 5 耐震壁の修復費の比較例

図 4(a)に耐震壁の修復に必要な作業範囲を，図 4(b)に DS3 (Damage State 3) の修復作業の概要を示す。図 5 に DS2 と DS3 の修復費の著者積算とゼネコンへアンケートの比較を示す。本例では，損傷度が大きくなると修復費の変動が大きくなる傾向が認められる。

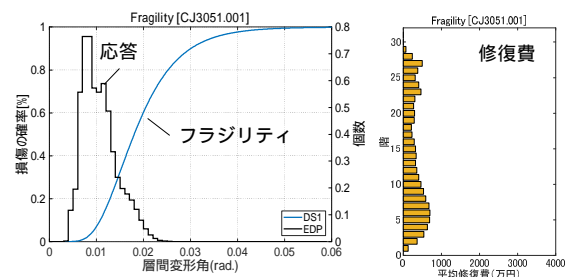
4.4 相模トラフの想定地震動に対する適用例

本研究の成果を，相模トラフの M8 級の想定地震動に対する建物損傷の評価に適用した事例を示す。

図 6 に，標準的に設計された S 造 30 階建て建物に横浜地点 (KNG002) の平均的な想定地震動を入力した場合の、鉄骨梁とアルミカーテンウォールの応答 損傷 修復費の評価例を示す。修復費は階別に集計して示す。図 7 に，建物全体の修復費の内訳を示す。この例では，過大な残留変形により建替となる場合の費用の比率が比較的大きいことが分かる。



(a) 鉄骨梁



(b) アルミカーテンウォールとガラス

図 6 相模トラフの M8 級地震動に対する S 造 30 階建て建物の部材損傷と修復費の評価例

：横浜地点 (KNG002) 2019 建築学会大会 PD 主題解説より

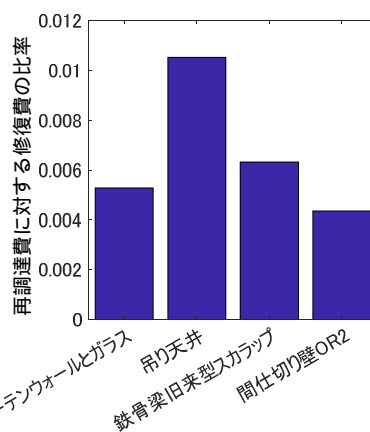
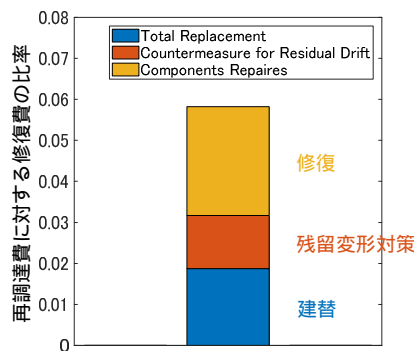


図 7 相模トラフの M8 級地震動に対する S 造 30 階建て建物の修復費の内訳の評価例

：横浜地点 (KNG002) 2019 建築学会大会 PD 主題解説より

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 桜庭 潮理, 岡野 創, 日下 彰宏	4. 巻 84
2. 論文標題 塑性率と累積塑性率に基づく線形累積損傷度の期待値の推定における減衰の影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 793, 799
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://doi.org/10.3130/aijs.84.793	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中村 正人, 岡野 創, 衣笠 秀行, 永野 正行, 日下 彰宏	4. 巻 25
2. 論文標題 積算見積とアンケートに基づく損傷を受けた耐震壁の修復費に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 685, 690
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijt.25.685	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岡野 創, 日下 彰宏, 桜庭 潮理	4. 巻 83巻 第747号
2. 論文標題 塑性率と累積塑性率から推定される線形累積損傷度の期待値	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 pp.669-676
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI http://doi.org/10.3130/aijs.83.669	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山崎美穂・日下彰宏・岡野 創
2. 発表標題 接合部曲げ強度と梁せん断強度を考慮した鉄筋コンクリート造フレームの部材フラジリティの検討
3. 学会等名 第15回 日本地震工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡野 創, 日下彰宏, 長谷川 幹
2. 発表標題 ネットワーク手法を用いた修復期間の自動評価に関する研究 (その1) ネットワークの自動生成とアクティビティの同期
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村正人, 岡野 創, 長谷川 幹, 日下彰宏
2. 発表標題 ネットワーク手法を用いた修復期間の自動評価に関する研究 (その2) 最短工期の算出方法と計算例
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎 美穂, 岡野 創
2. 発表標題 鉄筋コンクリート造フレームの部材フラジリティの検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村正人, 岡野 創, 日下彰宏, 永野正行, 衣笠秀行
2. 発表標題 耐震壁の修復費の評価に関する予備的検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桜庭 潮理, 岡野 創
2. 発表標題 減衰が有る場合の塑性率と累積塑性率を用いた線形累積損傷度の推定
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡野 創, 日下彰宏
2. 発表標題 測定限界を有する実験データの母数推定 ベイズ手法を用いたフラジリティ評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡野 創, 梅田 尚子, 貞許 美和
2. 発表標題 地震時の建物被害と経済的損失
3. 学会等名 日本建築学会大会 構造部門(振動) PD資料
4. 発表年 2019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	永野 正行 (Nagano Masayuki) (60416865)	東京理科大学・理工学部建築学科・教授 (32660)	