

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420601

研究課題名(和文) コンクリート系建物の終局限界に対する確率論的性能評価法の展開

研究課題名(英文) Probabilistic performance assessment for ultimate limit state of reinforced concrete buildings

研究代表者

長江 拓也 (Nagae, Takuya)

名古屋大学・減災連携研究センター・准教授

研究者番号：90402932

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：確率論的性能評価手法により、建物オーナー、住人等が自ら、地震後の継続使用性、補修性、終局安全性等を理解した上で、建物設計を選択することができる。近年、通常的设计で設定される地震動のレベルを遥かに超える威力を持つ直下地震が記録されている。設計レベル以上の地震動を広範に、また複数の都市に与える南海トラフ巨大地震が予測されている。本研究では、鑄鉄すべり支承を組み込む基礎構造を提案し、そこに確率論的性能評価手法を展開した。骨組変形の粘りにより安全性を確保する従来構造、および骨組変形が大きく進行する前に基礎をすべらす提案構造について、確率論的手法の系統的評価を適用することで、合理的な設計選択を実現する。

研究成果の概要(英文)：A probabilistic approach to assess seismic performance of reinforced concrete buildings was focused on. Owners and residents of buildings can decide the designs of their own buildings after understanding the key assessments such as continuous usability, reparability as well as prevention of collapse. Ground motions, whose intensity levels significantly exceed the adopted in design, have been recorded in recent earthquakes. Building foundations are required to be fixed in the current design code. An unfixed foundation system is proposed in this study. Cast iron bearings placed in a reinforced concrete foundation provide a stable frictional resistant force (friction coefficient of 0.2). Buildings adopting such foundation system are expected to exhibit sliding at foundation before having large inelastic deformations in upper frames. To apply the probabilistic approach promoted the development of proposed structural system.

研究分野：建築構造

キーワード：大変形 繰り返し加振 強度劣化 基礎 すべり 性能設計 確率

1. 研究開始当初の背景

大地震を受ける鉄筋コンクリート造建物の終局安全性や継続使用性を評価するためには、骨組の降伏機構を把握したうえで、各部材の損傷過程と破壊性状を適切に評価する必要がある。日本建築学会刊行の靱性保証型設計指針では、骨組の全体降伏機構を計画するとともに、塑性理論を用いたせん断強度式等によって部材の変形性能を評価し、終局限界状態までヒンジ領域に脆性的な破壊が生じないことを保証する設計法が体系化されている。性能評価指針では、変形成分を陽に分類し、そこから骨組全体の損傷度を導く評価手法が示されている。こうした詳細かつ体系的な性能評価用資料が、一般的な実務設計の中で陽に参照されることは極めて稀である。すなわち、建物の耐震性についての重要かつ詳細な情報が、一般社会には十分に伝わっていない状況にある。

こうしたなか、平成 21 年 12 月にコンクリート系建物に対する大型振動台実験が、実大三次元震動破壊実験施設 (E - ディフェンス) を用いて実施された¹⁾。実験では、新耐震設計法に従って設計されたコンクリート系建物 2 棟が対象とされ、純フレーム構造骨組と耐震壁フレーム構造骨組に対して繰り返し加振が与えられ、設計想定レベルの骨組変形、さらに設計想定レベルを遥かに超える骨組変形を被る地震応答が現出した。実験で試験骨組は、兵庫県南部地震相当の入力波を複数回経験したことにより重度の損傷が柱梁接合部、壁脚などに生じた。

2. 研究の目的

建物の耐震性能評価法のひとつとして、サイトの地震ハザードに対する地震動特性の不確実性から膨大な数の漸増時刻歴地震応答解析結果を統計処理し、上記指針類を参照した建物損傷フラジリティと重ね合わせる確率論的評価手順^{3),4)}が進展している。本研究では、合理的な性能評価手法の実用化に向けて関連の技術資料を蓄積する。

一方、補修・継続使用性を高める新たな構法、構造詳細についての研究開発にもたゆまず取り組む必要がある。上部構造と基礎構造の連成に関わる設計条件が両者のエネルギー吸収バランスを変化させる事実を利用し、基礎構造の柔軟性を高めた新損傷制御設計の検討を本研究の射程に据える。今後の性能設計の場面において、選択肢となる構造形式の実現できる耐震性能を、系統的に計るための物差しとして、確率論的手法の展開を意図している。

3. 研究の方法

補助事業期間 (3 年間) のうち、1 年目の平成 25 年度においては、上部骨組の地震応答特性に関連する技術資料の整備に取り組んだ。平成 21 年に実施された 4 層骨組に対する E - ディフェンス震動台実験を対象と

し、1 次モード応答特性 (Fig.1) を等価減衰、有効周期等の観点から定量的に分析するとともに、数値解析にて対象骨組をモデル化し、解析結果と実験結果を比較することで、適切な解析手法の特定を試みた。

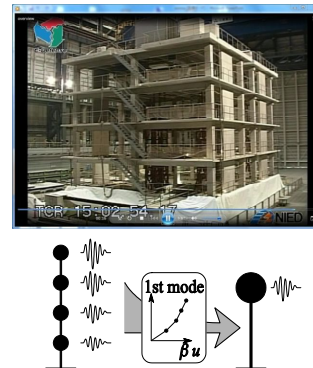
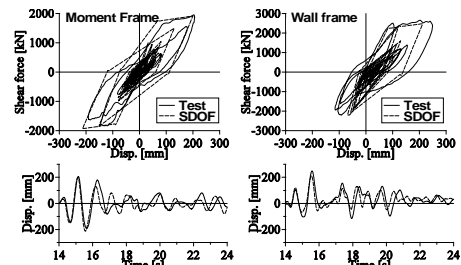
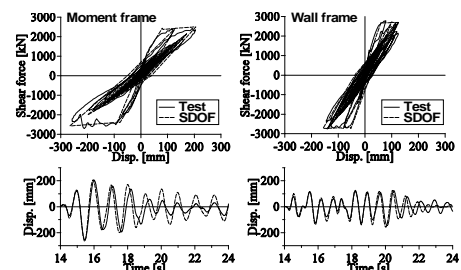


Fig.1 First mode response of the 2010 test data



(a) RC specimen ($g = -0.4$) in Kobe-100% test



(b) PT specimen ($g = -0.9$) in Kobe-100% test

Fig.2 Accurate evaluations for test responses

最大層間変形角が設計想定を大きく超える大変形実験についての検討が Fig.2 である。鉄筋コンクリート構造とプレストレストコンクリート構造のそれぞれにおける、純フレーム骨組と壁フレーム骨組において、適切に選択されたコンクリート系弾塑性履歴モデルは、実験の応答変位時刻歴波形を精度よく再現している。このような実用的な解析手法が、コンクリート系建物の代表的構造種別の実応答現象を包括的に表現しうることを確認することで、大変形領域までを対象とする応答変位予測において、安定した評価体系を与える 1 次モード縮約の手順を示した。また、1 次モード応答波形を等価減衰、有効周期等の工学量に置換することで応答スペクトル法の適用についても資料を整えることができた。

平成 26 年度は数値解析を用いて、基礎構

造を含む建物全体としての応答予測へと作業を進展させた。実規模の10層RC造建物を試設計し、各種地震動を用いた地震応答解析を実施した。提案基礎におけるすべり変形と上部構造の骨組変形の総量を評価対象としたとき、1自由度縮約による応答スペクトル法によって、時刻歴応答解析結果を適切に評価できることを確かめた。なお、解析には、過去に取り組んだ研究成果から、鋳鉄支承とコンクリート基礎の摩擦特性⁵⁾を組み込んだ。最終年度における平成27年度では、E-ディフェンスを用いた10層骨組の大規模振動台実験(11月-12月実施)に対して、これまでの検証内容を展開した。

そして、平成21年に実施した4層骨組の実験データを含め、1次モード応答特性を等価減衰、有効周期等の観点から分析する作業を進めた。一方、実験における繰り返し加振の条件を、繰り返す地震を複数回受ける建物条件と見立て、分析を進めた。ここでは、骨組変形の繰り返し回数と強度劣化性状の関係を対象として、終局性能評価精度の向上に取り組んだ。この点については、適切な解析方法がいまだ十分に確立されていない。そこで、近年米国で提案されているIbarra-Krawinklerモデルを導入して検討を進めた。入力条件を変えた多数の解析結果も参照しつつ、等価減衰、有効周期の傾向を考察した。

4. 研究成果

コンクリート系建物を対象に、確率論的性能評価手法の進展に寄与する技術資料を提示した。技術資料は解析研究および実験研究に基づくものである。確率論的性能評価、すなわち地震動の発生確率と建物損傷度を組み合わせた性能表現により、建物オーナー、住人等が自ら、地震後の継続使用性、補修性、終局安全性等の各種耐震性能を具体的に理解した上で、建物の構造形式等を選択することができる。近年、通常の設計で設定する地震動のレベルを遥かに超える威力を持つ直下地震が記録されている。設計レベル以上の地震動を広範に、また複数の都市に、与える南海トラフ巨大地震が予測されている。本研究では、現在の基準で義務化されている基礎固定の条件を解くことを提案する。摩擦係数にして0.2の摩擦抵抗力を安定して発揮する鋳鉄支承を基礎に組み込むことにより、大地震時、極大地震時において、骨組損傷が大きく進行する前に基礎がすべる構造形式を計画できる。骨組変形の粘りにより安全性を確保する従来構造、および骨組変形が大きく進行する前に基礎をすべらす提案構造の両者について、確率論的手法の系統的評価を参照しつつ、合理的な設計選択を推進することができる。

参考文献

- 1) 長江拓也, 田原健一, 福山國夫, 松森泰造, 塩原等, 壁谷澤寿海, 河野進, 西山峰広, 西山功: 4階建て鉄筋コンクリート造建物を対象とした大型振動台実験, 日本建築学会構

造系論文集, pp.1961-1970, No.669, 2011.11

- 2) 長江拓也, 田原健一, 福山國夫, 松森泰造, 塩原等, 壁谷澤寿海, 河野進, 西山峰広, 西山功: プレストレストコンクリート造建物の耐震性能評価と向上に関するE-ディフェンス振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, No.672, 2011.2
- 3) Helmut Krawinkler, Hessam Aslani, Jack Baker, C. Allin Cornell, Jon Heintz, Tara Hutchinson, Ufuk Ince, Steven Kramer, Bruce Kutter, Laura Lowes, Geoffrey Martin, Jack Meszaros, Eduardo Miranda, Takuya Nagae, Robert Pekelnicky, Keith Porter, Kim Shoaf, Hope Seligson, Paul Smerville, Farzin Freian: Van Nuys Hotel Building Testbed Report / Exercising Seismic Performance Assessment, PEER Report 2005/11, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, October 2005.
- 4) 長江拓也, 林静雄, 中島正愛: 全体降伏機構を呈する鉄筋コンクリートフレーム構造の強度劣化と終局限界, コンクリート工学年次報告集, Vol.29, No.3, pp.1021-1026, 2007
- 5) 黒鉛潤滑を応用した直置き型鋼構造建物柱脚の摩擦低減, 榎田竜太, 長江拓也, 池永昌容, 稲美充顕, 中島正愛, 日本建築学会構造系論文集, 査読有り, 685号, pp.435-444, 2013

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

T. Nagae, W. M. Ghannoum, J. Kwon, K. Tahara, K. Fukuyama, T. Matsumori, H. Shiohara, T. Kabeyasawa, S. Kono, M. Nishiyama, R. Sause, J. W. Wallace, and J. P. Moehle, DESIGN IMPLICATIONS OF A LARGE-SCALE SHAKING TABLE TEST ON A FOUR-STORY REINFORCED CONCRETE BUILDING, American Concrete Institute, Structural Journal, 112巻2号, pp.135-146, 2015(査読あり)

[学会発表](計 3件)

Takuya Nagae, Taizo Matsumori, Hitoshi Shiohara, Toshimi Kabeyasawa, Susumu Kono, Minehiro Nishiyama, Jack Moehle, John Wallace, Richard Sause, Wassim Ghannoum (2014) The 2010 E-Defense Shaking Table Test on Four-Story Reinforced Concrete and Post-Tensioned Concrete Buildings, the 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, USA, Paper ID 795, 2014.7.24

Ahmet Tanyeri, Jack Moehle, Takuya Nagae (2014) Seismic Performance and Modeling of Post-Tensioned, Precast Concrete Shear Walls, the 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, USA, Paper ID 470, 2014.7.24

Zeynep Tuna, Sofia Gavridou, John Wallace, Takuya Nagae, Taizo Matsumori (2014) 2010 E-Defense Four-Story Reinforced Concrete and Post-Tensioned Concrete Buildings- Comparative Study of Experimental and Analytical Results, the 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, USA, Paper ID 805, 2014.7.24

6. 研究組織

(1)研究代表者

長江 拓也 (NAGAE, Takuya)

国立大学法人名古屋大学・減災連携研究セ

ンター・准教授
研究者番号：90402932

(2)研究分担者

松森 泰造 (MATSUMORI, Taizo)
国立研究開発法人防災科学技術研究所・減
災実験研究領域兵庫耐震工学研究センタ
ー・主任研究員
研究者番号：10272361

土佐内 優介 (TOSAUCHI, Yusuke)
国立研究開発法人防災科学技術研究所・減
災実験研究領域兵庫耐震工学研究センタ
ー・研究員
研究者番号：10737597

森川 信之 (MORIKAWA, Nobuyuki)
国立研究開発法人防災科学技術研究所・社
会防災システム研究領域災害リスク研究
ユニット・主任研究員
研究者番号：60414413

高橋 典之 (TAKAHASHI, Noriyuki)
国立大学法人東北大学・工学(系)研究科
(研究院)・准教授
研究者番号：60401270