

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：14301  
 研究種目：基盤研究(C) (一般)  
 研究期間：2015～2017  
 課題番号：15K06292  
 研究課題名(和文) 1985年メキシコ地震にて倒壊したRC造住宅の固有周期変化と棟間衝突に関する研究  
  
 研究課題名(英文) Study on change of natural period and pounding of RC residential building collapsed in 1985 Mexico Earthquake  
  
 研究代表者  
 佐藤 裕一 (Sato, Yuichi)  
  
 京都大学・工学研究科・助教  
  
 研究者番号：20293889  
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：長周期地震として知られる1985年メキシコ地震において被災した14階建鉄筋コンクリート(RC)造集合住宅ヌエボ・レオン棟の倒壊に至る機構を実験と数値解析により解明した。ヌエボ・レオン棟は当初1秒であった固有周期が、震動過程で2秒まで増大して共振が発生するとともに、エクспанション・ジョイントを介して隣接する棟同士の衝突が建物倒壊の原因になったと推定される重要な事例である。本研究は、(1)震動過程の固有周期変化、および(2)棟間衝突が建物の損傷・倒壊を引き起こす機構を解明し、長周期地震動時の損傷防止を目的とした設計や検証に利用できる数値モデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：On September 19, 1985, middle/high rise buildings in Mexico City were severely damaged. A 14-story RC residential building Nuevo Leon is known to have suffered the most severe damage. It is supposed that the natural period was elongated due to structural damage including and resonance with the ground motion occurred. The building consisted of three structurally independent units and pounding between the units occurred and significant impact load was applied to the building structure. This study attempts to quantitate the period-elongation and the impact load due to contact/friction by means of finite element analyses and experimental tests. The evaluated pounding load induced between the building units. This load is 2.9 times the flexural strength of the column on the 14th story although it is resisted by the shear/flexural capacities of several adjacent columns. The analysis indicates that the pounding is accompanied with the friction in the transverse and up-down directions.

研究分野：鉄筋コンクリート工学

キーワード：低速衝突 有限要素法 反発係数 ひずみ速度依存性 残留変位 ひび割れ幅 ひび割れ長さ 非線形諸衝突モデル

## 1. 研究開始当初の背景

1985年9月19日に発生したメキシコ地震は、卓越周期2秒の長周期地震であり、固有周期が一致した中高層建物に大きな被害を出した。特に14階建集合住宅ヌエボ・レオン棟は、震動過程の損傷で固有周期が伸び、地震の卓越周期と共振して倒壊に至ったことで知られる(引用文献①)。

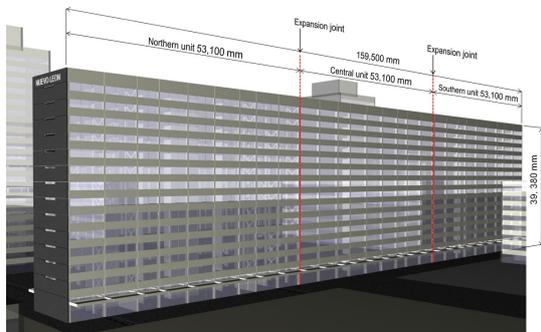


図1 ヌエボ・レオン棟外観

ヌエボ・レオン棟は3棟がエクспанション・ジョイントを介して連続していた。震動過程ではこの3棟の損傷が異なる度合いで進行し、固有周期の変化も異なった結果、棟ごとの揺れにずれが生じて棟間衝突を起こし、倒壊要因の一つになったと推定されている(引用文献②)。

当時のメキシコの設計規準に基づくRC建物は水平加速度150gal程度で倒壊に至ると報告されている(引用文献③)。一方、地震の最大加速度は168galであった。ヌエボ・レオン棟と同型棟は同じ敷地内にありながら倒壊、大破、中破と被災度が異なっていたが、これは地震力が建物の存否を分ける閾値上にあつたためと考えられ、この点からも検証対象として大きな意義を持つ。

今後予想される海溝性長周期地震において、RC建物はコンクリートの強い非線形性をもつ損傷によって固有周期が大きく変化し、予期せぬ共振や棟間衝突を起こす可能性がある。その対策を講じるためには、建物の振動特性、および衝撃作用時の挙動を、正確に把握する必要がある。

申請者はヌエボ・レオン棟の固有周期変化と倒壊機構を解明するため、数年にわたって数値解析による検討を続けてきた(引用文献④)。しかし棟間衝突の影響を定量化するための手法は国内外でもほとんど着手されておらず、実験と数値解析を組み合わせた研究が不可欠である。

実験的研究に関しては、建物全体の振動・倒壊挙動評価の事例がかなり存在する(引用文献⑤)ものの、棟間衝突により作用する荷重、加速度変化、減衰特性を定量的に評価した例は見られない。

数値解析に関しては、非線形材料構成モデルに基づくプログラムが開発されており(引用文献⑥)、振動・衝撃作用時の挙動をかな

り把握できるようになりつつある。ただし、地震動下の固有周期変化の予測結果については、十分な活用が行われていない。さらに、棟間衝突を再現するための数値解析構成モデルは、上記の通り、まったく構築されていない。

## 2. 研究の目的

本研究は1985年メキシコ地震で倒壊したヌエボ・レオン棟について、

(1) 震動過程の固有周期変化

(2) 棟間衝突

が建物の損傷・倒壊におよぼす機構を解明する。

こんにち日本および海外の設計用加速度応答スペクトルは、震動過程の固有周期変化の定量的評価を十分に考慮しきれていない。ヌエボ・レオン棟は当初1秒であった固有周期が、震動過程で2秒まで劇的に増大し、棟間衝突をも引き起こした顕著な事例である。固有周期変化から棟間衝突、倒壊にまで至る機構を解明し、これを計算機上で容易に再現する手法を確立することを目標とする。

## 3. 研究の方法

以下の方法により研究を実施する。

(1) エクспанション・ジョイント近傍の躯体をモデル化した実験を実施し、棟間衝突時に作用する荷重、加速度変化、減衰特性を定量化する。

(2) 上記実験に基づいて、棟間衝突を再現する有限要素解析用の構成モデルを構築する。

(3) 上記の作業に基づいて、ヌエボ・レオン棟の全架構を非線形有限要素法により解析し、震動開始から棟間衝突を経て倒壊開始に至るまでの機構を解明する。

## 4. 研究成果

2015年度は実部材を模した試験体による実験、および非線形時刻歴応答有限要素解析の2つの作業を通して、棟間衝突による影響と、その入力荷重の概算値を得た。

(1) 実部材試験については、エクспанション・ジョイント近傍の縮小架構試験体を2体作製し、固有周期が約2倍になると概算された変形レベルまで静的載荷を行った後、高速載荷を行い、棟間接触を再現する予定としていた。実際の実験においてはより局所的な接触挙動を把握するため、縮小架構試験体を実大中間階柱試験体に置き換え、ほぼ所期の実験データを採取した。

(2) 非線形時刻歴応答有限要素解析については、3棟接続の15万総自由度程度のモデルによる解析を予定していた。実際の解析においては、隣接接続部の接触を詳細に把握するため、棟数を2棟に減らす一方、1棟あたりの自由度数を5万自由度から6万自由度程度に増やして解析を行い、棟間接触による衝突荷重を概算した。また当初は次年度に予定していた接触抵抗構成モデルの構築に着手

し、実際の解析において機能することを確認した。

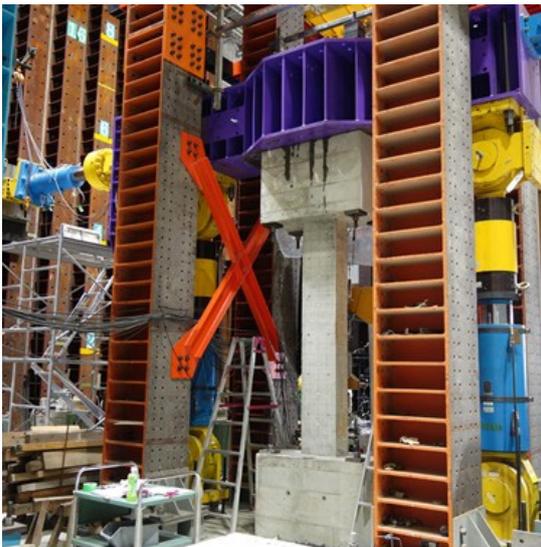


図2 実部材実験

次いで 2016 年度は以下の研究作業を実施した。

(3) 最上層階架構の1層1スパン試験体を作成し、落下錘衝突試験を実施した。衝撃載荷実験では、落下錘重量が一定以上の場合、衝突時における落下錘のリバウンドによって試験体への入力分散するため試験体の最大加速度は落下錘重量と比例しないこと、一方、試験体の最大部材角や残留部材角はおおむね比例すること、試験体の損傷によって卓越周期は長くなっていることを確認した。衝突後の静的載荷試験では、落下錘重量が小さい場合には剛性低下は確認されなかった。逆に落下錘重量が大きい場合は剛性の低下や等価粘性減衰定数の低下(最大で20%低下)を確認した。

(4) 衝撃載荷実験の FEM 解析においては、応答変位、リバウンド荷重、力積、ひび割れ分布の各項目について実験結果との整合を確認した。また衝突後の自由振動の卓越周期、および衝撃載荷後の剛性低下についても実験結果を適切に再現した。この結果から、比較的低速(5m/s程度)の衝撃荷重を受ける RC 架構試験体の衝突部モデル化にあたっては約 100kN/mm の剛性を有する接合要素を挿入が適切であることを確認した。

(5) 2015 年度に作成したヌエボ・レオン棟の有限要素モデル(全節点数 23,256、総自由度数 115,974)に上記の 100kN/mm の剛性を有する接合要素を適用し、地震応答解析を実施した。また昨年度の計算では考慮しなかった床積載重量の変動を解析パラメータに加えた。計算の結果、隣接する棟間の床重量差が 10%を超えると棟間の衝突領域が拡大し、重量増大の影響と相まって倒壊挙動を始めることを確認した。

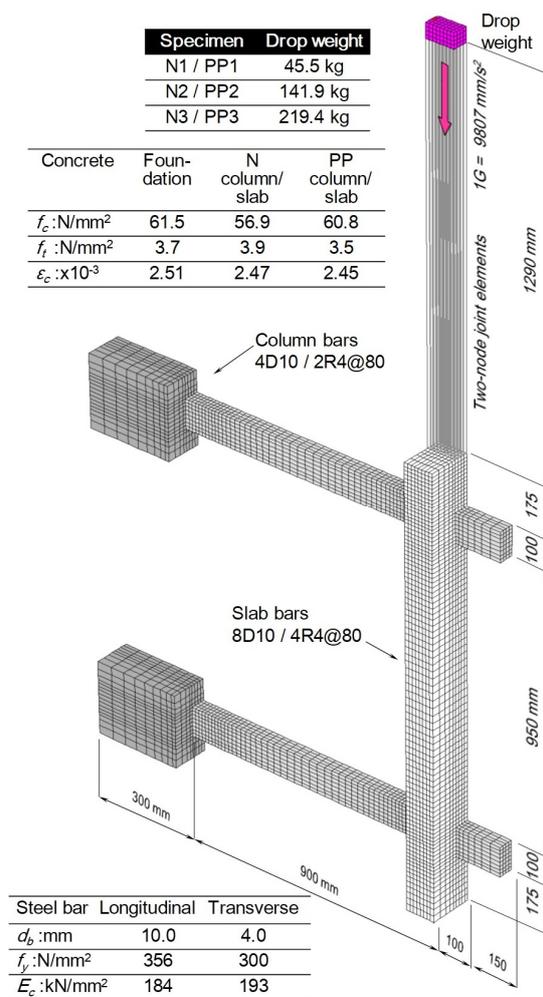


図3 衝撃載荷実験の有限要素解析

2018 年度において、棟間衝突のモデル化にあたり解析上・設計上敏感な影響を及ぼす反発係数の定量化をはかるため、追加の衝突実験を行った。またこの追加実験と前年度までの成果を反映した 3 棟連棟の全体架構有限要素モデルを作詞し、その解析結果に基づきヌエボ・レオン棟の倒壊原因を定量的に評価した。

(6) 追加衝突実験については、衝突部の設計詳細をより実構造物の状況に近づけた架構試験体および載荷装置を製作した。すなわち前年度には鋼製落下錘をやはり鋼製ロードセルに衝突させる形で実施していた、これに対し本年度は落下錘とロードセルにコンクリート系緩衝ブロックを組み込み、より実状に近い反発係数と定量化と構成モデルの最適化を行った。この追加実験は、前度と同様に残留性能を定量化し、かつ有限要素解析による衝突部モデル化の確認を行っている。この際、架構の剛性・減衰に加えて緩衝ブロックの影響を考慮した見かけの反発係数を実験的に得たことにより、衝突構成モデルの剛性と粘性の定量化により高い信頼性が得られた。

(7) 3 棟連棟のヌエボ・レオン棟全体架構有限要素モデルについて、竣工時から地震発生時

までの 23 年間におよぶコンクリートの乾燥収縮ひび割れを再現し、かつこの 23 年に生じたと推定される地盤の不同沈下も再現したうえで、地震応答解析を実施した。この解析によって、ヌエボ・レオン棟の倒壊原因を工学的に十分な客観性をもって評価した。

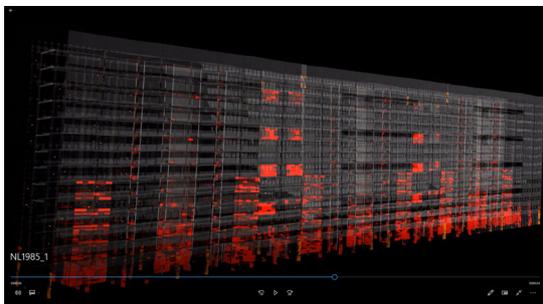


図 4 ヌエボ・レオン棟解析アニメーション

#### <引用文献>

- ① 日本建築学会 (1987) 1985 年メキシコ地震災害調査報告書
  - ② 磯部大吾郎, 太田外氣晴, 井上智広, 松枝富士雄 (2010) 長周期地震動を受ける隣接建築物の棟間衝突・崩壊解析, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, PS3-Sat-26
  - ③ Rodriguez, M., E., Santiago, S. and Meli, R. (1995) Seismic load tests on two-story waffle-flat-plate structure. J. Struct. Engrg., ASCE, 121(9), 1287-1293.
  - ④ 佐藤裕一ほか (2013) 建物の強非線形挙動の再現における可能性と展開, 日本建築学会構造委員会応用力学運営委員会, pp. 21-31 (分担執筆) .
  - ⑤ M. Sasani, M. Bazan, and S. Sagioglu, "Experimental and analytical progressive collapse evaluation of actual reinforced concrete structure", ACI Structure Journal, Vol. 104, No. 6, pp. 731-739 (2007).  
6 長沼一洋, 米澤健次, 松森泰造, 壁谷澤寿海 (2007) 1 / 3 スケール RC 造 6 層壁フレーム模型振動台実験の 3 次元動的 FEM 解析 (その 1, その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 構造 IV, pp. 403-406
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 2 件)
- ① Takahiro Chujo, Hiroshi Yoshikado, Yuichi Sato, Kazuhiro Naganuma, Yoshio Kaneko: Experimental and Analytical Investigations of Seismic Pounding of Adjacent 14-Story Reinforced Concrete Buildings Damaged in 1985 Mexico Earthquake, Advanced Concrete Technology Vol. 14, 753-769, December 2016, DOI: 10.3151/jact.14.753.
  - ② Koki Makita, Yoshifumi Uda, Hiroshi Yoshikado, Koji Mori, Yuichi Sato, Kazuhiro Naganuma, Yoshio Kaneko: Drop-Weight Test For RC Frame Made Of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete, Advanced Concrete Technology Vol. 16, 36-45, January 2018, DOI: 10.3151/jact.16.36.
- [学会発表] (計 9 件)
- ① 佐藤裕一, 中条貴大, 金子佳生: 棟間接触をモデル化した 1985 年メキシコ地震被災 RC 建物の地震応答 その 1-2 研究方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp. 295-298, 2016.
  - ② 宇田佳史, 榎田航己, 井上遼, 長谷部祐真, 森浩二, 佐藤裕一, 金子佳生: 1 層 RC 架構試験体の落下錘衝撃試験 その 1-4 実験計画, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 構造系, 第 56 号, pp. 665-680, 2017
  - ③ 榎田航己, 宇田佳史, 井上遼, 長谷部祐真, 森浩二, 佐藤裕一, 金子佳生: 1 層 RC 架構試験体の落下錘衝撃試験 その 2 実験結果, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 構造系, 第 56 号, pp. 669-672, 2017
  - ④ 井上遼, 長谷部祐真, 榎田航己, 宇田佳史, 森浩二, 佐藤裕一, 金子佳生: 1 層 RC 架構試験体の落下錘衝撃試験 その 3 解析計画, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 構造系, 第 56 号, pp. 673-676, 2017
  - ⑤ 長谷部祐真, 井上遼, 榎田航己, 宇田佳史, 森浩二, 佐藤裕一, 金子佳生: 1 層 RC 架構試験体の落下錘衝撃試験 その 4 解析結果, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 構造系, 第 56 号, pp. 677-680, 2017
  - ⑥ 佐藤裕一, 森浩二, 長沼一洋, 金子佳生: 低速衝撃を受ける RC 架構の損傷と残存性能の有限要素解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 2, pp. 613-618, 2017.
  - ⑦ 宇田佳史, 榎田航己, 井上遼, 長谷部祐真, 森浩二, 佐藤裕一, 金子佳生: 1 層 1 スパン RC 架構試験体の落下錘衝撃試験 その 1 -5 実験計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 527-536, 2017.
  - ⑧ 吉門大志, 中条貴大, 佐藤裕一, 金子佳生: 棟間衝突をモデル化した 1985 年メキシコ地震被災 RC 建物の地震応答 その 3 積載荷重を変数とした解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 741-742, 2017.
  - ⑨ 船倉一将, 佐藤裕一, 金子佳生: 多段階破壊機構を有するセメント系複合材料部材の有限要素法によるひび割れ指標に基づく損傷評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 659-660, 2017.
- [図書] (計 1 件)
- ① 佐藤裕一: 建築構造における強非線形問題への数値解析による挑戦, 日本建築学

会 , pp.101-123 , 2018.3 ,  
ISBN-10:4818906476 (分担執筆)

〔産業財産権〕  
該当なし

〔その他〕  
ホームページ等  
[http://www.kaneko.archi.kyoto-u.ac.jp/kenkyu\\_NL1985.htm](http://www.kaneko.archi.kyoto-u.ac.jp/kenkyu_NL1985.htm)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 裕一 (SATO, Yuichi)  
京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号 : 20293889

### (2) 研究分担者

金子 佳生 (KANEKO, Yoshio)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号 : 60312617