

令和元年6月24日現在

機関番号：82641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06602

研究課題名(和文) 高加速度応答を経験した鉄筋コンクリート造耐震壁の残存構造性能評価法の開発

研究課題名(英文) Structural residual performance evaluation on reinforced concrete wall suffered with high-frequency acceleration vibration response

研究代表者

金澤 健司 (Kenji, Kanazawa)

一般財団法人電力中央研究所・地球工学研究所・上席研究員

研究者番号：00371435

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)：剛性は、建築物の地震力や揺れの大きさを左右する基本的な物理量のひとつであり、地震後の構造健全性を保証するためのモニタリング指標への活用が期待されている。本研究では、地震を繰り返し経験する際に耐震壁の剛性が低下していくメカニズムを解明するため、あるいは高加速度の地震動を受けても建物の構造健全性が維持されることを実験的に検討するため、鉄筋コンクリート板状試験体を対象とした高加速度載荷試験法を開発した。そして、小さな変形を経験した後に耐震壁の剛性が低下していく傾向を評価できることなどを実験的に検証し、わずかな剛性変化に基づいて耐震壁の初期の欠陥を検出する技術開発への可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築物はオーダーメイドで作られる場合が多く、しかも耐震性能は稀に発生する地震に備えたものであるため、工場製品と違って客観的な品質や性能の補償が困難である。また、高度成長期に建設された建物の耐用年数が迫る中で、経年的な劣化事象を検査する診断技術への期待は高い。その意味で、客観的な評価指標となりうる剛性や固有振動数をモニタリングする構造健全性評価法の確立は急務である。今回の研究では、従来は検出が困難であったわずかな剛性変化を捉えられるコンクリート構造材料の試験方法の原理を確認することで、今後、本研究で明らかにした原理を応用して、初期のわずかな欠陥を検出する技術の開発へと展開が期待される。

研究成果の概要(英文)：Stiffness is one of the fundamental physical properties to have an influence on the magnitude of seismic loads or earthquake responses, and which are expected to be utilized to a structural health index as proving structural integrity of an existing building after quake-shocks. In this study a novel high acceleration loading test for a reinforced concrete plate-shaped specimen have been developed, in order to clarify the mechanism of degrading stiffness on shear-resisted walls with suffering repetitive loads, and in order to conduct experimental tests to assure the fact that the structural integrity will be still remained even after suffering a high-acceleration and high resonance frequency seismic waves. The study also has shown the possibility of evaluating stiffness degrading effects on the resisted shear walls even after experienced in tiny shear strain. The results will bring the next generated structural health monitoring with finding early defects on shear walls.

研究分野：工学

キーワード：建築構造・材料 モニタリング 保全技術 鉄筋コンクリート耐震壁 高加速度 地震経験 固有振動数 剛性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1)1994年米国ノースリッジ地震や1995年阪神淡路大震災の発生以降、建築物の耐震性能への要求として、倒壊を防止して人命を保護するだけでなく、建築物の機能維持や修復性などの建物を継続して使用するための構造性能の確保が社会一般のニーズとして強いことが明らかとなった。そのような要求は、2011年東北地方太平洋沖地震による広域的な地震災害の発生によってさらに強くなった。このような建物の継続使用性を判断するため、振動計測に基づく構造ヘルスマモニタリング技術(以下、SHM技術)に関する研究が実施されてきた。SHM技術に係る研究分野では、センシング技術やデータ解析技術などのハード開発が先行する一方で、「どのくらい建物の固有振動数や剛性が低下したら継続使用が困難と判断するか」といった研究や知見が不足しており、SHM技術の実用化を阻害している。

(2)その一方で、SHM技術のハード開発が進んだことによって、実建物や実大建物試験体による固有振動数や建物剛性の低下現象に係る観測記録や知見が蓄積されつつある。例えば、研究代表者が勤務する耐震壁付き10階建鉄骨鉄筋コンクリート建物では、2011年東北地方太平洋沖地震による震度5強の地震動を受けた後に目視調査により健全と判定されたものの、常時微動による評価で層剛性が最大で40%程度低下していることが確認された。この事例のように弾性範囲のみの地震応答を経験して建物の振動数や剛性が低下したという報告例は増えている。建物の振動数や剛性の低下は、次に受ける地震に対して変形や荷重が増加する事象へとつながる恐れがあるため、そのメカニズムを解明し、必要に応じて対策を講じることが望ましい。特に、短周期地震動や衝撃荷重等の高周波・高加速度の荷重に対して変形量が小さく留まり、一見して健全に見える建物に対する耐震壁の剛性・耐力評価は、SHM技術に必須の検討項目であるものの、衝撃に関する既往研究は高ひずみ速度に対するコンクリート材料の初期剛性増加や耐力上昇に係るひずみ速度依存性に着目したものが多く、外力経験後の剛性低下に係るデータや知見は乏しいのが現状である。

<引用文献>

日本建築構造技術者協会:建築の構造設計、第4章 目標性能と性能メニュー、オーム社、2002。
福和伸夫、高橋暁、飛田潤、斎藤知生、青木真、岡田成幸、久田嘉章:強震観測とモニタリング技術が災害時に果たすべき役割、2012年日本建築学会(東海)構造部門(振動)PD資料、2012.09。

吉澤伊織、金澤健司、飯野夏輝、北村春幸:強震動を経験した無被害SRC造建物の常時微動に基づく振動特性評価、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、構造、pp.563-564、2012.9。

日本建築学会:建築物の耐衝撃設計の考え方、216-221、2015.1。

白井孝治ほか:熱的経年変化による水分逸散したコンクリートの力学特性に及ぼすひずみ速度依存性の評価、電力中央研究所研究報告N11062、2011.5。

2. 研究の目的

短周期地震動や衝撃荷重等の高加速度応答を経験した耐震壁付き鉄筋コンクリート造(以下、RC造)建物の残存構造性能を明らかにすること、あるいは、振動計測に基づく構造ヘルスマモニタリングを促進させることを目的として、鉄筋コンクリート面部材を対象として地震経験に基づく剛性の変化を実験的に評価し、その変化が発生するメカニズムを考察する。

3. 研究の方法

(1)高加速度振動台実験に基づく鉄筋コンクリート板の動特性評価

弾性範囲内の高加速度振動を経験したRC造耐震壁の剛性低下現象のメカニズムを解明するため、鉄筋コンクリート板状試験体(以下、RC板試験体)を対象として慣性質量機構を利用した実験装置を新たに開発し、その実験装置を用いて耐震壁の面内変形に対する地震経験と剛性低下の関係を実験的に評価した。実現象を想定したとき、耐震壁付きRC造建物では、短周期地震動の影響を受けやすいことから、地震時に変形量が比較的小さく留まり、一見して健全に見える場合に剛性低下が大きく発生し、次の地震荷重に対して損傷しやすくなる事象が懸念される。この点を考慮して、地震荷重の動的効果がRC造耐震壁に及ぼす影響を分析するため、動的地震荷重となる慣性外力における質量と加速度の配分や加振振動数を調整した振動台実験を実施した。このうち、慣性外力の配分については、例えば、最大慣性力2000トン・ガルの質量×加速度の配分を、0.5トン×4000ガルまたは4.5トン×444ガルの2種類に設定して、その評価結果の違いに基づいてRC板試験体の動的荷重効果の分析を試みた。また、耐震壁における曲げ変形とせん断変形などの変形モードの違いが剛性低下現象に及ぼす影響を分析するため、試験体に鉄板補強を施すことによって変形モードをパラメータとした実験メニューも設定した。

(2)実大4層建物実験を対象としたRC造建物の固有振動数の分析

上記(1)での検討で用いる試験体は、実験設備の制約上、寸法30cm×30cm×5cm程度のサイズであり、スケール効果が懸念される。このため、実規模サイズでのRC耐震壁の剛性低下現象を分析することを目的として、(国研)防災科学技術研究所E-ディフェンスにおいて2010年12月に実施された4層鉄筋コンクリート建物実験(RC建物実験)を対象として、地震経験と剛性低下の関係を分析する。このRC建物実験では、耐震壁付きRC造建物に徐々に大きくした地

震動が複数回にわたり与えられており、それらの主要加振前後では微小加速度によるホワイトノイズ加振も実施されている。これらのホワイトノイズ加振を大地震前後の小地震と見なして、小地震記録による建物低下現象の把握を試みる。また、RC建物実験において、研究代表者らは、RC建物試験体に加速度センサを設置して人体には感じない微小振動（以下、常時微動）の連続観測を実施した。この常時微動の連続観測記録を分析することにより、小地震と常時微動のふたつの観測に基づくRC建物の剛性低下の結果を比較する。また、竣工後から初期の地震経験までの剛性低下現象については、例えば、初回のホワイトノイズ加振そのものが地震経験となってしまうため、小地震では分析が困難である。この点を考慮して、このような建物供用期間初期における剛性低下事象に着目した分析を、常時微動データを用いて検討する。

(3) コンクリート圧縮試験標準試験体を用いた剛性低下事象の分析

コンクリート材料の硬化はセメントと水の水和反応によるものであり、例えば4週間以上が経過して十分に硬化した後であっても、あるいは養生条件によっては数年が経過した後でも、水和反応は時間とともに収束するものの、継続してわずかに進行する。その結果として、剛性や強度に経年的な変化が発生する。また、コンクリート構造材料は表面から徐々に乾燥して水分が失われて収縮することが知られており、乾燥収縮と呼ばれる。

これらの水和反応や乾燥収縮に起因したコンクリート構造体の剛性変化を把握するための検討として、養生条件や圧縮試験の時期を種々に変えたコンクリート圧縮試験標準試験体（直径10cm、高さ20cm）を用いて剛性や強度の経時的な変化を実験的に評価した。

<引用文献>

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，第669号，pp.1961-1970，2011.11．

4. 研究成果

(1) 共振振動台を利用した高加速度実験法の開発

寸法30×30×5cmの鉄筋コンクリート板試験体に高加速度の慣性力を作用させる高加速度載荷試験システムを開発した。本システムは、図1に示すように、研究代表者らが開発した共振振動台の上に、慣性質量機構を搭載することを基本構造としたものであり、加振振動数5Hzであれば加速度10G（重力加速度の10倍の加速度振幅に相当する）まで、加振振動数10Hzであれば、加速度20Gまでの加振性能を有する。本研究では、加振振動数10Hz、最大加速度4G（約400ガル）までの試験を実施し、RC板試験体の復元力特性（荷重と変位の関係であり、耐震計算用の解析モデルの作成に用いる基本となるデータ）を評価できることを実証した。

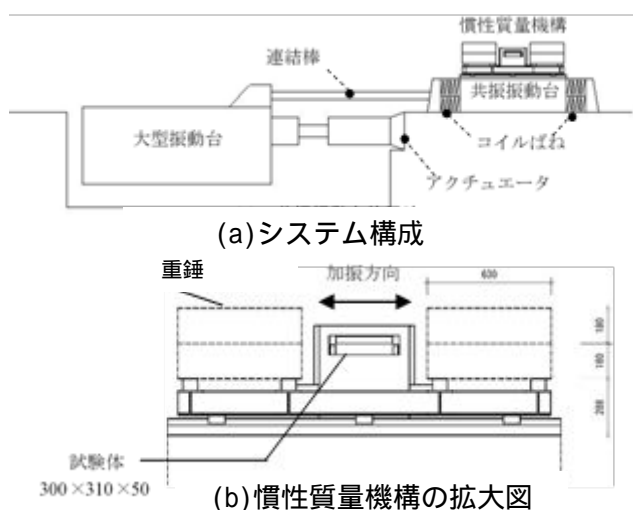


図1 高加速度載荷試験システム

(2) 地震経験に伴う剛性低下現象の特徴

慣性質量と加振振動数をパラメータとした実験データに基づき、剛性低下率（縦軸）とそれまでに経験した最大層間変形角（横軸）を図化した結果を図2に示す。ここで、図中の凡例は試験ケースを示しており、A1、A2およびA3は加振慣性質量0.5トンで加振振動数10.6Hz、B1は慣性質量4.5トンで加振振動数10.6Hz、C1は慣性質量2.5トンで加振振動数2.1Hzの、それぞれの条件で載荷試験を実施したものである。また、剛性低下率の算定にあたっては、地震経験を与えるための主要加振の合間に微小加振を実施しており、それらの微小加振データから等価剛性を算出してその変化を評価した。

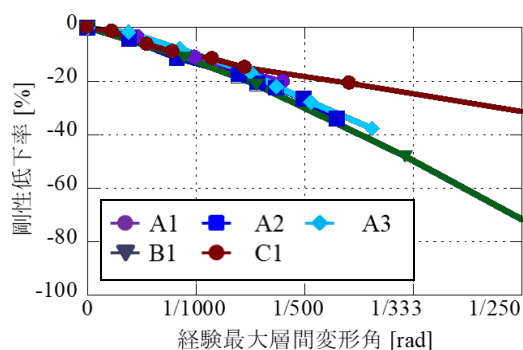


図2 地震経験と剛性低下の評価結果

試験ケースAの3つの試験体の結果は一致しており、このデータの信頼性が比較的高いことを確認した上で、剛性低下に関して以下の知見を得た。

試験ケースAの3つの試験体の結果は一致しており、このデータの信頼性が比較的高いことを確認した上で、剛性低下に関して以下の知見を得た。

- ・層間変形角 1/1000 以下の小さな変形を経験した場合でも、剛性低下現象は発生する。
- ・試験 A1、A2、A3 と試験 B1 の剛性低下傾向は一致した。試験 A と試験 B は試験体自身の質量で発生する慣性力と重錘から与えられる外部慣性力の比率を変えており、試験 B1 の方が 1/9 倍で、小さくなっているが、それが剛性低下に与える影響はほとんど無いといえる。
- ・試験 B1 と試験 C1 を比較すると、おおよそ層間変形角 1/500 以上で剛性低下傾向に差異が現れる。両試験では加振振動数が異なっており、変形速度の違いが剛性低下現象に何らかの影響を与えているものと推察される。

(3) 剛性低下現象と RC 板試験体の変形モードの関係

剛性低下現象と変形モードの関係を考察するため、試験体にスリットを入れた試験体 C1 と、側面を補強した C2、スリットを鉄板で補強してせん断変形を卓越させた試験体 C3 の剛性低下傾向を比較した。これらの 3 つの試験体については、慣性質量 2.5 トンで加振振動数 2.1 Hz の同一の条件で振動台試験を実施している。その結果を図 3 に示す。図 3 より、試験体 C3、C1、C2 の順番で地震経験に対する剛性低下が顕著となる傾向が確認される。この順番は、RC 板試験体の全体変形に及ぼすせん断変形モードの割合が大きく、曲げ変形モードの割合が小さくなる順番と一致している。このことから、RC 耐震壁のコンクリート部分のせん断変形の割合が大きくなるほど、地震経験に伴う剛性低下現象が顕著となるといえる。

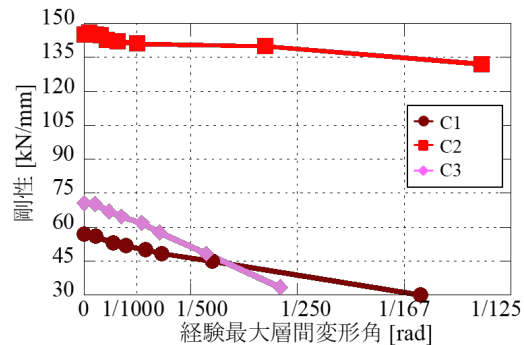


図 3 変形モードと剛性低下の関係

(4) 実大 4 層建物実験を対象とした RC 建造物の固有振動数の分析

(国研)防災科学技術研究所 E-ディフェンスにおいて 2010 年 12 月に実施された 4 層鉄筋コンクリート建物実験 (RC 建物実験) を対象として、振動台加振データと常時微動データを用いて RC 建物試験体の固有振動数を評価した結果を図 4 に示す。常時微動により評価された固有振動数は小地震に相当するホワイトノイズ加振による評価値よりも大きく評価されるものの、振動数が低下していく傾向は捉えられている。小地震の記録を用いた建物の剛性低下の評価は信頼性に優れるものの、小地震を記録するために地震計を常設しておく必要がある。その一方で、常時微動による剛性低下の評価は、常時発生している建物の微小振動を使う方法であるため、地震観測が実施されていない建物や、小地震記録が得られない場合にも、適用できる。図 4 の結果は、地震観測に変わる方法として、常時微動が活用できる可能性を示唆する。

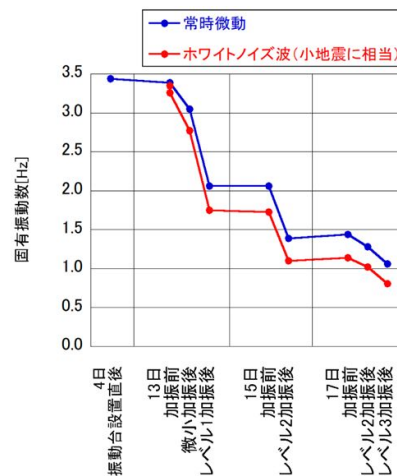


図 4 実大建物試験体の剛性低下

(5) コンクリート圧縮試験標準試験体を用いた剛性低下事象の分析

試験体を製造したときに作成したコンクリート圧縮試験標準試験体を用いて、養生条件と圧縮試験の時期をパラメータとした実験を実施した。まず、試験体 12 本に対して打設後 4 週間まで温度 20 度の水中養生を実施し、4 週で気中に取り出した。その直後、試験体 6 体は 1 回目の圧縮試験を実施してヤング係数 (ひずみ 応力曲線の傾きで、建物での剛性に相当する量) を評価するとともに、最大強度まで載荷して損傷させた。そして、そのまま温度 20 度かつ湿度 50% の環境条件で気中に暴露し、12 週で 2 回目の圧縮試験を実施してヤング係数を評価した。以上の試験体 6 体を試験体 P とする。一方で、残りの 6 体は、12 週まで同じ環境条件で気中に暴露した後、1 回目と 2 回目の圧縮試験を続けて実施した。以上の残りの試験体 6 体を試験体 Q とする。これらの試行において、2 回目の圧縮試験とは、1 回目の圧縮試験で損傷を与えた試験体に再載荷したものである。それぞれの試行において、試験体 6 体を試験したが、1 回目の圧縮試験において形状が崩れた試験体については 2 回目の圧縮試験の対象から除外した。ヤング率の評価結果を図 5 に示す。1 回目圧縮試験のヤング係数は、試験

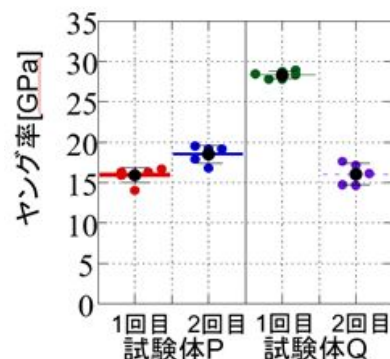


図 5 コンクリート圧縮試験結果

体 P よりも Q の方が大きく、乾燥収縮による剛性低下よりも水和反応による剛性増加の方が大きいことを示唆する。2 回目圧縮試験のヤング係数は試験体 P と Q でほぼ等しく、損傷したコンクリートであっても水和反応の増加により剛性が増加することを示唆する。さらに、試験体 P の 1 回目と 2 回目試験のヤング係数の差異は載荷経験による損傷分であり、それと 4 週から 12 週までの水和反応の剛性増加分は等しい。以上を整理すると、剛性の変動要因としては、水和反応と載荷経験による影響が大きく、乾燥収縮による影響は小さいといえる。ただし、この結果は、プレーンなコンクリートの実験結果に基づくものであり、鉄筋が入った場合や、柱や梁、耐震壁などの異なる部材間での乾燥収縮については別途の検討が必要である。

<参考文献>

酒井理哉, 金澤健司, 大鳥靖樹, 高尾景, 高木隆太: 共振振動台の設計概念, 日本機械学会 [No.13-18] Dynamics and Design Conference 2013 USB 論文集, 2013.8.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

金澤 健司, 北村 春幸. 多入力を受ける建物振動データに対する振動モード同定の安定化法, 第 15 回日本地震工学シンポジウム論文集, 査読無し, 1 巻, pp.3416-3425, 2018.

久保 賢一良, 金澤 健司, 西山 俊輔, 北村 春幸. コンクリートにおける圧縮破壊経験と乾燥収縮が圧縮特性に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, 材料施工, pp.525-526, 2018.

金澤 健司, 西山 俊輔, 久保 賢一良, 北村 春幸. 高加速度振動台実験に基づく鉄筋コンクリート板の動特性評価 その 4 純せん断載荷法の開発のための静的予備実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, 構造 II, pp.241-242, 2018.

西山 俊輔, 金澤 健司, 久保 賢一良, 北村 春幸. 高加速度振動台実験に基づく鉄筋コンクリート板の動特性評価 その 3 純せん断載荷法の開発のための動的予備実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, 構造 II, pp.239-240, 2018.

原 憲治, 金澤 健司, 酒井 理哉, 西山 俊輔, 北村 春幸. 高加速度振動台実験に基づく鉄筋コンクリート板の動特性評価, 日本建築学会構造工学論文集, 査読有り, 64B 号, pp.409-417, 2018.

西山 俊輔, 金澤 健司, 原 憲治, 酒井 理哉, 北村 春幸. 高加速度振動台実験に基づく鉄筋コンクリート板の動特性評価 その 2 剛性低下現象の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, 構造 II, pp.551-552, 2017.

原 憲治, 金澤 健司, 酒井 理哉, 西山 俊輔, 北村 春幸. 高加速度振動台実験に基づく鉄筋コンクリート板の動特性評価 その 1 実験概要と破壊モード, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, 構造 II, pp.549-550, 2017.

原 憲治, 金澤 健司, 酒井 理哉, 西山 俊輔, 北村 春幸. 耐震壁動特性の動的載荷依存性の把握を目的とした振動台実験, 日本建築学会関東支部報告集, 査読無し, I 巻, pp.285-288, 2017.

6. 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名: 北村 春幸

ローマ字氏名: (KITAMURA, haruyuki)

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 酒井 理哉

ローマ字氏名: (SAKAI, michiya)

(3)研究協力者

研究協力者氏名: 原 憲治

ローマ字氏名: (HARA, kenji)

(4)研究協力者

研究協力者氏名: 西山 俊輔

ローマ字氏名: (NISHIYAMA, shunsuke)

(5)研究協力者

研究協力者氏名: 久保 賢一良

ローマ字氏名: (KUBO, kenichiro)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。