

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：35403

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289190

研究課題名(和文)実部材に基づく既存建物の耐震性能評価に関する研究

研究課題名(英文)Seismic Evaluation of RC Buildings Based on Actual Members

研究代表者

荒木 秀夫 (Araki, Hideo)

広島工業大学・工学部・教授

研究者番号：40159497

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は既存建物の耐震性能を精度よく評価するために既存建物の実部材の性能と評価式の関係やコンクリートそのものの性能を明らかにすることを目的としている。既存建物から実部材や材料を取り出し載荷実験を行い、その結果を既往の評価式と比較することによって施工精度や経年劣化の影響を定量的に把握した。その結果、コンクリートの弾性係数が従来の評価式より2～3程度低くなる。一方、部材レベルではせん断ひび割れは評価式より耐力より早期に発生する傾向がみられたが、せん断強度自体は従来の下限式に低強度の低減率等を考慮することで評価できることが分かった。エポキシ樹脂の補強効果も確認した。

研究成果の概要(英文)：When conducting seismic evaluation of existing buildings it is necessary to clarify the differences in the properties of material and reinforced concrete members obtained from existing buildings and concrete manufactured in the laboratory. In this study, the seismic tests were performed using the actual material and members. The following conclusions can be made. (1) Observed modulus of elasticity of concrete was lower than the estimated values calculated from the present equation. (2) Tensile strength could be predicted by the present equation. (3) The present equation for the strength of shear crack recommended in the standard tends for RC members to significantly underestimate the observed value of the original members. (4) The present equation for shear capacity could predict the observed value considering the reduction factors for the lightweight and low strength concrete. (5) Epoxy resin injection significantly improved the seismic performance of the RC members.

研究分野：耐震工学

キーワード：既存建物 耐震性能 コンクリート RC部材 評価式

1. 研究開始当初の背景

既存建物の耐震性能は現地調査と構造図面に基づいて、耐力や靱性能を求めることによって評価されてきた。また、改修技術の開発にあたっては既存建物の材料特性を再現して新たな試験体を作成し、その補強効果を確認してきた。一方、既存建物の実態調査が進むにつれて設計当初の構造図とは異なる配筋状態や、設計強度とは異なる材料が使用されているものも数多く見つかるようになってきた。特に既存建物における「低強度コンクリート」の存在は耐震診断・補強において大きな問題となっている。このような背景から申請者等は科学研究費補助金を得て、低強度コンクリート部材を作成して載荷実験を行ってきたが、新規に調合したコンクリートは強度特性については整合性を持たせているものの、試験体用に使用されたセメントや骨材は数十年前の材料と異なるものであり、また長年月を経たコンクリートと同等であるかどうかは不明のままである。このように考えると低強度コンクリート部材に限らず既存建物における構造部材と実験室で作成する試験体の間には寸法効果ばかりでなく、使用材料、施工精度、経年劣化といった不確定な事項も存在していると考えられる。これらの事項が既存部材のせん断強度や曲げ強度評価に少なからず影響を与えるであろうことは容易に想像できるものの、その定量的把握に至っていないのが現状である。建設分野では新規技術開発には多大なエネルギーを費やすのが常であるが、構造物が結果的にどのようにできているのか、その性能に関して調査されることはしてこなかった。このように考えると実部材の性能を精度よくかつ安全側に評価しておくことは極めて重要と考えるが、実部材を対象とする研究はほんの僅かしか行われていない。この理由として大型の加力装置が無いことや、実験実施にあたって建物所有者の同意が得られない、多額の費用が必要であることなどが挙げられよう。既存建物を診断し、補強して継続使用するうえで、診断業務が進むにつれて建物の解体件数も増え、試験体としての長年月を経た材料や実部材が入手し易くなったことや大型の載荷実験が可能になったこともあり、既存の裁量や部材の性能把握が進展するならば、建物の実情に即したより精度の高い診断・補強ができると考えられる。

2. 研究の目的

部材のせん断強度の評価は建物の靱性評価に与える影響も大きく、耐震診断で使用される大野荒川式について検討を加える。本研究では既存建物から切り出した梁、柱の載荷試験を実施し、既往のせん断強度評価式の適用性について確認した。また、曲げ耐力は補強後の建物強度を代表するものであり、昭和40年代以前に使用された丸鋼の付着強度などについても既往の耐力評価式の修正を行う

必要がある。また、得られた試験体は貴重なものであり、載荷後の試験体を再利用して補強の有効性についても検討することとした。また、上記の部材実験に加えて、打設後、長年月を経たコンクリート自体の力学性能評価も重要である。耐震診断業務では建物から抜き取ったコアによる強度試験までが一般的で、応力ひずみ関係の提示までは要求していない。これまでの研究で判明したことの一つは既存建物から採取したコンクリートのヤング係数はコンクリート強度から推定されるヤング係数よりもかなり低いことである。このことは以前から指摘されてきたことであるが、現時点で設計・診断に反映されてはいない。本研究では実建物から採取したコンクリート引張強度や応力ひずみ関係について検討し、適正な評価式を提示する。

3. 研究の方法

本研究では既存建物内における実部材の耐震性能について繰り返し載荷実験を実施し、これまでの評価式の適用性について検討する。その結果はその部材(建物)の固有の性能に強く依存することが予想されるため複数の建物から得られた部材について検討する必要がある。同時に既存建物内のコンクリートや使用鉄筋の材料特性についても調査を行う。得られた実験結果と既往の耐力評価式とを比較検討することによって、先に述べた不確定な事項の影響について定量的に把握する。必要に応じて現行の評価式の修正を提案する。また、得られた実部材試験体は貴重なものであり、載荷後のひび割れた試験体の補修を行い、補強効果の検証も行うこととする。以下の手順に従ってその目的を達成する。

(1) 既存建物から取り出した実部材の載荷試験

地震時において建築物内の各部材は逆対称曲げモーメントを受けることを想定して実部材は建研式加力方法を採用して載荷を実施した。写真1にその様子を示す。特に注目した点は部材のせん断性能である。既存建物の耐震診断では柱部材がせん断部材かどうかで、評価が大きく異なり、その判定は極め



写真1 載荷状況

て重要であり，その判定式には高い信頼性が要求される．通常，せん断部材かどうかの判定は大野・荒川 minimum 式および曲げ耐力略算式の比較によって決定する．このせん断評価式は新規に作成された試験体を用いて行われた数多くの実験結果から導かれた実験式である．そこで本研究では既存建物から取り出した実部材と構造図面に基づいた配筋詳細によってせん断破壊先行型にした試験体を作成して加力実験を行った．具体的には新設するスタブの長さを変化させ試験体となる既存部分のせん断スパンを調整して，せん断破壊先行型に設定する．実験結果については破壊性状，最大耐力，限界変形（最大耐力の 80%耐力時の変形），ポストピーク後の耐力低下度合い，復元力特性等を検討対象とする．

(2) エポキシ樹脂による補強の確認試験

長年月にひびわれた部材や破壊実験後の試験体を用いて補強の可能性について検討する．申請者等はこれまでに小型試験体を用いたエポキシ樹脂注入による補修実験を行っており，曲げ耐力ばかりでなく，せん断耐力とも上昇することを確認している．実験室で作成された試験体は断面が小さいためエポキシ樹脂が部材内部まで浸透することを確認しているが，実部材のような大断面での検証はされていない．本研究における大きな断面を有する実部材に対して，エポキシ樹脂注入による補強による性能確認ができれば，非構造物や外壁の補修にとどまっている本工法を被災した構造部材の補修・補強にまで幅広く活用できると考えられる．写真 2 にエポキシ樹脂注入の様子を示す．

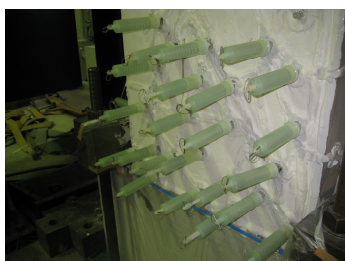


写真 2 エポキシ樹脂注入の様子

(3) 既存建物から取り出したコンクリートの強度試験

既存建物の耐力評価に使用する材料強度も重要であり，特にコンクリートについては採取部材直近から採取したコンクリートコアの力学的特性を検討した．これは建物内部のコンクリート強度は実際には大きくばらついていることが予想されるためである．このように強度分布が建物内で一様でないことは多くの研究からも指摘されていることである．本研究ではこのばらつき度合いも含めて評価することとする．コンクリートの材料特性把握にあたってはコンプレッソメータを用い，応力-ひずみ関係を計測し，最大強度，ヤング率，最大強度時歪，ポアソン比を



(a) 圧縮試験 (b) 割裂試験

写真 3 材料試験の様子

求める．それらの結果と既往の評価式と比較検討する．写真 3 に材料試験の様子を示す．

4. 研究成果

本実験の範囲において得られた知見を以下に示す．

(1) 実部材の結果

竣工後 52 年を経過した小学校校舎の梁，柱の繰り返し載荷試験を行った．本建物のコンクリートは軽量コンクリートであり，平均強度 12.5N/mm^2 の低強度コンクリートであった．低強度コンクリートの原因は成分分析の結果，粗骨材が軟質火山岩であることが判明した．梁および柱は現存する構造図面に基いて曲げせん断耐力比をそれぞれ 0.84, 0.61 としせん断破壊先行型とした．載荷試験による最終的な破壊形式は柱，梁とも設計とおりにせん断破壊となった．一方，鉄筋が丸鋼であるにも関わらず主筋の抜け出しや曲げひび割れの進展はほとんど見られなかった．図 1 に梁および柱の荷重変形関係を示す．図中には曲げ耐力式(式 1)，せん断耐力式(式 2)を示す．計算値を求めるにあたっては材料試験によって求めた材料強度を使用している．

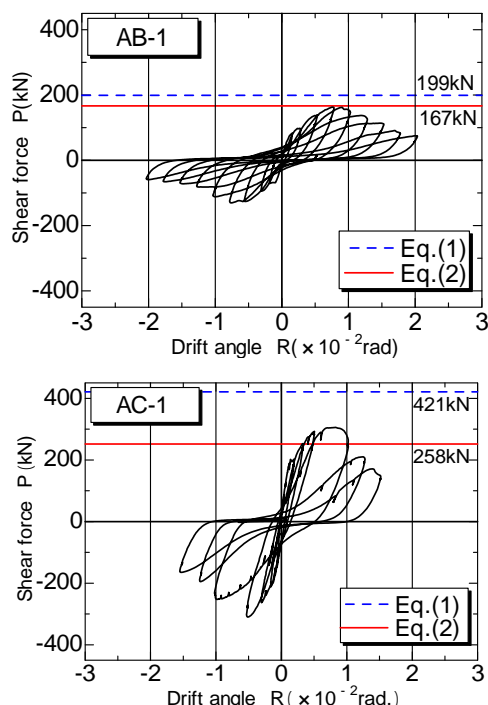


図 1 実部材の荷重変形関係

既存部材のせん断ひび割れ耐力は既往の評価式による計算値よりも大幅に下回る結果となった。

最大せん断耐力は既往の耐震診断式で軽量コンクリートおよび低強度コンクリートを考慮することにより安全側に評価できる。

(2) エポキシ樹脂による補強効果
取り出した2本の梁部材の1本はコールドジョイントや使用期間に発生したひび割れなどの損傷が見られ、これらの場所にエポキシ樹脂を注入した。また、鉄筋が丸鋼であるため主筋の付着滑脱破壊を防止する目的でコンクリート内部の主筋位置にも注入した。注入方法はスプリングカプセルを用いて低粘度のエポキシ樹脂を低圧 0.06N/mm^2 で注入した。一方、柱は1本しか取り出せなかったため、載荷後の試験体のひび割れ位置、および主筋位置に梁と同様な方法で注入した。注入量は梁、柱それぞれ 4.5kg 、 15.15kg である。図2に荷重変形関係の包絡線を比較し、補強効果を示す。初期剛性については注入前のものは理論値のほぼ半分以下であったが、エポキシ樹脂を注入することによって、梁、柱でそれぞれ2.1倍、1.4倍に上昇するが、理論値までには届かない。せん断ひび割れ耐力は梁、柱でそれぞれ1.8倍、1.6倍に上昇する。最大耐力は梁、柱でそれぞれ1.6倍、1.3倍に上昇する。柱の方が梁に比べより多くのエポキシ樹脂が注入されているにも拘わらずいずれの上昇値が低いのは柱には軸力の影響があるものと考えられる。柱に載荷している一定軸力は $0.1F_{cb}D$ である。剛性、耐力には注入による大幅な補強効果が確認できた。しかしながら、せん断破壊形式のた

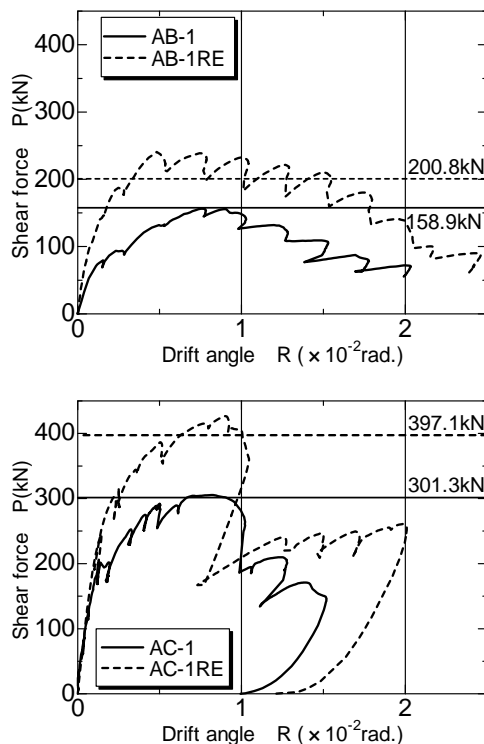


図2 エポキシ樹脂の補強効果

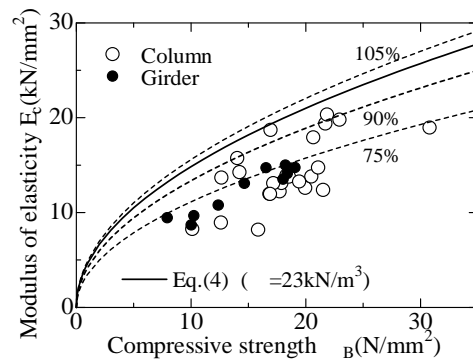


図3 ヤング係数と圧縮強度の関係

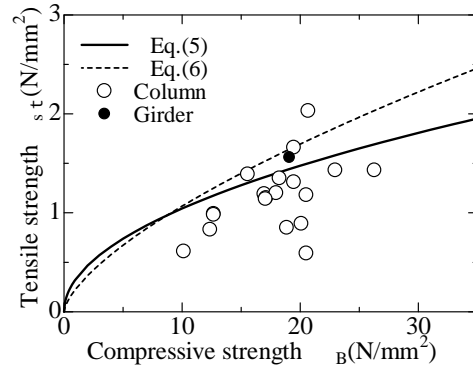


図4 引張強度と圧縮強度の関係

め靱性に対する改善効果はあまみられない。注入したエポキシ樹脂の体積比からせん断補強に換算してせん断耐力式の第2項に算入することでエポキシ樹脂の効果を定量的に評価する最大耐力の試算を提示した。図中にその値を示すがほぼ推測可能であることが分かるが、試験体数が限られているため今後の資料の蓄積が望まれる。

(3) コンクリートの力学的性能
竣工後52を経た体育館のコンクリートの力学的性状を調査した。抜き取ったコンクリートシリンダーは31本であり、このシリンダーから圧縮用37本、割裂用25本に切り分けた。圧縮強度は $7.96 \sim 30.8\text{N/mm}^2$ の間に大きくばらついている。圧縮強度は $7.96 \sim 30.8\text{N/mm}^2$ の間に大きくばらついている。引張強度は $0.59 \sim 2.03\text{N/mm}^2$ に分布し、その平均値は 1.24N/mm^2 となった。圧縮強度の1/13程度である。

応力度ひずみ度関係から得られたヤング係数と圧縮強度の関係を図3にヤング係数と圧縮強度の関係を示す。日本建築学会で推奨される推定式の約76%程度の値であった。この値は既往の研究よりも低い値である。この原因は長年月使用による乾燥とされているが、現時点でこのことは既存建物評価に反映されていない。

引張強度と圧縮強度の関係は日本建築学会で推奨される推定式が概ね実験値の上限値であった。図4に引張強度と圧縮強度の関係を示す。

圧縮強度時ひずみと圧縮強度の関係は村上式がほぼ下限値となっていた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 21 件)

荒木秀夫, 軽量コンクリート柱の耐震性能評価とその補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, 査読有, 2016, 印刷中

KJU KJU NWE, 貞末 和史, 荒木 秀夫, 低強度コンクリート SRC 柱のせん断終局強度に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, 査読有, 2016, 印刷中

貞末和史, 南宏一, アンカーボルトと鉄筋を併用して接合した鉄骨コンクリート露出型柱脚の復元力特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻 第 712 号, 査読有, 2015, pp939-949

貞末和史, 藤井稔己, 石村光由, 南宏一, 傾斜型あと施工アンカーを用いて袖壁補強した RC 柱の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 2, 査読有, 2015, pp. 883-888

墨野倉駿, 金久保利之, 八十島章, 大屋戸理明, 腐食を模擬した鉄筋の座屈性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 1, 査読有, 2015, pp973-978

荒木秀夫, 軽量コンクリートを用いた既存 RC 部材の耐震性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 2, 査読有, 2015, pp1291-1296

貞末和史, 南宏一, かぶりコンクリートを持たない鉄骨コンクリート柱の復元力特性に関する研究; 日本鋼構造協会鋼構造論文集, 第 85 号, 査読有, 2015, pp. 47-58

荒木秀夫, 徳川達也, 日比野陽, 既存 RC 建物における梁部材の耐震性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 2, 査読有, 2014, pp715-720

荒木秀夫, 根口百世, 南宏一, 解説: 低強度コンクリート建物の耐震補強に関する研究動向, コンクリート工学, Vol. 52, No. 2, 査読有, 2014, pp51-56

荒木秀夫, 星川知毅, 長年月を経た既存 SRC 建物のコンクリートの力学的性能, 日本建築学会技術報告集, 第 19 巻, 第 42 号, 査読有, 2013, pp561-566

貞末 和史, 赤松 克哉, 南 宏一, 柱断面内側のみに接合筋が配された鉄骨コンクリート露出型柱脚の復元力特性, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 78, No. 687, 査読有, 2013, pp1017-1025

八十島 章, 荒木秀夫, 低強度コンクリート柱の崩壊に至るまでの復元力特性 - 低強度コンクリート部材の残存耐震性能に関する研究 その 1 - ; 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 693 号, 査読有, 2013, pp1923-1930

荒木秀夫, 宮原憲之, 袖壁が低強度コンクリート柱の耐震性能に与える影響; コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 35, No. 2, 査読有, 2013, pp127-13

〔学会発表〕(計 44 件)

瀬川 優斗, 既存 RC 建物から切り出した

柱部材の耐震性能評価、日本建築学会中国支部研究発表会、3月5日-6日、2016年、近畿大学工学部(広島県・東広島市)

Hideo Araki and Cheng Hong, Distributions of bond stress between plain round bars and low strength concrete under cyclic loadings, 4th ICCRRR, 5-7October, 2015, Leipzig (Germany)

Hideo Araki, Seismic Performance of Lightweight Concrete Beams from Existing Building, The third SMAR2015, 7-9 September, 2015, Antalya (Turkey)

Hideo Araki and Yo Hibino, Seismic performance of RC Beams from Existing Building, fib Symposium, 18-20May, 2015, Copenhagen (Denmark)

荒木秀夫, 打設後 50 年を経過したコンクリートの物性、日本建築学会中国支部研究発表会、3月7日-8日、2015年、米子工業高等専門学校(鳥取県・米子市)

Hideo Araki and Tomotaka Hoshikawa, Mechanical Properties of Concrete Obtained from Existing Buildings, 37th IABSE Symposium, 3-5September, 2014, Madrid (Spain)

Mitsuyoshi Ishimura, Kazushi Sadasue, Koichi Minami, Shear Strength of Post-Installed Diagonal Anchor, 37th IABSE Symposium, 3-5September, 2014, Madrid (Spain)

Hideo Araki and Seiya Izaki, Seismic Performance of Shear Failed Short Columns Repaired by Epoxy Resin; fib Symposium, 22-24April, 2013, Tel-Aviv (Israel)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒木 秀夫 (ARAKI, Hideo)
広島工業大学・工学部・教授
研究者番号: 4 0 1 5 9 4 9 7

(2) 研究分担者

貞末 和史 (SADASUE, Kazushi)
広島工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 2 0 4 0 1 5 7 3

寺井 雅和 (TERAI, Masakazu)

近畿大学・工学部・准教授

研究者番号: 9 0 3 2 0 0 3 5

八十島 章 (YASOJIMA, Akira)

筑波大学大学院・システム情報工学研究科・助教

研究者番号: 8 0 4 3 7 5 7 4