

論文 内部欠陥を有する RC 柱部材の終局挙動に関する実験的研究

平澤 征夫*1・水野 英二*2・秋山 芳幸*3・大嶽 秀暢*4

要旨：初期欠陥(柱基部の帯鉄筋の破断)を有する柱部材では、その帯鉄筋の破断部分が柱基部で、高さが柱断面幅の1.0~1.5倍以内であれば、耐力はそれほど影響されないが、最大荷重到達以後の荷重低下過程に影響する。すなわち、部材角約1/20で帯鉄筋切断の影響が現れ、終局時近く(部材角約1/7)での荷重低下の割合は25%程度であることが明らかとなった。また、載荷試験方法による影響は耐力および靱性に大きな影響を与える。特に靱性に関しては正負交番繰返し載荷試験によれば、静的試験の場合の約50%となり、振動台試験では静的試験の場合の約1/3に止まることが明らかとなった。

キーワード：RC柱、動的応答、終局耐力、振動台試験

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート(以下RCと略す)橋脚などの構造物において、アルカリ骨材反応と経年劣化の複合劣化によると考えられる梁あるいは柱部材のスターラップあるいは帯鉄筋の破断が観測され学会等で問題になっている。

このような部材を維持管理してゆくためには劣化原因の追求の一方で適切な補修・補強を施す必要がある。そのためにはまず、内部損傷したはりや柱の損傷程度と終局耐力や変形に及ぼす影響を明らかにしておくことが前提となる¹⁾。

本研究の第一の目的は、上述のような内部損傷を有する柱部材に関して、まずその損傷程度を明らかな内部損傷で取り扱うこととするため、柱基部の帯鉄筋の破断箇所の数を変化要因として、曲げ耐力と変形に与える影響を実験的に明らかにすることである。具体的には、柱部材の内部損傷として柱基部の帯鉄筋を(1)1本切断したもの、(2)2本切断したもの、(3)3本切断したものの3種類を作成し、静的一方向漸増載荷実

験を行い、その曲げ耐力と変形性能の違いを、健全な供試体(内部損傷を有しない供試体)と比較して明らかにすることである。

一方、内部欠陥を有した柱部材が破壊する場合の多くは、通常の場合ではなく地震時であることから、合理的な耐震設計を確立する上で基本的に重要な事項は、地震時における構造物の挙動をできるだけ正確に把握することである。その最も有効な方法は実際に被害を受けた構造物の調査を行うことであるが、現実に内部損傷を有した構造物が破壊した例はほとんどなく調査することは困難である。したがって、実験的に確かめることが必要となる。具体的には、第一の研究目的で行った静的一方向漸増載荷実験で得られた結果を、静的一方向正負交番載荷実験結果と比較することにより、繰返し荷重の影響を明らかとし、さらに動的繰返し載荷の影響を明らかとするために、振動台を用いた動的載荷実験を行うものとする。

本研究の第二の目的は、上記第一の研究目的

*1 中部大学工学部都市建設工学科教授 工博 (正会員)

*2 中部大学工学部都市建設工学科教授 Ph. D. (正会員)

*3 (株)千代田コンサルタント 技術部 (正会員)

*4 中部大学大学院 工学研究科建設工学専攻 学士(工学)

で行った静的一方向漸増載荷実験結果を振動台を用いた地震波による損傷実験に結びつけるために、静的一方向正負交番載荷実験と振動台による動的載荷実験との比較を行い、それぞれの実験方法による荷重～変位曲線の違いの程度を明らかにするための基礎的実験を実施することである²⁻⁵⁾。

2. 静的実験

2.1 実験概要

静的載荷実験は内容的に2種類に分けられる。(1)一方向漸増載荷試験、(2)正負交番繰り返し載荷試験である。

供試体も(1)内部損傷を有しないもの(健全供試体)、(2)内部損傷を有するものの2種類である。表-1に供試体名と載荷方法の種類を示す。

表-1 静的試験供試体種類

供試体名	載荷方法	帯鉄筋間隔
RC1-50-0	一方向漸増載荷	50 mm
RC2-50-1	一方向漸増載荷	(0.8d mm)
RC3-50-2	一方向漸増載荷	(1.2d mm)
RC4-50-3	一方向漸増載荷	(1.6d mm)
SR01-72-1	正負交番載荷	100 mm
SR01-72-2	正負交番載荷	100 mm

()内の帯鉄筋間隔は、破断を含む距離、d:柱の有効高さ

2.2 供試体の諸元

供試体の形状・寸法を図-1に示す。フーチングの部からの柱の高さは、1110mm(載荷点または錘の位置までは985mm)で、軸方向鉄筋にはD10を8本、帯鉄筋にはφ6を50mmまたは100mmピッチで配筋した。予め損傷を与える供試体の場合は50mmピッチを基本供試体(RC1-50-0)とし

て、曲げ破壊を想定したので柱基部の1.0d～1.5d(d=125mm)に破壊が集中するため、基部から1本目を切断した場合(RC2-50-1、ピッチは100mm=0.8dとなる)、2本切断した場合(RC3-50-2、ピッチは150mm=1.2d)、3本切断した場合(RC4-50-3、ピッチは150mm=1.6d)とした。

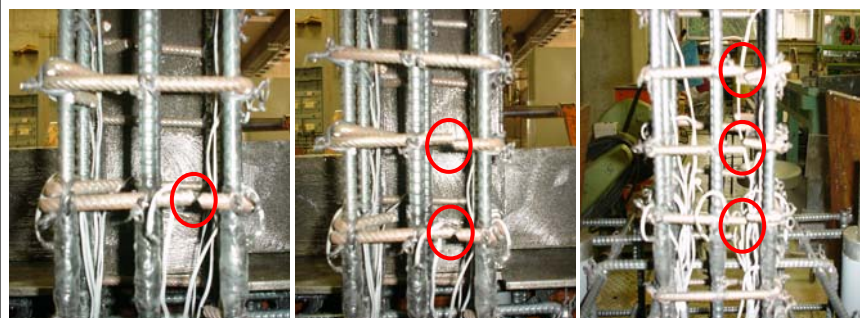
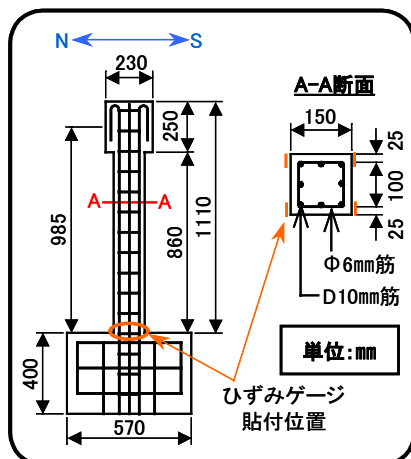
一方、正負交番繰り返しおよび動的振動台試験に用いた供試体は帯鉄筋のピッチをすべて100mmピッチとしたものを用いた。供試体作成と同時に作成したコンクリートシリンダーによる実験時の圧縮強度は39.3～52.3N/mm²であり、ヤング係数は25.6～35.7kN/mm²であった。使用鉄筋の内軸方向鉄筋D10mmの降伏点強度は373～380N/mm²であり、ヤング係数は1.7～2.0kN/mm²であった。また、帯鉄筋D6mmの降伏点強度は467N/mm²であった。これらの材料強度に基づき道路橋示方書に準じて算出した供試体の曲げ耐力及びせん断耐力を表-2に示す。

表-2 供試体の曲げ及びせん断耐力

供試体名	曲げ耐力 P _u (kN)	せん断耐力 P _s (kN)	P _s /P _u
RC1-50-0	9.7	71.2	7.34
RC2-50-1	9.7	39.1	4.03
RC3-50-2	9.6	28.4	2.96
RC4-50-3	9.7	23.0	2.37
SR01-72-1	10.6	30.7	2.90
SR01-72-2	10.5	30.7	2.92

2.3 試験手順と計測方法

静的実験は図-2に示した油圧アクチュエータ装置により漸増載荷と正負交番繰り返し載荷試験を変位制御で行った。制御段階は柱基部の主鉄筋降伏時の変位δ_yまでは変位のきざみを



【RC2-50-1・1本切断】

【RC3-50-2・2本切断】

【RC4-50-3・3本切断】

図-1 供試体形状・寸法種類

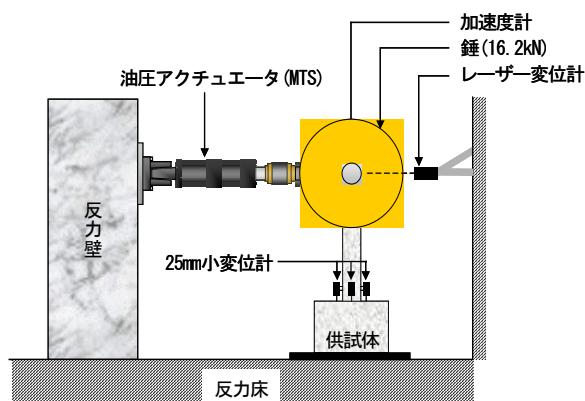


図-2 静的載荷実験装置

0.25, 5.0, 7.5mm,・・・と増加させ、鉄筋降伏後は δ_y の整数倍で一方向または正負1回繰返して増加させた。荷重は供試体が破壊するか、あるいは装置の許容変位の限界まで行った。試験に先立って、供試体をフーチング部分に通した $\phi 32$ mmのPC鋼棒8本によってフロアに固定し、柱上端部に16.2kNの錘を取り付けた(この錘による軸応力は約 $0.72\text{N}/\text{mm}^2$ 、軸力比1.9%)。つぎに水平荷重載荷のための油圧アクチュエータをフーチング上面より98.5cmの位置に付け、さらに計測のためのセンサーおよび機器をセットした。

図-2中に示すように水平変位は大変位計(ストローク200mm)、荷重はアクチュエータ先端に取り付けたロードセル(容量50kN)により計測した。さらに供試体基部の主鉄筋に鉄筋ゲージを、コンクリート表面の4隅各部にコンクリートゲージを添付した。大変位計と鉄筋およびコンクリートのひずみは、データロガー(TDS-302)にて計測した。なお、一方向載荷供試体については帯鉄筋を切断した影響を調べるため、柱基部の帯鉄筋から4段目までの5本について、圧縮側と引張側とで合計10箇所鉄筋ゲージを取り付けてその変化を計測している。

2.4 静的載荷試験の結果と考察

静的一方向漸増載荷実験として得られた荷重～変位曲線を比較して図-3に示す。

図-3より、帯鉄筋を切断していないRC1-50-0に対し、帯鉄筋を切断した他の供試体は、最大荷重についてはそれほど大きな違いは無いこと

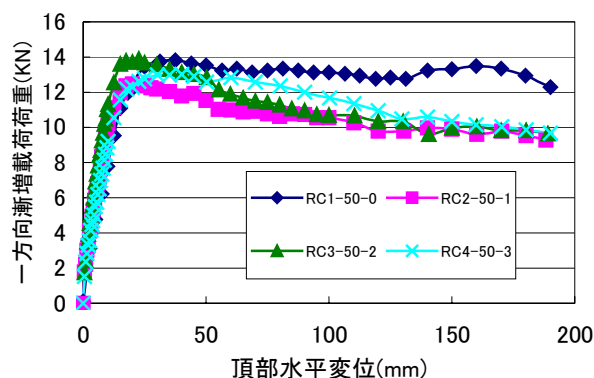


図-3 静的一方向漸増載荷試験結果

が分かる。しかし、最大荷重以後の荷重低下に着目すると、帯鉄筋を切断した供試体では低下の割合が大きく、特に変位50mm付近では顕著に現れている。一方、帯鉄筋切断本数の違いによる荷重低下率の影響は、RC2-50-1, RC3-50-2, RC4-50-3とも終局時付近(変位150mm)においてほぼ一定の荷重の値(約10kN)を示しており影響の無いことが明らかとなった。

以上より、最大荷重後の荷重低下に対して懸念が残るものの、柱の曲げ耐力(最大荷重)には大きな影響は無いことが明らかとなった。また、曲げ耐力に影響の無い帯鉄筋間隔としては、本研究では断面幅15cmの使用供試体に対して20cmまで確認できたことから、一般的には安全を考慮し、柱の断面幅までの帯鉄筋間隔までは影響が無いものと考えて良いだろう。このことは、阪神大震災以前の示方書で定められていた規定までは許容できるとも考えられる。したがって、内部欠陥が必要間隔の2倍以上の本数が破断しているのが発見された場合には直ちに補修・補強が必要であると判断するのが適切であるとの根拠を与えていると考えることができる。

次に、図-4に静的正負交番繰返し載荷実験の結果を示す。なお、この実験にはSR01-72-1, SR01-72-2の2体の供試体を用いているが、これは結果のばらつきを考慮したものであり、使用供試体・加力など条件は同じものである。

図-5には図-4の最大変位と最大荷重の包絡線を取りそれらを重ねて示す。この図は後で述べる動的載荷試験結果との比較に用いる。

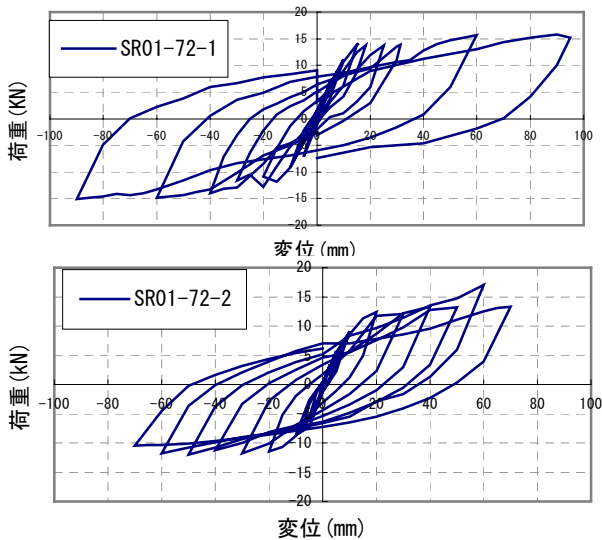


図-4 静的正負交番繰返し载荷実験結果

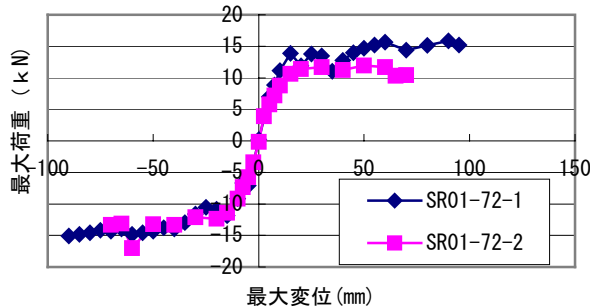


図-5 最大荷重～最大変位包絡線の比較

3. 振動台による動的試験

3.1 実験概要

静的実験で正負交番载荷試験に用いたものと同じ配筋を有する供試体を振動台を用いて動的試験を行い、最大応答荷重～最大応答変位包絡線を求めて、前章で行った静的試験結果と比較し、動的繰返しの影響を検討する。

図-6 に試験に用いた水平・鉛直同時加振振動台装置と供試体設置状況および計測センサーと機器の設置状況を示す。

動的試験であるのでテーブルの水平および鉛直変位と供試体頂部の水平変位はレーザー変位計（検長：-150mm～+150mm）、振動台および柱頂部の加速度を3軸加速度計（容量：頂部5G、台3G）にて計測した。また柱基部の抜け出し量を計測するためにN,S両側に2個の小変位計（検長25mm）を取り付けた。

3.2 加振方法

加振は水平一軸方向加振とし、入力波形に兵

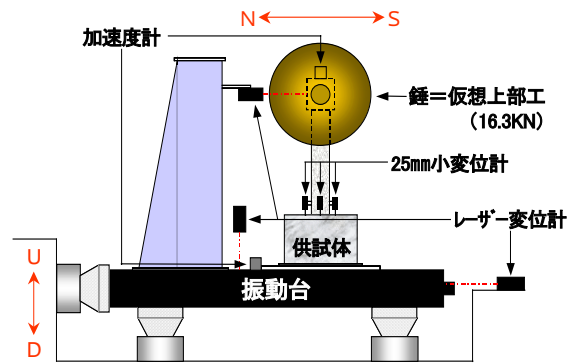


図-6 動的振動台試験装置

庫県南部地震波形を用い、入力方法は最大地震加速度818galを0, 5/10, 1/10, 1, 5/10, …, 10/10倍した加振段階をとり、各段階で1回加振、これを段階的に加速度を上げて加振する。この方法で供試体が破壊するか試験装置の限界まで行う。ただし、時間軸の短縮は行っていない。

図-7 に振動台入力波形を示す。

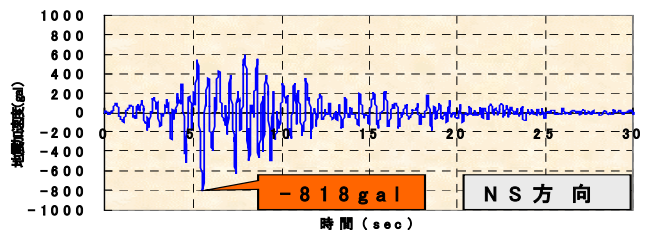


図-7 振動台試験に用いた入力波形

3.3 動的試験結果と考察

図-8 に動的試験の結果得られた最大応答荷重～最大応答変位包絡線を示す。

供試体は、静的载荷試験と同種の供試体3体（KHT01-72-1, KHT01-72-2, KHT01-72-3）とした。なお、SR01と同様、KHT01についても、条件は同じものである。

この図は縦軸に、各加振段階で頂部の加速度

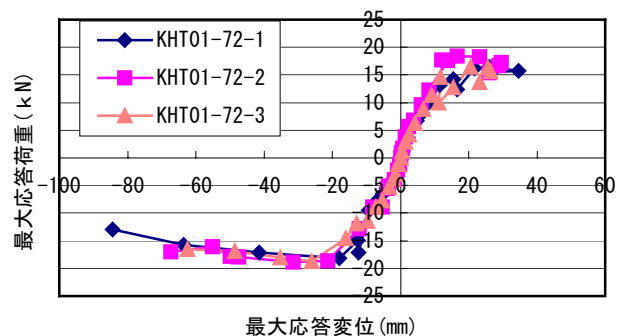


図-8 最大応答荷重～最大応答変位

計で計測した水平方向の応答加速度波形のうち、最大の応答値に錘と供試体の換算質量を乗じて得られる応答荷重を最大応答荷重として取ったものである。また、横軸には、その加振段階で計測された最大の応答変位を最大応答変位と定義して示したものである。したがって、この図は必ずしも最大荷重の時に最大の応答変位を表現したものではないことに注意する必要がある。また、加振段階が上がるにつれて、振動による損傷が累積された結果を示していることにも注意が必要である。

図-8を、前掲の図-5の静的正負交番繰返し試験結果から得られた包絡線と比較することにより、動的損傷過程は、静的繰返し損傷過程よりも、実験のばらつきが大きいことが分る。

また、正負交番載荷と動的加振の違いを比較するため、図-9に図-5の包絡線の正負を重ねて平均したものと、同様に図-8の代表的な包絡線（KHT01-72-2）の正負を重ねたものを比較して示す。

これより、動的試験結果の方が静的繰返し試験結果よりも曲線の立ち上がり勾配も大きく、最大耐力も大きくなる。しかし、動的試験結果の方が最大耐力以後の靱性は小さくなることが分る。

3.4 欠陥を有する静的試験結果と正負交番載荷および動的試験結果の比較と考察

本実験のまとめとして、図-10として最初に

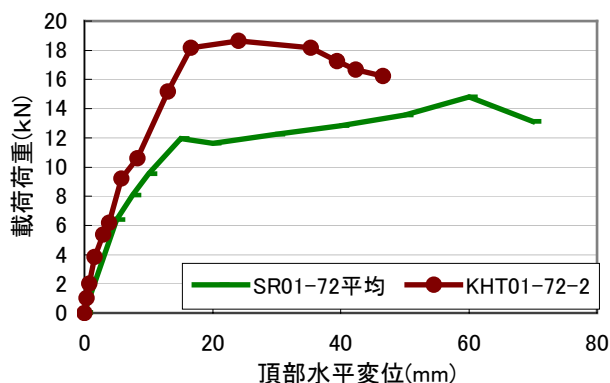


図-9 正負交番載荷と動的加振の包絡線の比較

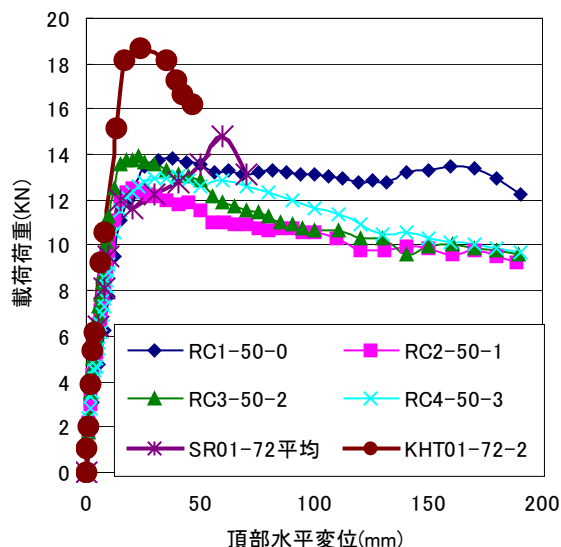


図-10 一方向載荷、正負交番載荷、動的加振結果の比較

欠陥を有する柱部材の静的実験結果の図-3に、図-9を重ねて比較して示す。

図-10より、同じ静的載荷試験でもプッシュオーバーと正負交番載荷では、得られる荷重～変位曲線に違いが見られ、プッシュオーバー試験の方が、最大荷重も最大荷重到達後の荷重低下割合が少なく、靱性率が大きくなる傾向にあることが分る。また、初期欠陥の影響は、帯鉄筋の切断個所が3箇所まで（すなわち、柱基部の有効帯鉄筋間隔が20cm程度まで）は、最大荷重にはそれほど大きく影響しないが、到達以後の荷重を減少させる傾向があることが明らかである。

実験供試体数が少ないため、定量的考察は困難であるが、図-10の結果からは帯鉄筋の切断本数が3本まで（帯鉄筋間隔にして20cmまで、あるいは柱断面幅の1.5倍相当まで）は最大耐力（荷重）に与える影響はそれほど大きくないが、基部帯鉄筋が切断された場合は、最大荷重到達以後の荷重低下過程に影響が現れることが明らかとなった。また、最大荷重到達以後の荷重低下は、変位50mm（部材角1/20）から帯鉄筋の切断の影響が現れ、終局時付近（変位150mm：部材角1/6.6）での荷重低下割合は25%程度であ

ることが明らかとなった。

しかし、比較のため示したように正負交番繰返し荷重や動的繰返し荷重を受けた場合は、初期欠陥の存在の影響は大きく現れやすいことが推定される。今後の検討がさらに必要である。

4. 結論

近年、鉄筋コンクリート橋脚などの構造物において、アルカリ骨材反応と経年劣化による、はりあるいは柱部材内部のスターラップや帯鉄筋の破断が観察されている。本研究は、上述の内部損傷を有する柱部材の耐力と変形に及ぼす帯鉄筋破断の影響を実験的に検討することを目的として実施した。実験要因は、人工的損傷として予め柱基部の帯鉄筋を1~3本破断させた供試体とし、これに一方向漸増荷重試験を行い健全な供試体と比較した。さらに健全供試体について、地震時の崩壊を考察するために別の載荷試験方法、すなわち、正負交番繰返し載荷、動的載荷試験を行い、その結果の比較より、耐力と靱性の違いを示した。

本研究から得られた結果をまとめると以下のようである。

- 1) 初期欠陥(柱基部の帯鉄筋の破断)を有する柱部材では、その帯鉄筋の破断部分が柱基部で、高さが柱断面幅の1.0~1.5倍以内であれば、耐力はそれほど影響されないが、最大荷重到達以後の荷重低下過程に影響する。すなわち、部材角約1/20で帯鉄筋切断の影響が現れ、終局時近く(部材角約1/7)での荷重低下割合は25%程度であることが明らかとなった。
- 2) 載荷試験方法による影響は耐力および靱性に大きな影響を与える。特に靱性に関しては正負交番繰返し載荷試験によれば、静的試験の場合の約50%となり、振動台試験では静的の場合の約1/3にとどまることが明らかとなった。
- 3) 正負交番繰返し載荷あるいは、動的載荷を受けた場合には、より欠陥の影響が現れる

ことを予想した。

以上より、柱の帯鉄筋の破断という欠陥の場合は、帯鉄筋の横拘束効果が失われることを考慮すれば、特に柱基部の欠陥が柱の耐力と靱性に及ぼす影響は、はり部材の場合よりもその影響は大きいと考えるべきであろう。また、今後、さらに多くの実験により各種欠陥が柱部材の耐力と靱性に与える影響を定量化することが必要である。さらに、柱部材の特徴でもある基部のコンクリートの打ち継ぎ目の欠陥や、ジャンカなど施工不良による欠陥の影響も重要な研究の対象となろう。

謝 辞

本研究は、平成14年度と15年度の2年間にわたり中部大学総合工学研究所研究費および特別研究費を受けて行ったものである。実験は多くの卒業研究学生の協力によって遂行された。ここに記して謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, (社)日本道路協会, 2002.3
- 2) D.G.Morrison, I.Hirasawa, M.A.Sozen, Lateral-Load Tests of R/C Slab-column Connections, A.S.C.E., vol.109, no.11, pp.2698-2714, November, 1983
- 3) 睦好宏史, 町田篤彦, 動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究, 土木学会論文集V, 354/V-2, pp.81-90, 1985.2
- 4) 加納昌男, 平澤征夫, 動的外力を受ける鉄筋コンクリート柱部材の損傷と振動特性に関する実験的研究, 材料, Vol.45, No.9, pp.1042-1047, 1996.9
- 5) 平澤征夫, 中村一郎, RC柱部材の載荷方法の違いが荷重~変位包絡線に及ぼす影響とその靱性の定量化に関する基礎的研究, 総合工学, 第10巻, pp.91-100, 1998.3