

軸方向に衝撃力を受ける RC 円柱試験体の 圧縮破壊メカニズムに関する実験的研究

大野友則¹・喜多龍一郎²・藤掛一典³

¹正会員 工博 防衛大学校教授 土木工学科 (〒239 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

²学生会員 防衛大学校理工学研究科 (〒239 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

³正会員 工修 防衛大学校助手 土木工学科 (〒239 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

兵庫県南部地震で被害を受けた道路橋コンクリート橋脚の中に、鉛直方向の衝撃的地震動によって発生したのではないかと考えられる局部的な損傷が見られた。本研究は、コンクリート橋脚に生じた圧縮破壊や全周水平ひび割れに着目して、水平衝撃荷重載荷装置を用いたシミュレーション実験を行ったものである。衝撃力の負荷にあたっては、試験体を横に設置して柱軸方向に衝撃入力が作用するようにした。実験では、直径 10cm、長さ 50cm の小型 RC 円柱試験体を用いて軸方向鉄筋比・帯筋間隔および断面剛性の変化（段落し）などの影響について調べている。さらに、衝撃力の作用にともなう応力波によって圧縮破壊が発生するかどうかを確認し、そのメカニズムについて検討している。

Key Words : RC bridge pier, circular RC column member, impulsive earthquake motion, impulsive load, impact loading machine

1. はじめに

地震動の特性の中で構造物の破壊に大きな影響を及ぼすものとして、地動の最大水平加速度または最大水平速度がその指標であるという認識があった。著者らは、兵庫県南部地震（平成 7 年 1 月 17 日）発生後間もない時期に被災地を訪れ、被害を受けた土木・建築構造物の破壊状況を見た。そのときには、神戸海洋気象台で記録された最大水平加速度が 818gal であったことは情報として既に知っていた。ところが、水平力を受けたにしては不思議な破壊が、いくつかの RC 橋脚や RC 柱構造物に生じていると疑問に感じたものがあった。過去に行ったことがある両端自由支持のコンクリート棒を対象とした軸方向衝撃載荷実験から、コンクリート棒に衝撃力を加えると、スキャビングと呼ばれる引張ひび割れが生じることがわかっている。また、反力基礎床上に設置した長いコンクリート円柱供試体（径 10cm、長さ 40cm）に、高速度で急速荷重を載荷すると基礎床に近い部分で圧縮破壊が生じる。この破壊は、衝撃力により材料中に発生した応力波の伝播、反射、重複により生じることは、衝撃工学の分野ではよく知られた現象である。このような衝撃破壊に類似し

た被害が、RC 橋脚や RC 柱に生じていることは驚きであった。

その後、調査報告が次々と発表される^{1)~10)}とともに、多くの解析的・実験的研究が精力的に行われている。これらの調査報告書や研究報告によれば、「今回の地震動では上下方向成分は大きかったが水平方向加速度が破壊の主原因であった」と結論づけられている（例えば¹⁾）。一方では、「被災した構造物の中には衝撃的な上下動によると考えられる破壊があつた」との見解も多くある^{11)~17), 21)}。被害を受けた鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の中で衝撃的な破壊と考えられているのは、建物の RC 柱や RC 橋脚における頂部・中央付近の圧壊や斜めせん断破壊および水平全周引張ひび割れ、RC 中低層建物の中間階の圧壊、RC 煙突の頂部破壊、などである。

構造物の多くは設計強度を上回る大きな水平動で破壊したことが、破壊形態や数値シミュレーションからも説明されている¹⁸⁾。これは一つの事実だと考えられるものの、水平地震荷重入力による弾塑性振動論の知識では説明が無理な破壊が存在することも事実である。例えば RC 構造物では、RC 橋脚の中央付近から上部にわたって見られる全周水平ひび割れや頂部の圧縮破壊、柱部材の 1 軸圧縮型破壊

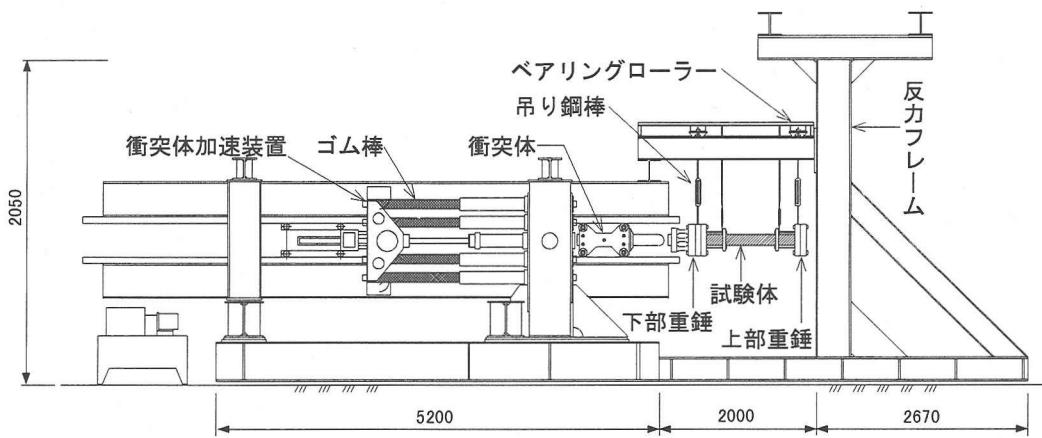


図-1 衝撃実験装置の概要

(X型破壊)が代表的な例である。このような破壊は上下方向への衝撃的載荷によって生じた、と説明した方が無理がないと考える。(衝撃的載荷は衝撃載荷と異なる。すなわち、物体の衝突によって発生する衝撃力の負荷ではなく、物体に急激な挙動の変化を及ぼす力の負荷と定義される。その結果、支点変位の強制により変位速度が急変して大きな加速度が生じる現象となる。)

問題は、その説明を検証する方法である。実験的方法を用いる場合、とくに衝撃実験を行う場合には試験体の規模・載荷方法および載荷装置が制約になる^{19), 20)}。別府らは、RC橋脚に生じた水平全周ひび割れを実験的に再現することを目的として、衝撃突き上げ装置を開発している²²⁾。この方法は、装置上に固定された小型柱試験体（上部に質量500kgの鋼製重錘が付加されている）を下側から急速に上昇・停止させるものである。急速上昇時には、重錘の慣性力によりコンクリート試験体には圧縮応力が生じ、次に急速停止によって引張応力が生じる。したがって、小型コンクリート試験体の引張ひび割れを再現する目的においては、簡便で非常に有用な方法・装置である。しかしながら、コンクリートに圧縮破壊を生じさせる実験を行うには、装置および施設の制約から困難であると考えられる。また、応力波が主因となって生じる引張ひび割れや圧縮破壊を再現するための衝撃実験を行う場合、荷重が地盤から上部構造物に作用する問題に対応させるためには下方向から上向きに衝撃荷重を作成する必要がある。このためには、専用の特殊な装置を新たに開発しなければならず、これも困難である。

そこで本研究では、既存の水平衝撃荷重載荷装置を用いたシミュレーション実験を行うことを試みたものである。実験装置の概要・実験の方法等の詳細については、後述する。本実験の目的は、RC橋

脚に生じた圧縮破壊や全周引張ひび割れに着目し、衝撃入力とともに応力波によってこれらの破壊モードが出現するかどうかを調べること、およびそのために必要な入力の特性を推定することである。実験に用いたRC円柱試験体は実際RC橋脚を直接モデル化した縮尺模型ではないが、基礎部分と上部構造を含んだ橋脚の境界条件などはできるだけ反映させるように工夫した。

実験のパラメータは、RC柱部分の軸方向鉄筋比、帶鉄筋間隔、段落としの有無および衝撃荷重入力速度とした。

2. 実験の概要

(1) 実験装置

図-1に、装置の概要を示す。本装置は、水平衝撃荷重載荷装置と呼ばれ、最大質量150kgの鋼製重錘を最大20m/sで試験体に衝突させる能力を有している。機構は、直径10cmで有効長さ150cmのゴム棒8本（左右に4本づつ）を伸長させることによって得られる弾性エネルギーを重錘の運動エネルギーに変えるものである。ゴムの伸長長さに応じて、重錘の速度を任意に設定できる。伸長長さ50cmで重錘の得る速度は約7m/sであり、伸長率100%（伸張長さ150cm）で約20m/sとなるように設計している。容量294kN(30tonf)の油圧ピストンでゴム8本が取り付けられた可動部を押すことによって、ゴム棒は伸長される。可動部には磁石で重錘が付属している。ゴムの伸長にともなって、重錘も移動する。可動部を所定の長さで停止させ、可動部を固定している掴み装置を解放するとゴムの復元力によって重錘は可動部から離れ、上下左右4本のガイドレールに沿って走行し試験体に対して水平方向に衝突する。本実験では、重錘（以後、衝突体と呼

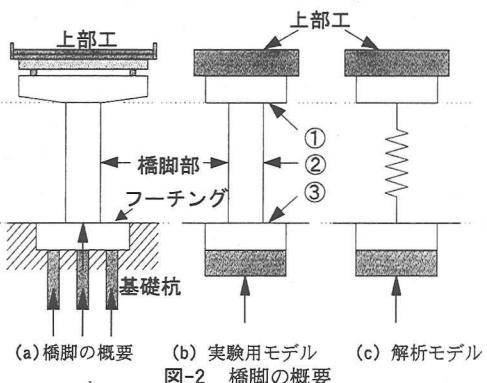
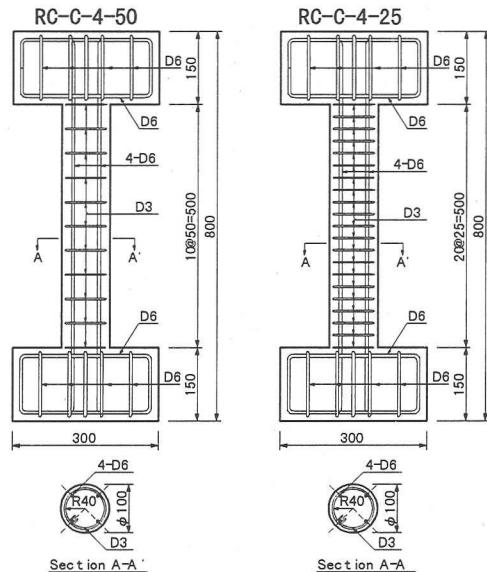


図-2 橋脚の概要



ぶ)の質量は、100kgとした。衝突体には、走行用2本と離脱防止用2本の4本のガイドレールに沿って走るためのローラーが16個取り付けられている。また、試験体に衝突する部分は、直径10cm、長さ30cmの特殊鋼棒である。その先端は、半球、平坦、円錐の3種類のアタッチメントで選択できる。本実験では、偏当たりを防ぐために、先端は半球とした。

(2) RC 円柱試験体

実際のRC橋脚の概要を、図-2(a)に示す。実験では、図-2(b)のように上部工、橋脚部、基礎部分の3つに単純モデル化し、上部工および基礎部分に相当するものとしてそれぞれ鋼製の上部重錘・下部重錘を附加している。橋脚部に相当する部分は、図-3に示すようなI型RC試験体である。試験体の寸法・諸元は、図-3および表-1に示す通りである。柱部分は、直径10cmの円形断面で長さは50cmである。厳密ではないが、単純化したモデルの柱部は実際橋脚の概ね1/20程度の大きさに相当すると考えられる。実際の橋脚を想定した場合、実験に用いるRC円柱試験体の大きさから上部工に相当する部分の上部重錘には質量1ton程度が必要になるが、試験体を設置するための空間的な制約や安全上の配慮から、本実験では、上部重錘に質量200kgの鋼板、下部重錘に質量100kgの鋼板を用いることとする。柱部の両側には15×30×10cmの矩形部分を設けている。上側は橋脚上部の桁受け梁、下側はフーチングに対応するものとした。実験パラメータは、軸方向鉄筋比(1.61, 3.22%)、帯筋間隔(25, 50mm)および段落としの有無である。軸鉄筋にはD6(4, 8本)を、帯筋にはD3を用いた。段落とし試験体は、柱下端から中央25cmまでD6×8本、中央から上端までをD6×4本とした。結果的に、本実験で用いる試験体の軸方向鉄筋比は3.22%となった。実際のRC橋脚の軸方向鉄筋比は、多くても2%程

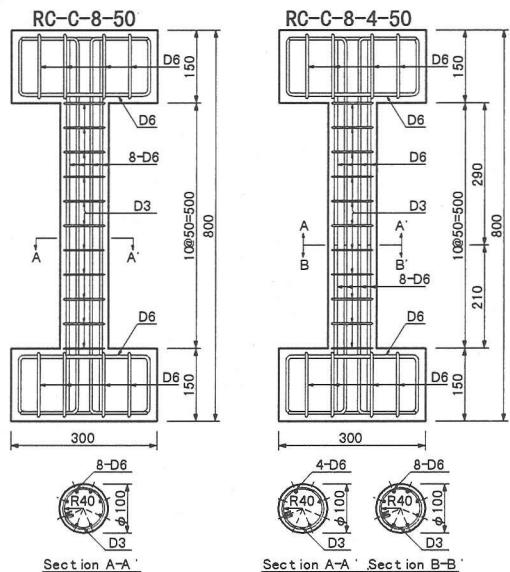


図-3 試験体の寸法・諸元

度であり、試験体と比較した場合、かなり大きな値であると思われる。本研究では、軸方向の衝撃応答における軸方向鉄筋量の相違や段落し部の影響を把握するための基礎的な研究であること、および試験体製作上の制約等から上記のように設定した。コンクリートの配合・強度を表-2に示す。圧縮強度は、静的で27.7MPa(271kgf/cm²) (平均)、動的で41.3MPa(405kgf/cm²) (平均:動的強度増加率1.49)であった。

表-1 試験体の諸元

| No. | 試験体名 | 軸方向鉄筋比 (%) | 帶筋間隔 (mm) | 個数 |
|-----|-------------|------------|-----------|----|
| 1 | RC-C-4-50 | 1.61 | 50 | 3 |
| 2 | RC-C-4-25 | 1.61 | 25 | 3 |
| 3 | RC-C-8-50 | 3.22 | 50 | 2 |
| 4 | RC-C-8-4-50 | 1.61, 3.22 | 50 | 2 |

表-2 試験体用コンクリートの配合・強度

| 粗骨材の最大寸法 (mm) | スランプの範囲 (cm) | 空気量の範囲 (%) | 水セメント比 W/C (%) | 細骨材率 s/a (%) |
|---------------|--------------|------------|----------------|--------------|
| 10 | 16.3 | 4.9 | 70.1 | 46.4 |
| 単位量 (kg/m³) | | | | |
| 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 AE 減水剤 |
| 181 | 259 | 835 | 983 | 0.842 |
| ひずみ速度 | | 圧縮強度 | | |
| (1/sec) | | (MPa) | | |
| 静的 | 10⁻⁶ | 27.7 | | |
| 動的 | 10⁻¹~10⁰ | 41.3 | | |

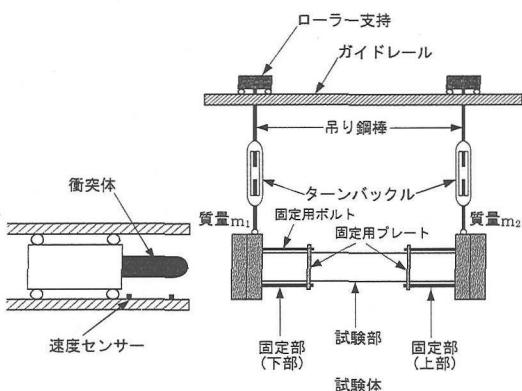


図-4 試験体の設置状況

(3) 実験計画および条件の設定

実際には、衝撃的地震動は地盤から基礎を介して上方向に（鉛直に）入力する。既存の衝撃荷重載荷装置としては、鉛直下方向に衝撃力を載荷する自由落下方式の装置が主流である。鉛直上方向に衝撃荷重を載荷する装置は、その種の実現象がこれまでほとんど無かったせいか、現在国内はもちろん海外にも存在しない。そこで、水平衝撃荷重載荷装置を代用して、軸方向に衝撃荷重が入力する場合の現象ができるだけ現実に近い形で再現するようにした。この装置は、ガードフェンスに対する車両の衝突や砂防ダムに対する土石流衝撃などのように水平方向

から衝撃力が載荷される現象を検討する目的で開発した実験装置である。実際橋脚は、橋脚下部はフーチングおよび基礎で地盤中に固定され鉛直下方向への移動が拘束されるが、鉛直上方向には移動可能の条件にある。また、橋脚は橋桁および橋床版等の上載荷重を受け、圧縮応力状態にある。実験装置は水平方向からの載荷しかできないので、柱軸方向への衝撃荷重入力のためには図-4 に示すように試験体を水平に設置せざるを得ない。したがって、上載荷重による軸圧縮応力は無視することになる。橋脚が上方向には移動可能という実際の条件に合わせるために、装置上部にガイドレールを敷設してその上をローラーが走行できるようにした。RC 円柱試験体は、上下の左右張出し部にそれぞれ固定用プレートを当て $\phi 16\text{mm}$ の固定用ボルト 16 本で上部重錘・下部重錘と固定した。横に配置した試験体は、4 本の吊り鋼棒を介して容易に移動可能である。また図-1 に示すように、装置は荷重載荷装置本体と反力フレームで構成されている。載荷装置前端と反力フレームまでの距離は、約 200cm である。衝撃荷重載荷による衝撃現象を調べるには、試験体が衝突によって移動し反力フレームに再衝突することを防止する必要がある。すなわち、試験体上部の重錘前端と反力フレームの間に 50cm 程度の距離を置かなければならぬので、上下部の重錘と試験体を合わせた全体の長さを 150cm 程度以内とする必要がある。装置の載荷能力や重錘の重量等を考慮して検討した結果、試験体全体の寸法が 80cm 以内であればよいことがわかった。

a) RC 試験体の寸法の決定

試験体を上下の重錘に取り付ける部分は、衝撃力によって容易に破壊しないようにするために十分な補強と大きさが必要なため、図-3 に示すような形と寸法 ($15 \times 30 \times 10\text{cm}$) および配筋とした。したがって、試験体円柱部分の長さは 50cm ($=80 - 2 \times 15\text{cm}$) となり、柱の断面径を 10cm とすれば細長比 5 の柱試験体となる。

b) 衝撃力載荷速度（衝突速度）の設定

実験における衝撃載荷速度および試験体両側に取り付ける上下重錘の重量を設定するために、簡単な数値シミュレーションを行った。図-5 に、解析モデルを示す。図で、 m_1 は衝突側（下部）重錘の質量、 m_2 は上部重錘の質量およびばね k は試験体を表わしている。

いま、この 2 質点系モデルにおいて、 x 軸上で系 S が自然長 L を保って静止しているとする。 $t = 0$ で質点 m_1 に瞬間的に力積（または運動量）を加えて速度 V_0 を与える。衝突後の質点 m_1, m_2 の位置

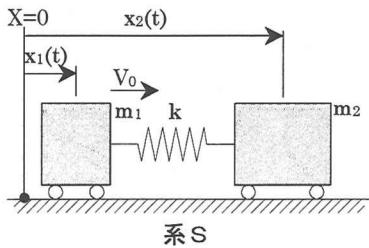


図-5 解析モデル

を絶対座標系で $x_1(t)$, $x_2(t)$ とすると、ばねの伸び $\Delta = (x_2 - x_1 - L)$ である。このとき、系の運動方程式は次式で表わされる。

$$\ddot{m}_1 x_1 = k(x_2 - x_1 - L)$$

$$\ddot{m}_2 x_2 = -k(x_2 - x_1 - L)$$

初期条件を、 $t=0$ で、 $x_1=0$, $x_2=L$, $\dot{x}_1=V_0$, $\dot{x}_2=0$ とすると、系 S の質量中心位置および速度は

$$x_c(t) = (m_1 x_1 + m_2 x_2) / (m_1 + m_2)$$

$$V_c(t) = (m_1 \dot{x}_1 + m_2 \dot{x}_2) / (m_1 + m_2)$$

で与えられる。これに、初期条件を用いると

$$x_c(t) = (m_1 V_0 t + m_2 L) / (m_1 + m_2)$$

$$V_c(t) = m_1 V_0 / (m_1 + m_2)$$

したがって、

$$\ddot{x}_2 - \ddot{x}_1 = -(m_1 + m_2) k (x_2 - x_1 - L) / m_1 m_2$$

である。すなわち、相対座標 $x_R = x_2 - x_1$ についての方程式が次のように得られる。

$$(d^2/dt^2)(x_R - L) = -\omega^2 (x_R - L)$$

$$\omega^2 = k(m_1 + m_2) / m_1 m_2, k = EA/L$$

この一般解は、 $x_R - L = a \cos \omega t + b \sin \omega t$ で与えられる。初期条件を用いると $a=0$, $b = -V_0 / \omega$ となり、結局相対変位は、

$$x_R = x_2 - x_1 = L - (V_0 / \omega) \sin \omega t$$

となる。ばね（柱部）に作用する軸方向衝撃力は、 $P = k \Delta = k(x_R - L)$ があるので、

$$P = -k(V_0 / \omega) \sin \omega t$$

を得る。最大衝撃力および最大発生応力は、それ

$$P_{max} = -k(V_0 / \omega)$$

$$\sigma_{max} = P_{max} / A \quad A: \text{柱部の断面積}$$

で与えられる。ここで、柱部分は軸鉄筋とコンクリートの合成であるので、コンクリートと鉄筋の継弾性係数、断面積および作用する力をそれぞれ E_c , A_c , P_c , E_s , A_s , P_s とし、軸鉄筋比を p とする。合成柱の軸方向の変形に対して、コンクリートと鉄筋に生じるひずみは等しいから、

$$\sigma_c / E_c = \sigma_s / E_s$$

となる。コンクリートおよび鉄筋に生じる応力 σ_c ,

表-3 試験体諸定数

| | 鉄筋比 p (%) | | |
|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| | | 1.61 | 3.22 |
| コンクリート継弾性係数 E_c | N/cm ² | 2.45×10 ⁶ | |
| 鉄筋継弾性係数 E_s | N/cm ² | 2.06×10 ⁷ | |
| 断面積 A | cm ² | 78.54 | |
| 柱長 L | cm | 50.00 | |
| ばね定数 k | N/cm | 4.30×10 ⁶ | 4.76×10 ⁶ |

表-4 解析結果（質量・変位速度と最大応力）

| m_1 (kgf) | m_2 (kgf) | 最大応力(MPa) | | | | | |
|----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 鉄筋比:1.61% | | | 鉄筋比:3.22% | | |
| | | V_0 (m/s) |
| 50 | 50 | 13.8 | 20.6 | 27.5 | 14.5 | 21.7 | 28.9 |
| 50 | 100 | 15.9 | 23.8 | 31.8 | 16.7 | 25.1 | 33.4 |
| 50 | 150 | 16.8 | 25.3 | 33.7 | 17.7 | 26.6 | 35.4 |
| 50 | 200 | 17.4 | 26.1 | 34.8 | 18.3 | 27.5 | 36.6 |
| 100 | 50 | 15.9 | 23.8 | 31.8 | 16.7 | 25.1 | 33.4 |
| 100 | 100 | 19.5 | 29.2 | 38.9 | 20.5 | 30.7 | 40.9 |
| 100 | 150 | 21.3 | 32.0 | 42.6 | 22.4 | 33.6 | 44.8 |
| 100 | 200 | 22.5 | 33.7 | 44.9 | 23.6 | 35.4 | 47.3 |
| 150 | 50 | 16.8 | 25.3 | 33.7 | 17.7 | 26.6 | 35.4 |
| 150 | 100 | 21.3 | 32.0 | 42.6 | 22.4 | 33.6 | 44.8 |
| 150 | 150 | 23.8 | 35.7 | 47.7 | 25.1 | 37.6 | 50.1 |
| 150 | 200 | 25.5 | 38.2 | 50.9 | 26.8 | 40.2 | 53.6 |
| 200 | 50 | 17.4 | 26.1 | 34.8 | 18.3 | 27.5 | 36.6 |
| 200 | 100 | 22.5 | 33.7 | 44.9 | 23.6 | 35.4 | 47.3 |
| 200 | 150 | 25.5 | 38.2 | 50.9 | 26.8 | 40.2 | 53.6 |
| 200 | 200 | 27.5 | 41.3 | 55.0 | 28.9 | 43.4 | 57.9 |

σ_s は、

$$\sigma_c = P_c / A_c = P_c / (1-p)A$$

$$\sigma_s = P_s / A_s = P_s / pA$$

である。衝撃力 P は、 $P = P_c + P_s$ であるから

$$P = P_c + P_s = \sigma_c (1-p)A + \sigma_s pA$$

$$= (\Delta / L) \{ (1-p) E_c + p E_s \} A = k \Delta$$

$$\text{ここに, } k = \{ (1-p) E_c + p E_s \} (A / L)$$

である。

次に、解析のための試験体諸定数を表-3 に示す。

表-4 は、質点 m_1 に与える変位速度 V_0 を変化させたときの最大衝撃力と最大応力の値である。

c) 重錐の重量の設定

衝撃荷重載荷用の載荷体（衝突体とも呼ぶ）の質量が 100kg であることおよび実験安全上と装置の保護から衝突速度を 10m/s 以内に収める必要があることを考慮して、被衝突体（試験体を含む）の総質量は約 350kg 以内になるようにした。また、前述の数値シミュレーションの結果から、被衝突体の質量合計が 300kg で衝突による質点の変位速度が 1.5m/s 以上の場合には、2つの質点の間のばね（試験体柱部に対応する）にコンクリートの設計圧縮強度 27.6MPa (270kgf/cm²) を越える圧縮応力 (33.7MPa (330kgf/cm²) 以上) が発生することがわかった。そこで、衝突を受ける下部重錐の質量を

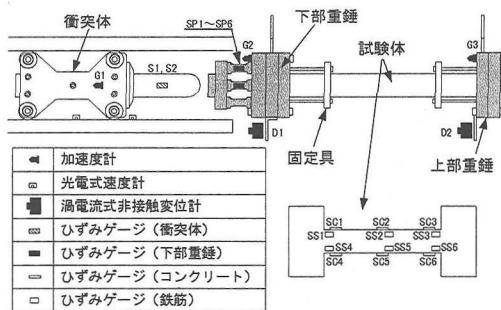


図-6 計測位置および種類

表-5 計測機器の種類および性能・諸元

| 種類 | 型名 | 計測範囲 | 仕様 |
|---------------------|--------------|--------|-------------|
| 加速度計 | 305A04 | 5000G | 固有振動数 60kHz |
| | 302A02 | 500G | 45kHz |
| 変位計 | KD-2300-12CU | 50.8mm | 周波数応答 50kHz |
| ひずみゲージ (コンクリート用) | PL-30-11-3L | | 抵抗値 120Ω |
| ひずみゲージ (鉄筋用) | FLA-2-11-3L | | 抵抗値 120Ω |

135kg、試験体上部の重錐質量を200kgとした。表-7に示した急速載荷試験の結果では、鉄筋コンクリート円柱供試体（軸鉄筋比1.61%）の動的圧縮強度（平均値）は帶筋間隔50mmの場合に35.7MPa(350kgf/cm²)で、25mmの場合は36.9MPa(362kgf/cm²)であった。したがって、質点m₁に与える変位速度V₀が1.5~2.0m/sであれば、圧縮破壊が生じる可能性があると推定される。

(4) 計測

図-6に、計測位置および種類を示す。計測項目は、衝突体の加速度(G1)・速度(V)・衝突体のひずみ(S1, S2)、試験体上下の重錐の加速度(G2, G3)・変位(D1, D2)、下部重錐のひずみ(SP1~SP6)、柱部のコンクリートひずみ(SC1~SC6)および鉄筋ひずみ(SS1~SS6)である。計測に用いた機器の種類およびその性能・諸元を表-5に示す。また、破壊の進展状況等の細部を実験後に確認するために、ビデオ撮影（シャッター速度1/2000秒）を行った。

(5) 実験ケース

対象とした試験体は、諸元が異なる4種類である。また、同一諸元の試験体に対しても、載荷速度を変えた実験を行った。表-6に、実験ケースの一覧を示す。試験体数は、合計10体である。本実験では、衝撃入力に対する試験体の初期変位速度として(3)b)の簡易解析結果を考慮して0.5~1.5m/s

表-6 実験ケースの一覧

| 試験体名 | 衝突速度 | ゴム伸び |
|---------------|----------|-------------------------|
| | V m/s | $\Delta \epsilon$ cm |
| RC-C-4-50-1 | 8.32 | 60 |
| RC-C-4-50-2 | 8.08 | 60 |
| RC-C-4-50-3 | 4.98 | 40 |
| RC-C-4-25-1 | 7.69 | 60 |
| RC-C-4-25-2 | 5.06 | 40 |
| RC-C-4-25-3 | 6.94 | 50 |
| RC-C-8-50-1 | 8.78 | 60 |
| RC-C-8-50-2 | 5.76 | 40 |
| RC-C-8-4-50-1 | 8.50 | 60 |
| RC-C-8-4-50-2 | 5.88 | 40 |

を与えるように衝突体の速度を設定した。試験体の幾何学的縮尺を実物に対して相似比sとし加速度に対しては1/sとすれば、速度の相似比は実現象に対して1対1に対応する。したがって、本実験で設定した試験体の初期変位速度0.5~1.5m/sの値は、実際のRC橋脚においても初期変位速度として0.5~1.5m/sを与えることになる。予備実験において、載荷装置のゴムの伸長長さを40~60cmの範囲とすれば、所定の変位速度が得られることを確認した。このとき、試験体に対する衝突体の衝突速度は約5~9m/sである。

3. 実験結果および考察

(1) 鉄筋コンクリート円柱供試体の動的圧縮強度

図-7に、円柱供試体(Φ10cm、高さ20cm、軸鉄筋比1.61%、帶筋間隔50mm、25mm)の寸法・諸元を示す。また図-8に高速度急速載荷試験に用いた試験装置の概要および設置状況を示す。本試験装置は、高速変形負荷装置と呼ばれ、最大荷重容量490kN(50tonf)、最大速度4m/sで載荷が可能である。試験体を反力基礎床上に固定し、上方向から下に加圧ビームを高速移動させることにより試験体には動的圧縮荷重が載荷される。試験終了後の供試体の損傷状況の例を、写真-1に示す。得られた各試験体の動的圧縮強度を、表-7に示す。

(2) 柱部の損傷状況

a) 高速ビデオによる損傷進展状況

ビデオで撮影した試験体の実験状況の映像の中から、衝撃力の作用直後の状況をビデオプリンターや用いてコマ撮りでプリントした。写真-2、3に、柱部に圧縮破壊が生じた試験体のうち2体(RC-C-8-50-1、RC-C-8-4-50-1)の例を示す。引張また

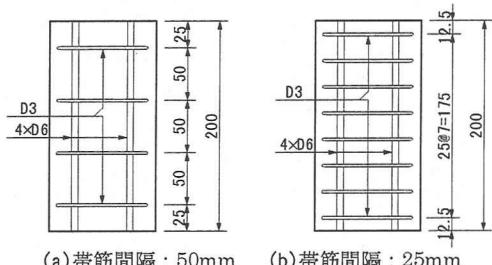


図-7 RC円柱供試体の寸法・諸元

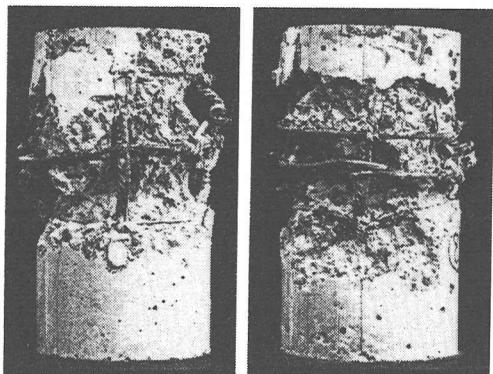


写真-1 急速載荷試験後のRC円柱供試体の状況

いる可能性がある。

b) 最終損傷状況

図-9に、全試験体の最終損傷状況を示す。1本の試験体に対する4枚の損傷状況図は、4方向から見たことを表わしている。なお損傷図で、柱部が曲がっているものは試験体が水平に設置されたことによる。また、軸鉄筋に囲まれた内部コンクリートが欠落している(RC-C-8-50-1)のは、衝撃力により粉砕されたコンクリートが運搬時に抜けてしまったためである。

1) RC-C-4-50-1 (軸鉄筋比 1.61%, 帯筋間隔 50mm) : 初期変位速度 0.96m/s (衝突速度 8.32m/s) の条件で、柱下端から 5~15cm の範囲が圧縮破壊し、柱上部には圧縮・引張の複合ひび割れが生じた。

2) RC-C-4-50-2 (軸鉄筋比 1.61%, 帯筋間隔 50mm) : 初期変位速度 0.97m/s (衝突速度 8.08m/s) の条件で、柱下端から 7.5~15cm の範囲が圧縮破壊し、柱中央から上部に3本の全周ひび割れが生じた。

3) RC-C-4-50-3 (軸鉄筋比 1.61%, 帯筋間隔 50mm) : 初期変位速度 1.06m/s (衝突速度 4.98m/s) の条件で、柱下端から 15cm の範囲に圧縮・引張複合ひび割れ、柱中央から上端までに約 15cm 間隔で3本の全周引張ひび割れが生じた。この試験体はRC-C-4-50-2とほぼ同程度の初期変位速度であるにもかかわらず破壊形態が著しく異なるのは、衝突体の衝突速度がRC-C-4-50-2の値に対して 1/2 程度になっていることに起因していると考えられる。

4) RC-C-8-50-1 (軸鉄筋比 3.22%, 帯筋間隔 50mm) : 初期変位速度 1.51m/s (衝突速度 8.78m/s) の条件で、柱下端から 5~15cm の範囲で圧縮破壊が生じ、さらに 15cm から上端までの範囲には圧縮と引っ張りによるひび割れが生じた。

図-8 急速載荷実験装置および試験体の設置

表-7 RC円柱供試体の静的・動的圧縮強度

| 載荷条件 | ひずみ速度 (1/sec) | 諸元 | | 圧縮強度 (MPa) |
|------|---------------------|-------|------|---------------|
| | | 軸鉄筋比 | 帯筋間隔 | |
| 動的 | $10^{-1} \sim 10^0$ | 1.61% | 50mm | 35.7 |
| | | | 25mm | 36.9 |
| 静的 | 10^{-6} | | 50mm | 27.2 |
| | | | 25mm | 28.1 |

は圧縮ひび割れだけが生じた試験体については、ひび割れ状況がビデオ映像からは判別できなかつたため省略した。ここに示した連続写真の時間間隔は、ビデオ再生機の性能から 1 / 60 秒 (約 17msec) である。いずれの試験体においても、2コマ目 (衝突後、1/60 秒経過) では圧縮破壊がかなり進展している状態である。したがって、映像からは確認できないが、少なくとも 1/60 秒以前で破壊が発生して

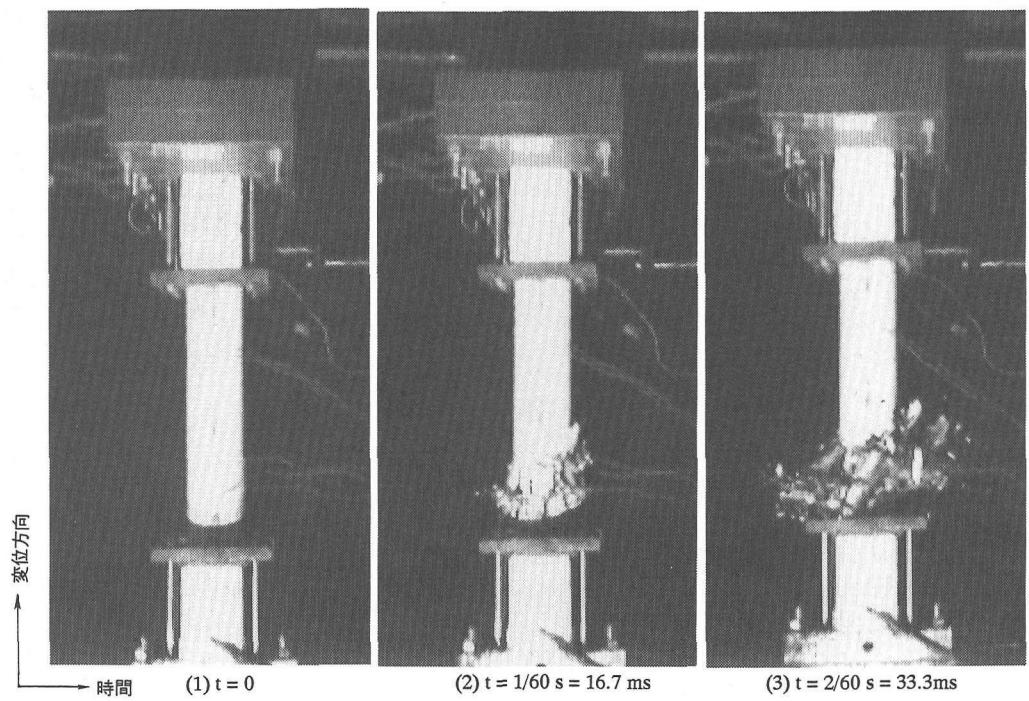


写真-2 RC-C-8-50-1 試験体の損傷過程

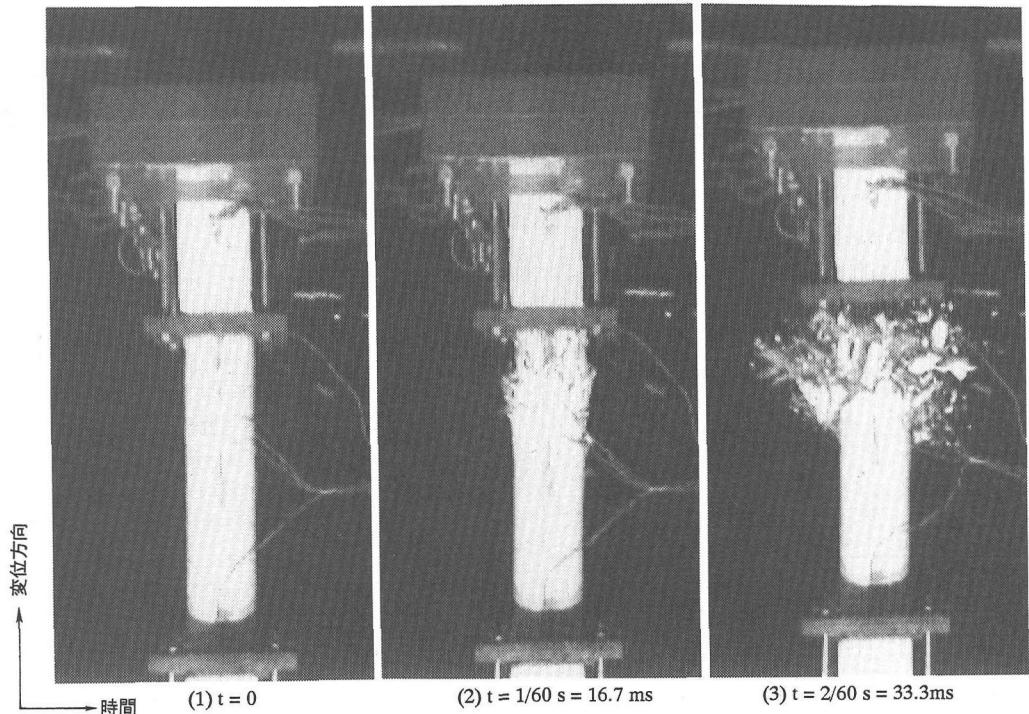


写真-3 RC-C-8-4-50-1 試験体の損傷過程

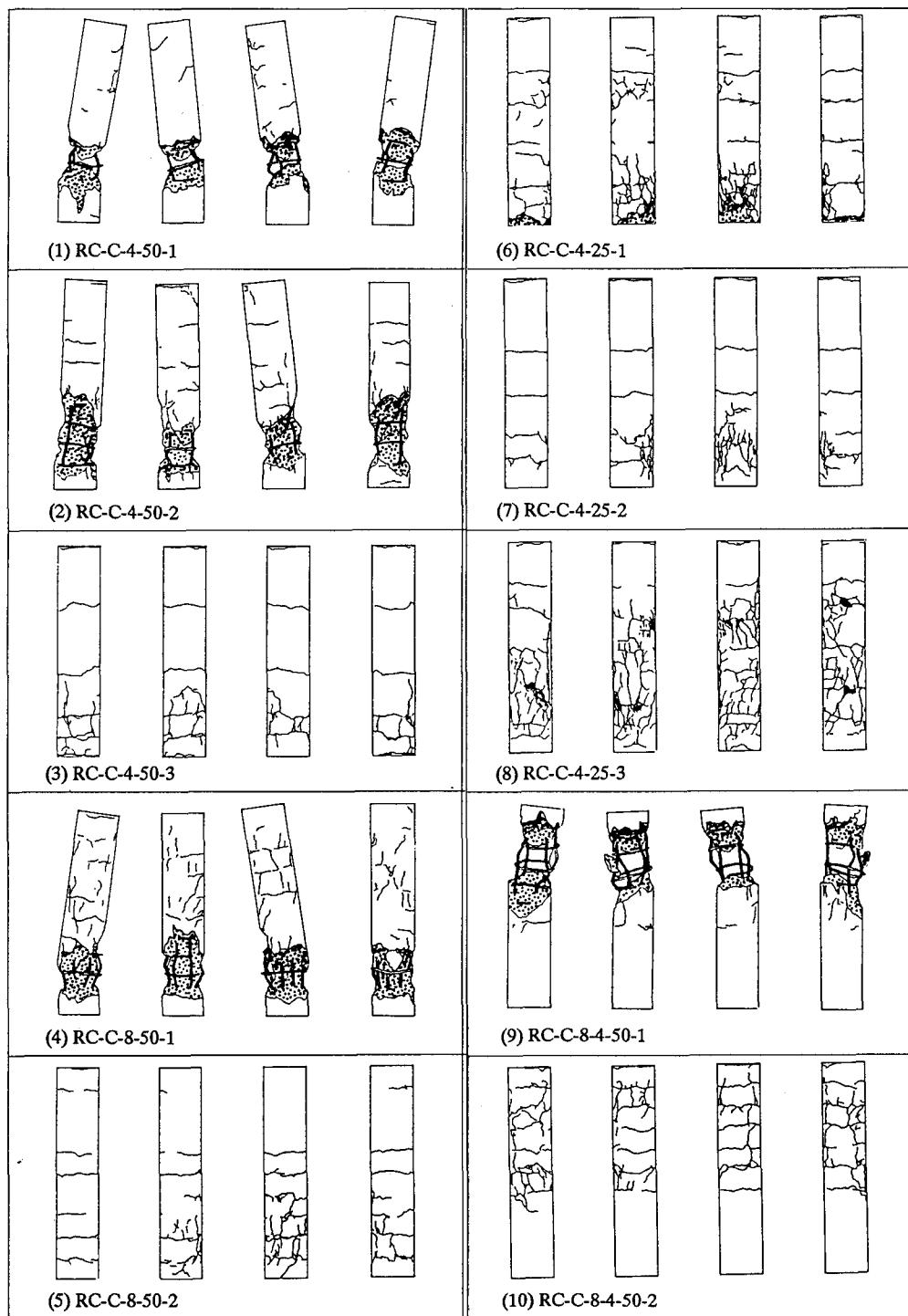


図-9 衝撃載荷実験後の損傷状況

5) RC-C-8-50-2 (軸鉄筋比 3.22%, 帯筋間隔 50mm) : 初期変位速度 0.42m/s (衝突速度 5.76m/s) の条件で、柱下端から 20cm の範囲には引っ張りによる全周ひび割れと圧縮によると考えられる縦ひび割れが生じ、柱中央付近に 2 本の全周ひび割れおよび上端から 5cm に 1 本のひび割れが生じた。

6) RC-C-4-25-1 (軸鉄筋比 1.61%, 帯筋間隔 25mm) : 初期変位速度 1.11m/s (衝突速度 7.69m/s) の条件で、柱下端から 15cm の範囲および上端から 15cm 付近には、圧縮によると考えられるコンクリートの剥離およびひび割れが生じた。また、柱部全体にわたって、約 10cm 間隔で引張ひび割れが生じている。

7) RC-C-4-25-2 (軸鉄筋比 1.61%, 帯筋間隔 25mm) : 初期変位速度 0.65m/s (衝突速度 5.06m/s) の条件で、柱下端から 5~15cm の範囲に圧縮・引張複合ひび割れ、中央部 1 本、中央から 10cm に 1 本および上端に 1 本の全周ひび割れが生じた。

8) RC-C-4-25-3 (軸鉄筋比 1.61%, 帯筋間隔 25mm) : 初期変位速度 0.96m/s (衝突速度 6.94m/s) の条件で、柱下端から 40cm の広い範囲にわたって圧縮と引っ張りの複合と考えられる細かなひび割れが生じた。柱上端にも引張りひび割れが生じている。

9) RC-C-8-4-50-1 (軸鉄筋比 3.22+1.61%, 帯筋間隔 50mm, 段落有) : この試験体は、柱中央で軸鉄筋比が変化 (下側 3.22%, 上側 1.61%) している。衝突速度 8.50m/s (初期変位速度: 計測不能) の条件で、柱上端から 5~15cm の範囲が圧縮破壊した。軸鉄筋比は上端から 25cm の位置で変化 (いわゆる、段落し) しており、断面剛性が小さい上半分の柱部に圧縮破壊が生じている。

10) RC-C-8-4-50-2 (軸鉄筋比 3.22+1.61%, 帯筋間隔 50mm, 段落有) : この試験体も、柱中央で軸鉄筋比が変化 (下側 3.22%, 上側 1.61%) している。初期変位速度 0.49m/s (衝突速度 5.88m/s) の条件で、柱中央部 (段落し位置) から上および下 5cm の範囲に圧縮・引張複合ひび割れが生じた。

c) 帯筋間隔の相違による損傷状況の比較

図-9 で、RC-C-4-50-1 (帯筋間隔 50mm) と RC-C-4-25-1 (帯筋間隔 25mm) の損傷状況を比較する。両者に与えられた初期変位速度は、約 1m/s でほぼ等しい。帯筋間隔の大きい試験体は、圧縮により柱下部に局部的な破壊が起りかぶりコンクリートの剥落および軸鉄筋の座屈が生じた。一方、帯筋間隔が小さい試験体では、柱部全体にわたって圧縮と引っ張りによるひび割れが生じた。したがって、軸方向への衝撃入力に対しても帯筋の効果は大きく、密な配置ほど効果は増加するものと考える。

d) 軸方向鉄筋比の大小による損傷の比較

図-9 で、RC-C-4-50-2 (軸鉄筋比 1.61%, 帯筋間隔 50mm) と RC-C-8-50-1 (軸鉄筋比 3.22%, 帯筋間隔 50mm) の損傷状況を比較すると、いずれも柱下端から 5~15cm の範囲に局部的な圧縮破壊を生じており両者の損傷程度はほぼ等しいとみなせる。しかしながら、同程度の損傷を与えるために必要な初期変位速度は、軸鉄筋比が大きい試験体の方が約 1.6 倍 (=1.51m/s/0.97m/s) である。したがって、軸鉄筋比が大きい (軸方向の剛性大) ほど軸方向衝撃入力に対して損傷を減少させるのに効果的であると考えられる。

e) 軸鉄筋比の変化 (段落し) の影響

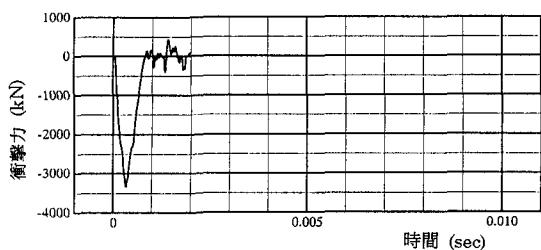
図-9(9), (10)に示した RC-C-8-4-50-1 と RC-C-8-4-50-2 試験体の損傷状況から、1 本の柱部材で軸鉄筋比が変化する場合は鉄筋比が小さい部分に破壊が集中することがわかる。本実験で用いた RC 試験体は、フーチングおよび桁受けはり部に対応しつつ試験体を重錘に固定するための矩形部を柱の両側に設けている。したがって、柱部は両端完全固定の条件にある。本実験結果から、軸方向に衝撃力を受ける RC 柱部材の全般的な損傷傾向として、局部的な圧縮破壊は固定端ではなく上下端からやや内側 (本実験では、帯筋間隔に相当する 50mm) に生じている。

(3) 衝撃荷重の入力特性

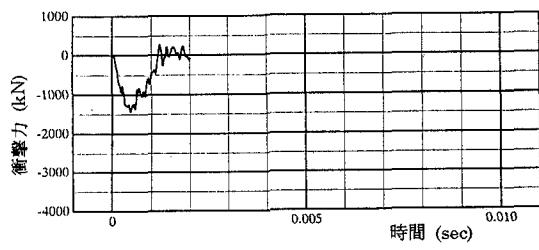
図-10, 11 に、計測データの出力例として柱下部に圧縮破壊が生じた RC-C-4-50-2 試験体 (軸鉄筋比 1.61%, 帯筋間隔 50mm) および RC-C-8-4-50-2 試験体 (段落し有, 帯筋間隔 50mm) の衝撃入力、加速度、変位、コンクリートひずみおよび鉄筋ひずみの時刻歴を示す。

衝突によって試験体に作用した衝撃力 P は、厳密ではないが、その反力として衝突体にも作用したものと考える。したがって、その力 P は衝突体の棒に生じるひずみ ϵ に棒の断面積 A (78.54cm^2) と綫弾性係数 E ($3.43 \times 10^7\text{N/cm}^2$) を乗じることによって求め ($P = \epsilon EA$) ている。次に、衝撃力の作用時間は、衝突体が衝突により試験体下部重錘に接触してから離反するまでの時間と定義する。この時間は、衝突体の棒に生じるひずみ値が衝突によって発生した後、最大値に達して、再び 0 値になるまでの時間に対応するものとした。

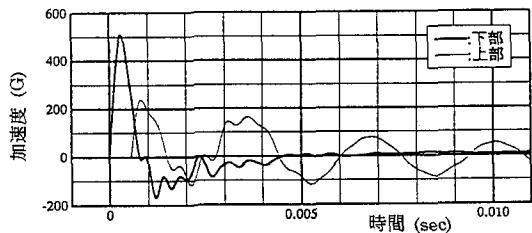
図-10(1)と図-11(1)に、衝突体 (棒) の先端から 20cm の位置に貼付したひずみゲージによるひずみから算定した衝撃力の時刻歴を示す。図から、それぞれ 3234kN (330tonf) および 1470kN (150tonf)



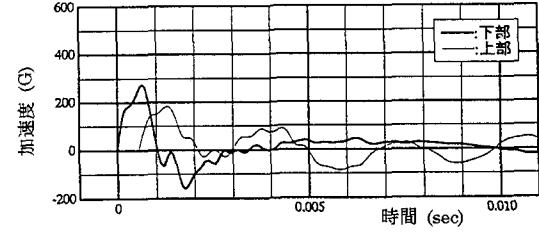
(1) 入力衝撃力



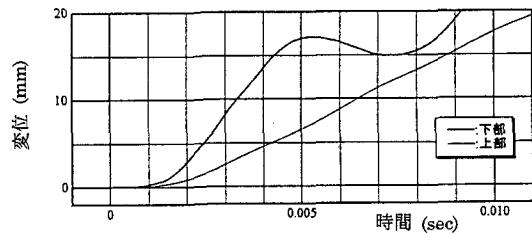
(1) 入力衝撃力



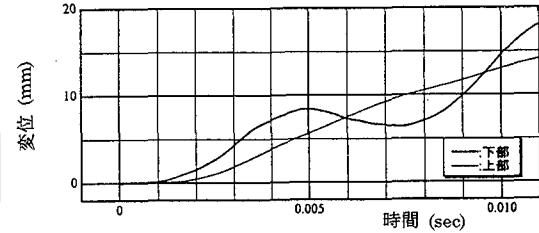
(2) 加速度応答



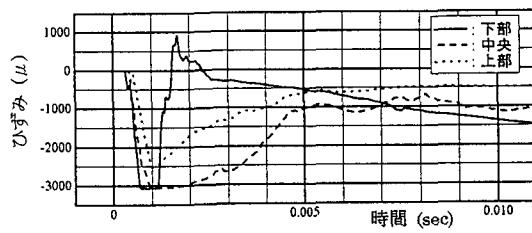
(2) 加速度応答



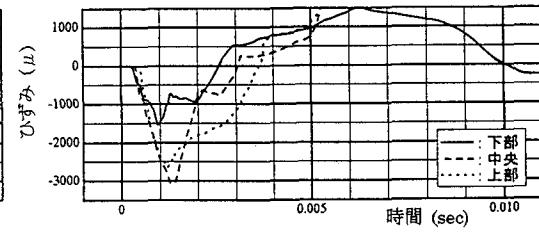
(3) 変位応答



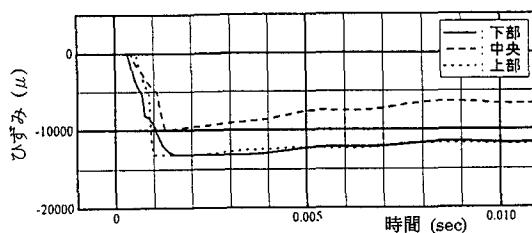
(3) 変位応答



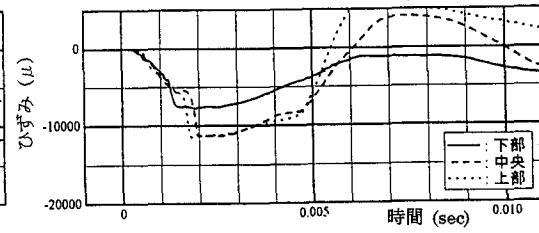
(4) コンクリートひずみ応答



(4) コンクリートひずみ応答



(5) 鉄筋ひずみ応答



(5) 鉄筋ひずみ応答

図-10 試験体柱部の応答

(RC-C-4-50-2 : 軸鉄筋比 1.61%, 帯筋間隔 50mm)

図-11 試験体柱部の応答

(RC-C-8-4-50-2 : 軸鉄筋比 3.22+1.61%)

の衝撃力が作用していることがわかる。作用時間は、それぞれ 0.7 msec および 1.2 msec である。

(4) 上下重錘の加速度および変位応答

図-10(2)と図-11(2)に、加速度時刻歴を示す。図中、太線および細線は、それぞれ重錘下部（衝突側）と上部重錘に対する場合を表わす。下部重錘の加速度は、衝突直後に発生しほば衝撃力の作用時間に等しい時間経過すると逆向きに転じている。上部重錘の加速度は、衝撃入力が最大に達して減少に転じた時点で発生し、その継続時間は衝撃力作用時間よりやや長い。また、上部重錘の最大加速度の大きさは下部重錘の約 1/2～2/3 程度となっている。

(5) 上下重錘の変位応答

図-10(3)と図-11(3)に、上部および下部重錘の変位の時刻歴を示す。図を見ると、上下重錘の変位はいずれも衝突直後は発生せず、衝撃力の作用が終了する時刻付近で発生している。また、下部重錘（衝突側）の変位 x_1 の方が早い時刻で発生し、変位量も大きい ($x_1 > x_2$)。時刻の経過にともなって下部重錘の変位は振動し、上部重錘の変位より小さくなる状態 ($x_1 < x_2$) が現われる。上下重錘の相対変位量 ($x_1 - x_2$) が正 ($x_1 - x_2 > 0$) の場合は柱部は圧縮状態、負の場合 ($x_1 - x_2 < 0$) は引張状態となる。したがって、衝突後時間が経過すると (RC-C-8-4-50-2 試験体では、約 6msec)，上下重錘の伸縮運動により柱部には圧縮と引張が交互に現れる。

(6) 試験体柱部の各位置におけるひずみ応答

図-10(4), (5)と図-11(4), (5)に、柱部分の 3箇所、すなわち下端、下端から 25cm および下端から 50cm の位置（それぞれ、下部、中央部、上部と呼ぶ）におけるコンクリートおよび鉄筋ひずみの時刻歴を、加速度および変位時刻歴に対応して示している。いずれのひずみも、衝撃力あるいは下部重錘の加速度が最大となる時刻付近で発生している。柱下部に圧縮破壊を生じた RC-C-4-50-2 試験体の場合、下部から時間間隔をおいて中央部、上部の順に発生している。とくに下部のコンクリートひずみは、発生後 0.3msec（衝撃力の入力後約 0.6 msec）で 3000 μ を超えている。圧縮破壊は、この時点で生じたのではないかと推定される。段落としのある RC-C-8-4-50-2 試験体の場合には、軸鉄筋比が小さい柱上半部に圧縮・引張複合ひび割れが生じた。コンクリートひずみは、衝撃入力後 3msec 付近までいずれも圧縮であり、中央部と上部のひずみが大きな値を示している。下部の圧縮ひずみの最大値は、中央部お

よび上部の圧縮ひずみの最大値の約 50%程度となっている。試験体の柱下部と段落し部の剛性比は 1.1:1.0 であるから静的載荷のように一定の力が柱全体に作用するような場合、柱下部のひずみは中央部・上部のひずみに対して 90%程度の値になる。しかしながら、実際の計測値は 50%程度と小さい。このような理由として、段落しの影響による衝撃特有の現象である損傷の局所化が生じている可能性を考えられる。この点に関しては今後詳細な解析的検討を行う必要があると考えている。コンクリートの圧縮ひずみは、約 3msec 前後で引張側に転じている。ひび割れが生じた中央部・上部のひずみは 5msec 付近で急激に引張ひずみが増加し出すことからこの時刻付近でひび割れが生じたものと推定される。コンクリートの下部の引張ひずみも最大で 1500 (μ) 程度になっていることからある程度ひび割れが生じた可能性がある。しかしながら、実験終了後の目視による観察では柱下部の部分にひび割れを確認することはできなかった。

(7) 損傷発生のメカニズムに対する考察

RC-C-4-50-2 試験体では、衝撃力の作用直後約 0.6msec で下部のコンクリートひずみが 3000 μ を超える値を示しているが、上下重錘の変位はまだ計測器が検出できるほどの値 (5/1000 mm) が発生していない。すなわち、上下の重錘は動いていないとみなせる。これは、重錘の慣性力によるものであり、見方を変えれば、衝撃力の作用間は試験体の柱部は両端固定の条件にあると言える。

ある棒の一端に衝撃圧縮力が加えられると、棒中を圧縮応力波が進行し、先端に達すると応力波が反射・重複しながら後退波となって戻って来る。先端が自由端の場合は後退波は進行波と異符号（引張）となり、固定端では同符号（圧縮）となる。したがって、固定端での応力は、入射応力の 2 倍となって反射する。両端が固定であれば、棒端では反射の度に倍々の応力状態となる。実際には応力の透過や逸散などがあるため厳密ではないが、棒の両端における応力 σ は、 $\sigma = n \sigma_0$ 。 $(n : 往復回数, \sigma_0 : 初期発生応力 = \rho C V_0, V_0 : 初期変位速度)$ で推定できる。

ここで、RC-C-4-50-2 試験体の場合を例に、試算してみる。コンクリート中の三次元弾性波速度 C ($= \{(1-\nu) E / (1+\nu)(1-2\nu) \rho\}^{1/2}$: $\rho = 2.3 \text{ t/m}^3$, $E = 2.45 \times 10^9 \text{ N/cm}^2$, $\nu = 1/3$) は、略算で 3640 m/s となるので、衝撃力の作用時間 0.83ms の間に応力波は 3 往復 ($0.83\text{ms}/0.275\text{ms} = 3.0 : 0.275 \text{ ms}$ は、弾性波が長さ 50cm の鋼管を 1 往復する時間) する。

RC-C-4-50-2 試験体の初期変位速度 V_0 は、97cm/s であり、初期発生応力 σ_0 ($= \rho CV_0 = 0.854 V_0$) は 8.47MPa (83kgf/cm²) となる。このとき、棒中を伝播する最大応力 σ_{max} は、 $\sigma_{max} = 2 \times 3 \times 8.47 = 50.8$ MPa (498 kgf/cm²) となる。この値は、RC-C-4-50-2 試験体と同一諸元の円柱供試体に対する急速載荷試験で得られた動的圧縮強度 35.7MPa (350 kgf/cm²) より大きな応力である。つまり、衝撃圧縮応力により局部的な圧縮破壊が生じる可能性が十分考えられる。

衝撃応力 σ の大きさは、材料が同じであれば変位速度 V_0 の大きさおよび弾性応力波の往復回数に依存する ($\sigma = 2n \sigma_0 = 2n \rho CV_0$) ので、柱部が長い場合や変位速度が小さい場合には軸方向への衝撃入力に対して圧縮破壊は生じにくい。

4. おわりに

兵庫県南部地震において、道路橋橋脚に多くの被害が生じた。道路橋橋脚に生じた被害の中で、橋脚上部の圧縮破壊や鋼製橋脚の局部座屈など軸方向への衝撃入力により発生したのではないかと考えられる損傷が見受けられた。震災後すでに 2 年が経過したが、実際に被害を受けた橋脚の破壊メカニズムについては未だ十分に検証されたとは言えない。都市の直下またはその近傍が震源となって発生する直下型地震では、表層までの距離が短いため震源で放出されたエネルギーは短時間にしかも短周期の地震波が減衰せずに、パルス的な鉛直動として構造物に作用する可能性がある。このような衝撃的地震動に対して、構造物の鉛直方向に対する損傷発生メカニズムを把握しておくことは、耐震安全性の観点から重要な問題であると考える。

本研究は、柱部材に対する衝撃入力により局部的な圧縮破壊が生じる可能性やその発生メカニズムについて実験的に検討することを試みたものである。なお、本実験では装置の制約から試験体を横に設置した状態で載荷を行った。もし、鉛直に試験体を設置した状態で実験を行えば、下方向から鉛直上方に衝撃的に突き上げられた上部重錘は衝撃荷重の入力終了後試験体に落下衝突するという現象が再現できる。この場合には、応力波によって生じた局部破壊はさらに大きくなることが予想される。

本研究で得られた結果は、以下のように要約できる。

(1) 水平衝撃荷重載荷装置を用いた軸方向衝撃荷重載荷実験を行うことにより、RC 円柱試験体に圧縮応力波による圧縮破壊や引張ひび割れおよび圧

縮・引張複合ひび割れなどが生じることを確認できた。

(2) 柱部に断面剛性変化（段落し）がある場合は、剛性が小さい部分に破壊が集中する。

(3) 同一諸元の柱部材に対して、入力する衝撃力が同一の大きさであれば、帯筋間隔が狭いほど破壊は小さくなる。また別途行った急速載荷試験から、帯筋間隔が密なほど動的圧縮強度が増加することがわかった。すなわち、帯筋によって軸鉄筋を拘束することにより内部コンクリートの逸脱を防止できるため、軸方向衝撃入力による圧縮破壊の抑制に効果があると考えられる。

(4) 応力波による圧縮破壊の発生は、柱部の長さおよび変位速度の大きさに依存する。すなわち、軸方向への衝撃入力があっても柱部が長い場合や変位速度が小さい場合は、圧縮破壊は生じにくい。

(5) 構造系が、本研究で用いた 2 質点系モデルのように単純置換できるならば、簡易な数値解析によつて圧縮破壊の発生を概ね予測できる。

参考文献

- 1) 兵庫県南部地震による道路橋の震災に関する調査中間報告書（案），兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会，1995年3月。
- 2) 土木学会阪神大震災震災調査第二次報告会資料，土木学会，1995年3月。
- 3) 平成7年兵庫県南部地震被害調査報告書（第一報），（第二報），鹿島建設，1995年2月1日，1995年3月31日。
- 4) 「阪神大震災（兵庫県南部地震）」調査報告一第1～4報一，竹中工務店，1995年1月31日，2月15日，3月31日，10月31日。
- 5) 1995年1月17日兵庫県南部地震調査報告速報（1）一建築構造物被害写真一，大林組技術研究所，1995年1月31日。
- 6) 平成7年（1995年）兵庫県南部地震被害調査報告書，大林組技術研究所，1995年3月。
- 7) 阪神大震災写真集，シバタ工業，1995年4月。
- 8) 1995年兵庫県南部地震調査報告書，清水建設技術研究所，1995年2月28日。
- 9) PRELIMINARY REPORT ON THE GREAT HANSHIN EARTHQUAKE OF JANUARY 17, 1995, DPRI News Letter Special Issue, 京都大学防災研究所，1995. Feb.
- 10) 大林組技術研究所報特別号 1996, 大林組技術研究所，1996年8月。
- 11) 岡本舜三：阪神・淡路大震災に思う，土木学会誌，Vol.80, pp.2～5, 1995. 4.
- 12) 高田直峻：「突き上げるような上下動」はどこへいった，土と基礎，44-3, pp.13～15, 1996.3.
- 13) 小野紘一：衝撃的突き上げの RC 橋脚への影響，土木学会誌，Vol.80, 11, pp.37～38, 1995.
- 14) 園田恵一郎，小林治俊：兵庫県南部地震における土

- 木構造物の衝撃的破壊事例, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.115～120, 1996年6月.
- 15) 西岡俊久, 重村仁, 柳谷昌信, 市川雄策: 兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊に関する基礎調査および数値解析手法の開発, 神戸商船大学震災研究会研究報告第1号, 1996年1月.
 - 16) 園田恵一郎, 小林治俊: 阪神・淡路地震—初期震動の証言について, 構造物の衝撃的破壊に関する学協会合同研究協議会資料, 1995.
 - 17) 足立紀尚: 阪神・淡路大震災に学ぶ地盤工学の課題, 土と基礎, Vol.44 No.2, pp.3～6, 1996.2.
 - 18) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅, 大内雅博: コンクリート橋脚の被害の特徴, 土木学会誌, pp.11～19, Vol.80, 1995.4.
 - 19) 松岡健一, 岸徳光, 三上浩, 佐藤昌志, 大山高輝: RC橋脚模型の横方向衝撃力載荷実験, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.91～96, 1996年5月.
 - 20) 佐藤昌志, 谷本俊充, 岸徳光, 松岡健一: 大型RC橋脚模型の横衝撃載荷実験, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.97～102, 1996年5月.
 - 21) 小野紘一: 道路橋脚の被害とそのシミュレーション, コンクリート工学, pp.53～55, Vol.34 No.11, 1996.11.
 - 22) 別府万寿博, 香月智, 石川信隆: 衝撃突き上げ実験によるコンクリート柱供試体の輪切り状ひび割れ, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.139～144, 1996.5.

(1997.2.20受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON RUPTURE MECHANISM OF CIRCULAR RC COLUMN MEMBERS SUBJECTED TO AXIAL IMPULSIVE LOADS

Tomonori OHNO, Ryuichiro KITA and Kazunori FUJIKAKE

This study is to investigate the rupture mechanism of compressive rupture in circular reinforced concrete bridge piers caused by the Hyogoken-Nanbu-Earthquake of 1995. Impact loading tests were done to examine the possibility of producing compressive rupture in circular reinforced concrete specimens by axial impulsive force. Four types of RC specimens with circular cross section were employed for tests. Axial impulsive load was input to a specimen by means of the horizontal impact loading machine.