

論文 鉄筋端部不連続面を有する RC 棒の衝撃的破壊に関する考察

石原和典^{*1}・余国雄^{*2}・田邊忠顕^{*3}

要旨：兵庫県南部地震によって橋脚が、輪切り状のせん断破壊をしたことを背景として、その橋脚がどの程度衝撃力の影響を受けたかを確認することが必要である。しかし、衝撃的地震動の発生メカニズムは非常に複雑であり、衝撃問題を数値解析で扱う際には入力条件や解析対象のモデル化の設定が重要であり困難である。そこで、防衛大学校は実際の RC 橋脚を意識して作られた RC 供試体が上下方向の衝撃力を受けた場合の実験を行っており、本研究ではその実験を有限要素解析により再現しようと試み、実験で得られたひずみ応答と比較検討した。

キーワード：衝撃的上下動、水平輪切り状ひび割れ、衝撃的破壊、鉄筋段落とし部

1. はじめに

1995年1月に発生した兵庫県南部地震では、土木構造物の破壊事例を多数確認した。その中に RC 橋脚の輪切り上のひび割れなどの上下動の影響を受けたと思われるものがあり、そこに着目した研究が、数多く行われている。衝撃的上下動の発生メカニズムは非常に複雑であることに加え、高周波成分は地震計で観測されない部分があるため、解析的に再現する際には、入力条件が問題となる。よって、衝撃的上下動の発生メカニズムを明らかにするためにも実験的に再現されることが望まれている。その背景の中、防衛大学校では、衝撃突き上げ実験装置を新たに開発した¹⁾。それは、RC 橋脚の水平輪切り状ひび割れ破壊に注目し、コンクリート柱供試体の衝撃突き上げ実験で水平輪切り状ひび割れを現出して、その入力速度を推定しようと試みたものである。この実験的再現により、上下動の衝撃破壊のメカニズムが明らかになりつつあり、本研究ではこの実験結果をもとに、上下方向の衝撃応答を解析的に再現することを試みた。

2. 実験概要

2.1 実験装置

はじめに、防衛大学校で行われた実験についての概略を記す。この実験は、衝撃的上下動による RC 橋脚の水平輪切りひび割れを模型実験的に現出するために、供試体寸法や供試体内補強鋼材量などの点に着目して衝撃突き上げ実験装置を開発し、上下方向の衝撃力によって、水平方向のひび割れを現出したものである。衝撃突き上げ装置は、図-1のような高速変形負荷装置の鉛直下方向への載荷力を図-2に示すように「この原理」的に鉛直方向へ変換するものであり、高速変形負荷装置からの荷重を入力側アクチュエーターのピストンで受け、伝達ホースを介し

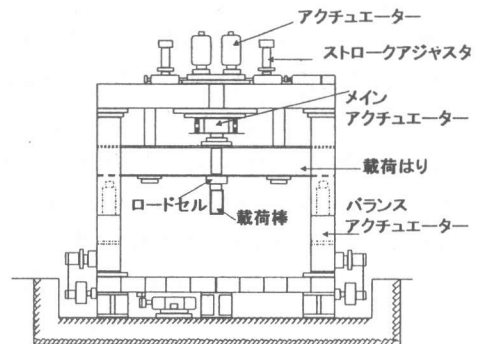


図-1 高速変形負荷装置

^{*1} 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (正会員)

^{*2} 名古屋大学助手 工学部 土木工学科 工博 (正会員)

^{*3} 名古屋大学教授 工学部 土木工学科 工博 (正会員)

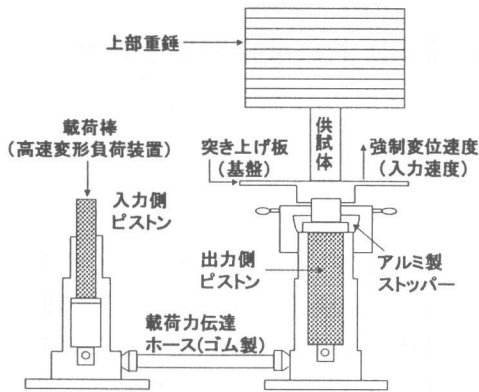


図-2 衝撃突き上げ装置

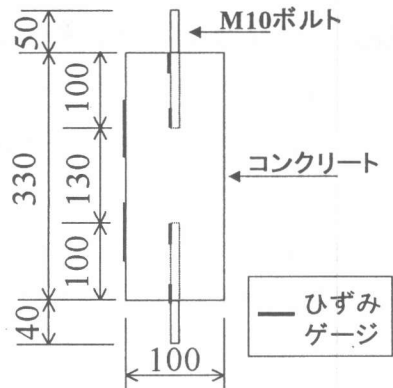


図-3 (a)上下ボルト 単位 (mm)

て出力側アクチュエーターに伝えるシステムになっている。そして、出力側ピストン先端に取り付けてある試験体取り付け板（以下、基盤）を突き上げ、出力側ピストンに内蔵されているアルミ製ストッパーにより停止する。したがって、基盤上の供試体は強制変位を受けた後、急停止することになり、上下方向の衝撃加速度を与えるシステムになっている。

2.2 実験モデル

次に実験で使われた供試体柱部分の概要を示す。この供試体は、実際のRC橋脚を柱高10m、直径3mの円柱型と想定して、その1/30の大きさの円柱コンクリート供試体としている。基盤および上部の重錘と供試体との固定条件の制約から、供試体の補強鋼材としてM10ボルトを用いているが、鉄筋補強されたコンクリートとしての特性は失っていないものと思われる。また、各縮尺モデルに対して次の配筋が、施してある。図-3の(a)供試体の上下部だけにボルトを埋め込んだもので、主鉄筋比約1.0%（以下、上下ボルト）、図-4の(b)供試体内に連続してボルトを通してあるもので、主鉄筋比約1.0%（以下、通しボルト）、図-5の(c)RC橋脚の段落としを意識したもので、通しボルトタイプで供試体軸方向高さ半分までD6の異形棒鋼を挿入し供試体軸方向に剛性変化点を設けたもので、主鉄筋比約2.4%（以下、段落とし）、以上の3タイプのモデルについて検討する。また、高架橋上部工のモデル化については、直径400mm、板厚20mm

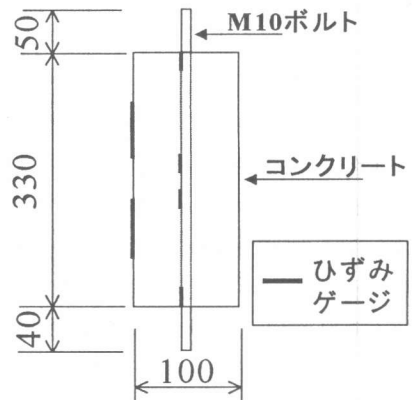


図-4 (b)通しボルト 単位 (mm)

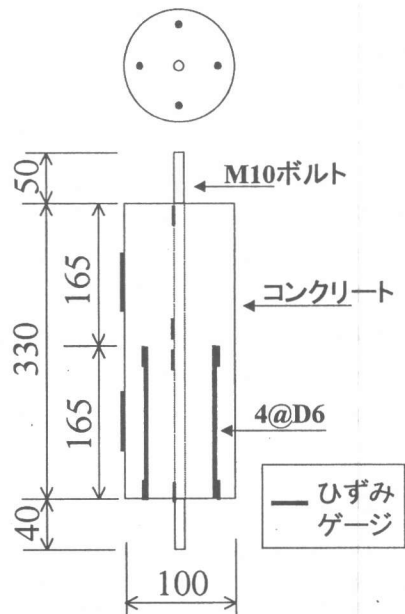


図-5 (c)段落とし 単位 (mm)

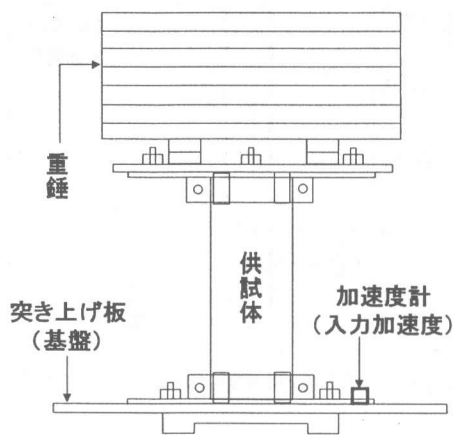


図-6 基盤-供試体-重錘固定図

の重量 200N の鋼製円盤を積載することで表現しており（以下、重錘）、鋼製円盤は合計 25 枚、総重量 5000N としている。したがって、断面積 7850mm^2 に対して初期圧縮応力約 0.64N/mm^2 が作用していることになる。また、この供試体は図-6 のように突き上げ板および重錘と固定されている。この実験では、図-3, 4, 5 中に示されたゲージ位置で、ひずみを測定しており、その実験結果は、解析の結果とともに紹介する。

3. 解析概要

本研究では、以上に示した実験と条件を同じくした数値解析で、どのような結果が得られるかを試みた。解析対象の動的応答を解析するにあたり有限要素法を用い、数値積分を行うにあたっては、Newmark の β 法 ($\beta = 1/4$: 平均加速度法) を用いた。なお時間ステップは、衝撃加速度の入力時間や系の最大振動数を考慮して、 $10^{-7}(\text{sec})$ のオーダーとした。

3.1 解析に用いた材料定数

塑性解析を行うにあたり、コンクリート材料に対しては、軟化領域を有する Drucker-Prager 則を用いている。一方鉄筋については、Von-Mises 則に従う完全弾塑性体として扱っている。解析に用いたコンクリートおよび、鉄筋の材料定数を表-1 に示す。コンクリート材料は、応力が引張り強度に達した後は表-1 に示した軟化勾配に従って軟化するように定めた。また本解析では、

表-1 コンクリートと鉄筋の材料定数

	コンクリート	鉄筋
ヤング係数 (N/mm^2)	2.3×10^4	2.1×10^5
軟化勾配 (N/mm^2)	-2.3×10^3	0
ポアソン比 ν	0.16	0.3
密度 (N/mm^3)	2.5×10^{-8}	7.8×10^{-8}
引張強度 (N/mm^2)	2.5	5.0×10^2
圧縮強度 (N/mm^2)	30.0	5.0×10^2

鉄筋とボルトは、同じ材料定数を与えている。

3.2 解析モデル

実験に用いられた供試体のうち、上下ボルトと通しボルトの解析モデルを図-7 に示す。解析モデルは、実験供試体の形状を考慮して軸対象モデルとした。要素分割は材料ごとに区別し、上下ボルトモデルのためにボルトの不連続部分は要素を細かくとった。そしてこのモデルの底面を拘束し、その節点から、図-6 中の基盤に取り付けられた加速度計で測定された加速度を入力した。また、減衰を考慮するにあたり、減衰定数を $h=0.05$ として、与えている。

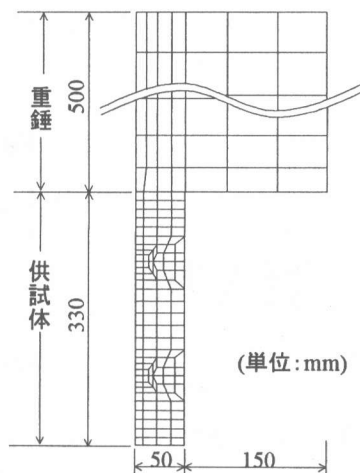


図-7 解析モデル (上下ボルト・通しボルト)

4. 解析結果

4.1 上下ボルトモデルの結果

図-3の上下ボルトモデルに図-6の基盤上の加速度計で得られた図-8のような加速度を入力した結果を以下に示す。

図-8の入力加速度は、加速領域は約8(msec)までであり、その後基盤が急停止したことにより高周波成分が見られる。この加速度を入力した事により、図-9のひずみ測定位置で得られたコンクリートのひずみ履歴は図-10のように、ボルトのひずみ履歴は、図-11のようになった。

コンクリートのひずみ履歴(図-10)を見ると、8(msec)(点線で表示)までの加速領域では、解析値、実験値ともに圧縮領域でのひずみ履歴をたどっているが、引張加速度の高周波成分が入力された後は、引張り側に移行し、ひび割れが生じたために、急激にひずみが増大している。圧縮場でのひずみ履歴と引張り側への移行速度の点で解析値と実験値に違いがあるが、これは解析では粘塑性ひずみを考慮していない点が実際の挙動と異なる点であり、その原因によって違いが生じたと考えられる。

ボルトのひずみ履歴(図-11)を見ると、実験では、供試体の底面付近でコンクリートが破断されているため、上昇するコンクリート部と基盤に固定されているコンクリート部に埋め込まれているボルトの付着がとれ始め、上昇するコンクリート部に引きずられるように下側のボルトの先端部(ひずみゲージ位置SB3)のひずみが

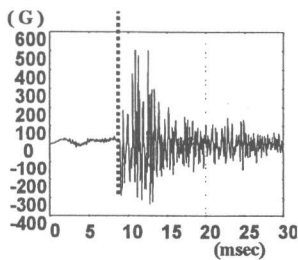


図-8 入力加速度
(上下ボルト)

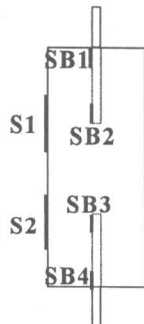


図-9 測定位置
(上下ボルト)

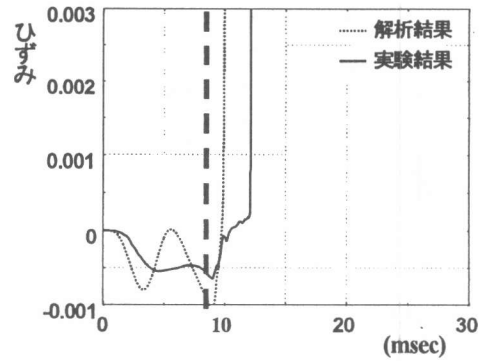


図-10 ひずみ-時間曲線(コンクリート:S1)

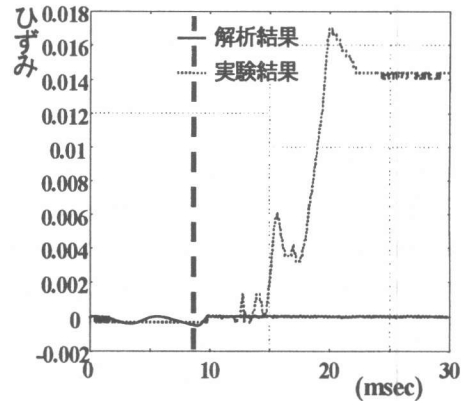


図-11 ひずみ-時間曲線(ボルト:SB3)

上昇する。しかし解析では、下側に取り付けられたボルトの先端周辺である断面急変点付近でコンクリートが破断した。つまり、ボルトと付着していないコンクリート部で破断したため、ひずみゲージ位置SB3でのボルトのひずみは、増大しない結果となった。

4.2 通しボルトモデルの結果

図-12の加速度を通しボルトモデルに入力した結果、図-13のひずみ測定位置でのひずみ履歴は以下ようになった。

実験では、高周波成分の加速度が入力されて間もなく図-13中のコンクリートのひずみゲージS1の位置で破断しているため、図-14のようにその部分のひずみが急激に増大している。そのために、図-15のようにひび割れ発生後は有効断面面積の減少に伴いボルトに力の負担が移行し、ボルトのひずみは、ひび割れ発生位置の上部で最も大きな値をとり、ひび割れ発生位置から離れる

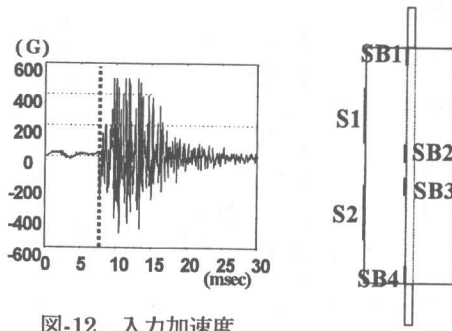


図-12 入力加速度
(通しボルト)

図-13 測定位置
(通しボルト)

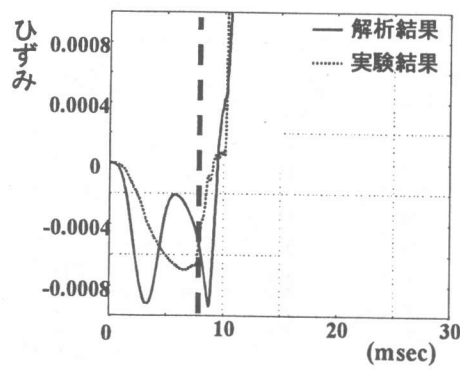


図-14 ひずみ-時間曲線 (コンクリート:S1)

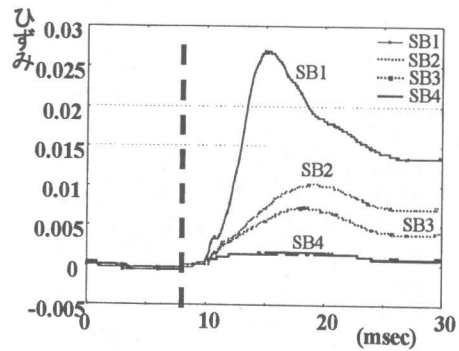


図-15 実験結果：ひずみ-時間曲線 (ボルト)

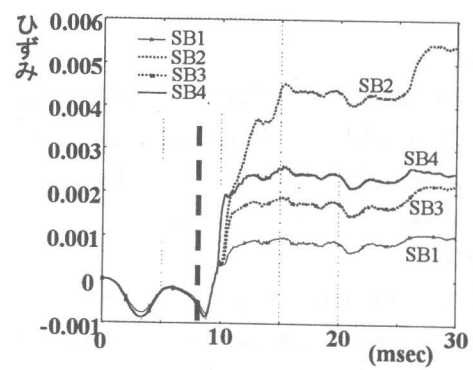


図-16 解析結果：ひずみ-時間曲線 (鉄筋)

に従い小さくなる傾向がある。一方解析では、加速度の高周波成分が入力されたことにより実験と同じコンクリートのひずみゲージ S1 の位置で破壊し、その部分のコンクリートのひずみが急激に増加している (図-14)。それによって、有効断面積の減少により、ボルトのひずみが増大するのだが、最も大きな値をとったのは、SB2 の位置でのボルトのひずみであり、これはひずみゲージ S1 の位置でコンクリートが破断したため、上昇しようとする重錘により破断面に近い SB2 のひずみの値が大きくなったと考えられる。しかし、それでも解析での SB2 のひずみの値は、実験の SB2 の値よりも小さく、本解析ではボルトのひずみが小さく現れる傾向がある。

4.3 段落としモデルの結果

段落としモデルは、以上の 2 つと違い偏心した配筋がされているので、そのまま軸対象モデルでは表せない。そこで、鉄筋を同じ断面積を持つ鋼管に置き換えて解析モデルを作製した。

図-17 の加速度を段落としモデルに入力した結果、図-18 のひずみ測定位置でのひずみ履歴は以下ようになった。実験では、鉄筋の端部である断面急変点で破断しており、解析でも同じように再現できた。図-19、図-20 のようにコンクリートのひずみ履歴も加速領域(8msec)までの圧縮場での履歴に違いはあるが、高周波成分が入力された後はオーダー的に良い結果を得られている。

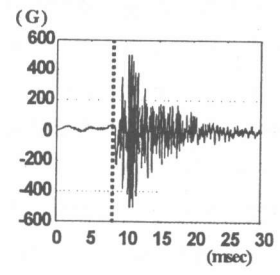


図-17 入力加速度
(段落とし)

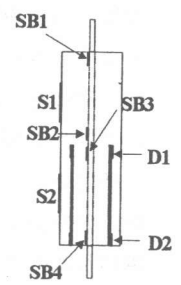


図-18 測定位置
(段落とし)

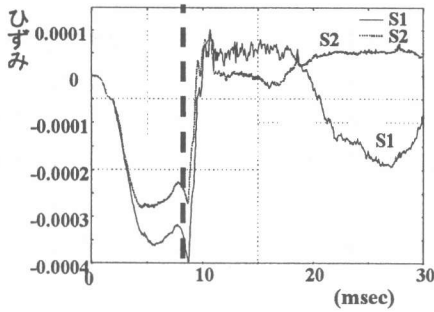


図-19 実験：ひずみ-時間曲線 (S1)

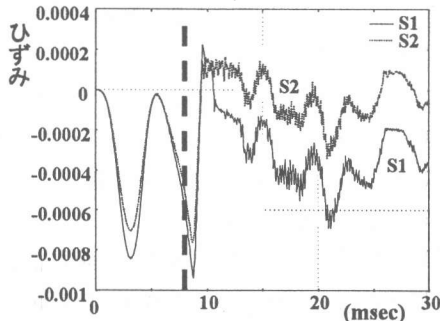


図-20 解析：ひずみ-時間曲線 (S1)

図-21, 図-22 のようにボルトのひずみ履歴は、このモデルの場合も解析の方が実験値よりも全体的に小さいひずみ応答を示しているが、ひび割れ面付近のボルト SB2 のひずみが他のひずみより最大となり、他のボルトのひずみの大小関係も実験値と解析値は一致している。

図-23 は鉄筋のひずみ履歴で、コンクリートが破断した後、反射波の影響を受け圧縮場に移行する現象を表している。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に述べる。

- ① 上下方向の衝撃を受けた RC 棒の挙動を防衛大学校の実験値と比較して数値計算で再現しようと試みた結果、ボルトのひずみに問題は残ったが、コンクリートの応答ひずみおよび、引張り強度に達した後の力学的塑性挙動などは、ある程度再現できた。
- ② 軸対象解析で、鉄筋の段落としにより水平輪切り状のクラックを発生させることが再現でき、実構造物へ応用する目途がついた。

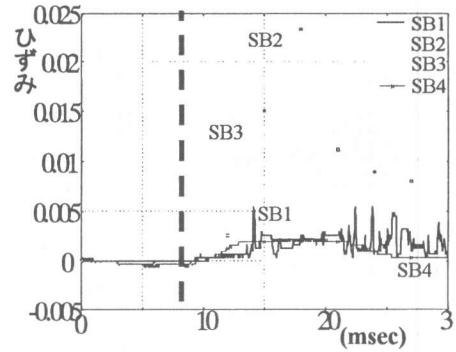


図-21 実験：ひずみ-時間曲線 (ボルト)

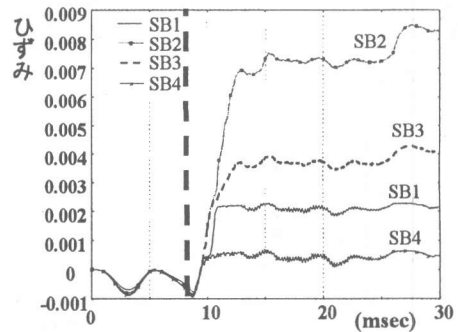


図-22 解析：ひずみ-時間曲線 (ボルト)

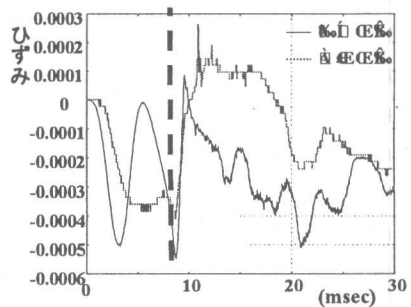


図-23 ひずみ-時間曲線 (鉄筋：D1)

参考文献

- 1) 別府万寿博ほか：衝撃突き上げ装置による RC 橋脚模型の輪切り状ひび割れに関する実験的研究，土木学会論文集 I，No. 577，I-41，pp. 165-180，1997. 10

謝辞

防衛大学校の別府万寿博様，石川信隆様には，研究・論文作成を進めるに当たりご指導を賜りました。ここに，深く感謝の意を表します。