

(49) 水中線爆装置による衝撃破壊実験に関するシミュレーション解析

SIMULATION ANALYSIS FOR IMPACT MODEL TESTS BY WIRE EXPLOSION METHOD

園田恵一郎*, 高田直俊*, 小林治俊**, 奥田洋一***, 林 道廣***

Keiichiro SONODA, Naotoshi TAKADA, Harutoshi KOBAYASHI, Yoichi OKUDA, and Michihiro HAYASHI

* 工博 大阪市立大学教授, ** 工博 大阪市立大学助教授, *** 大阪市立大学大学院前期博士課程
工学部土木工学科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

キーワード：高架橋RC橋脚，モデル実験，衝撃破壊解析，有限要素解析
(Viaduct RC pier, Model test, Impact failure analysis, FEM)

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、数多くの鉄筋コンクリート構造物および鋼構造物が多大な被害を受けた。震災後3年を経過したが、これらの破壊現象のメカニズムについては十分に検証されたとは言いがたく、著者らは被害を受けたRC橋脚等の損傷が衝撃的(地震)上下動によって発生した可能性があると考えている[1]。そこで、本研究の目的は、先に行った水中線爆装置による高架橋RC橋脚モデルの破壊実験結果[2,3]を数値解析により再現することにある。すなわち、実験橋脚モデルで得られた破壊モードと有限要素解析結果とを対応させることにより、解析手法の適用性を確認する。ついで、実験モデルを実物大の高架橋RC橋脚モデルに拡張して同様の数値解析を行い、実橋脚の衝撃的破壊モードと鉛直入力動の特性を把握する。

2. 実験モデルへの非線形有限要素法の適用

衝撃実験から得られた破壊形態を数値解析によって再現するため、写真1の実験供試体の軸方向の応力あるいはひずみ応答に着目し、図1に示す様に8節点軸対称有限要素により各構成部材を忠実に再現した解析モデルを構築した。そして、衝撃実験で充電電圧7.5kv、静電容量5μFの時の上載質量が0, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0kgの5種類、そしてキャップなしの実験供試体モデルの計6体について解析した。時間積分についてはNewmark-β法(β=1/4)を用い、解析モデルに与える外力は、図2に示す同実験で計測された代表的な衝撃圧力波をモデル底面全面に一様に与

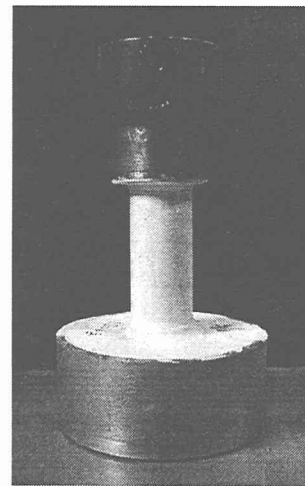


写真1 実験供試体 (上載質量 1kg)

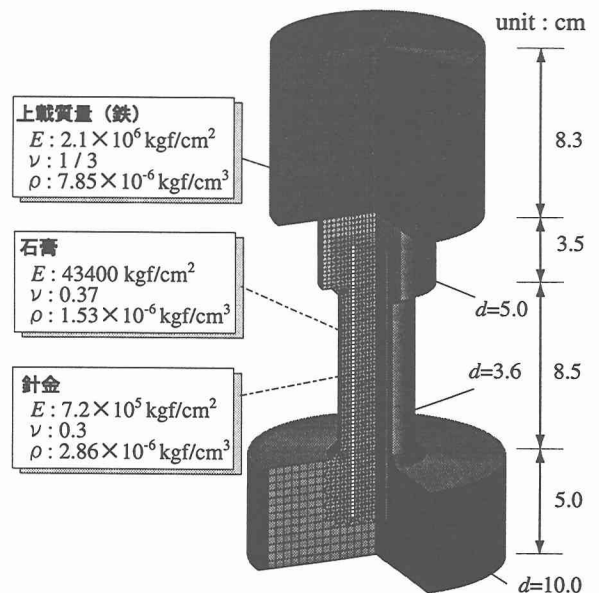


図1 実験供試体モデルの要素分割および材料定数

えた。また、材料非線形性を考慮し、図3の様な単軸上での応力-ひずみ関係に対応する構成式を用いた。すなわち、脆性的な破壊挙動を示す石膏に対してはコンクリート系材料によく用いられる放物線形Mohr-Coulombの降伏条件式を、また補強筋としての針金には本解析が軸対称解析モデルを使用していることから円周方向の降伏応力を軸方向の降伏応力の1/10に減ずることの可能なHillの降伏条件式を適用した。減衰については、減衰定数に換算して8%の構造減衰を用いた。さらに、降伏強度に対するひずみ速度効果を考慮し、図4に示す塑性ひずみ速度-降伏強度増加率を用いた。

2.1 解析結果

衝撃実験結果と有限要素解析結果との比較を柱中央部の軸ひずみについて図5から図10に示す。まず、破壊モードの比較であるが、水中線爆実験と有限要素解析では破壊モードとしては類似した破壊形態が得られた。ここで特記しうる点は、実験結果では引張破壊と判断できる破壊モードについても解析によると、内部が圧壊に至ったものがあり、この時の上載質量は1kgと2.5kgの2ケースであった。これは、柱部表面が圧壊に至らなかった構造物も内部では圧壊している可能性があったことを示唆するものである。

最大圧縮ひずみについては、上載質量が増加するにつれて実験値と解析値の差が増大した。特に上載質量が10kgの軸ひずみの比較においては2倍程度の差異が認められた。これは実験での軸ひずみが静的破壊時と比べて5倍以上の値を示しており、解析に用いた塑性ひずみ速度効果式の降伏強度増加率の最大値約1.5との間に開きがあったためと考えられる。軸ひずみ応答曲線における応答周期については、上載質量が増加するに従って実験では周期が延び解析でも延びる傾向があるものの実験結果程の周期の延びは認められなかった。これは、構造物の減衰特性によるものと考えられる。

3. 高架橋 RC 橋脚の破壊についての検討

対象とした高架橋 RC 橋脚の被災時の破壊状況は写真2に見られるような柱軸に垂直に入ったひび割れが全周にほぼ水平に入っており、このようなひび割れについては水平加速度に基づく交番曲げで入ったという考えもあるが、水平の輪切りひび割れは橋脚の上部や、中間、下部と被災の地域によって異なっているが、軸引張力によるものと考えるのが妥当と思われる。

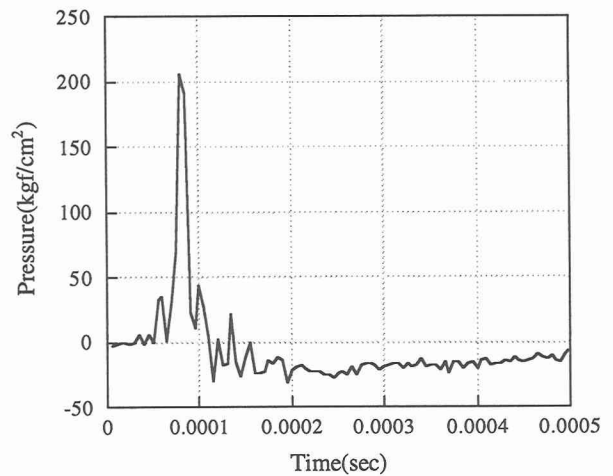
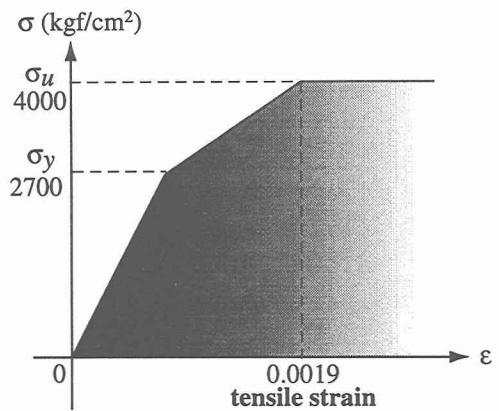
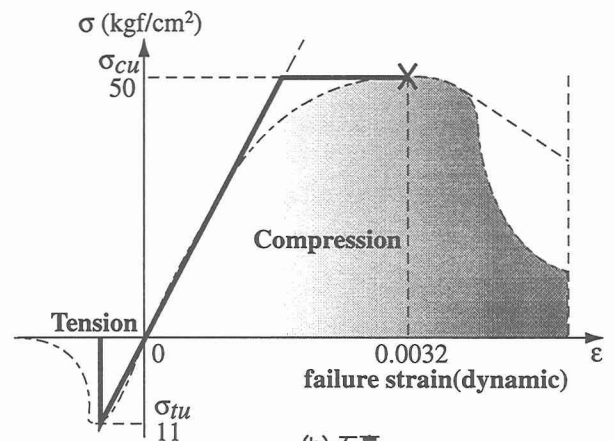


図2 入力衝撃圧力



(a) 針金



(b) 石膏

図3 針金・石膏の単軸応力-ひずみ関係

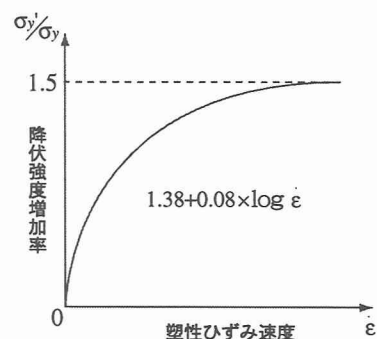


図4 ひずみ速度効果曲線

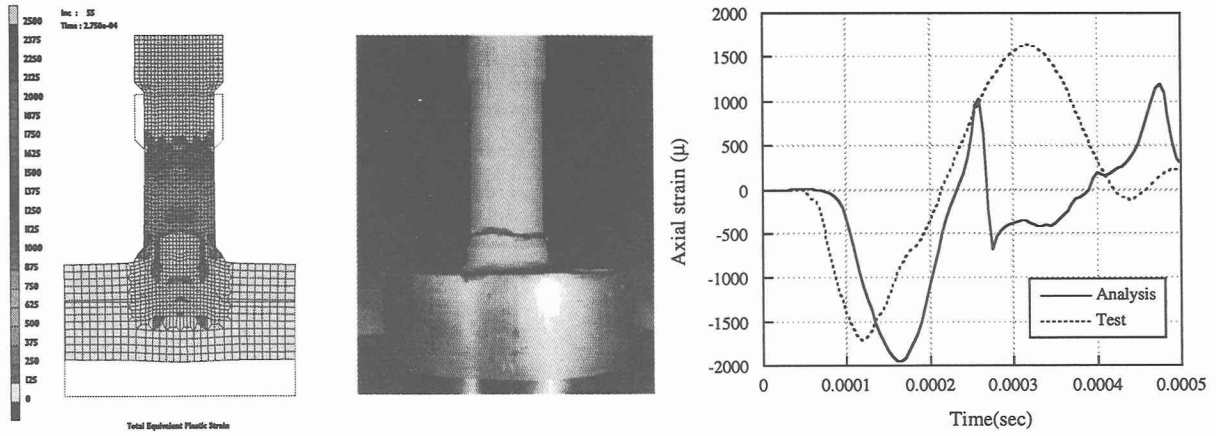


図5 キャップなしモデルの破壊モードと柱中央部の軸ひずみ応答曲線

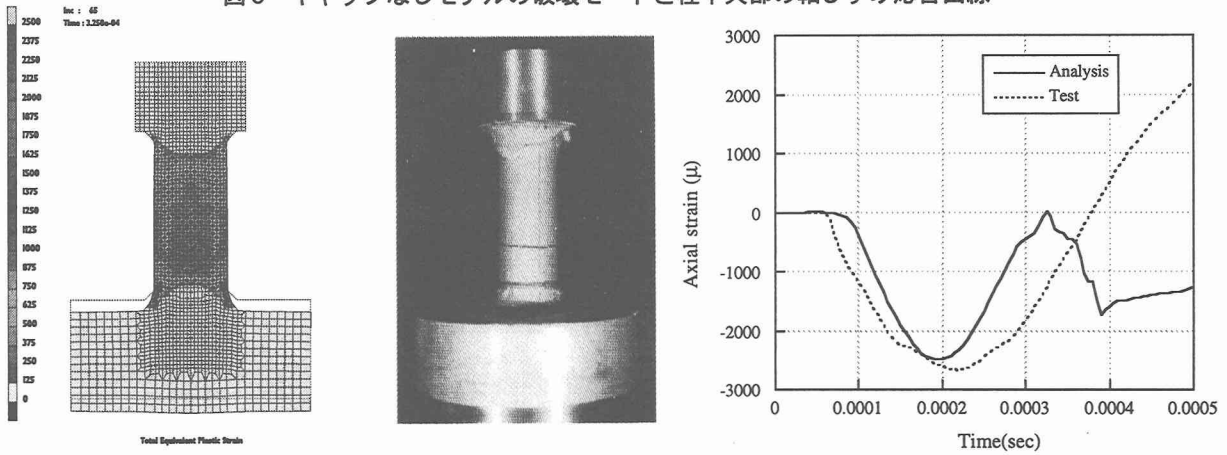


図6 上載質量0kgでのモデルの破壊モードと柱中央部の軸ひずみ応答曲線

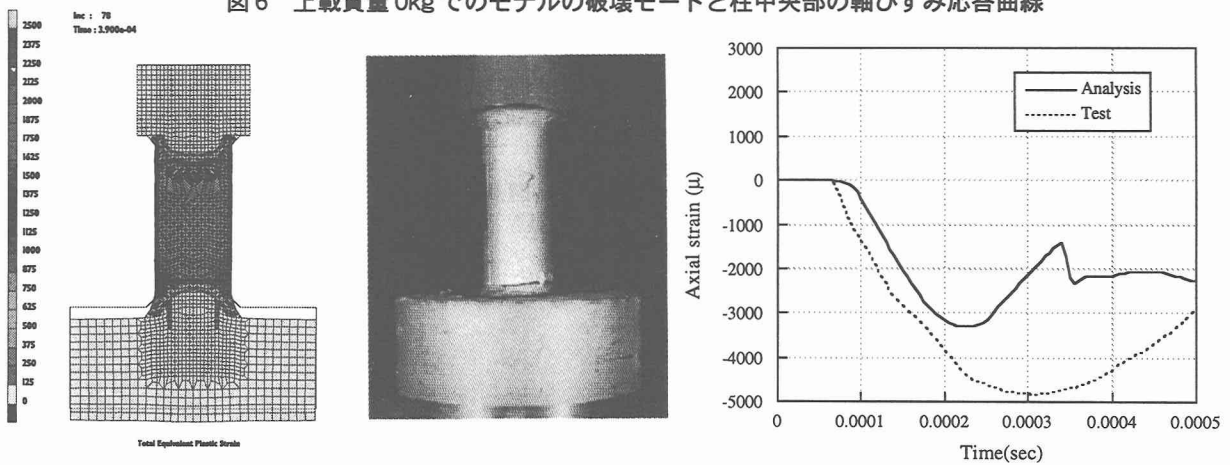


図7 上載質量1.0kgでのモデルの破壊モードと柱中央部の軸ひずみ応答曲線

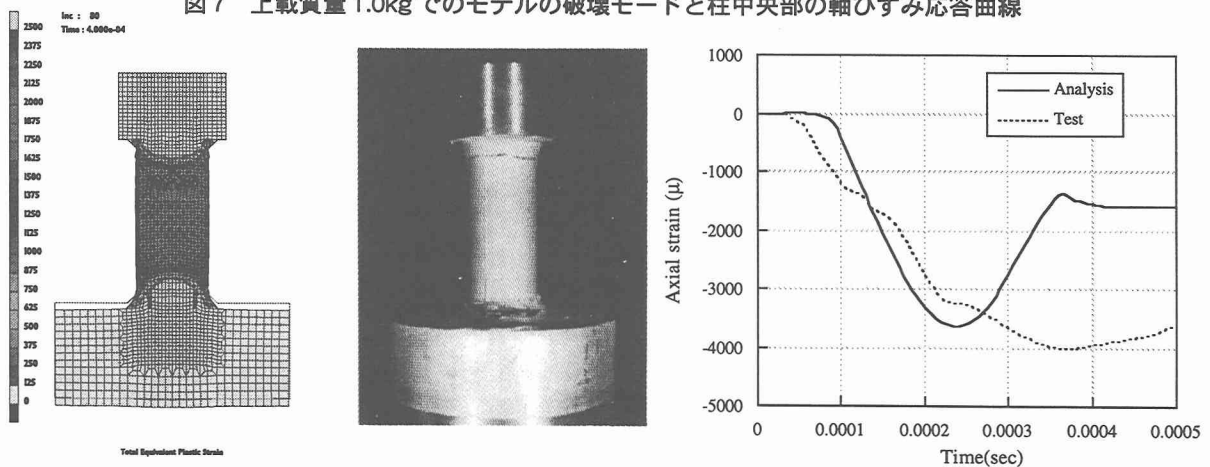


図8 上載質量2.5kgでのモデルの破壊モードと柱中央部の軸ひずみ応答曲線

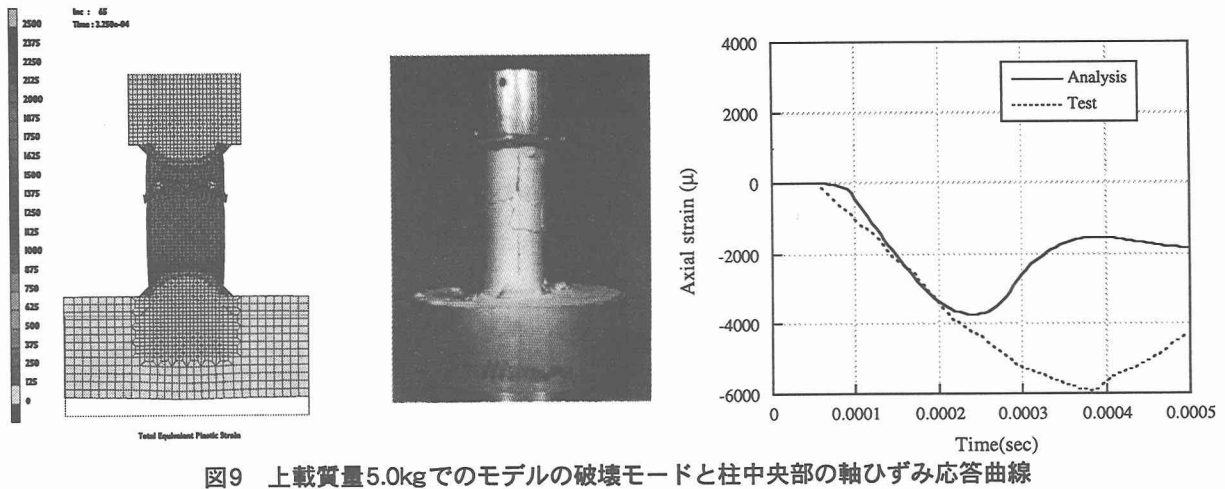


図9 上載質量5.0kgでのモデルの破壊モードと柱中央部の軸ひずみ応答曲線

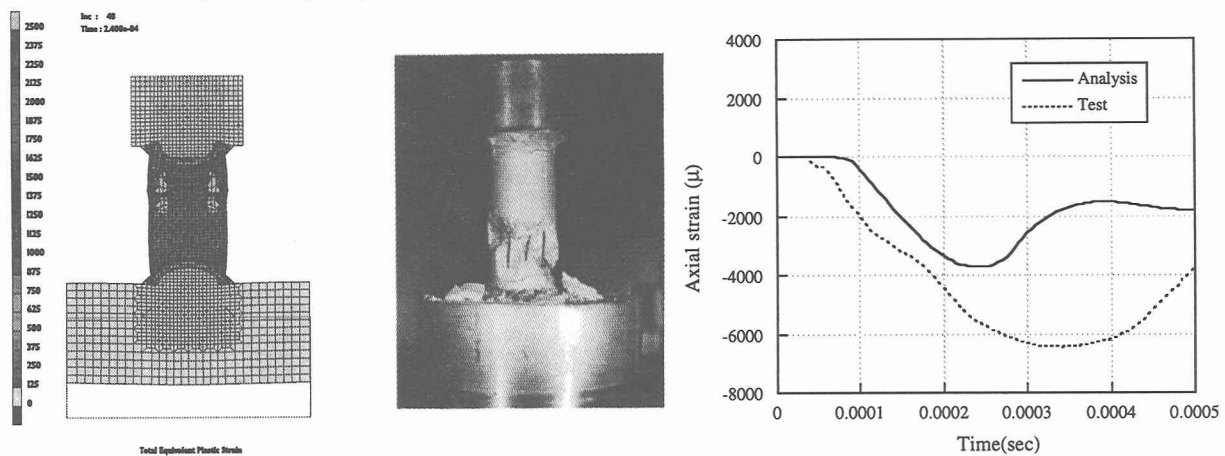


図10 上載質量10.0kgでのモデルの破壊モードと柱中央部の軸ひずみ応答曲線

そこで、本章ではこの高架橋RC橋脚の軸方向破壊(言い換えれば、軸方向応力応答特性および衝撃力载荷実験より得られた破壊モード)に着眼し、鉛直入力波による高架橋RC橋脚の動的材非線形解析を行い、入力波の継続時間特性、入力圧とRC橋脚の軸方向応力、破壊特性の関係について調べる。

3.1 解析対象と解析モデル

前節における衝撃実験の非線形有限要素解析による検討から、実際の高架橋RC橋脚について新たに解析モデルを構築し、衝撃的な力が橋脚の破壊に及ぼす影響を調べる。解析対象は図11に示す様なRC橋脚とし、主桁がスパン長に応じた上載質量として橋脚一基当たりに対応するように配慮した軸対称の解析モデルを図12のように構築した。解析に用いた材料特性は図13に示すように通常用いられる鋼・コンクリートの単純化した単軸相当応力-ひずみ関係を使用した。また、降伏条件は前節と同様に鋼に対してはHillの異方性降伏条件をコンクリートに対しては放物線形Mohr-Coulombの降伏条件式を使用し、さらに図4に示すひずみ速度効果を考慮した。解析は前節と同様にNewmark-β法($\beta=1/4$)と8%の構造減

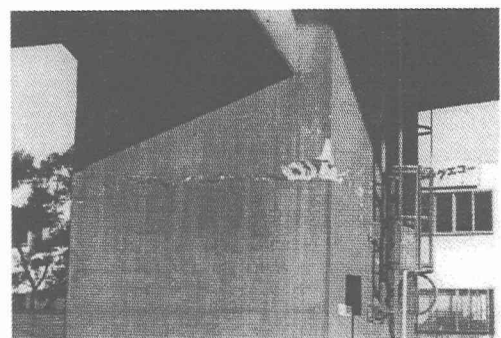


写真2 高架橋RC橋脚の引張破壊現象

衰を用いた。なお、実RC構造物の破壊現象を忠実に再現するため構造物の自重応力を考慮した。外力の入力は図2の衝撃力をモデル化した図14に示す三角パルス鉛直応力波をモデル底面に一様に与え、継続時間Tを因子とするパラメトリック解析を行い、得られた橋脚軸方向応力 σ_z の応力特性より衝撃的破壊を与えるとされる短周期の外力が構造物に及ぼす影響を調べた。そのため、継続時間を0.0025, 0.005, 0.01, 0.025, 0.04, 0.05, 0.1(sec)の7通りに設定し入力応力Pの大きさを上記継続時間に対して $p=200, 60, 20, 10(\text{kgf/cm}^2)$ の4通りに設定して、合計28通りの解析を行った。

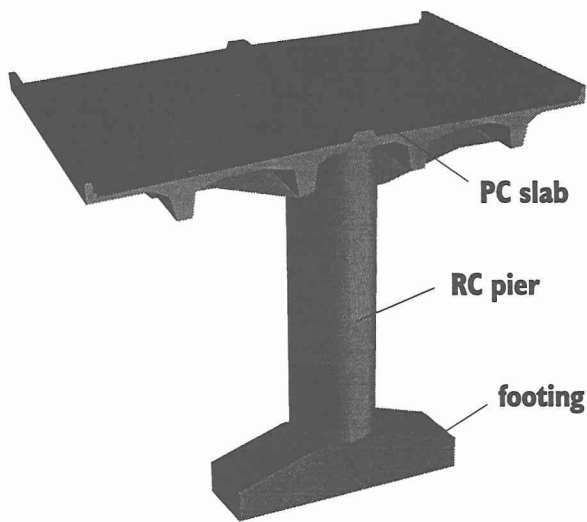


図11 解析対象とした高架橋RC橋脚例

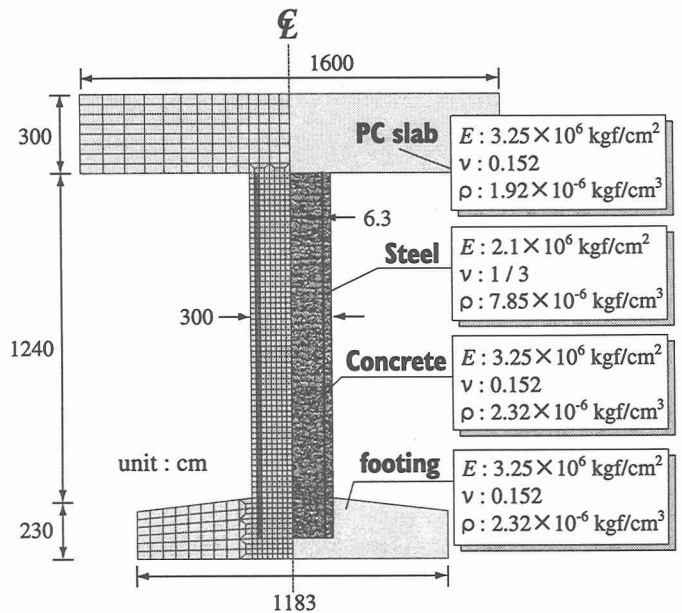


図12 高架橋RC橋脚の要素分割

3.2 解析結果

入力応力と周期特性が及ぼす破壊モードをまとめたものを図15に示す。まず破壊モードの比較であるが、入力応力が 10 kgf/cm^2 の時の破壊モードは入力継続時間が 0.025 sec のものが引張破壊を示したが、それ以外の継続時間に対しては破壊しなかった。入力応力が 20 kgf/cm^2 に増加すると、破壊モードは本解析モデルの固有振動周期 T_0 (約 0.05 sec) 付近で引張破壊を示し、その固有振動周期から離れるに従って破壊を起こさなかった。また、入力応力が 60 kgf/cm^2 の場合は、圧縮破壊が現れ、さらに 200 kgf/cm^2 になると入力継続時間の短いところでも圧縮破壊が現れる。破壊モードの特徴としては、図17に示すように最初の圧縮波で圧壊に至る応力をもたらしたことが挙げられる。この時の最大圧縮応力はコンクリートの静的降伏応力に比べて1.5倍ほどの値となっているが、これはひずみ速度効果の影響によるものと推察される。

4. まとめ

衝撃実験の結果を基に有限要素解析モデルを構築して破壊モードの再現を試みた結果、実験結果と同様の破壊モードを再現でき、本手法の衝撃的破壊現象への適用性が確認できた。さらに実物大の高架橋RC橋脚を対象に軸対称モデルを構築し、入力応力を変化させながら継続時間を因子として軸方向の衝撃力が高架橋RC橋脚の破壊に及ぼす影響を調べた。その結果、圧縮及び引張破壊をもたらす軸方向入力圧と固有振動周期との相関性が破壊にもたらす影響

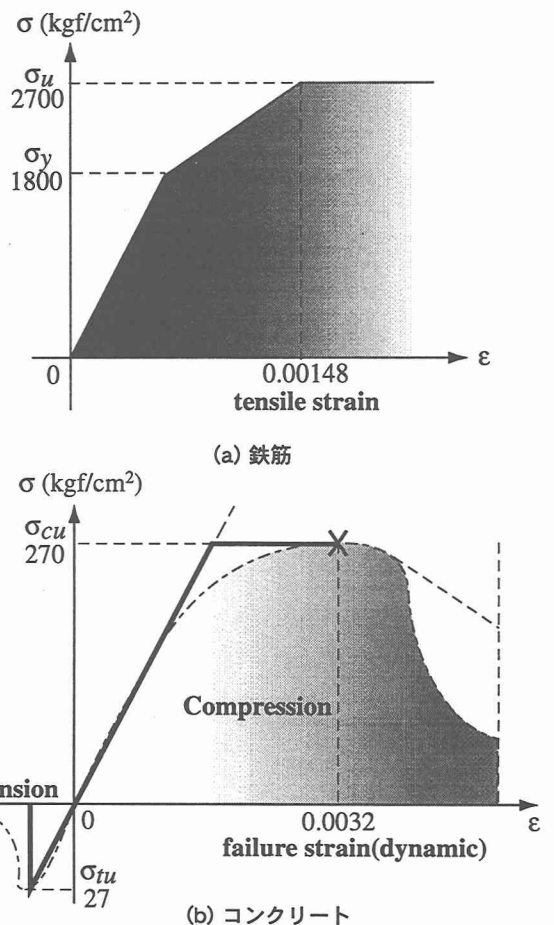


図13 鋼・コンクリートの単軸応力-ひずみ関係

を再現することができた。以上、実験において衝撃的破壊現象が再現され、その破壊現象を解析手法により追跡することができたことから、高架橋RC橋脚の衝撃的破壊をもたらす入力特性(圧力と継続時間)を持つ鉛直入力動が兵庫県南部地震において存在した可能性が指摘できる。

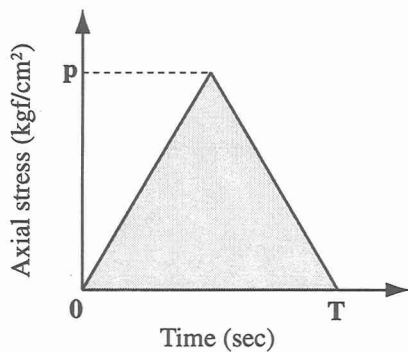


図14 三角パルス入力波

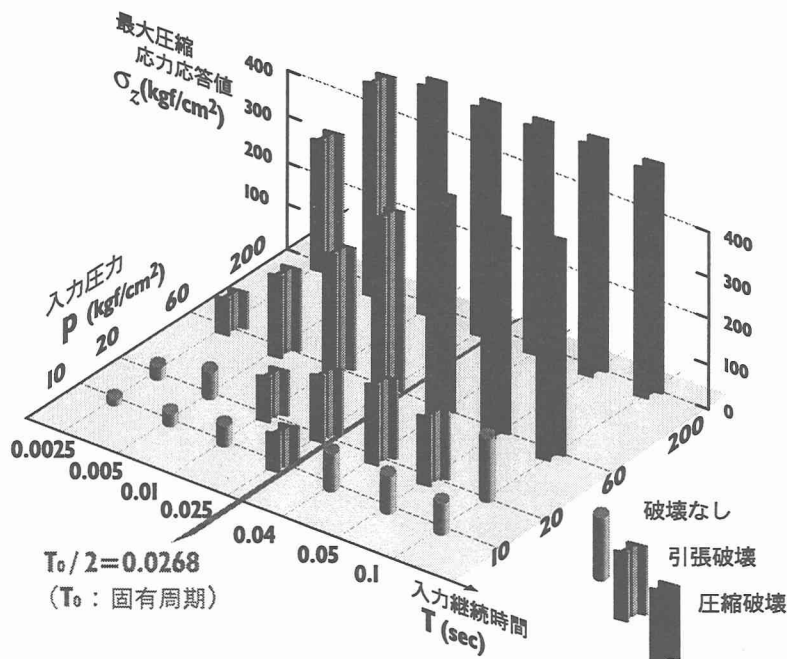


図15 入力鉛直応力波と周期特性による最大圧縮応力および破壊モードの対応図

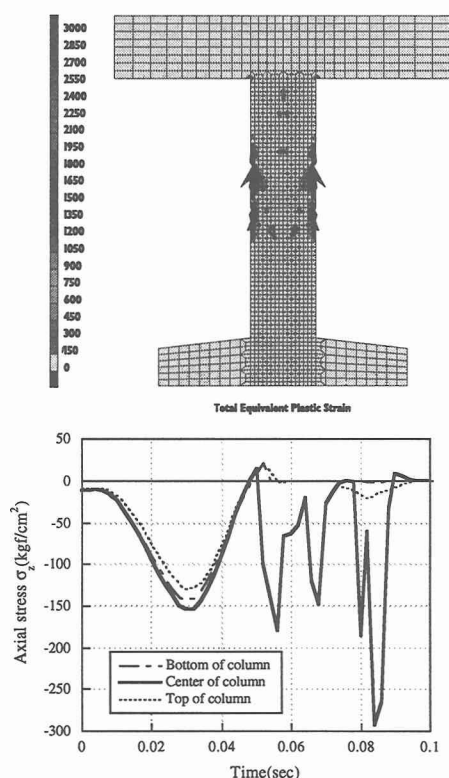


図16 引張破壊時の等価塑性ひずみコンタ図および軸方向応力応答曲線($p=20\text{kgf/cm}^2$, $T=0.05\text{sec}$)

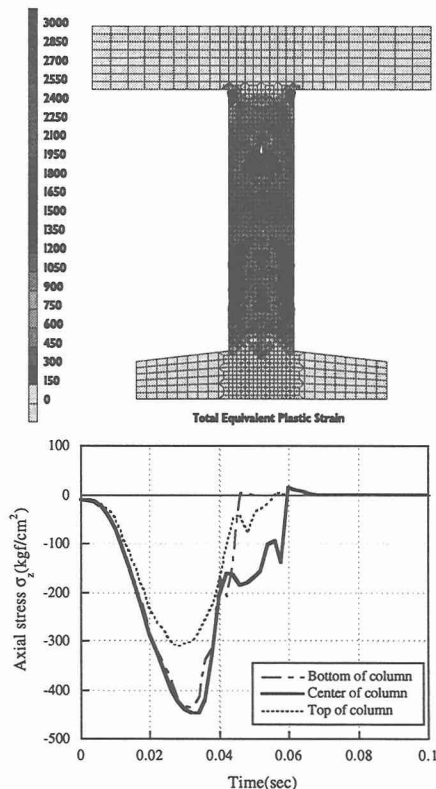


図17 圧縮破壊時の等価塑性ひずみコンタ図および軸方向応力応答曲線($p=60\text{kgf/cm}^2$, $T=0.05\text{sec}$)

謝辞

本論文作成にあたり、大学院前期博士課程 中島大使氏には多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝を申し上げます。

参考文献

[1] 園田恵一郎・小林治俊, 他: 地震による土木構造物の衝撃的破壊について, 兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊に関するシンポジウム, 日本建築学会, pp. 37-44, 1997年3月。

[2] 園田恵一郎・高田直俊, 他: 衝撃電圧発生装置を用いた高架橋橋脚モデルの破壊実験, 土木学会衝撃問題研究小委員会資料, 1997年11月4日。

[3] 園田恵一郎・高田直俊, 他: 水中線爆装置による高架橋RC橋脚モデルの衝撃的破壊実験, 第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, 1998年6月。