

兵庫県南部地震による単柱高架橋の崩壊シミュレーション

Collapse Simulation of Elevated Expressway Bridges with Single Piers
due to the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake

目 黒 公 郎*・佐 藤 唯 行**・片 山 恒 雄***

Kimiro MEGURO, Tadayuki SATOH and Tsuneo KATAYAMA

1. は じ め に

兵庫県南部地震は、地震工学の先進国と言えども構造物の崩壊被害によって多くの犠牲者を出してしまうことを再認識させた。地震による人的被害の軽減には、地震時の構造物の動的破壊メカニズムの解明が不可欠である。そこで本研究では、拡張個別要素法 (Modified or Extended Distinct Element Method, MDEM or EDEM)¹⁾を用いて、兵庫県南部地震で甚大な被害を受けた単柱高架橋の崩壊解析を試みた。EDEMはDEM²⁾を基に、連続体から非連続体に至る挙動を統一的に解析できるように改良した手法である。

さらに本研究では、接触判定の簡便さから一般に用いられる円形や球形の要素ではなく、任意の矩形要素を扱えるEDEMプログラム³⁾を用いた。これにより大規模な構造物の解析が低自由度のモデルで可能となり、計算時間の短縮化が計られる。また任意矩形の要素を使用することにより、複雑な形状の構造物を忠実に表現できる。図1に矩形要素を用いたEDEMにおける要素間の力学モデルを示す。

2. 解 析 モ デ ル

兵庫県南部地震は早朝 (5:46) に発生したため、死傷者のほとんどは住宅の倒壊による。しかし、高速道路や新幹線をはじめとする鉄道施設、オフィスビルなどが数多く倒壊したことを考えると、発生時刻が少し遅ければ、これらの構造物の被害で多くの犠牲者が出たことは間違いない。

そこで本研究では、写真1と写真3に示す高架橋の崩壊被害を対象として、その破壊メカニズムの解析を試みた。写真1の高架橋で落橋した箇所は、4径間単純箱桁橋の中央の2径間部分の橋桁である (図3)。また橋脚P1から

P5に至るまで、橋脚基部に損傷が見られた (写真2)。被災した箇所の東 (大阪) 側は5径間連続、西 (明石) 側は3径間連続の鋼箱桁橋に接続している。一方写真3の高架橋は、橋桁と橋脚が一体となったピルツ式ゲルバーPC桁橋である。17本の単柱橋脚が崩壊することで、630mにわたって横転する被害を受けた。これら2つの高架橋を、それぞれ図2、図3 (モデルA) と図5 (モデルB) に示すようにモデル化し解析を行った。モデルの作成に当たっては、被害橋梁の崩壊モードや計算時間の短縮等に配慮し、詳細な構造部に対しては解析の目的を満たす範囲で単純化をはかった。

地震外力は、対象地域で強震記録が得られていないことから、神戸海洋気象台で記録された加速度波形 (NSとEWの2成分) を数値積分して得られた変位波形 (図4) を各橋脚の基礎に与えることで表した。この時、それぞれの高架橋の位置と神戸海洋気象台の位置関係から、モデルAにはEW成分をBにはNS成分の変位波形を用いた。さらにモデルAでは橋脚ごとの入力波形の位相を変化させ、地震外力の位相差の影響を調べた。なお解析に先立って行った衝撃応答シミュレーションから、両解析モデルが弾性範囲内で道路橋示方書⁴⁾から求まるこの種の構造物と一致する固有周期を持つことを確認している。

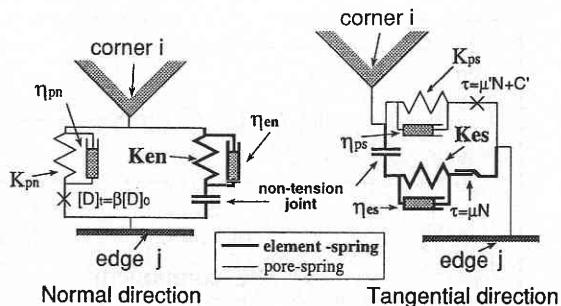


図1 EDEMにおける力学モデル

*東京大学生産技術研究所 国際災害軽減工学研究センター

**清水建設株式会社

***科学技術庁 防災科学技術研究所

研 究 速 報

3. 解 析 結 果

まずモデル A を用いた解析結果を示す。地震外力の位相差の影響を調べるために、次のような 3 ケースの解析を行った。すなわち、現地盤の N 値から推定した 2 種類のせ



写真 1 橋桁 S3 および S4 の落橋

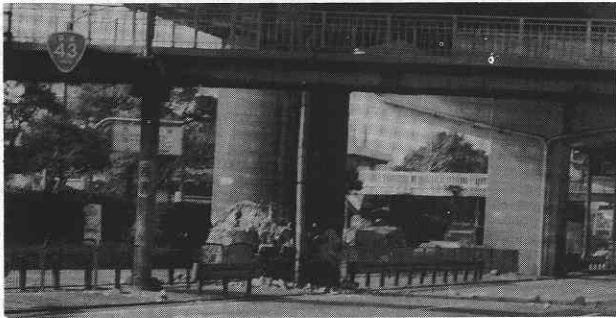
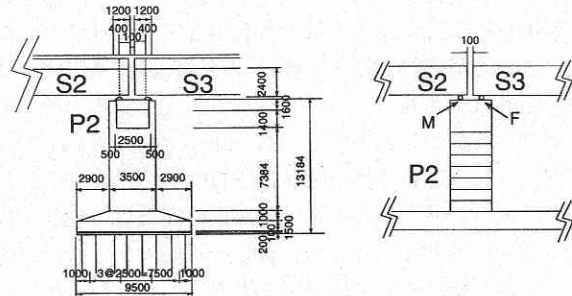


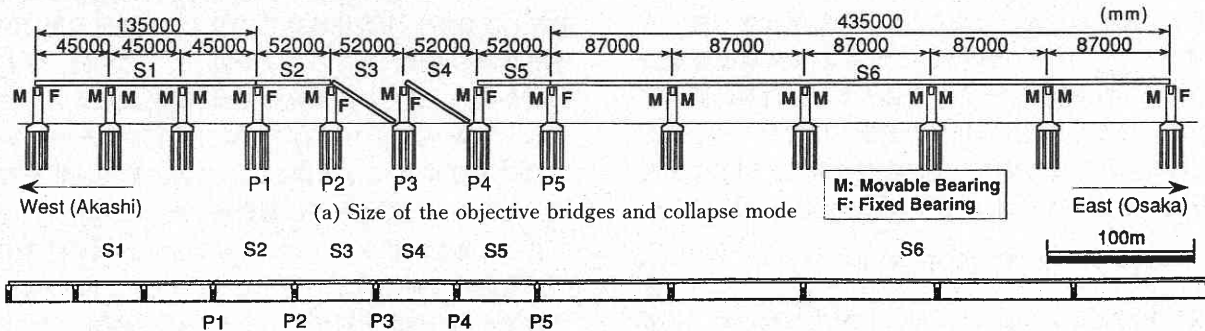
写真 2 橋脚 P1 の下端部の被害

ん断波速度 (124m/s と 296m/s) を用いて、地震動が西から東に伝播したことを仮定した 2 ケースと同位相のケースである。これら位相の違う 3 ケースの動的応答解析の結果、同位相入力では起こらなかった桁どうしの激しい衝突が、位相差入力の 2 ケースで観察された。図 6 に $V_s = 124\text{m/s}$ のケースの桁の応答変位を示す。橋桁間の 10cm のクリアランスを考慮して表記すると、隣接する桁どうしが衝突している様子がわかる。図 7 と図 8 からは、橋桁の衝突は桁を支える橋脚や支承にも大きな影響を及ぼしていることが読み取れる。すなわち、桁の衝突によって基礎の下端部や固定支承に作用した衝撃力が、橋脚部の損傷 (写真 2) や支承の被害の主な原因と推定される。ここで扱った位相差入力は極端な例ではあるが、今回対象としたような線状に広がる構造物では入力地震動の位相差が被害に影



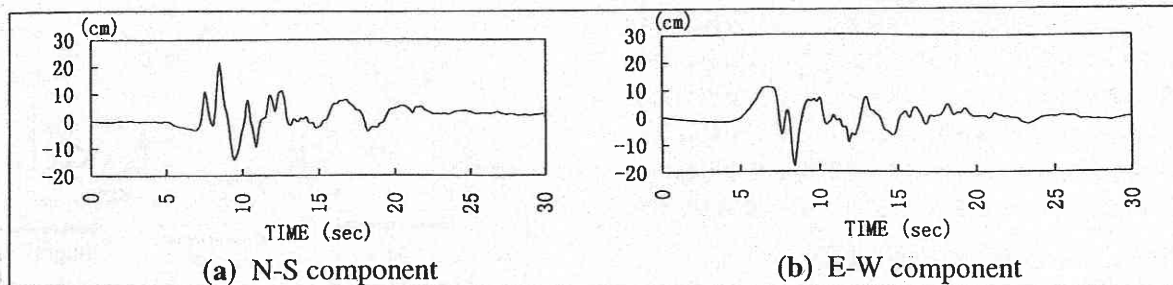
(a) Size of the bridge (b) Simulation model (Model A)

図 2 橋脚部分における概寸とその解析モデル



(b) Overview of the simulation bridge model (Model A)

図 3 解析対象高架橋の崩壊モードと解析モデルの全景 (モデル A)



(a) N-S component

(b) E-W component

図 4 入力変位波形 (神戸海洋気象台で観測された加速度波形からの積分変位)

響を及ぼすことがわかる。ここまでの解析は、固定支承部を含めて要素間に破壊が生じない条件下での解析である。

次に $V_s=124\text{m/s}$ を用いて行った破壊過程シミュレーションを図9に示す。桁どうしの衝突によって支承が破壊し、単純支持部分の桁 S2 と S3 の端部が、橋脚 P2 と P3 の天端から脱落下落橋していく過程がシミュレーションされた。落橋箇所が実際の被害では S3 と S4 であったのに

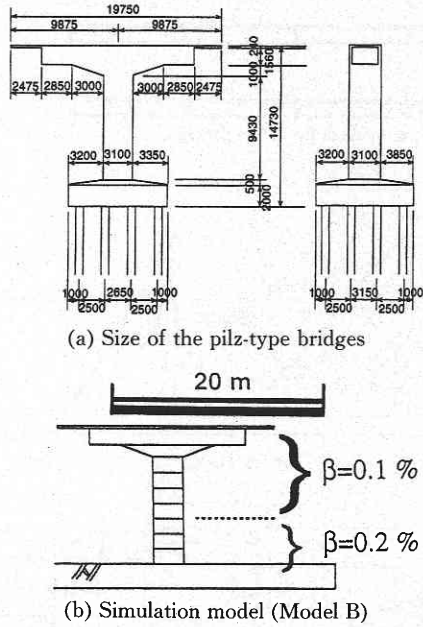


図5 解析対象構造物の概寸と解析モデル (モデル B, 図中の β は間隙パネの限界歪み, 鉄筋の段落とし部分で変化)

対して、シミュレーションでは、S2 と S3 である点に差がある。しかし崩壊モードは実際の被害と一致し、そのメカニズムも被害調査から推定されるメカニズムと同様であ

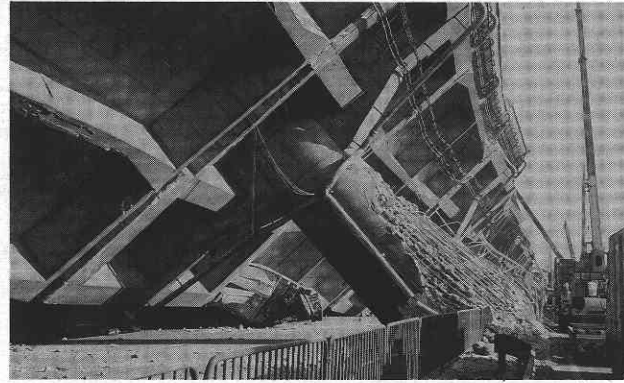


写真3 ビルツ式道路高架橋の崩壊被害

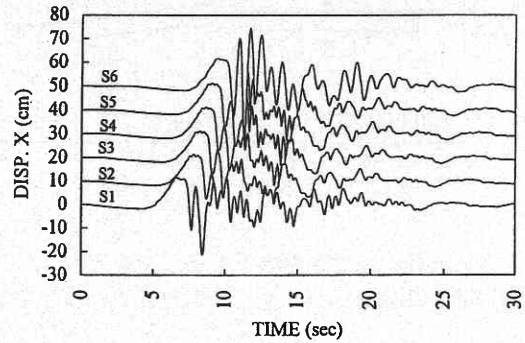


図6 橋桁の水平応答変位 (桁間のクリアランスを考慮して表記)

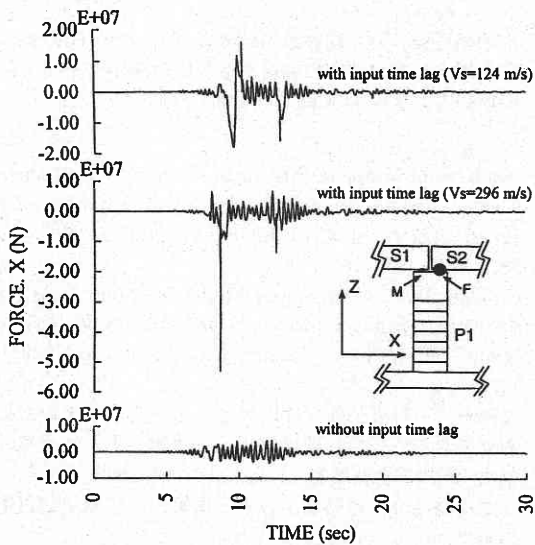


図7 支承 (P1, S2 間) に生じる力の時刻歴 (入力地震の位相差の影響)

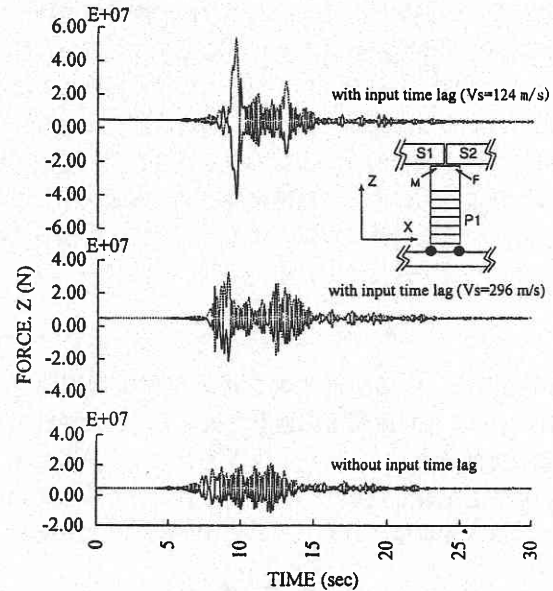


図8 橋脚 (P1) 基部に生じる力の時刻歴 (入力地震の位相差の影響)

研 究 速 報

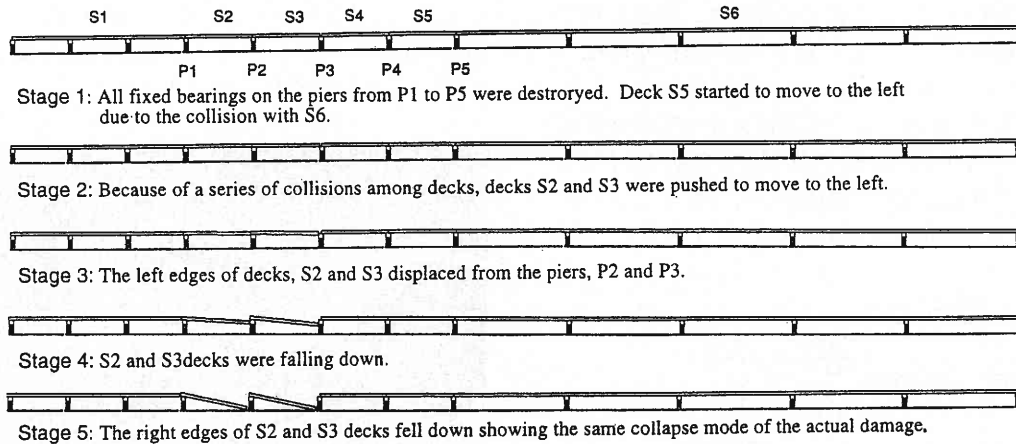


図9 高架橋崩壊過程のシミュレーション (モデルA)

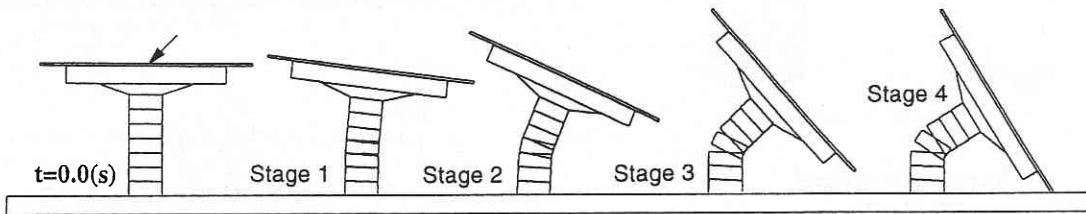


図10 EDEMを用いたピルツ式高架橋の崩壊シミュレーション (モデルB)

る⁵⁾。入力地震動や境界条件の不確かさを考えれば、この結果は地震被害のメカニズムを十分再現していると考えられる。

次にモデルBを用いた解析結果を示す。橋脚部分の鉄筋量を変化させた複数のモデルを用いて、強度の差による崩壊過程の違いを解析したが、ここでは実際の構造物に対応して橋脚の途中で鉄筋量が増加するモデルを用いた解析例(図10, 図11)を紹介する。図10のように橋脚の破壊が鉄筋量の急変する部分から始まり、破壊の進行にともなって横転していく過程がシミュレーションされた。また図11からは、地震外力によって橋脚に少しずつ破壊が生じ、その結果として橋脚の剛性が低下するとともに応答が非線形になっていく様子が良くわかる。

4. お わ り に

本研究では、任意矩形要素を用いた拡張個別要素法(EDEM)による兵庫県南部地震で被害を受けた単柱道路高架橋の動的破壊シミュレーションを行った。その結果、実際の被害と同様な崩壊モードが得られるとともにその崩壊メカニズムが推定された。(1996年8月23日受理)

参 考 文 献

1) 例えば, K. MEGURO and M. HAKUNO: Fracture

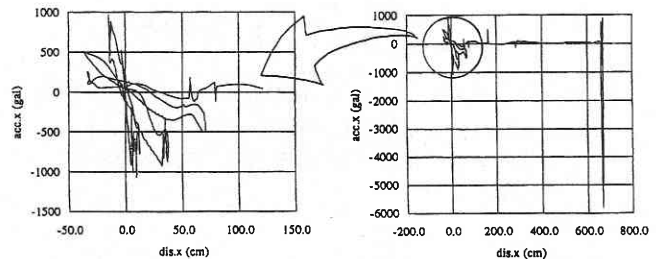


図11 崩壊過程において橋脚頂部の要素(図10の矢印の要素)に作用する水平方向の加速度と変位の関係(左図は右図の最初の部分[○印で囲まれた部分]のクローズアップ)

Analyses of Concrete Structures by the Modified Distinct Element Method, Structural Eng./Earthquake Eng., Japan Society of Civil Engineers, Vol. 6, No. 2, pp. 283s-294s, 1989. 10.

2) Cundall, P.A.: A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movement in a Blocky Rocksystem, Symp. ISPM, Nancy, France, Proc., Vol. 2, pp. 129-136, 1971.
 3) 佐藤唯行・目黒公郎・片山恒雄: 矩形要素を用いた拡張個別要素法の構造物破壊解析への適用, 土木学会第50回年次学術講演会概要集, I, pp. 900-901, 1995.
 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 1990.2.
 5) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会: 兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する研究, 1995.12.