

兵庫県南部地震による阪神高速3号線高架橋崩壊被害のメカニズム解析

西川大介¹・目黒公郎²

¹学生会員 中央大学大学院 (〒106東京都港区六本木7-22-1)

²正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所 (〒106東京都港区六本木7-22-1)

兵庫県南部地震では橋梁構造物に様々な被害が生じたが、その中でも支承や橋脚の破壊が多く見られた。支承や橋脚が損傷すると、桁に残留変位が生じたり、隣接する桁同士が衝突し、次々に大きな慣性力が伝達されていく可能性がある。このような被害の軽減には、衝突を含む隣接桁の相互作用の解明が不可欠である。本研究では、任意矩形要素を用いた拡張個別要素法を用いて兵庫県南部地震で被害を受けた単柱高架橋の動的破壊シミュレーションを行い、大きな地震外力を受けた場合に起こる桁同士の衝突が高架橋崩壊に及ぼす影響を調べた。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。

Key Words: *Extended Distinct Element Method, Distinct Element Method, fracture analysis, pounding, seismic design, Great Hanshin-Awaji Earthquake, Kobe Earthquake*

1. はじめに

先の兵庫県南部地震は、大きな人命損失と様々な都市施設の破壊をもたらした。特に構造物の崩壊被害には目を見張るものがあった。万全の耐震設計がなされているはずの高速道路や鉄道施設にも甚大な被害が生じた。地震発生時刻がもう少し遅ければ、多くの犠牲者を出していたことは自明であり、早急な耐震設計の見直しを迫られることになった。高速道路や新幹線をはじめとした橋梁構造物には様々な被害が生じたが、その中でも支承や橋脚の破壊が多く見られた。支承や橋脚が損傷すると、桁に残留変位が生じたり隣接する桁同士が次々に衝突する「玉突き衝突」が生じる可能性がある。このよ

うな被害の軽減には衝突を含む隣接桁の相互作用の解明が不可欠である。

本研究では個別要素法(Distinct Element Method, DEM)¹⁾に改良を加えた任意の矩形要素を扱える拡張個別要素法(Extended DEM, EDEM)²⁾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。この手法では、低自由度のモデル化が可能となり、解析時間の短縮化がはかれる。

2. 解析モデル

本研究では、図1と写真1に示す高架橋の崩壊被害を対象として、隣接桁同士の相互作用に関する検討を行

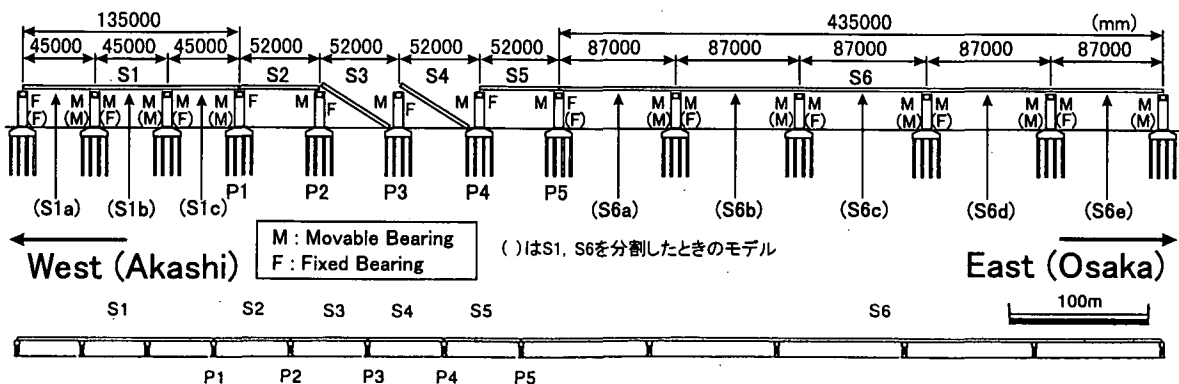


図1 解析対象高架橋の崩壊モードと解析モデルの全景

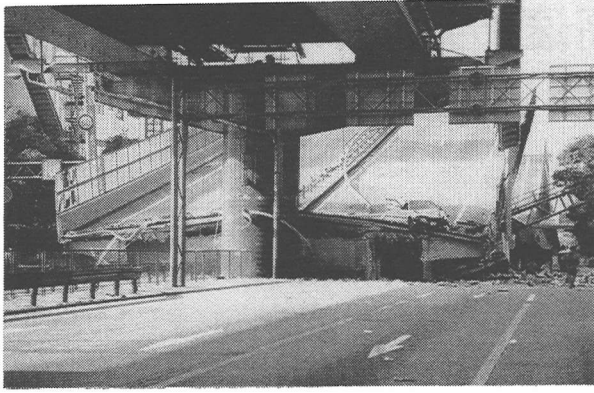


写真1 橋桁S3およびS4の落橋

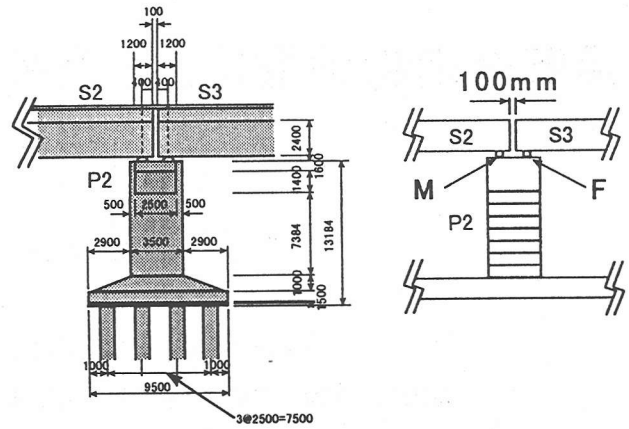


図2 橋桁部分における概寸とその解析モデル

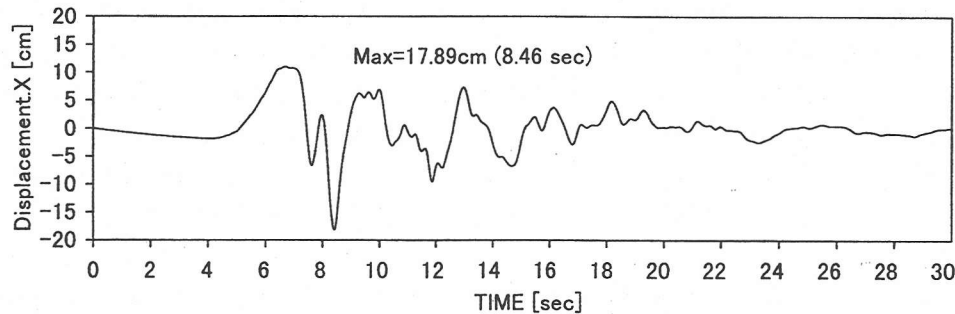


図3 入力波形

い、その崩壊メカニズムの解析を試みた。写真1に示す落橋箇所は、図1の4径間単純箱桁の中央の2径間部分の橋桁であり、橋脚P3とP4上の可動支承側の桁端が橋脚天端から脱落して落下したものである。橋脚については、P1からP5にいたるまで基部に損傷が見られた。被災した箇所の東(大阪)側は5径間連続の鋼床版ゲルバー箱桁橋に、西(明石)側は3径間連続鋼箱桁橋に隣接している。この高架橋を図1、図2に示すようにモデル化して解析を行った。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、詳細な構造部分に対しては可能な限り単純化をはかった。解析に先立って行った衝撃応答シミュレーションから、解析モデルが道路橋示方書から求まるこの種の構造物と一致する固有周期を弾性範囲内で持つことを確認している。

3. 解析結果

本研究では、地震外力として神戸海洋気象台で記録された加速度波形を数値積分して得られた変位波形を用いた。震源と高架橋の位置関係から、EW成分の変位波形(図3)を各橋脚の基礎に与えている。

(1) 地震外力の位相差が及ぼす影響

見かけの地震動の伝播速度(V_a)を変化させながら($V_a=500, 1000, 3000, 5000, \infty$ m/s)、地震動が西から東

に伝播したことを仮定した5ケースの解析を行った。解析結果の1例を図4と図5に示す。図4は橋桁の変位応答を、桁間の隙間10cmを考慮して描いたものである。桁同士の変位が一致している箇所は衝突が生じたことを表している。図5は、各橋桁の固定支承に作用した力の時刻歴である。橋桁同士の衝突で衝撃的な大きな力が作用している様子が見られる。この解析では、桁同士の衝突は生じるが、支承部を含めて各要素間の間隙バネは破断しない条件を与えている。位相の違う5ケースの動的応答の最大値を比較すると(図6)、想定しうる V_a の範囲内では、 $V_a=3,000$ m/sのケースが最も厳しい条件であることがわかった。

(2) 隣接する動特性の異なる桁橋が及ぼす影響

単純桁S2~S5とその両端に位置する2つのゲルバー橋(S1とS6)の動特性が大きく異なることが、落橋被害の一因と考えられることから、S1とS6の連続桁をそれぞれ3つと5つの単純桁に分割し、(1)と同様の条件のもとで動的応答解析を行った。 $V_a=3,000$ m/sの条件における解析結果を図7、図8に示す。分割によってS1とS6部分がS2~S5と近い動特性を持つ単純桁になり、(1)の場合で見られるような桁同士の激しい衝突が発生しなくなった。図7、8と図4、図5の結果との比較から、隣接する動特性の異なるゲルバー橋の影響が非常に大きかったことがわかる。

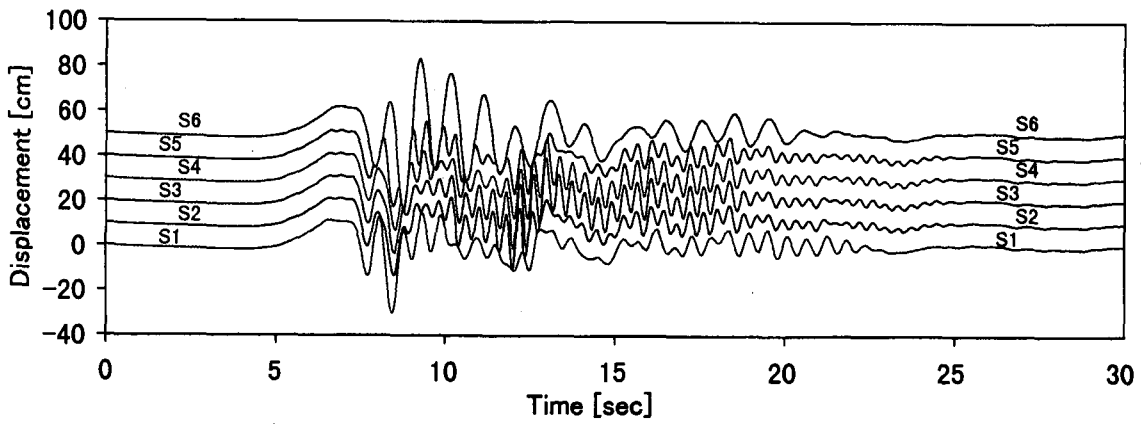


図4 橋桁の応答変位($V_a=3,000$ m/s)

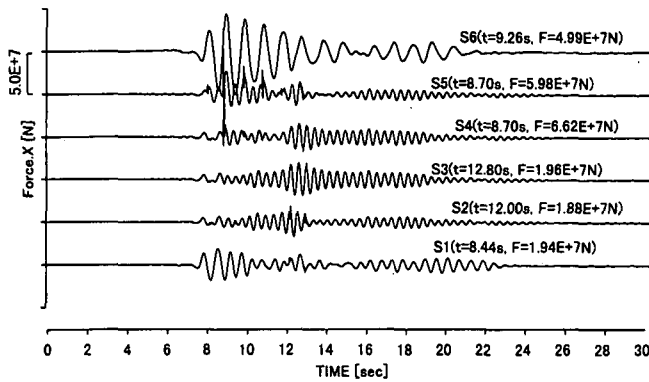


図5 支承に作用する力の時刻歴

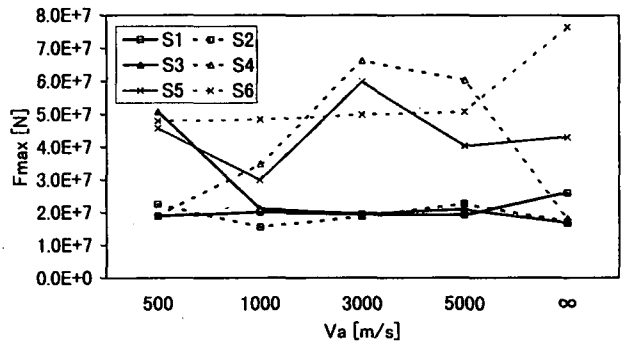


図6 支承に作用する力の最大値の比較

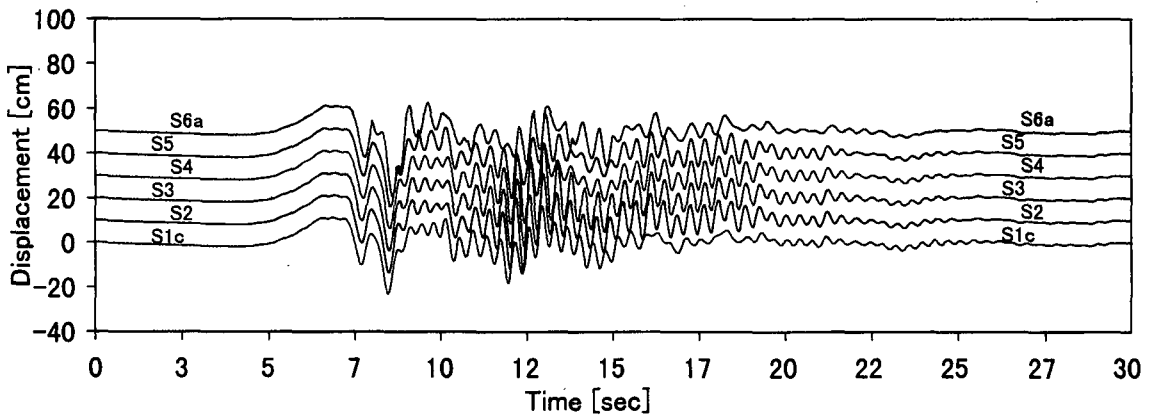


図7 橋桁の変位応答(S1とS6を単純桁に分割)

(3) 桁間の衝突が落橋に及ぼす影響

次に $V_a=3,000$ m/sの条件のもと、動的破壊解析を試みた。解析結果を図9と図10に示す。図10は20秒間の解析のうち、桁同士の激しい衝突が発生した7.0秒～10秒の間の変位応答の拡大図を表している。図より、S6の支承の損傷によるS6とS5の衝突が引き金となって、次々と隣接桁同士の玉突き衝突が伝達されていく様子が分かる。桁同士の衝突の影響で、8.0秒前後にS1からS6までのすべての固定支承が破壊し、最終的には図11に示すようにS2とS3が落橋するに至った。実際の崩壊被害では、こうした玉突き衝突の過程で、桁同士の食い込み(実際

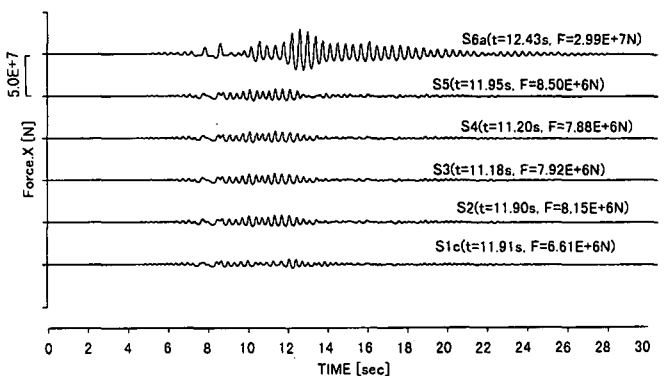


図8 支承に作用する力の時刻歴

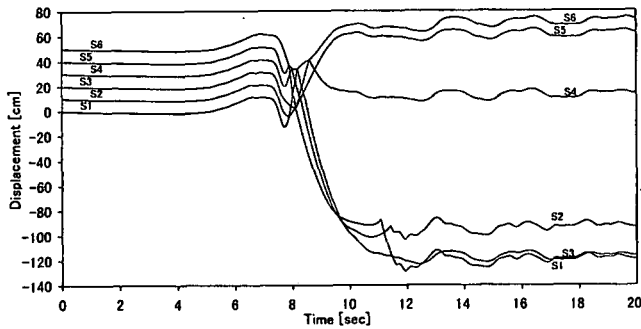


図9 橋桁の変位応答(破壊解析・Va=3,000 m/s)

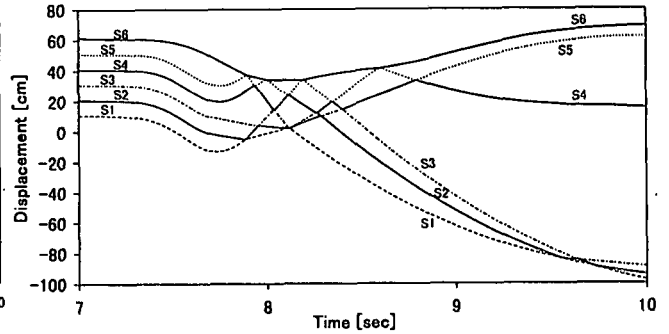


図10 橋桁の変位応答(図9の拡大図)

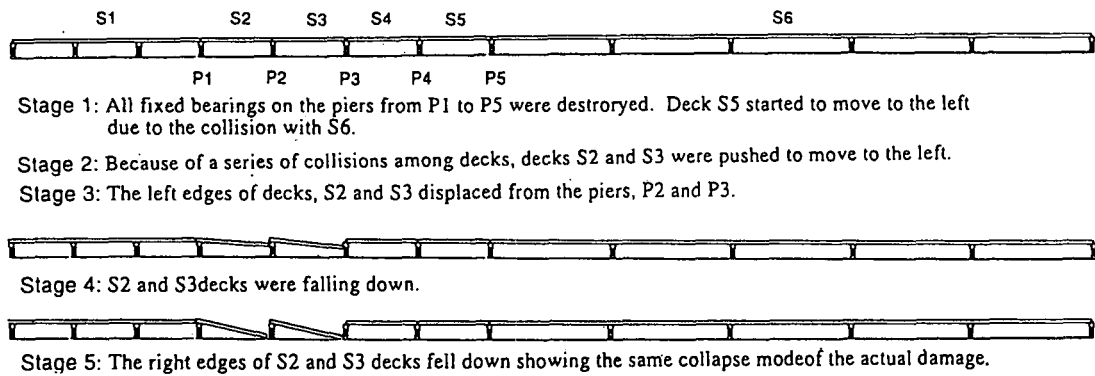


図11 高架橋崩壊被害のシミュレーション

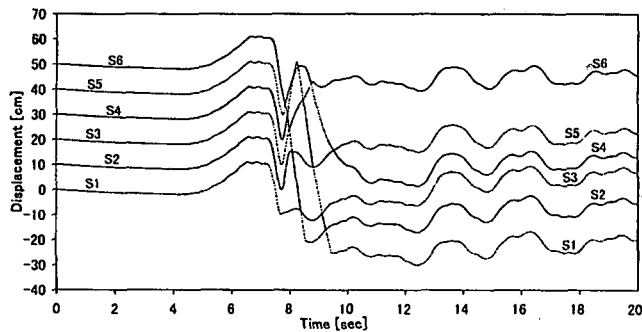


図12 橋桁の変位応答(S1とS6を分割)

にS3の桁端がS2の桁端に約30cm食い込んだ形跡がある)や、各橋脚の残留変位の発生により、桁によっては図9で見られる以上の大きな応答変位があったと推定される。図1にも示したように、実際の被害ではS3、S4桁が落橋したが、今回採用した入力地震動や境界条件を考えると、ここで再現されたシミュレーション結果は、定性的には被害のメカニズムを再現していると考えられる。

次に同様の境界条件の下で、S1とS6の連続桁を単純桁に分割して解析した結果を図12に示す。図9の結果との比較から、応答変位が著しく小さくなっていることが分かる。隣接する動特性の異なるゲルバー橋の影響が大きかったことがうかがえる。

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(EDM)による兵庫県南部地震で被害を受けた単柱高架橋の動的破壊シミュレーションを行い、大きな地震外力を受けた場合に起こる桁同士の衝突が高架橋崩壊いに及ぼす影響を調べた。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。

参考文献

- 1) 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.
- 2) K. MEGURO and M. HAKUNO: Fracture Analyses of Concrete Structure by the Modified Distinct Element Method, Structural Eng./ Earthquake Eng., Japan Society of Civil Engineers, Vol.6, No.2, pp.283s-294s, 1989.10.
- 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, 1, 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) 建設省土木研究所: 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.