

東神戸大橋の兵庫県南部地震時の 応答シミュレーション

山崎文雄¹・Todor Ganey²・石崎 浩³・北沢正彦⁴

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

²工博 Failure Analysis Associate Inc. (149 Commonwealth Drive, Menlo Park, CA94025, USA)

³正会員 阪神高速道路公団 神戸第二建設部 (〒650 神戸市中央区東川崎町1-3-3)

⁴正会員 工博 阪神高速道路公団 工務部 (〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

東神戸大橋は阪神高速5号線に架かる長大斜張橋であり、1995年1月17日の兵庫県南部地震による強震動に見舞われたが、幸い橋本体の致命的被害は受けなかった。この橋では、長大斜張橋とその基礎の地震時挙動の解明のために、主塔内、ケーソン基礎、および周辺地盤で地震観測を行っており、兵庫県南部地震の本震および余震が記録された。本研究では、これらの観測記録を入力として、3次元動的相互作用解析を実施し、観測応答値との比較検討を行った。本震の際は、表層地盤に液状化が発生するなど地盤の非線形化が進行しており、3次元解析に先立ち、地盤の1次元有効応力解析を行って地盤モデルを決定した。

Key Words : *Dynamic soil-structure interaction, Hyogoken-Nanbu Earthquake, cable-stayed bridge, 3D FEM, liquefaction analysis.*

1. はじめに

東神戸大橋は、阪神高速5号線の魚崎浜と深江浜間の500mの水路をまたぐ、1993年に完成した我が国で最大級の斜張橋であるが、1995年1月17日の兵庫県南部地震による強震動に見舞われた。幸い橋本体の致命的被害は受けなかったが、ウインドダムの破損、伸縮装置の損傷、耐震連結装置の破断、橋脚柱の局部座屈などの被害が魚崎浜側の端橋脚に集中して発生するなど、多数の被害を被った¹⁾。この橋では、長大斜張橋とその基礎の地震時挙動の解明のために、主塔内、ケーソン基礎、および周辺地盤で地震観測を行っており、兵庫県南部地震の本震およびその後のいくつかの余震が記録された。本研究では、これらの記録を入力として、地盤-橋梁構造物系の動的相互作用解析を実施し、数値解析による地震時挙動の再現を試みる。

2. 東神戸大橋の仕様

東神戸大橋の東半分(深江浜側)を図-1に示すが、センタースパン485m、サイドスパン200mの3径間2

層構造となっている。基本構造系は、主桁をケーブルを介して塔に弾性固定するオールフリー形式を採用し²⁾、主桁の支点を橋軸方向に全て可動としている。これにより、橋軸方向の橋の固有周期が長周期化し、設計地震力を大幅に低減することが可能になっている。可動支承を採用したので、地震時の橋軸方向変位を抑えるためにオイルダンパーが端橋脚に設置されている。また、アップリフトを端橋脚に集中させないためと、橋全体の剛性を高めるために、両サイドスパンに中間橋脚が設けられている。本橋の設計には、このほかにも様々な工夫がされている。

主塔の下部工は、海面下36.2mを支持層とする大型ケーソン基礎であり、陸上部の橋脚基礎は場所打ち杭である。地盤は軟弱沖積層が分厚く堆積しており、魚崎浜、深江浜ともに、昭和30年代から40年代にかけて埋立てられた人工島である。

この長大斜張橋とその大規模基礎の地震時挙動の解明を目的として、地震計が設置されている。地震計は、深江浜側の主塔およびケーソン基礎に5箇所(塔頂部: T1, 塔中部: T2, 桁レベル: T3, ケーソン上面, 同底面: K1), 主塔から50m陸側の地盤内に2箇所(GL-34m: G1, GL-1.5m: G2)設置されている。

3. 兵庫県南部地震の観測記録

深江浜側の主塔・ケーソン基礎および地盤内に設置した地震計により、兵庫県南部地震の本震が記録された。橋軸方向(N78E)の地盤加速度¹⁾は、-34mで最大425.4Galが観測され、これが-1.5mにおいて282.0Galに低減するなど、ポートアイランド³⁾で観測されたものと同様の強い地盤非線形性が見られる。

主塔基礎では、ケーソン上面位置の地震計は作動しなかったが、図-2に示すようにケーソン底面で3成分の加速度波形が記録された。主塔頂部の地震計は、橋軸方向および橋軸直角方向とも1Gを越えて振り切れた。塔中間部の地震計は、橋軸直角方向については1Gを越えわずかに振り切れたが、橋軸方向は最大385.7Galを記録している。また、主桁レベルにおいては、図-2に示す3成分の加速度波形が記録されている。この波形には、非常に特異なパルスが、後続動部に繰り返し記録されている。このようなパルスは地盤や基礎の記録には見られず、また、被害修復後に記録された余震波形には見られないことより、主桁端部における取付け部の桁との衝突、魚崎浜側端橋脚のウインド杓の破損、さらにはケーブルの影響などが原因として考えられる。

4. 動的相互作用解析モデル

東神戸大橋の地震時挙動を解析するために、数値解析モデルを作成した。本橋の設計時には、2次元FEMにより地盤-構造物系の相互作用を考慮したが²⁾、ここでは大型ケーソン基礎の3次元挙動を厳密に評価するため、3次元FEMにより地盤を含む全体系をモデル化した。動的サブストラクチャー法による3次元解析コードSASSI⁴⁾を用いて、図-3に示すように、対象条件を利用した1/4モデルを構築した。周辺地盤は、ケーソン部のみ3次元要素でモデル化し、端橋脚と中間橋脚の周辺地盤と杭はバネで評価した。

上部工は、桁およびケーブルともにはり要素を用いた。ここで、ケーブルは、張力には抵抗するが圧縮力は受け持たないので、これを厳密にモデル化しようと思えば、非線形解析を行う必要がある。SASSIは振動数領域の解析であるので、このような非線形解析は行えない。そこで、ケーブルの影響を評価するための予備解析として、3次元非線形解析コードMSC/NASTRAN⁵⁾のギャップ要素とバネ要素を用いてケーブルをモデル化し、周辺地盤の影響を簡易なバネで評価して、全体系の時刻歴応答解析を実施した。解析の結果、初期自重を考えると、ケー

ブルが圧縮応力状態にはなりにくく、はり要素でモデル化しても近似的にはよいとの結論となった。

最初に、微小ひずみ時の地盤定数を用いたSASSIのモデルを用いて、1996年1月25日の余震(G2:42.0Gal)の応答解析を行った。図-4は、地表面と主塔中間部とのフーリエ振幅比であるが、解析結果は観測記録を非常によく再現している。また、図-5に示すように、観測と解析の時刻歴波形もよく近似している。これらの結果より、小さな地震動に対する解析モデルの実証性は確認されたものと思われる。

5. 地盤の液状化解析

兵庫県南部地震時の応答解析を行うに際しては、地盤要素の物性値を決定する必要がある。観測地盤加速度を見ると、液状化が発生していると思われる波形となっている。したがって、通常行われる等価線形地盤応答解析(SHAKE)はもちろんのこと、履歴型の全応力非線形地盤応答解析によっても、地震時挙動の再現は困難と考えられる。そこでここでは、間隙水圧の発生と消散、および有効応力の減少による地盤剛性の変化を考慮できる、1次元有効応力解析⁶⁾を実施した。この解析では、地盤要素のひずみ依存性は履歴型ROモデルで表現し、間隙水圧の発生はせん断仕事⁷⁾で規定されるモデルを用いる。-34mでの橋軸方向記録を入力とすると、表層地盤は-13m付近まで液状化ないしそれに近い状態となった。地表近くの加速度波形を観測記録と比較して図-6に示すが、液状化の発生によって周期特性が大きく変化していく様子がよく再現できている。

6. 兵庫県南部地震のシミュレーション

液状化解析結果より、周辺地盤の特性は、兵庫県南部地震時には時間により大きく変動することが分かる。しかし、振動数領域の3次元解析では、物性値を時間変化させることはできない。したがってここでは、液状化に至る直前付近(8-10秒)での平均的な地盤物性値を用いて本震の応答解析を行った。地盤物性値について何度か試行を繰り返すことにより、主塔中間部のフーリエ振幅比として、図-7に示すような比較的よい一致を得ることができた。しかし、図-8に示す波形においては、短周期成分は表現できていない。桁同士の衝突、支承の損傷、ケーブルの一時的張力損失、地盤の液状化など、解析上表現が非常に難しい現象が生じている可能性が高く、現状の解析手法では限界があると思われる。

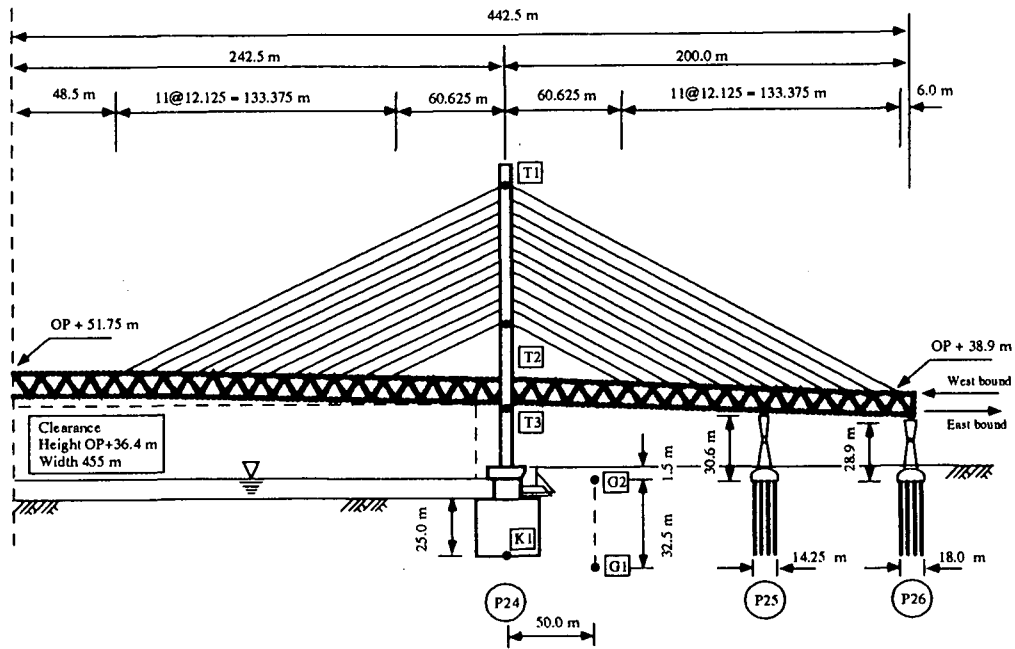


図-1 東神戸大橋の東半分（深江浜側）の構造と地震観測点位置

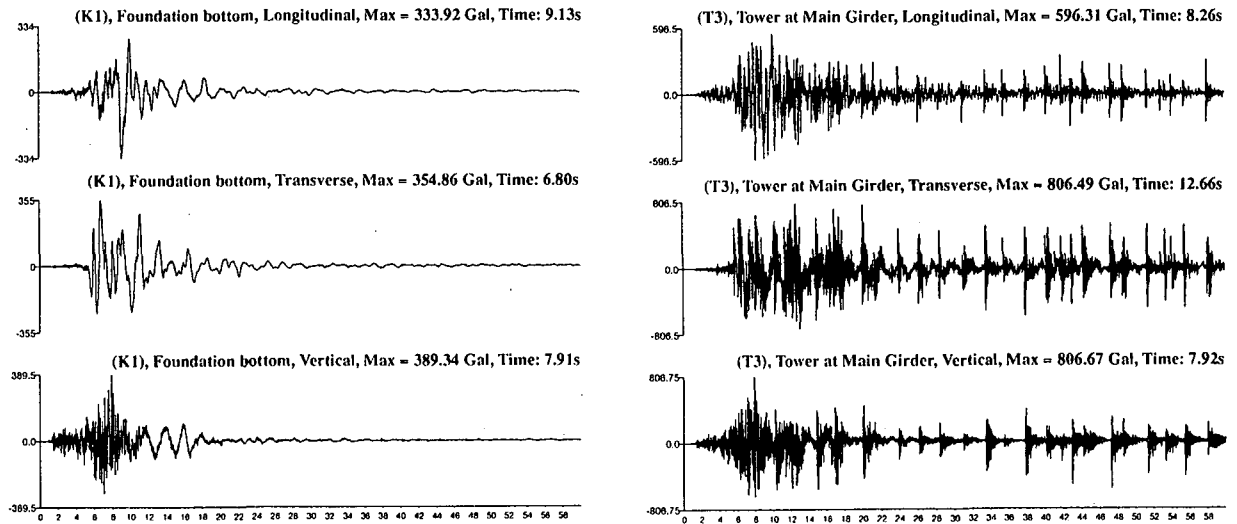


図-2 兵庫県南部地震の加速度記録 (K1: ケーソン基礎底面, T3: 主塔桁レベル)

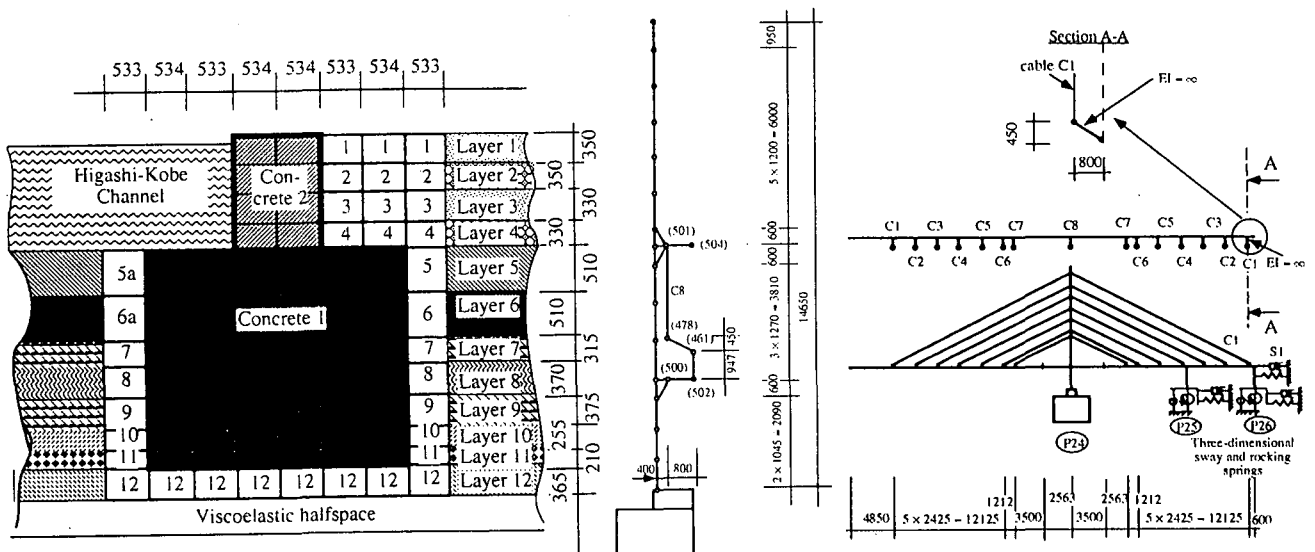


図-3 3次元解析コードSASSIによる動的相互作用解析モデル

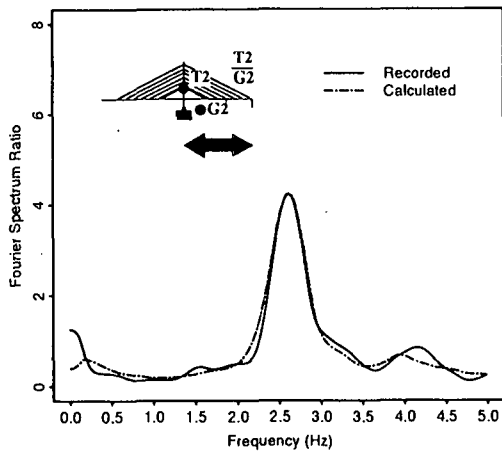


図-4 観測と解析によるフーリエ振幅比 (余震)

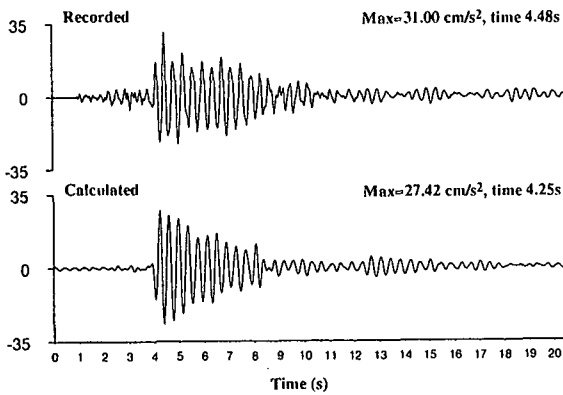


図-5 観測と解析による加速度波形の比較 (T2, 余震)

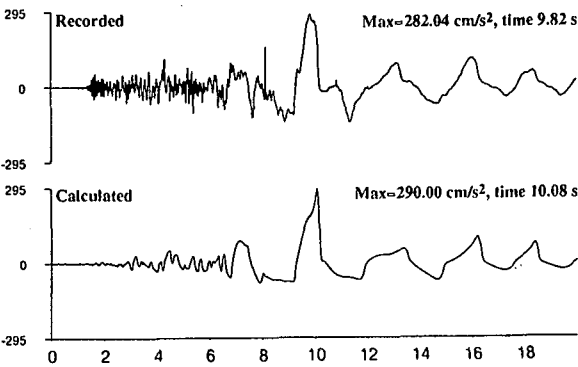


図-6 有効応力解析による加速度波形 (G2, 本震)

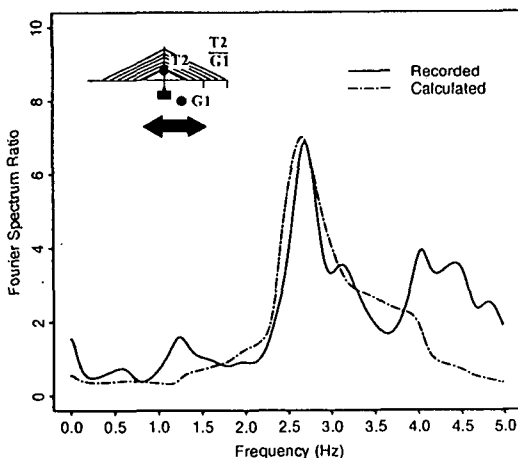


図-7 観測と解析によるフーリエ振幅比 (本震)

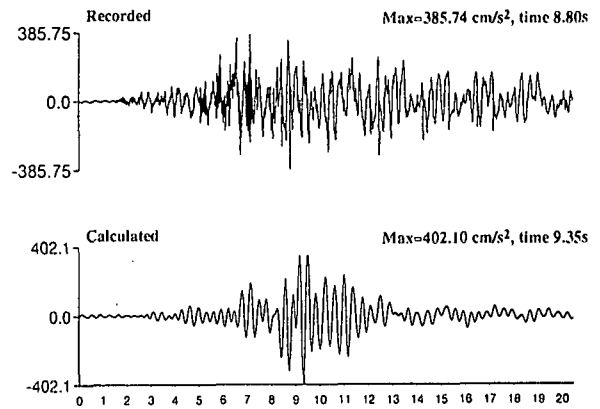


図-8 観測と解析による加速度波形の比較 (T2, 本震)

7. まとめ

兵庫県南部地震において東神戸大橋で観測された地震記録を用いて、長大斜張橋とその基礎の地震時挙動について解析的な検討を行った。動的サブストラクチャー法による3次元解析コードSASSIを用いて、基礎部と周辺地盤を含む橋梁全体をモデル化した。このモデルによる余震記録の解析結果は、観測記録を非常によく再現した。本震時には、ケーソン周辺地盤が液状化したと思われることから、有効応力法による地盤の液状化解析を実施し、観測記録とよく近似した結果を得た。この地盤解析結果をもとに決定した物性値を用いて、本震時の3次元動的相互作用解析を行い、観測記録にかなり近似する結果を得ることができた。今後とも、この貴重な地震観測記録を用いて、解析手法の検証と長大橋梁・基礎の地震時挙動の解明を進めていきたいと考えている。

参考文献

1. 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告「第1巻土木構造物の被害 橋梁」、1996。
2. 北沢正彦, 石橋浩, 江見晋, 西森孝三：基本構造系をオールフリーとした長周期斜長橋(東神戸大橋)の地震応答特性と耐震設計, 土木学会論文集, 第422号, 1990。
3. Yamazaki, F., Ansary, M.A., and Towhata, I. : Application of a dynamic effective stress model at a reclaimed site during the Great Hanshin Earthquake, 1995: Proc. of the First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Vol.1, pp.591-597, 1995.
4. Lysmer, J., Ostadan, F., Tabatabaie, M., Vahdani, S., and Tajirian, F.: SASSI- A system for analysis of soil-structure interaction- User's Manual, UC Berkeley, 1988.
5. MSC/NASTRAN for Windows: Installation and application manual, MSC, 1995.
6. Ishihara, K. and I. Towhata, I.: One-dimensional soil response analysis during earthquakes based on effective stress method, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B), 35 (4), pp: 655-700, 1980.
7. Towhata, I. and Ishihara, K.: Shear work and pore water pressure in undrained shear, Soils and Foundations, JSSMFE, 25 (3), pp: 73-84, 1985.