

阪神・淡路大震災時における 阪神高速道路3号神戸線の挙動解析

Motion analysis of Hanshin Expressway No.3 Kobe Line during Great Hanshin-Awaji Earthquake

吉見宙¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Sora Yoshimi and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: yoshimi.sora.sm@alumni.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 筑波大学教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

In this paper, we investigated the factor that caused the collapse of 18-span Gerber beam prestressed concrete (PC) bridge of the Hanshin Expressway No.3 Kobe Line during the Great Hanshin-Awaji Earthquake which occurred in 1995. The ASI-Gauss code which can stably calculate non-linear phenomenon such as collapse was used as a numerical code for this research.

Key Words : Motion analysis, Great Hanshin-Awaji Earthquake, PC Gerber bridge, ASI-Gauss code

1. 緒言

1995年に発生した兵庫県南部地震により、自動車道や鉄道など、多くの高架橋が甚大な被害を受けた。特に、阪神高速道路3号神戸線内には横倒しになって倒壊した区間がある。倒壊したのは、全長約635[m]の18径間PCゲルバー橋である。倒壊した様子を図1に示す。この写真[1]は東側(大阪側)から西側(神戸側)に向けて撮影されたものであり、北側に向けて横倒しになる形で倒壊していることが分かる。この区間は19脚の橋脚からなり、両端の橋脚はRC単柱橋脚で、その間にある17脚はピルツ形式になっている。ピルツ形式とは、橋脚の一部が受桁内にあり、一体となっているものをいう(以下、ピルツ形式の橋脚と受桁を合わせてピルツ橋脚と呼ぶ)。倒壊しているピルツ橋脚のほとんどが、段落し部から折れるようにして倒壊している[2]。ここで、段落し部とは、橋脚の主鉄筋が途中定着している部分をいう[3]。

この倒壊は大規模であったにも関わらず、目撃者が少なく、また、その後の解析的検討からも、どの橋脚から倒壊が進展したかなど、倒壊過程の詳細は明らかになっていない。そこで本研究では、橋脚の位置や長さ、段落し部や主筋量、上部構造の質量、重心位置等を考慮した上で18径間PCゲルバー橋のモデルを構築し、JMA神戸波を入力した際の挙動解析を行った。数値解析手法として、構造物の崩壊解析において実績があるASI-Gauss法[4]を用いた。解析結果を基に、倒壊の進展のプロセスについて考察する。

2. 18径間PCゲルバー橋の概要

一般的な連続桁橋や単純桁橋などでは、橋桁は橋脚上で支承を介して支持されているが、ゲルバー橋と呼ばれる形式では、両側の橋脚から張り出ている部分がヒンジ

を介して吊桁を支持している。ゲルバー橋の利点として、不同沈下のような局所的な変形が生じてても、上部構造内における応力集中を防げることが挙げられる。

図2に今回解析対象とした18径間PCゲルバー橋の概略図を示す。総幅員は全区間で20.05[m]である。橋脚スパンは、B431-B513間でそれぞれ35[m]であり、それ以外の区間は36[m]である。上部構造の平面形はB431からB514までは直線状であり、B514から東側は曲線状になっている。直線区間の橋軸方向は、北62度東を向いている。この19脚のみのモデルでは、境界条件が実際と大きく異なってしまう。そこで、今回の解析では、境界条件の影響を軽減するために、東西に2脚ずつRC単柱橋脚を追加した。追加した橋脚の仕様は、東西それぞれB431、C101の値を用いている。RC単柱橋脚は全て張出式橋脚である。橋脚の呼び名



図1 倒壊した18径間PCゲルバー橋[1]

は、ピルツ橋脚を西からB501, B502, . . . , B517とし、西側の3本のRC単柱橋脚を西からB429, B430, B431, 同じく東側のRC単柱橋脚を西からC101, C102, C103と呼ぶこととする。これらの橋脚と、橋桁の仕様をそれぞれ表1, 表2に示す。

倒壊したピルツ橋脚には段落し部があるが、その概略図を図3に示す。RC単柱橋脚には段落し部はない。段落し部はフーチング上端から2.5[m]~3.5[m]の位置に1箇所あり、段落し部以下では主筋が3段であるのに対し、段落し部以上では2段になっている。1段には同じ本数の主筋が用いられるため、段落し部において主筋量が2/3になっている。表1に橋脚ごとの段落し部位置や主筋本数を示している。

今回、解析対象としているゲルバー橋は、橋脚がピルツ橋脚となっているため、橋脚と橋桁の間に支承はなく、本来ヒンジが設置される吊桁と受桁の間(掛け違い部)に支承が設置されている。掛け違い部に設置されているのは密閉ゴム支承版支承(BP・B支承)とPC鋼棒である。BP・B支承は東西にそれぞれ固定支承、可動支承が用いられている。可動支承はテフロン板とステンレス板の滑りによって橋軸方向に±40[mm]の水平変位を許容しており、ストッパーによってそれ以上の変位は生じないようにになっている。また、ゴム板の弾性変形によってヒンジとしての機能を持つことで、橋軸に直角な軸回りのモーメントを打ち消している。固定支承は橋軸方向の水平変位が許容

されていないものであり、ゴム板によるヒンジの機能のみを有している。PC鋼棒は掛け違い部での落橋を防止するものである。

3. 解析モデルおよび解析条件

2章で述べた仕様に加え、上部構造の質量、重心を考慮し、解析モデルを作成した(図4)。このとき、掛け違い部における支承やPC鋼棒は、ヒンジと伸縮要素によってモデル化している。ヒンジは全体座標系Y軸回りの剛性を小さくしている。可動支承は伸縮要素の軸ひずみによって軸剛性を変化させることで、滑りとストッパーを表現している。解析モデルの要素にはすべて線形チモシェンコ梁要素を用いている。図4のカラーバーは神戸港からの海拔を表している。橋脚下端部の標高や道路の縦断勾配、横断勾配を考慮してモデル化しており、西から東にかけて徐々に地形が高くなっていることがわかる。解析にはピルツ橋脚1脚のモデル(図4の白枠)と、23脚全てをモデル化した全体モデルを用いた。なお、今回のモデルではフーチングや杭はモデル化していない。

(1) 1脚モデル

1脚モデルの要素数は204、節点数は151である。1脚モデルの解析には代表としてB509を用いた。本来のように段落し部のあるモデルと、橋脚全体を3段配筋とし、段落し部をなくしたモデルで解析を行った。いずれも橋脚下端部のみ6自由度拘束し、拘束点にJMA神戸波100%を入力し



図2 18径間PCゲルバー橋の概略図

表1 橋脚の主な仕様

区間	B431	B501-B510	B511-B512	B513-B516	B517	C101	
コンクリートの設計基準強度[MPa]	26.5						
コンクリートのヤング率[MPa]	2.34302 × 10 ⁴						
鉄筋	SD30 (現在のSD295)						
	主筋	D29	D35				
	せん断補強筋	D16					
	断面[m]	3.5 × 3.5	φ3.1	φ3.3	φ3.3	φ3.3	φ3.5
	1段の主筋本数	60	54	66	60	60	
	段落し部の位置[m](フーチング上端から)		2.5	3.0	3.0	3.5	

図2 上部構造の主な仕様

	受桁	ゲルバー桁
コンクリートの設計基準強度[MPa]		39.2
コンクリートのヤング率[MPa]		2.66966 × 10 ⁴
鉄筋	SD30 (現在のSD295) D10, D13, D16, D19, D22	
PC鋼棒	SBPCφ27[mm]第3種	

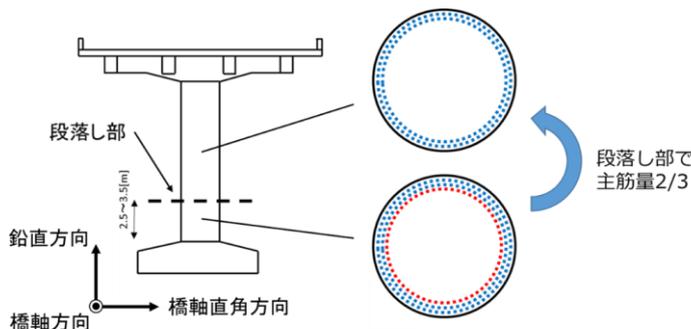


図3 段落し部の概略図

た。

(2) 全体モデル

加振波の向きの影響を見るために、直線区間の橋軸が実際と同様に北62度東を向いているモデル（以下、北62度東方向全体モデル）と、直線区間の橋軸がX軸方向を向くように回転させたモデル（以下、X軸方向全体モデル）を用いた。全体モデルの要素数は10,080、節点数は7,571である。全体モデルは、いずれも23脚の下端部のみ6自由度拘束し、上部構造の東端、西端は拘束していない。拘束点にJMA神戸波100%（図5）を入力した。

4. 解析結果

(1) 1脚モデル

解析結果を図6に示す。グラフは段落しありのモデルで曲げ破壊が発生した時刻の、曲げモーメントの分布である。段落し部がある場合、段落し部において曲げ終局強度に対する曲げモーメントの比が大きくなり、曲げひび割れ、曲げ破壊が他の箇所と先行して発生した。また、段落し部をなくしたモデルでは、段落し部において曲げ終局強度に対する曲げモーメントの比が大きくなることはなく、同時刻で曲げ破壊は発生しなかった。このことから、段落し部において曲げ破壊が起こり易いということが確認された。

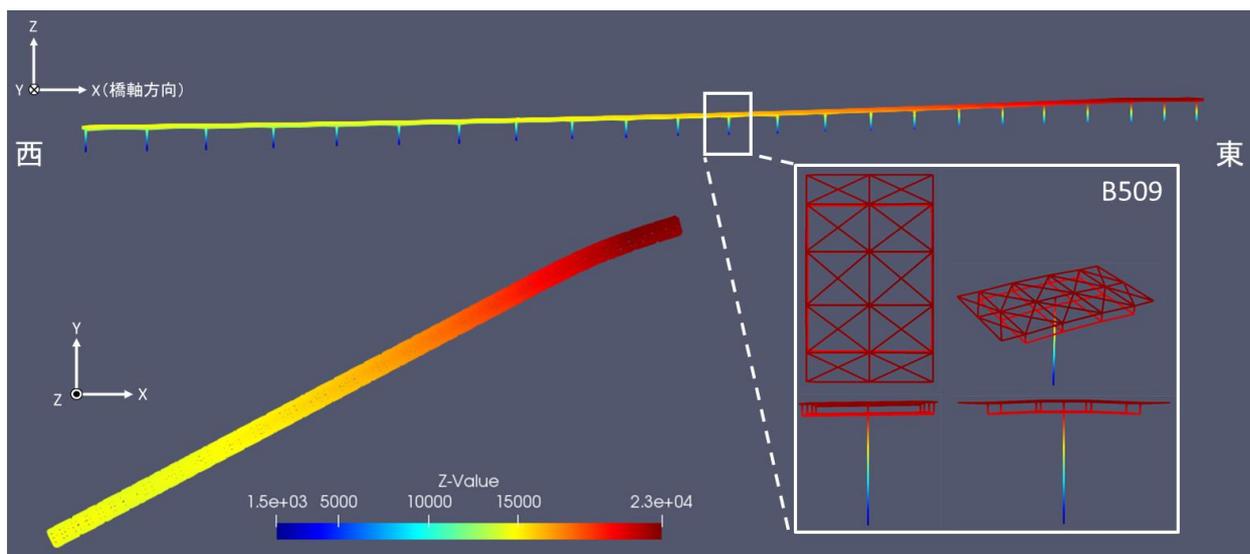


図4 解析モデル

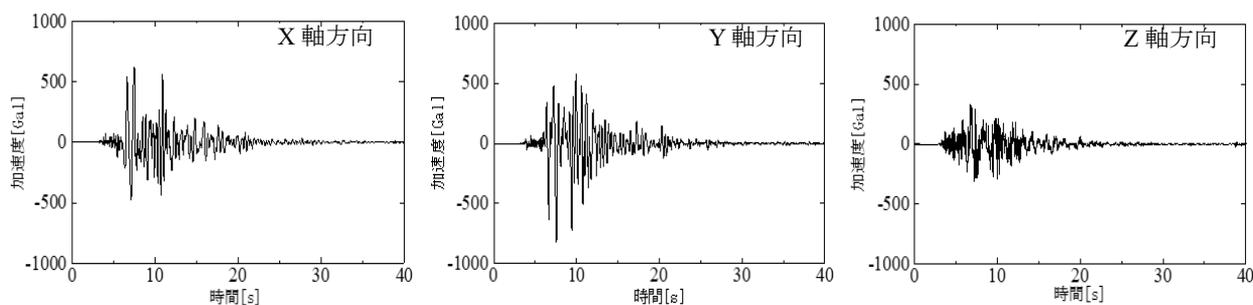


図5 JMA 神戸波 100%加速度波形

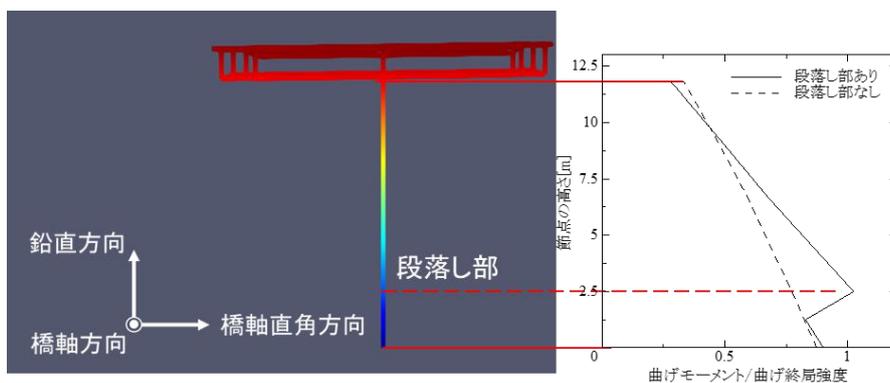


図6 1脚モデルの解析結果

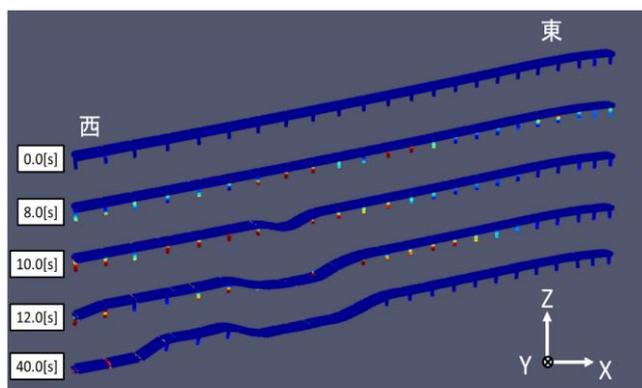


図7 北62度東方向全体モデルの解析

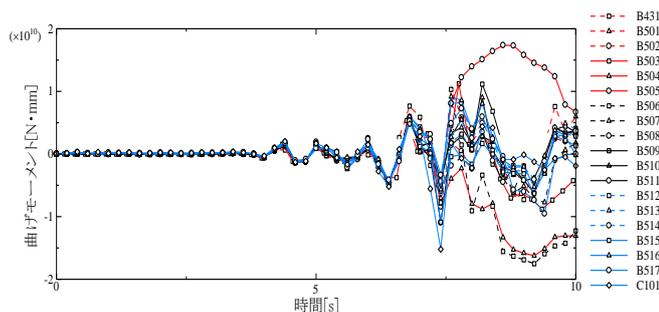


図8 北62度東方向全体モデルの各橋脚に生じる橋軸方向回りのモーメント

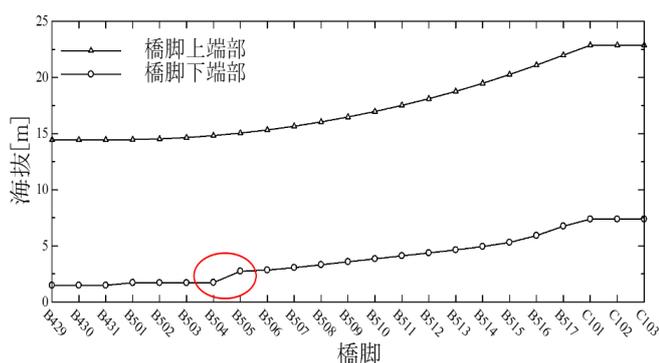


図9 全体モデルにおける橋脚上端と下端のZ座標

(2) 全体モデル

解析の結果、北62度東方向モデルは、約8.0[s]からB505がつぶれるように崩壊し始め、周りの橋脚も連鎖的に崩壊した。その後、B429から同様につぶれるように崩壊した。最終的に、B429～B431、B504～B508が崩壊する結果となった。また、X軸方向全体モデルは崩壊しなかった。

北62度東方向全体モデルの解析結果を図7に、10.0[s]までの各橋脚の曲げモーメントを図8に示す。RC単柱橋脚は橋脚下端部を、ピルツ橋脚は段落し部の値を用いている。B505は約7.6[s]から曲げモーメントが大きくなり、曲げ破壊が発生した。このときのB504とB505の変位は同程度である。ところで、B504とB505の間では、図9のように橋脚の長さが急激に短くなっているため、B505がB504に比べ相対的に大きな剛性を持っている。橋梁は連結されているため、隣接する橋脚で同程度の変位が生じることとなり、相対的に剛性の大きい橋脚において大きな曲げモー

メントが生じた。これによって、B505において曲げ破壊が発生したと考えられる。すなわち、橋脚の長さが急激に変化する位置において、相対的に剛性の大きい橋脚では、曲げ破壊が発生しやすくなる可能性が示唆された。阪神淡路大震災時の倒壊のプロセスとしては、B505から倒壊の進展が始まり、ピルツ橋脚全体に広がったことが十分に考えられる。

また、2つの全体モデルで異なる結果となったことから、加振波のXY成分と高架橋の向きとの関係によって挙動が大きく異なることが示された。

5. 結言

本研究では、阪神淡路大震災時に倒壊した18径間PCゲルバー橋と、その両端に1径間追加した高架橋をモデル化し、地震時挙動解析を行った。1脚モデルの解析では、段落し部において曲げ終局強度に対する曲げモーメントの比が卓越し、曲げ破壊が起こりやすい傾向がみられた。また、全体モデルの解析では、橋軸の方向を変えた2種類のモデルを用いて解析を行った。北62度東方向全体モデルの結果から、橋脚の長さが急激に変化する位置において、相対的に剛性の大きい橋脚では、曲げ破壊が発生しやすいことが示唆された。また、加振波によって結果が大きく異なることから、阪神淡路大震災時の再現を行うには、地盤による地震波の増幅および減衰を考慮する必要があるといえる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、阪神高速道路様から実際の図面を提供していただきました。この場をお借りして深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 朝日新聞 DIGITAL 「[阪神大震災]レンズの記憶-神戸市東灘区」
http://www.asahi.com/gallery/hanshin20/kobe_higashinada/kobe_higashinada16.html
- [2] 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 土木建造物の被害 橋梁, 土木学会, 地盤工学会, 日本機械学会, 日本建築学会, 日本地震学会, 1996.
- [3] (社)日本コンクリート工学協会: 兵庫県南部地震に関する耐震技術特別研究委員会報告書 第2編 構造設計小委員会 2. 兵庫県南部地震による被害と教訓, 1997.
- [4] Daigoro Isobe : Progressive Collapse Analysis of Structures Numerical Codes and Applications, Butterworth-Heinemann, 2017.