

鋼製支承条件が連続曲線高架橋の地震時非線形応答性状に与える影響

Influence of Condition of Steel Bearings on Nonlinear Dynamic Behavior of Continuous Curved Viaducts under Earthquakes

北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川 俊郎 (Toshirou Hayashikawa)
 北海道大学工学部 O 学生員 加藤 三兼 (Mitsukane Katou)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 荻島 知之 (Tomoyuki Ogishima)
 北海道大学大学院工学研究科 ワリート・アブ・エルワファ (Waleed Aboelwafa)

1. まえがき

先の兵庫県南部地震では、公共都市施設に非常に多くの被害が発生した。特に、高速道路などの橋梁構造物が甚大な損傷を受け、数多くの高架橋の被害例は周知の通りである。高架橋は上部構造・支承・橋脚で構成されており、各々の耐震性能を考えるのではなく、高架橋全体の地震時応答性状を把握し、構成部材の性能規定を行うことが重要であると思われる。そのため、上部構造・支承・橋脚からなる高架橋システム全体系の地震時動的性状を調べる必要がある。通常、直線橋の設計に関しては、橋軸方向に地震波を入力して動的解析を行うが、曲線橋の場合は3次元的な広がりを持つ構造物であるため、その動的解析を行うためには3次元動的な非線形解析が不可欠であると考えられる。¹⁾

そこで本研究では、鋼製支承を有する3径間連続曲線高架橋(図-1)を立体骨組構造にモデル化し、幾何学非線形性と鋼材の降伏を考慮した弾塑性有限変位動的応答解析法を用いて解析を行い、鋼製支承の条件が曲線高架橋の非線形動的応答に与える影響を比較検討する。具体的には図-2に示すように支承条件の異なる Case I ~ Case IV のモデルを設定し、それぞれの上部構造の応答変位・支承部の水平力-水平変位関係・橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係を調べることで、設計上最も有利となる固定支承の配置について考察する。

2. 解析モデル

本研究は連続曲線高架橋の3次元非線形挙動についての検討を目的としているため、上部構造・支承部・橋脚の相互作用を考慮できる解析モデルとして、図-1 のような3径間連続曲線高架橋を対象とし、全体座標系(X-Y-Z系)を置く。同様に支承の配置方向にx軸、配置直角方向にy軸を局所座標系(x-y系)として図-2のように設定する。

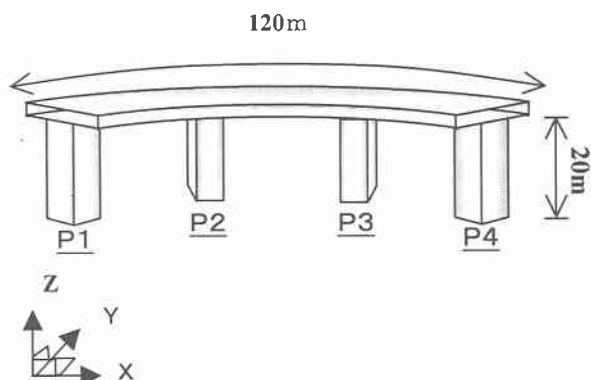


図-1 3径間連続曲線高架橋モデル

2. 1. 上部構造・下部構造

上部構造は曲率半径 100m、橋長 120m (3@40m)、総重量約 8.82MN の鋼箱桁を使用する。橋脚は震度法および許容応力度設計法に基づき設計を行い、断面幅 2.4m、板厚 0.05m の正方形箱形断面の鋼製橋脚を採用し、橋脚高さはすべて 20m とする。橋脚の設計は支承条件を考慮して橋脚ごとに行うのが望ましいが、本研究では橋脚断面には全て同一の条件を設定した。橋脚の配置方向は各橋脚とも支承の配置スペースを考慮して、支承方向と同様とした。また、橋脚基礎は十分に剛である場合を考え固定とした。それぞれのケースにおいて、上部構造・下部構造ともに同様のものを採用する。

2. 2. 支承部

本研究では鋼製支承を採用し、支承部は図-2のように曲線桁の接線方向に配置している。また、可動支承は接線方向にのみ動くものとする。

支承部は水平2方向、鉛直方向、回転3方向のばね要素にモデル化した。橋軸方向(x軸)は支承条件の特性を満足するような非線形ばねとする。また、橋軸直角方向(y軸)については剛な結合条件とするために十分に大きなばね定数を設定し、回転ばねについてはヒンジ結合を表現するために非常に小さなばね定数を設定する。

鋼製固定支承は固定の条件とするため、水平2方向に

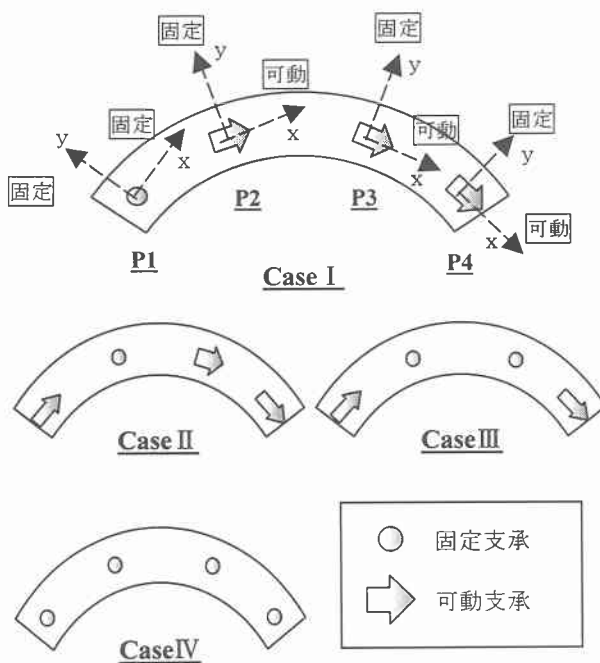


図-2 支承条件別モデル

大きなばね定数を設定する。鋼製可動支承には摩擦と変位制限構造を考慮したものを採用する。この支承は非線形ばね要素にモデル化し、支点反力による摩擦力が最大摩擦力以下のときの状態、水平力が最大摩擦力を超えて支承が滑っているときの状態、支承が変位制限構造に達した後に上部構造と一体となって挙動している状態を表すものとする。また、支承部が滑り始める水平力は支点反力に静止摩擦係数を乗じた最大摩擦力であり、支承は滑り始めてから 0.1m で変位制限構造に達するものとする。²⁾

3. 解析方法

本研究では材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮したはり柱要素の有限要素法と Newmark β 法 ($\beta = 0.25$) および修正 Newton-Raphson 法を併用した平面骨組のための弾塑性有限変位動的応答解析法を 3 次元的に拡張した解析方法を用いる。また、使用する鋼材の応力-ひずみ関係をバイリニア型にモデル化し、降伏応力 235MPa、弾性係数 200Gpa、塑性域のひずみ硬化を 0.01 とする。構造減衰は質量比例型を仮定し、1 次の水平固有振動モードに対する減衰定数 $\eta = 5\%$ を基準とする。³⁾

入力地震波は兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録における 3 成分を使用する。

4. 非線形動的解析結果

4. 1. 応答変位

表-1 に X 方向の 1 次モードにおける固有周期を示す。固定支承の数が増すごとに固有周期の値が減少する傾向

表-1 固有周期

Case I	Case II	Case III	Case IV
1.453 (s)	1.409 (s)	1.041 (s)	0.683 (s)

が認められる。同じ固定支承の数である Case I と Case II には差異が見られる。これは桁端を固定とするよりも中心部を固定とする方がやや剛性が増すためと考えられる。

Case I ・ II ・ III ・ IV それぞれにおける上部構造の時刻歴応答変位の軌跡を図-3 に示す。横軸に X 方向変位、縦軸に Y 軸方向変位を表す。また、応答変位は全体座標系 (X-Y-Z 系) を用いて表す。

Case I ~Case IV までの応答変位の軌跡を比較検討し、どのケースにおいても、支承の配置方向への大きな応答変位が生じている。また、固定支承が増えるにしたがい軌跡が丸みを帯び、応答変位が小さくなっているのが確認できる。特に、支承の y 方向は固定されているため、さほど変化は見られないが、動きを許している可動支承の x 方向に大きな変化が見られる。しかし、着目点が橋脚頂部ではなく連続している上部構造にあるため、全ての支承部において同様の軌跡を描くと考えられたが、実際には支承部ごとに微妙な違いが生じている。これは曲率半径の影響によるものと考えられる。

4. 2. 支承部の水平力-水平変位関係

Case I ・ II ・ III ・ IV における x 軸に関する支承部の水平力-水平変位関係を図-4 に示す。横軸は水平変位、縦

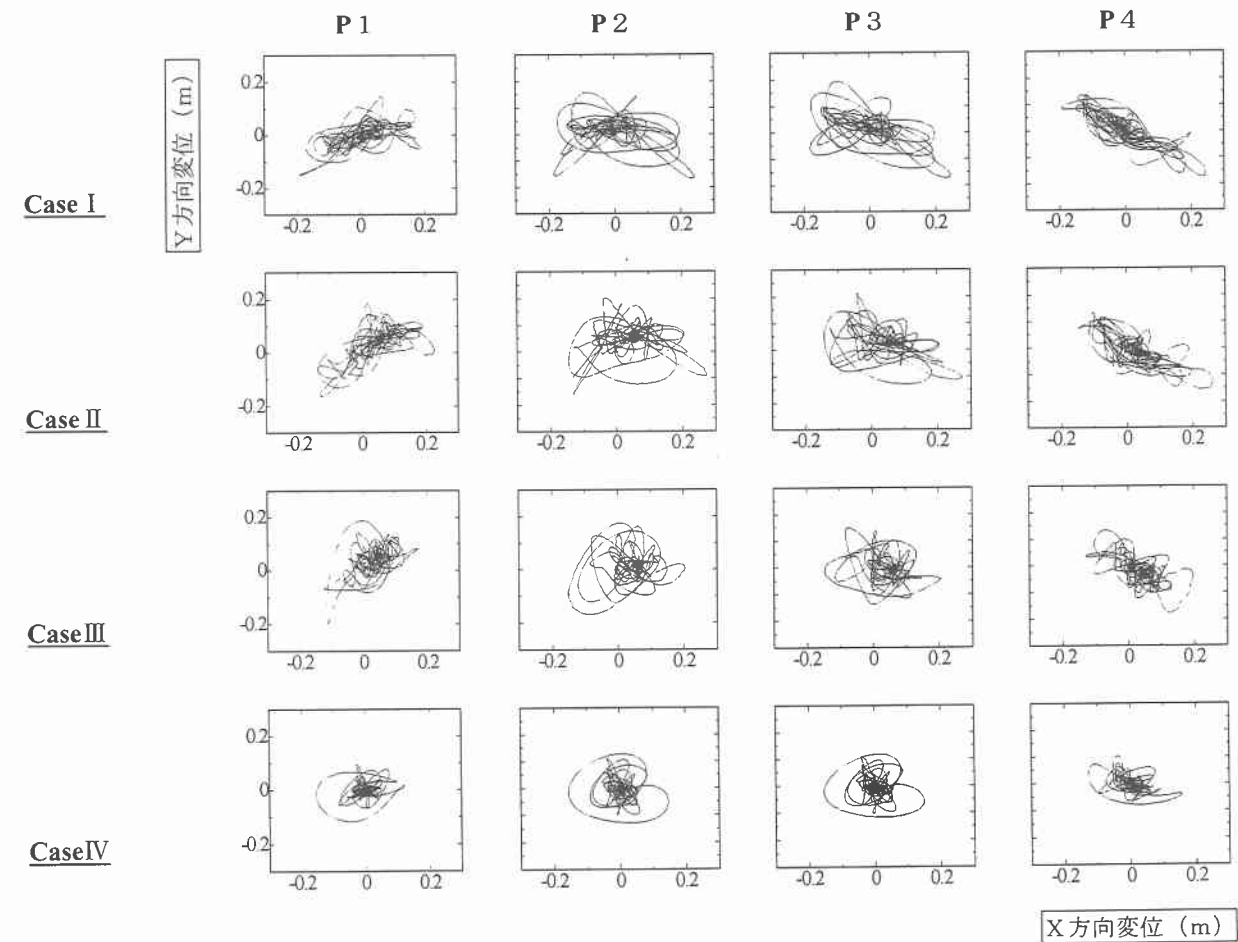


図-3 上部構造の応答変位

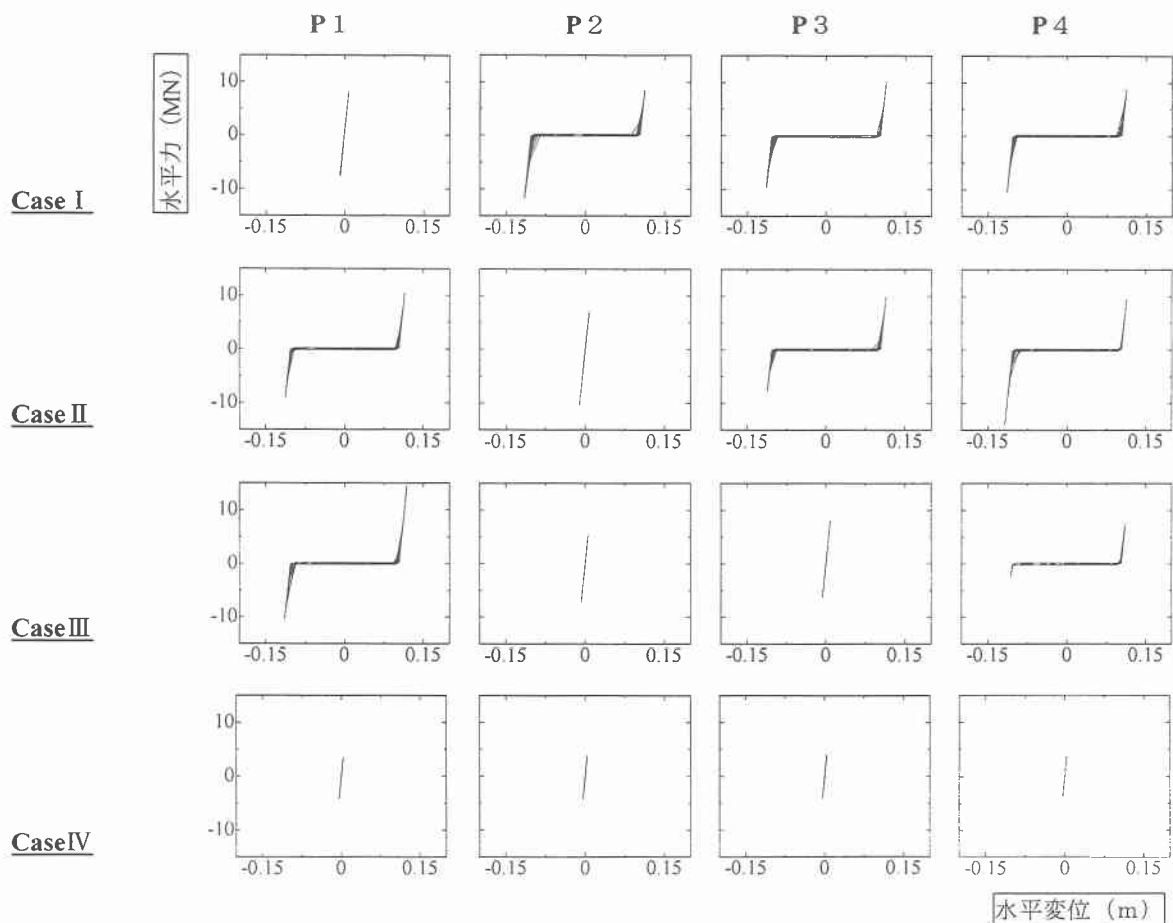


図-4 支承部の水平力水平変位関係

軸は水平力を表している。支承部の水平力と水平変位を調べる際に、支承配置方向をx軸、直角方向をy軸とする局所座標系を用いる。

いずれのケースにおいても、固定支承と可動支承の特色が顕著に見られる。可動支承は0.1mで移動制限装置に衝突し、そこで大きな水平力が発生している。

固定支承部の数が1つであるCase I とCase IIに比べ、数が2つであるCase IIIは固定支承部の水平力が小さい。また、数が4つであるCase IVの水平力はさらに小さくなっている。固定支承部が複数になることにより、地震力が分散している結果であると考えられる。

Case IIIにおいては中心部を固定支承とし、支承条件は左右対称になっているが、桁端の可動支承の水平力に大きな違いが見られる。これはP3橋脚の水平力の方がP2橋脚の水平力よりも少し大きくなっているため、地震力の分散が均等化されなかったこと、また、は応答変位のx軸方向における大きさの差異がこのような違いを生じさせたのだと考えられる。

Case IVでは全ての固定支承に同じような水平力が発生している。

ケース別に関らず、いくつかの可動支承部は固定支承部よりも大きな水平力が発生する場合がある。これらの可動支承部が滑り、移動制限装置に一時的に接触したことにより、大きな水平力が発生したものと考えられる。それにより、固定支承部よりも水平力の高い可動支承部が存在したものと考えられる。

y軸に関する支承部の水平力ー水平変位関係についてはどの支承部にも同じような水平力が生じているのが確認できた。これは全ての支承のy方向が固定されているため、際立った差が出なかったものと考えられる。

4. 3. 橋脚基部の曲げモーメントー曲率関係

Case I・II・III・IVにおけるx軸に関する橋脚基部の曲げモーメントー曲率関係を図-5に示す。横軸は曲率、縦軸は曲げモーメントを表している。橋脚基部の曲げモーメントー曲率関係を調べる際には、支承部の水平力ー水平変位関係と同様に、支承配置方向をx軸、直角方向をy軸とする局所座標系を用いる。

いずれのケースにおいても、水平力ー水平変位関係と同様に固定支承部の橋脚と可動支承の橋脚に顕著な違いが見られ、可動支承部の橋脚よりも固定支承部の橋脚に大きな塑性履歴ループが現れている。これは固定支承部の橋脚に地震力が集中しているためと考えられる。また、固定支承部の数に比例し、それぞれの橋脚基部に作用する曲げモーメントが小さくなる傾向が見られる。これは固定支承部に作用する水平力が均等化されるためであると考えられる。

図-6に示す降伏モーメントの算出式をもとに、橋脚が2.4mの正方形断面で板厚が0.05mであることから、橋脚の降伏モーメントは約84.8MN・mであると算出され、これは図-5のどのケースにおいても約84.8MN・mで塑性化し始めていることが確認できる。

P4橋脚について、固定支承の数が同じであるCase I

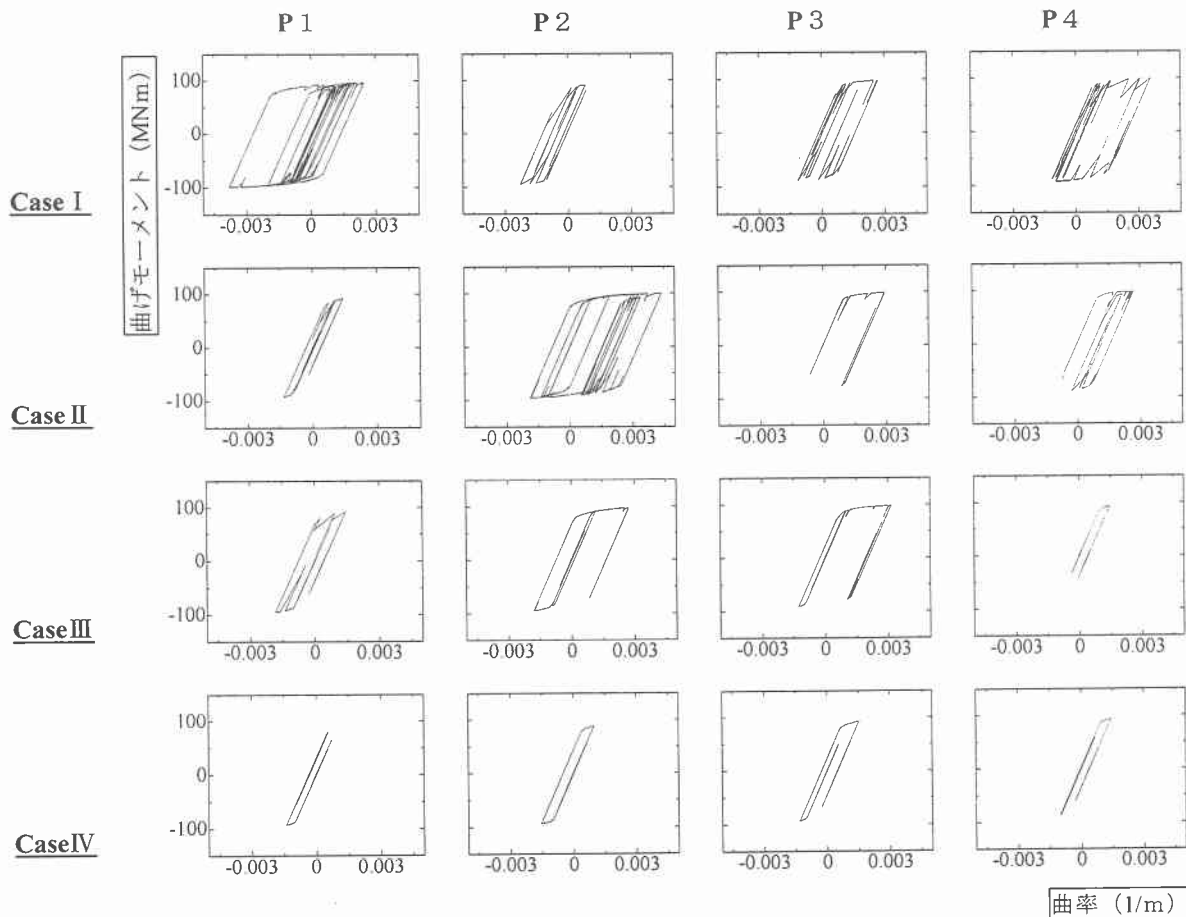


図-5 橋脚基部の曲げモーメントー曲率関係

$$M_y = \frac{4\sigma_y}{3a} [a^3b - (a-t_1)^3(b-t_2)]$$

$$= 84.8 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

橋脚断面図

図-6 降伏モーメント算出式

と Case II を比較し、Case I の方がより大きな塑性域が生じている。さらに、Case I は固定支承部から離れるに従い大きな塑性履歴ループが現れている。

Case III では、中心部に固定支承を持ち、左右対称になっているが、P1 橋脚は P4 橋脚よりも塑性域が大きい。このことは水平力ー水平変位関係のグラフより、水平力の差異により生じたものだと考えられる。

すべての鋼製支承を固定支承とする Case IV において、中央部の P2 および P3 橋脚に発生する塑性履歴ループは桁端部の P1 および P4 橋脚よりもやや大きいものの、ほぼ同じような結果を得ている。つまり、固定支承部に作用する水平力が均等化され、同程度の損傷に納まるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では鋼製橋脚を有する 3 径間連続曲線高架橋を対象として、幾何学的非線形性と鋼材の降伏を考慮した弾塑性有限変位動的応答解析法を用いて解析を行い、鋼製支承条件が連続曲線高架橋の非線形動的応答性状に与える影響について比較検討した。

本研究で扱ったような曲線高架橋の場合、設計上最も有利となる場合は全ての支承を固定支承とする Case IV である。また、固定支承部を 1 つだけ設けるのであれば、桁端に置くよりも中心部に置く方が有利であると考えられる。さらに、固定支承部と可動支承部を対称に配置しても左右とも同じ地震力が発生するとは限らないことが確認された。水平力と曲げモーメントの関係について、支承部の水平力と橋脚基部の塑性履歴ループの大きさは必ずしも比例しないと考えられる。

本研究では Case IV が最も有利な鋼製支承の配置方法と考えられるが、温度変化による上部構造の変形、架設時の有利性、橋脚の損傷について十分に把握しておく必要がある。

参考文献

- 1) 林川俊郎・大嶽敦郎・中島章典・佐野雅章：3 成分大地震動を受ける連続曲線高架橋の非線形応答解析、土木学会構造工学論文集、Vol. 45A、pp849~858、1999.3
- 2) 林川俊郎・荻島知之・勝山寛：地震波の入力方向が連続曲線高架橋の非線形応答に与える影響、土木学会北海道支部論文報告集、第 57 号、pp240~243、2001.2
- 3) 林川俊郎：橋梁工学 朝倉書店 2000.4