

模擬的な三径間曲線ラーメン高架橋の大地震時非線形応答特性

Nonlinear Dynamic Response of 3-Span Curved Rigid Frame Viaduct under Great Earthquake

北海道大学工学部環境社会工学科

北海道大学大学院工学研究院

北海道大学大学院工学研究院

北海道大学大学院工学研究院

北海道大学大学院工学研究院

○学生員

フェロー会員

正会員

正会員

学生員

嶋田琢磨(Takuma SHIMADA)

林川俊郎(Toshiro HAYASHIKAWA)

松本高志(Takashi MATSUMOTO)

何 興文(Xingwen HE)

吉野絢人(Kento YOSHINO)

1. まえがき

1995年に発生した兵庫県南部地震、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震に代表されるように、巨大地震動は土木構造物に甚大な被害を及ぼす。橋梁が巨大地震動を受けた場合、ある程度の損傷は許容するが落橋などの致命的な被害が無いようにすべきであり、曲線橋のような三次元的に変化する橋梁では上部構造、下部構造、支承部全体を一つの構造系として捉え、橋梁全体系が巨大地震動を受けた場合の動的挙動を調べる必要があると考える¹⁾。

また、2011年東北地方太平洋地震では、兵庫県南部地震以降の耐震補強、耐震設計により、巨大地震動に対して落橋、崩壊した道路橋は、鹿行大橋といったパイルベント式橋脚を有するものに限定され²⁾、ほとんどのものは津波により破壊されるものだった。これは上部構造と下部構造の間に存在する支承が、鉛直荷重下向きの力を主に考えており、津波による浮力や転倒力に対しては弱い構造であることによる。したがって、上部構造と下部構造を剛結合としたラーメン構造ならば巨大地震動発生後、到達する可能性のある津波により、上部構造の流出を防ぐことができ、早急に交通を確保することができると思われる。

そこで本研究では、三径間連続曲線高架橋を立体骨組構造にモデル化し、幾何学的非線形と材料非線形を考慮した弾塑性有限変位動的応答解析を用いて、橋脚、上部構造を固定し、支承部が鋼製支承、免震支承、剛結合の三種類について解析を行い、比較考察する。具体的には、上部構造と橋脚塔頂部の応答変位軌跡、橋脚基部の曲げモーメント—曲率関係に着目する。

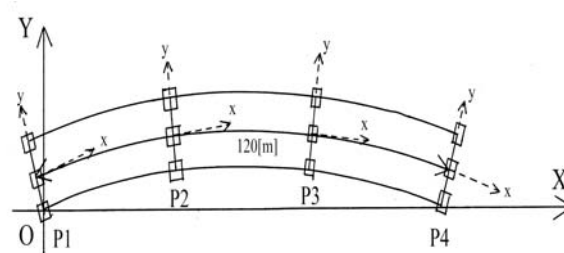
2. 解析モデル

本研究は連続曲線高架橋の三次元非線形挙動について検討することを目的としているため、上部構造、支承部、橋脚の動的相互作用を考慮することのできる解析モデルとして、図-1のような三径間連続曲線高架橋を対象とする。また、橋脚高さが全て同一のもの(CASE1)と、異なるもの(CASE2)のモデルを設定し、支承部の違いによる動的応答性状を比較する。

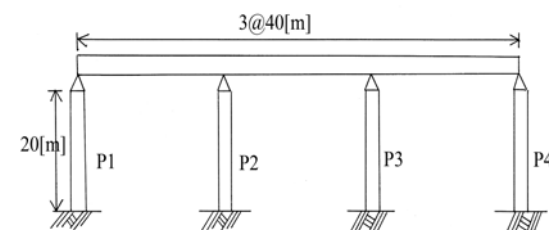
解析モデルは上部構造および橋脚を、梁—柱要素にモデル化し、上部構造は62要素に、橋脚は5要素に分割する。さらに、それぞれの要素を断面方向に24分割、部材軸方向に5分割するファイバー要素を用いる。また使用する鋼材の応力—ひずみ関係をバイリニアモデ

ルとし、降伏応力 235[MPa]、弾性係数 200[GPa]、弾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、一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。

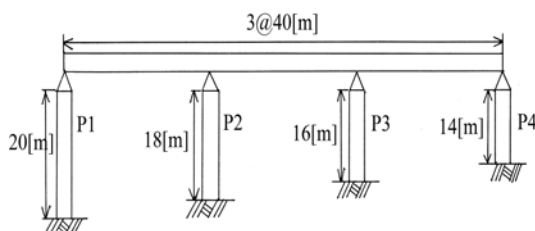
なお、剛結合条件としては、支承部のばね係数を十分大きい値にすることで、模擬的なラーメン構造とした。鋼製支承は4本橋脚のうち2点固定、2点可動とした。従来の設計では1本のみを固定とするものが多用されたが、巨大地震発生時にその橋脚に大きな負担が生じ大きく損傷するため、本研究では2点固定とするものを採用し、その配置は一例として(MFFM)とした。免震支承は全橋脚に配置するものとし、実橋で多く行われているように橋軸直角方向には固定とした。



(a) 支承の配置



(b) CASE1 橋脚高さが全て同一のモデル



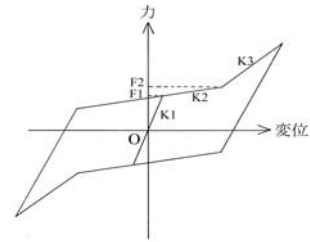
(c) CASE2 橋脚高さが異なるモデル

図-1 三径間連続曲線橋の解析モデル

表－1 支承部の諸元(k[MN/m] F[MN])

	可動支承	固定支承	免震支承	剛結合
k1	49.0	980.4	13.10	980392.0
k2	0.0098	980.4	2.05	980392.0
k3	980.4	980.4	5.41	980392.0
F1	0.060	980.4	0.33	980.4
F2	0.061	980.4	0.68	980392.0

※端数がでていいるのは工学単位系[tf]を102で除し, SI単位系に換算したためである



図－1 トリリニア型モデルの概念図

2.1 上部構造・下部構造

上部構造は支間長 40[m], 鋼主桁 3 本と鉄筋コンクリート床版からなる総重量約 8.82[MN]橋長 120[m]の三径間連続桁橋とした。橋脚は震度法および許容応力度設計法に基づき概略設計を行い, 断面幅 2.4[m], 板厚 0.05[m]の正方形断面の鋼製橋脚を採用する。なお, case1 では橋脚高さを全て一定の 20[m]に, case2 では P1 橋脚を 20[m], P2, P3, P4 橋脚をそれぞれ 18[m], 16[m], 14[m]とした。橋脚基礎は十分剛である場合を考え固定条件とした。

本研究では支承部の条件（非線形ばねモデル）による違い, 橋脚高さの違いによる高架橋全体の動的非線形応答に着目していることから, 橋脚は同一断面のものをを用いる。支承配置方向は, 橋軸接線方向である。

2.2 支承部モデル

支承部は鋼製支承, 免震支承, 剛結合の 3 種類を, 支承部の摩擦や移動制限装置, 水平力－水平変位の非線形履歴の影響を考慮するために非線形ばねに設定した。各種支承の諸元は表－1 に示すとおりである。

(1) 鋼製支承

鋼製支承において固定支承は, 橋脚と上部構造が一体となって挙動するので水平ばね定数を十分に大きな値に設定する。可動支承は鉛直反力により静止摩擦力を生じ, 最大静止摩擦力を超えると動き出し, 変位制限装置衝突後は橋脚と一体となって挙動するものとした。なお変位制限量は, 10[cm]とする。

(2) 免震支承

免震支承は鉛プラグ入り積層ゴム支承とし, 水平力－変位関係はハードニングを考慮した図－2 に示すようなトリリニア型とした。橋軸直角方向は固定条件で, 十分大きいばね定数を設定した。

(3) 剛結合

実際の構造とは異なるが, 本研究では上部構造, 橋脚をすべて同一の断面諸元とした。支承部の違いによる動的応答性状について比較することを目的としているため, 単純に十分大きなばね定数を設定し, ヒンジの回転を拘束することで, 模擬的なラーメン構造とした。

3. 動的応答解析結果

本研究では入力地震波として兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録を使用し, N－S成分を全体座系の X 方向に, E－W成分を Y 方向に, U－D成分を鉛直方向に, 三成分同時入力をした。上部構造と橋脚塔頂部の全体座標系

X－Y軌跡を, 図－3, 図－4 に示す。横軸はX変位[m],

縦軸はY変位[m]を表している。本研究では曲線半径が, $R=\infty$, $R=100$ [m], $R=200$ [m], $R=400$ [m]と異なる場合について数値計算を行っている。しかし, ここでは $R=100$ [m]の解析結果のみ述べることにする。

(1) 上部構造と橋脚塔頂部の応答変位軌跡

まず, 固定支承と剛結合の高架橋については, 上部構造, 橋脚塔頂部ともに同様の軌跡を描いていることが確認できる。免震支承や可動支承は上部構造と橋脚塔頂部の軌跡が異なるが, 残留変位の影響で最終的にはほぼ同じ座標に収束していることがわかる。支承条件による上部構造の軌跡については, 免震支承が最も応答が大きく, 続いて鋼製支承, 剛結合である。ここでは曲線半径 100[m]のものであり, 免震支承の上部構造の軌跡はおおよそ橋軸接線方向に卓越しているが, 鋼製支承, 剛結はその傾向が薄い。橋脚高さの影響については, 不等橋脚の場合, 等脚の場合に比べ全体的に応答が小さい。特に橋脚高さの最も低い P4 橋脚塔頂部は, 最も小さい応答変位である。また, 橋脚の高い P1, P2 橋脚では上部構造の軌跡が橋軸方向以外にも大きく描くが, 橋脚の低い P4 橋脚では, 橋軸方向の指向性が強い。なおいずれの場合も橋脚塔頂部の軌跡は, 橋軸方向の影響が少ない。橋脚高さが低くなるにつれ, 橋脚塔頂部応答軌跡も小さくなっている。一方上部構造は全体が一体となって動いているため, 橋脚高さによって軌跡は変化するが, その最大変位は大きく変化しない。したがって, 上部構造と橋脚塔頂部の応答変位の差を支承部で吸収しているが, 免震支承では上部構造の応答変位が大きく, 特に不等橋脚条件の P3, P4 橋脚では支承の負担する割合が大変大きい。その場合, 支承高さによっては破断してしまう可能性があると考えられる。

(2) 橋脚基部の曲げモーメント－曲率

橋脚基部の曲げモーメント－曲率関係を図－5, 図－6 に示す。横軸は曲率[1/m]であり, 縦軸は曲げモーメント[MN・m]である。ここでの曲げモーメント－曲率は全体座標系ではなく, 局所座標系に関するものであることに注意されたい。すなわち, M_x-C_x は, 橋軸方向に関する曲げモーメント－曲率関係であり, M_y-C_y は橋軸直角方向に関するものである。 M_x-C_x について見て見ると, 鋼製支承条件に関しては固定支承 P2, P3 の履歴ループが大きいことがわかるが, 免震支承では P1 から P4 橋脚にかけて履歴ループが小さくなり, 剛結合では

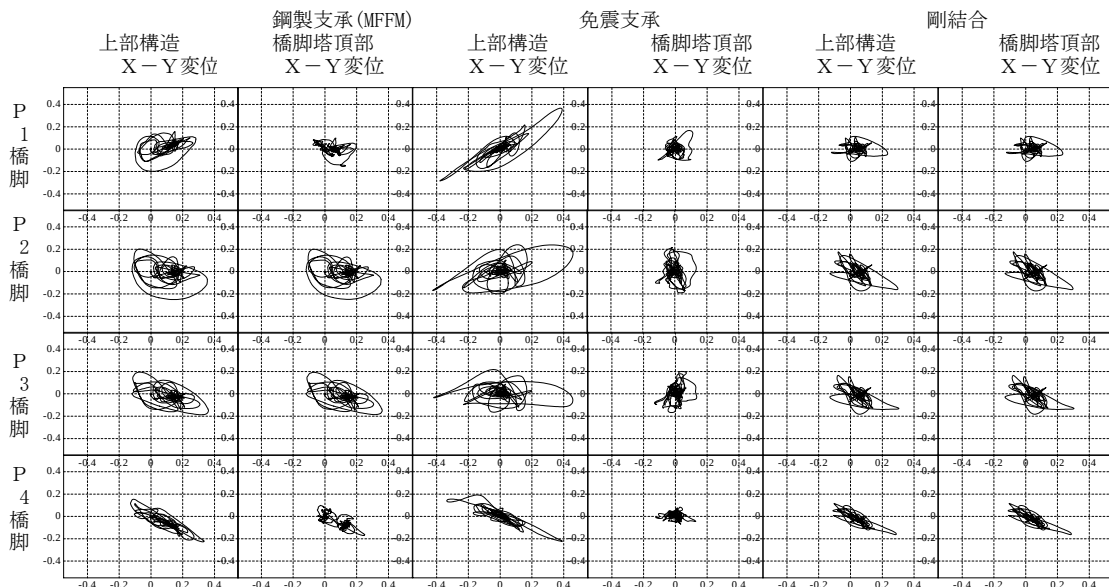


図-3 上部構造および橋脚塔頂部における応答変位軌跡 (case 1)

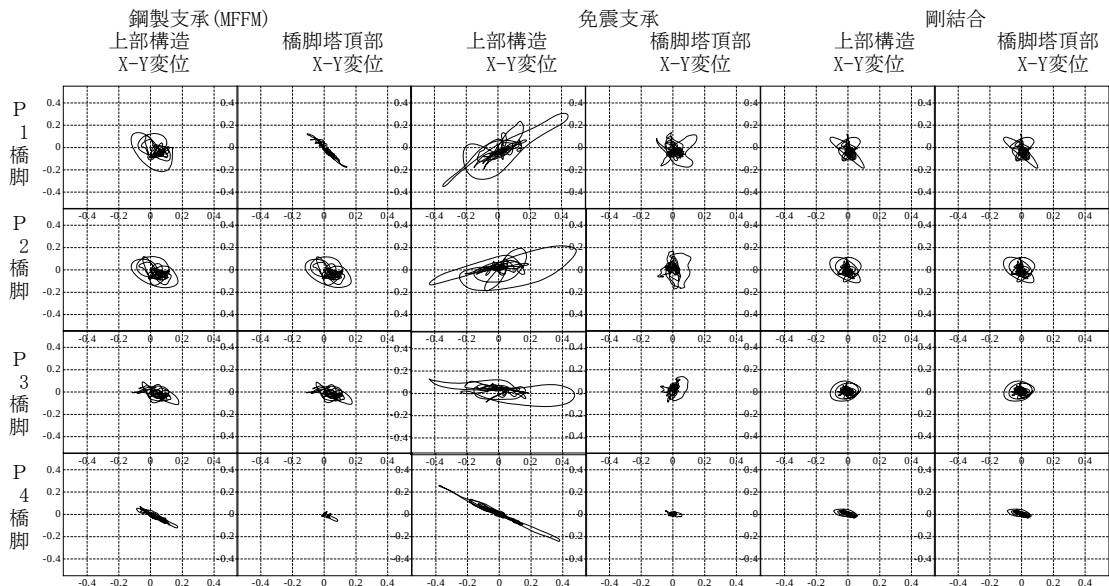


図-4 上部構造および橋脚塔頂部における応答変位軌跡 (case 2)

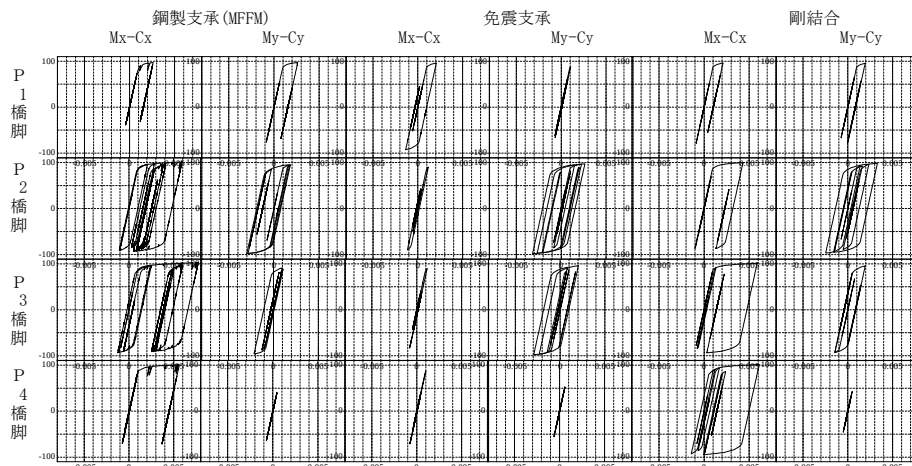
その逆になっている。中には弾性領域に収まっているものもある。My-Cy について見てみると、等脚の場合では P2, P3 橋脚が両端部, P1, P4 橋脚の履歴ループよりも大きくなっている。これは上部構造死荷重の影響であり、P2, P3 橋脚の方が端部橋脚の P1, P4 橋脚よりも大きな死荷重を受け持っており、その分大きな慣性力が働くためと考えられる。しかし、不等橋脚の場合では、橋脚高さが低くなるにつれて、履歴ループがおおよそ小さくなっている。これは、橋脚高さが低くなるにつれ、上部構造の応答軌跡も小さくなることによる。橋脚基部の損傷は橋脚塔頂部の軌跡の大きさが関わっている。

4. まとめ

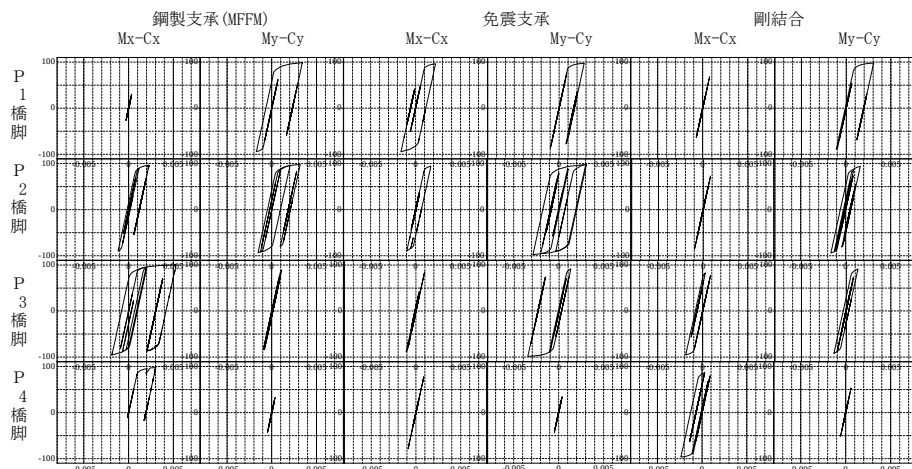
本研究は、模擬的な三径間ラーメン高架橋について、一般的な鋼製支承や免震支承を有する高架橋と比較することで、それらの支承条件に比ベドのような問題点があ

るのか調べることを目的としている。その問題点を考えるため本研究では、橋脚と上部構造の諸元、地震波を固定し、曲線半径と橋脚高さを変化させて、上部構造と橋脚塔頂部の応答変位、橋脚基部の曲げモーメント・曲率に着目して考察した。なおラーメン橋の場合、橋脚塔頂部や上部構造の橋脚との接合附近にも塑性化する可能性があり調べる必要があるが、現段階では行うことができなかった。

鋼製支承については、可動支承を配置する橋脚では橋脚の損傷が低減し、固定支承を配置する橋脚が集中的に損傷する。大地震動を受けた際、意図した部材を損傷させることは、その後の補修を行いやすくするという観点では良いが、ある部材のみ大きな損傷を受けることで、その後補修不能という事態にならないよう注意すべきものとする。免震支承については支承を介して上部構造



図－5 橋脚基部の曲げモーメント－曲率関係（case 1）



図－6 橋脚基部の曲げモーメント－曲率関係（case 2）

の応答変位を大きくすることで固有周期を長周期化し、また支承部の弾力的な変形性能によって上部構造の慣性力を低減することで、橋脚の損傷を大幅に小さくすることができる。剛結合は、大地震への対処法である免震とは逆であり、固有周期が短周期化することで、一般的な地震波加速度スペクトルの卓越周期と一致しやすくなり、共振する可能性がある。さらに地震による力を部材そのものの力で対処しなくてはならない。したがって、部材断面が大きくなり、長支間には適さず、不等沈下や温度変化に対する影響も大きい。このような不利な点を有し、高次不静定かつ三次元的な広がりを持つラーメン曲線高架橋について、津波という二次災害の前段階である大地震動に対してどのような動的挙動を示すのか研究する必要がある。不等橋脚の場合を調べた理由としては、橋脚高さが同じ場合の上部構造の最大応答変位と、不等橋脚の場合の最大応答変位が仮に等しかったとき、剛結条件の橋脚高さの低いものは大きく損傷すると考えられるからである。なぜならば上部構造に変位が生じたとき、橋脚高さが高い橋脚よりも低い橋脚の方が、橋脚基部の曲率が大きくなる必要があるからである。しかし橋脚高さが低い橋脚を持つ不等橋脚の場合では、上部構造の応答変位が小さくなり、懸念された問題は発生しなかった。

今回使用した解析モデルは、単純に支承部モデルのば

ね係数のみを十分に大きくしただけの模倣的なラーメン高架橋のモデルであり、今後の検討課題としてラーメン高架橋に適した上部構造、下部構造を概略設計し、その諸元を反映させた解析を行う必要がある。

<参考文献>

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2008.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，2011.
- 2) 林川俊郎：橋梁工学 朝倉書店，2000.
- 3) 土木学会：道路橋支承部の改善と維持管理技術，2008.
- 4) 林川俊郎・中井仁太郎：鋼製支承の配置を考慮した曲線格子高架橋の大地震時非線形応答，平成 17 年度土木学会北海道支部論文報告集，第 62 号，第 1 部門 NO.15，2006.
- 5) 林川俊郎・大嶽敦郎：三成分地震波入力による鋼製橋脚の非線形挙動，平成 8 年度土木学会北海道支部論文報告集，第 53 号，pp.102-105，1997.
- 6) 林川俊郎・荻島知之：橋脚高さの異なる 3 径間連続曲線高架橋の大地震時非線形挙動，平成 11 年度土木学会北海道支部論文報告集，第 56 号，pp16-21，2000.