I - 1 3

3 成分地震波の入力方向と支承条件を考慮した曲線高架橋の非線形応答性状

Dynamic behavior of curved viaduct system in consideration of direction of three-dimensional earthquake and bearing conditions

北海道大学大学院工学研究科	F 会員	林川 俊郎(Toshiro Hayashikawa)
北海道大学大学院工学研究科	学生員	小川 伸也(Shinya Ogawa)
北海道大学大学院工学研究科	学生員	ダニエル・ルイス(Daniel Ruiz Julian)
北海道大学大学院工学研究科	学生員	阿部 健次(Kenji Abe)

1. まえがき

先の兵庫県南部地震では,港湾施設や新幹線,さらに 地下鉄や高速道路などの公共都市施設に甚大な被害が生 じた¹⁾.特に,道路や鉄道の高架橋で数多くの被害が発 生した.橋梁の被害は,支承や橋脚など地震力が集中す る箇所での損傷,崩壊が原因となったものが多く,これ らの被害に伴って,上部構造も著しい被害が生じた.高 架橋は上部構造・支承・橋脚で構成されており, 個々の 構造部材の耐震性能のみ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,構成部材の性能照査を行 うことが重要であると思われる.そのため,上部構造, 支承そして橋脚を1つの構造システムとして考えた高架 橋全体系が大地震動を受けた場合の動的挙動を調べなけ ればならない.つまり,兵庫県南部地震のような大規模 地震動が高架橋に作用するときに部材強度のみで抵抗す るには限界があると思われる.そこで,橋脚,支承部お よび落橋防止システムなどの構成部材のある程度の損傷 は許し,高架橋全体系としての機能を保持しながら,大 規模地震にも耐え得る構造を持つことが重要である.こ のように耐震性に対する要求性能が高まるなか, 少子高 齢化や熟練労働者の減少への対応,コスト縮減などの目 的から,耐震性を確保しつつ,施工性,安全性,経済性 を満たした合理的な下部構造・基礎構造・支承の設計法・ 構造・工法が望まれている.

また、曲線高架橋は上部構造が曲線であり,3次元的 な広がりを有する構造であることから,平面解析による 正確な挙動の評価は困難である.そのため,動的解析を 行うためには3次元動的非線形解析が不可欠であると考 えられる^{2,3)}.また,実際には地震動が橋梁構造物のど の方向から作用するかわからないため,3次元非線形解 析を行う際には地震波の入力方向を考慮する必要がある と考えられる.

そこで本研究は,3径間連続曲線高架橋を立体骨組構 造にモデル化し,幾何学的非線形性と材料非線形性を考 慮した弾塑性有限変位動的応答解析法を用いて地震波の



図-1 3径間連続曲線高架橋の解析モデル

入力方向を変化させた3次元的動的解析を行い,地震波 の入力方向や支承条件の違いが曲線高架橋の動的応答性 状に及ぼす影響を比較検討する.

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 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する.

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.また,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 向と同様にし,橋脚の基部は十分に剛である場合を考え 固定とした.



図-2 支承の配置方向と地震波の入力方向

2.2. 支承部

本研究で用いる支承部は水平2方向,鉛直方向,回転 3方向のばね要素にモデル化する.水平2方向は支承条 件に応じた非線形ばねの特性を有しており,鉛直方向に ついては剛な結合条件を表すために十分大きなばね定数 を設定し,回転方向についてはヒンジ結合を表現するた めに小さなばね定数を設定する.

支承の配置方向については,実設計においては接線方 向に支承を配置することが多いと思われるが,支承配置 の影響を比較検討するため,図-2に示すように温度変化 に伴う曲線桁の伸び変形を放射方向に許すよう P1 橋脚 から P2・P3・P4 橋脚の方向に放射状に支承を配置する 場合と曲線桁の接線方向に支承を配置する場合の 2 通り を考える.なお,図-2に示すように橋軸方向を X 軸,橋 軸直角方向を Y 軸とする全体座標系(X-Y-Z 座標系)を 設定する.また,支承の配置方向を x 軸,配置直角方向 を y 軸とする局所座標系(x-y 座標系)を各橋脚上に設定す る.

また,支承については次に示す(1)鋼製支承モデル(2) 片免震支承モデル(3)両免震支承モデル(4)両免震両端固 定モデルの4通りについて比較検討する.

(1)鋼製支承モデル

本研究では P1 橋脚には鋼製固定支承を, P2・P3・P4 橋 脚には鋼製可動支承を採用する.ここで、鋼製固定支承, 鋼製可動支承を表すばねの水平力-水平変位関係を図-3, 図-4 に示す.鋼製固定支承は固定の条件とするため,水 平2方向に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の影響を考慮したものを採用する. ただし,支承の配置直角方向に関しては剛な条件とする ために十分大きなばね定数を設定する、支承の配置方向 に関して,K1は支点反力による摩擦力が最大摩擦力以下 の状態での剛性であり, K2 は支承部に作用する水平力が 最大摩擦力を超えて支承が滑るときの状態での剛性, K3 は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の剛性である.ここで,F1は最大 摩擦力を超えて支承部が滑り始める水平力であり,支点 反力に静止摩擦係数を乗じた値である.また,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し, F2 は支承の変位が変位制限構造に達したときに支承部 に発生する水平力である.

(2)片免震支承モデル

本研究では,支承の配置方向は免震支承の特性を有し, 支承の配置直角方向に関しては固定の状態としたものを 片免震支承モデルとする.なお,免震支承はアイソレー ターとダンパーが一体となった鉛プラグ入り積層ゴムタ イプの免震支承を考え,水平ばねの水平力-水平変位関係 を図-5 に示すようなバイリニア型に設定する.

(3)両免震支承モデル

片免震支承モデルに対し,支承の配置方向,配置直角 方向の両方向に免震支承の特性を有するものを両免震支 承モデルとする.

(4)両免震両端固定モデル

P1・P4 橋脚は支承の配置方向のみ免震支承の特性を有 し,支承の配置直角方向に関しては固定の状態(片免震 支承)とし,P2・P3 橋脚は支承の配置方向,配置直角方 向の両方向に免震支承の特性を持たしたもの(両免震支 承)とする.

3. 解析方法と入力地震波

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 法(= 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.上部構造および橋脚をはり柱要素 にモデル化し,上部構造は1スパン40mを8要素に,橋 脚を5要素に分割する.さらに,各要素の降伏条件を判 定するために,はり柱のそれぞれの要素を断面方向に12 分割,部材軸方向に5分割するファイバー要素を用いて 表現する.断面の降伏はせん断応力による影響は小さい ものとして,各ファイバー要素における垂直応力と垂直 ひずみで評価する.さらに,面内および面外の2軸曲げ モーメントと軸力の相関は断面を2次元的にファイバー 要素に分割することにより考慮する.本研究で用いるフ ァイバー要素は,解析の際にファイバー要素の応力-ひ ずみ関係を求めやすくするために,箱型断面を I 型断面 に置き換え, I 型断面において断面方向にウェブを 10 分割し,上フランジ,下フランジと合わせ12分割し,部 材軸方向には5分割し1要素を60個のファイバー要素に 分割するものとする.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h=5%を基準とする^{4,5)}.

入力地震波には兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録を使用 する.この地震波は水平2方向,鉛直1方向からなる3 成分地震波であり,地震波の入力方向角 は,橋軸方向 からの角度とし,その方向に N-S 成分を,その直角方向 に E-W 成分を作用させる.また, を0°から180°ま で 15°ピッチで変化させて動的応答解析を行う.





4. 動的応答解析結果

4.1. 上部構造の応答変位

各橋脚上の上部構造の最大応答変位と地震波の入力方 向角の関係を図-6に示す.横軸は地震波の入力方向角, 縦軸は上部構造の最大応答変位である.また,応答変位 は全体座標系(X-Y-Z系)を用いて表す.

X 方向では鋼製支承モデルに比し,免震支承を用いた 場合の最大変位が全体的に大きくなっている.

両免震支承では支承の配置直角方向も免震支承の特 性を有しているために地震波の入力方向角によっては Y 方向の変位が非常に大きくなっている.橋軸直角方向を 免震支承とすると変位が非常に大きくなり伸縮装置の損 傷の可能性を考慮しなければならない.両免震両端固定 モデルの結果を見ると,両免震支承モデルに比し,P1, P4橋脚上での Y 方向の変位が小さく抑えられており,伸 縮装置の損傷の可能性も小さくなることがわかる.

4.2. 支承部に作用する水平力

支承部に作用する最大水平力と地震波の入力方向角 の関係を図-7 に示す.横軸は地震波の入力方向角,縦軸 は支承部に作用する最大水平力である.また,支承の水 平力は支承配置方向を x 軸,直角方向を y 軸とする局所 座標系を用いる.

鋼製支承モデルでは,可動支承を有する支承部で非常 に大きな水平力が発生している.これは可動支承が変位 制限構造に衝突したときに大きな水平力が発生したもの であり,地震波の入力方向角により非常にばらつきがあ る.支承の回転角と地震波の入力方向角が近い値のとき に可動支承が強く変位制限構造に衝突し大きな水平力が 発生する.しかし,上部構造は一体となって挙動するた めに地震波の入力方向角と同じ方向に上部構造は挙動す るわけではない.そのため支承の回転角と地震波の入力 方向角が近くても支承の配置方向に上部構造が大きく挙 動しなければ,大きな水平力が発生するわけではなく, 必ずしも支承の回転角と地震波の入力方向角が近いとき



地震波の入力方向角の関係

に大きな水平力が発生するわけではない.y 方向に関し ては全ての支承部で固定条件であり,地震波の入力方向 角の違いによるばらつきは少ない.また,内側2本の橋 脚の支承部で水平力が若干大きくなっており,内側2本 の橋脚に地震力が集中することが考えられる.

免震支承を用いた場合のモデルでは,免震支承の特性 を有している方向では非常に水平力が小さくなっている. 両免震両端固定モデルでは P1, P4橋脚の支承部の y方 向で若干水平力が大きくなっているが,他の支承条件と それほど大きな差はみられない.

4.3. 橋脚基部に働く曲げモーメント

橋脚基部に働く最大曲げモーメントと地震波の入力方 向角の関係を図-8に示す.横軸は地震波の入力方向角 であり,縦軸は橋脚基部の曲げモーメント(M)を橋脚 断面の降伏曲げモーメント(My)で除した値である.こ こで,橋脚の降伏モーメントは84.8MNmである.した がって,この曲げモーメント比(M/My)の値が,1以内 であれば,橋脚基部は弾性範囲内であることを意味し, 降伏は起こらないと考えられる.逆にこの値が1以上で あれば,橋脚基部は塑性領域にあることを意味し,橋脚 基部が損傷することも考えられる.

図中においては, *M*/*M_y*=1 を太線で示す.また、橋脚 基部の曲げモーメントは支承配置方向を *x* 軸,直角方向 を *y* 軸とする局所座標系を用いる.

鋼製支承モデルでは,固定支承部を有する P1 橋脚の 基部で大きな曲げモーメントが発生しており,橋脚基部 が損傷することが予想される.可動支承部を有する橋脚 の基部でも地震波の入力方向角によっては弾性範囲内に 収まっているときもあるが,ほとんどの場合において塑 性領域にあり,橋脚基部の損傷が予想される.y 方向に 関しては内側2本の橋脚基部で曲げモーメントが大きく なっていることがわかる.

免震支承を用いた場合には ほとんどの場合において弾 性範囲内に収まっているが,地震波の入力方向角によっ



図- 橋脚基部の最大曲げモーメント比と 地震波の入力方向角の関係

ては塑性領域に入っている部分もあるが鋼製支承に比し, 曲げモーメントの値は小さくなっている.両免震両端固 定モデルでは P1・P4 橋脚の y 方向で地震波の入力方向角 によっては大きな値を示している.

4.4. 橋脚基部の曲率

橋脚基部の最大曲率と地震波の入力方向角の関係を 図-9に示す.横軸は地震波の入力方向角,縦軸は橋脚基 部の最大曲率である.また,橋脚基部の曲率は支承配置 方向をx軸,直角方向をy軸とする局所座標系を用いる.

鋼製支承モデルでは, x 方向で固定支承部を有する P1 橋脚の曲率が非常に大きくなっていることがわかる.可 動支承部を有する橋脚でも曲率が P1 橋脚ほどではない が大きくなっていることがわかる.y方向に関しては, 外側2本の橋脚は曲率が非常に小さくなっているが,内 側2本の橋脚では地震波の入力方向角が橋軸直角方向に 近い角度のときに曲率が大きくなっていることがわかる.

片免震支承モデルでは,内側2本の橋脚のy方向で曲 率が大きくなっている.両免震支承モデルではy方向の 曲率も非常に小さくなっており,両免震両端固定モデル では外側2本の橋脚で地震波の入力方向角によっては若 干大きな値を示しているが,他のモデルに比しそれほど 大きな差はない.

5. あとがき

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材料非線形性を考慮 した弾塑性有限変位動的応答解析法を適用して,3成分 地震波の入力方向と支承条件の差異が曲線高架橋の非線 形動的応答に与える影響について比較検討した.

(1) 鋼製支承モデルに比して,免震支承を用いた場合に 変位が大きくなる.両免震支承では橋軸直角方向に 生じる変位が大きく,伸縮装置が損傷する可能性が 大きくなるが,外側2本の橋脚の支承配置直角方向 を固定条件とすることで橋軸直角方向に生じる変位

図-9 橋脚基部の最大曲率と 地震波の入力方向角の関係

が抑えられる.

- (2) 免震支承を用いることで水平力は小さく抑えられ、 鋼製支承モデルでは可動支承部で変位制限装置に衝 突した際に非常に大きな水平力が発生する.
- (3) 鋼製支承モデルでは固定支承部で塑性化することが 考えられる.片免震支承モデルでは,支承の配置方 向ではほとんど弾性範囲内に収まるが,支承の配置 直角方向の曲げモーメント,曲率が大きくなる.両 免震支承モデル,両免震両端固定モデルでは曲げモ ーメント,曲率が全体的に小さな値を示すが,両端 を固定することで外側2本のy方向で若干大きな値 を示す.

以上のように鋼製支承モデルに比して免震支承を用い ることで,水平力,曲げモーメント等を小さく抑えるこ とができる.しかし,支承の配置直角方向も免震支承の 特性を有すると,変位が大きくなり,伸縮装置が損傷す る可能性を考える必要がある.両免震両端固定モデルに することで外側2本の橋脚の曲率は若干大きくなるが, 橋軸直角方向に生じる変位を抑えることができる.

参考文献

- 1) 土木学会:阪神・淡路大震災調査報告書 土木構造物の被害,橋梁 ,丸善,1992.12.
- 2) 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, pp.849-858, 1999.3.
- 渡邊英一・杉浦邦征・北根安雄:地震時における構 造物の3次元的挙動,構造工学論文集, Vol.43A, pp.897-906, 1997.3.
- 4) 林川俊郎:橋梁工学 朝倉書店 2000.4.
- 5) 巣山藤明・真子幸也・落合稔・坂本佳子・野中哲也: ファイバーモデルを用いた鋼構造物の耐震設計法に 関する一考察,橋梁と基礎, pp.32-40, 2000.9.