

地震波の入力方向に着目した 曲線高架橋の非線形応答に関する研究

林川俊郎¹・荻島知之²・Felix Daniel Ruiz Julian³

¹F 会員 工学 北海道大学大学院工学研究科 (〒001-0013 札幌市北区北 13 条西 9 丁目)

²学生員 工学 北海道大学大学院工学研究科 (〒001-0013 札幌市北区北 13 条西 9 丁目)

³Student Member of JSCE, Graduate School of Engineering, Hokkaido University

一般的に橋梁構造物の設計の段階で動的応答解析を行う場合、地震波を橋軸方向に作用させることが多い。曲線高架橋は 3 次元的な広がりを持つ構造であり、地震時の挙動が複雑になるため、この方法では設計上不利になる部分を把握することができないと考えられる。

そこで本研究では、鋼製支承を設置した鋼製橋脚を有する 2 径間連続曲線高架橋を対象とし、地震波の入力方向を変化させた 3 次元動的応答解析を実施し、地震波入力方向の差異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ことにより、設計上最も不利な条件となる地震波の方向を明らかにする。

Key Words: nonlinear dynamic analysis, earthquake direction, curved viaduct, seismic design

1. まえがき

都市高速道路のような高架構造を有する構造物は、地震時の挙動が問題になる。高架橋は上部構造・支承・橋脚で構成されており、その耐震性能を向上させるためには、その構成要素を個別に設計するのみならず、高架橋全体系の地震時応答性状を把握し、想定される地震動に対して構成部材の性能照査を行うことが重要であると考えられる。そのためには上部構造・支承・橋脚からなる高架橋システムとして捉えた橋梁全体系の地震時動的挙動を調べておかなければならない¹⁾。

一般的に橋梁構造物を設計する場合、地震波を 1 方向に作用させた平面的な動的応答解析を行う場合が多い。直線橋に関しては、この方法で地震時挙動を把握することが可能であると考えられる。しかし、曲線高架橋は上部構造が曲線であることから、2 次元モデルに表現することが非常に難しく、地震時の挙動が複雑になるため、平面解析では設計上不利になる部分を把握することができないと考えられる²⁾。また、実際には地震力は構造物のどの方向から作用するか事前にはわからない。よって、地震波の入力方向を変化させた 3 次元動的応答解析を行い、その非線形応答性状を調べることに、曲線高架

橋の立体的な動的挙動を明らかにすることが必要である³⁾。

そこで本研究では、鋼製橋脚を有する 2 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、地震波の入力方向を変化させた 3 次元動的解析を行い、大地震時にもっとも負担が大きくなる部分を調べる。具体的には、上部構造の最大応答変位、支承部に作用する最大水平力、橋脚基部に作用する最大曲げモーメントを調べることに、設計上最も不利な条件となる地震波の方向を明らかにする。

2. 解析モデル

本研究は連続曲線高架橋の 3 次元動的な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できる基本的な解析モデルとして 2 径間連続曲線高架橋を対象とする。支承の配置方向は図-1 のように放射方向と接線方向の 2 つの場合を考える。また、全体座標系 (X-Y-Z 座標系) と支承の配置方向を x 軸、配置直角方向を y 軸とする局所座標系 (x-y 座標系) を設定する。

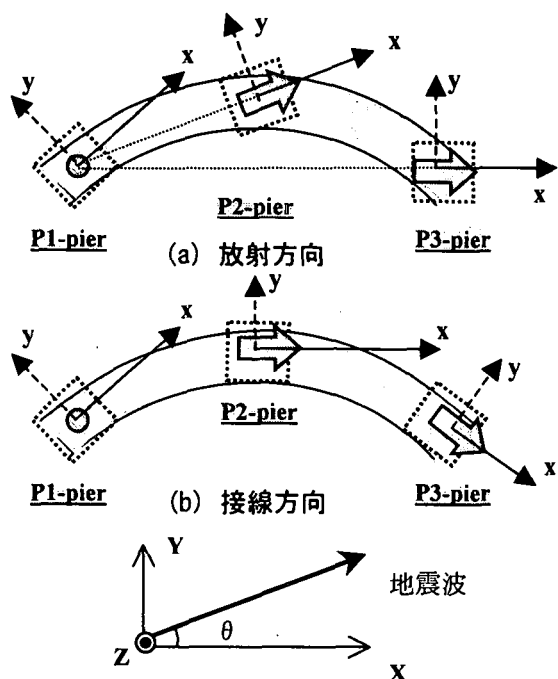


図-1 支承の配置方向と地震波の入力方向

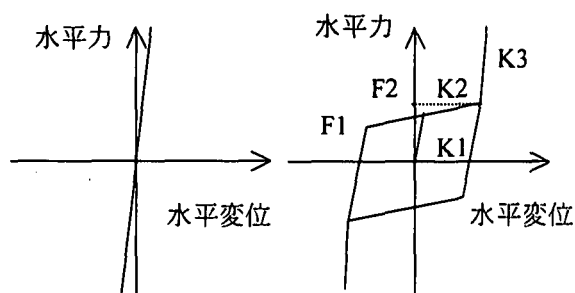
(1) 上部構造・橋脚

上部構造は曲率半径 100m、橋長 80m (2@40m)、総重量約 5.88MN の鋼箱桁を使用した。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 2.5m、板厚 0.05m の正方形箱型断面の鋼製橋脚を採用し、橋脚高さは全て 20m とする。橋脚の設計は、支承条件を考慮して断面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諸元を設定した。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、橋脚の基礎は十分に剛である場合を考え固定とした。

(2) 支承部

本研究では、鋼製支承を採用し、P1 橋脚上に鋼製固定支承、P2 橋脚・P3 橋脚上に鋼製可動支承を設置する。支承部は図-1 のように P1 橋脚から放射状に配置するモデルと、曲線桁の接線方向に配置するモデルを考える。ただし、可動支承は配置方向 (x 方向) にのみ動くものとする。

本研究で使用した鋼製支承モデルの水平力-水平変位関係を図-2 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を考慮したものを採用した。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状態におけるばね剛性を K1、水平力が最大摩擦力を超えて支承が滑っているときの剛性を K2、支承が変位制限構造に達したあとに、上部構造と一体と



(a) 鋼製固定支承 (b) 鋼製可動支承

図-2 支承部の水平力-水平変位関係

なって挙動している状態の剛性を K3 とする。ここで、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。

3. 入力地震波と解析手法

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 ($\beta = 1/4$) 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²⁾。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。入力地震波には II 種地盤標準波の N-S 成分を使用する。地震波は、図-2 のように全体座標系の X 軸から角度 θ をつけた方向に作用させ、 θ を 0° から 90° まで 15° ピッチで変化させて解析を行う。

4. 地震波の入力方向角と最大応答値の関係

地震波の入力方向角 θ (Direction Angle) を横軸に、上部構造の最大応答変位 (Displacement)、支承部に作用する最大水平力 (Force)、橋脚基部にかかる最大曲げモーメント (Moment) を縦軸にとった図を図-3~図-8 に示す。

(1) 上部構造の応答変位

放射方向モデルで X 方向変位が最大となるのは、全て橋脚で $\theta = 0^\circ$ のときであり、Y 方向変位が最大となるのは $\theta = 75^\circ$ のときである。また、接線方向モデルでは最大 X 方向変位が現れるのは、P1 は $\theta = 0^\circ$ 、P2・P3 は $\theta = 15^\circ$ のときであり、Y 方向変位が最大

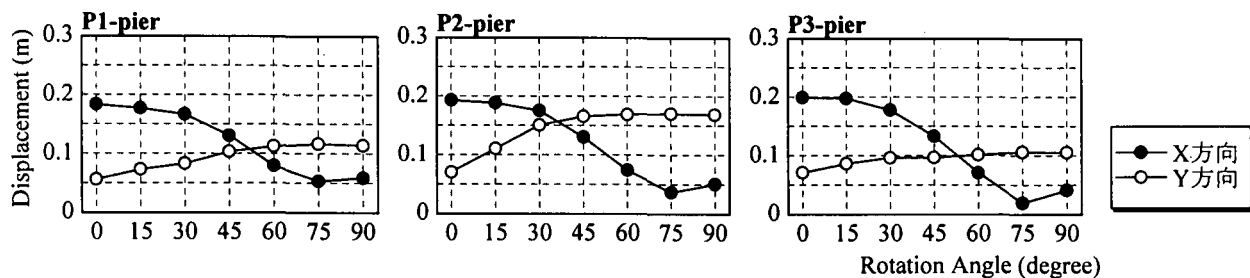


図-3 入力方向角 θ と上部構造の最大応答変位の関係 (放射方向)

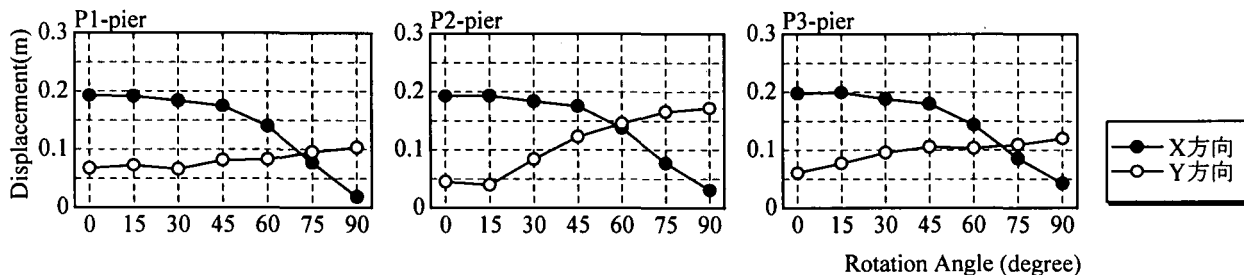


図-4 入力方向角 θ と上部構造の最大応答変位の関係 (接線方向)

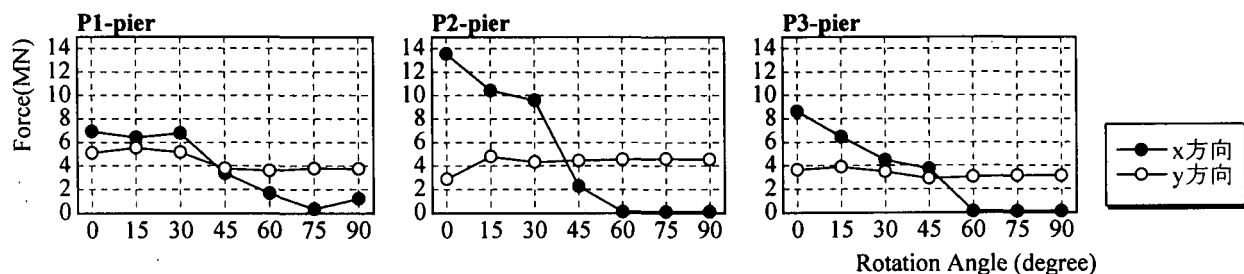


図-5 入力方向角 θ と支承部に作用する最大水平力の関係 (放射方向)

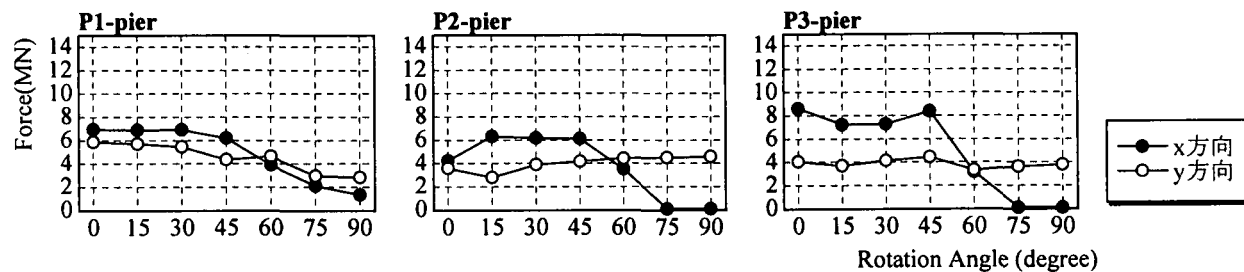


図-6 入力方向角 θ と支承部に作用する最大水平力の関係 (接線方向)

となるのは全ての橋脚で $\theta=90^\circ$ のときである。

ただし、どちらのモデルでも θ が小さいうちは X 方向変位に大きな差はなくほぼ同じ値を示しているが、放射方向モデルでは 45° 、接線方向モデルでは 60° あたりから徐々に小さくなっている。Y 方向変位では回転角 θ が大きくなると、それに対応して応答変位も大きくなっていることがわかる。

(2) 支承部の水平力

放射方向モデルでは、全ての橋脚で x 方向では θ が 0° のとき、y 方向では 15° のとき水平力が最大になっている。地震波の入力方向角が小さい場合、接線方向モデルと比較すると、x 方向に作用する水平力は大きくなっていることがわかる。これは、放

射方向に支承を設置すると直線橋のような挙動を示し、変位制限構造の影響が大きくなったためと考えられる。

接線方向モデルでは、x 方向、y 方向とも全ての橋脚で $\theta=30^\circ$ 付近で水平力が最大値をとっていることがわかる。x 方向における水平力の変化を見ると、 θ が大きい場合には、支承部に作用する水平力は小さくなっている。これは、本研究に使用している鋼製可動支承は支承が変位制限構造に達するまでの距離を 0.1m としているが、この場合の支承の相対変位は非常に小さくなっているため、変位制限構造に衝突せずに、水平力がほとんど発生しなかったものと考えられる。

y 方向は全て固定にしているため、どの支承にも

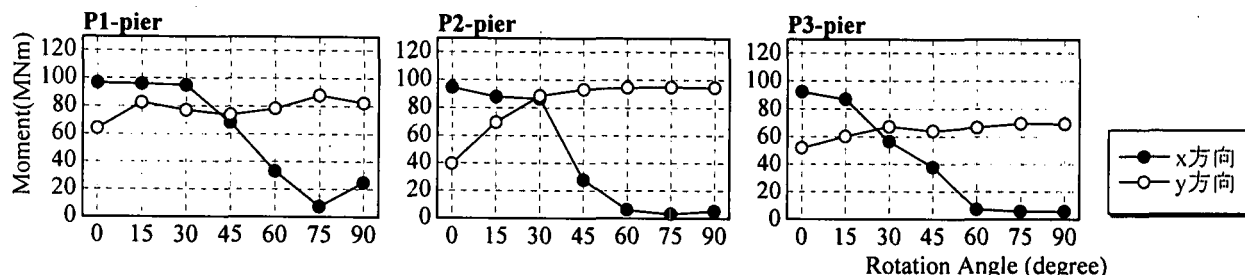


図-7 入力方向角 θ と橋脚基部に作用する最大曲げモーメントの関係（放射方向）

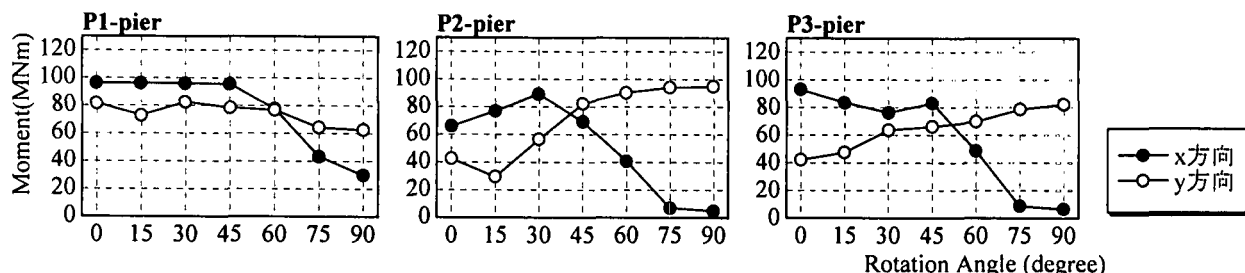


図-8 入力方向角 θ と橋脚基部に作用する最大曲げモーメントの関係（接線方向）

同程度の水平力が作用している。

（3）橋脚基部の曲げモーメント

放射方向モデルでは、最大曲げモーメントが現れるのは、全ての橋脚で x 方向では θ が 0° のとき、y 方向では 75° のときである。

接線方向モデルの場合、x 方向では $\theta = 0^\circ$ から 45° のときに曲げモーメントが大きな値をもつことがわかる。一方、y 方向では P1 が $\theta = 30^\circ$ のとき、P2・P3 が $\theta = 90^\circ$ のときに最大値となっている。

どちらのモデルでも、x 方向のグラフは、支承部に作用する水平力と同じような傾向があることがわかる。これは、上部構造の地震慣性力が支承を通じて橋脚に伝えられているためである。y 方向を見ると、地震波の入力方向角が大きくなると、支承部の水平力はそれほど大きくないにもかかわらず、橋脚基部にかかる曲げモーメントは大きい値をとっている。これは、上部構造と橋脚が一体となって y 方向に振動するため、支承部よりも橋脚に負担がかかっているためと推測できる。

5. あとがき

本研究では、鋼製橋脚を有する 2 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適用して、地震波入力方向の差異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、設計上最も不利になる場合の地震波の入力方向と橋軸方向

(X 方向)、橋軸直角方向 (Y 方向) が必ずしも一致するわけではないということがわかった。上部構造の変位に関しては、どちらのモデルも入力方向角 θ が小さい場合は応答変位にあまり変化がない。また、水平力、曲げモーメントに関しても、支承を放射方向に設置した場合には、直線橋に近い挙動を示すため、橋軸方向、橋軸直角方向に分離して動的解析を行うことが可能と考えられる。

ところが、接線方向モデルにおいては、支承部に作用する水平力は θ を 15° 、橋脚基部に作用する曲げモーメントは θ を 30° としたときに最も大きくなっている部分があるため、設計時において入力地震波の方向を変化させて 3 次元動的応答解析を行い、地震動に対して不利になる部分を十分に把握しておく必要があると思われる。特に、支承部に発生する水平力は、地震波の入力方向角が同じであるにもかかわらず、支承の配置方向によってその値が大きく異なる場合があることから、十分な注意が必要である。

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、1996.12.
- 2) 林川俊郎・大嶽敦郎・中島章典・佐野雅章：3 成分地震動を受ける連続曲線高架橋の非線形解析、構造工学論文集、Vol.45A、pp.849-858、1999.3
- 3) 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集、第 57 号、pp.240~243、2001.2.