

曲線橋における水平地震動の最悪入力方向の簡易推定

浅野恵哉¹・田崎賢治¹・吉澤 努¹・川神雅秀²

¹正会員 工修 大日本コンサルタント 技術本部耐震技術室（〒343-0851 埼玉県越谷市七左町5-1）

²正会員 工博 大日本コンサルタント 技術本部耐震技術室（〒343-0851 埼玉県越谷市七左町5-1）

1. はじめに

曲線橋の耐震設計を行うに際しては、まず、各々の橋脚に対して水平地震動の最悪入力方向を推定する必要がある。一般に、橋脚が弾性挙動のみの場合は、上部構造の変形を無視することで解析的に最悪入力方向が決定できるため、その方向のみに地震動を入力し設計断面力等を求めればよい。

しかし、大規模地震動により橋脚が弾塑性領域で挙動する場合は、塑性ヒンジの進展に伴い構造系が時々刻々と変化するため最悪入力方向を一義的に推定することは困難と思われる。このため、設計の現場においては、例えば3次元骨組みにモデル化した橋に対して、水平地震動を0度から適当な角度で刻んだ方向別に入力し、各々の入力方向に対する動的応答の最大値をピックアップし所要断面を決定するといった、極めて煩雑な作業を採用せざるを得ない場合が多い。

本稿では、曲線けた橋および曲線ラーメン橋をモデルに選び、各々について地震動の最悪入力方向の簡易推定手法について検討した結果の一部を紹介する。

2. 解析対象橋梁

解析対象橋は、けた橋モデルおよびラーメン橋モデルともに、支間長64.5m～70.2mの4径間連続曲線鋼床版2箱けた橋（下部構造形式；高さ23.5m～25.0mの鋼製橋脚、基礎構造形式；杭基礎）とした。各モデル橋の支持条件および橋脚断面を、表-1および表-2に示す。

表-1 曲線けた橋モデルの支持条件および橋脚断面

	P1	P2	P3	P4	P5
橋軸方向支持	ピン	ピン	ピン	ピン	ピン
橋直方向支持	固定	固定	固定	固定	固定
橋脚断面	円形	円形	円形	円形	円形

表-2 曲線ラーメン橋モデルの支持条件および橋脚断面

	P1	P2	P3	P4	P5
橋軸方向支持	可動	剛結	剛結	剛結	可動
橋直方向支持	固定	剛結	剛結	剛結	固定
橋脚断面	矩形	矩形	円形	矩形	矩形

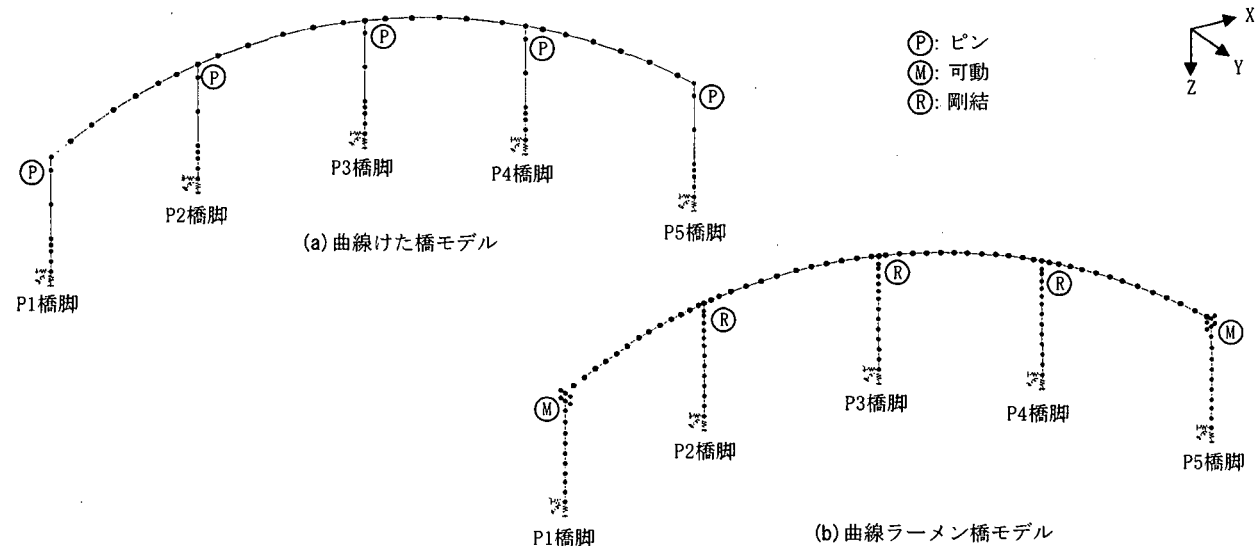


図-1 全体系骨組モデル

3. 曲線けた橋モデル

(1) 解析手法およびモデル化

当該モデルを対象とした簡易化の試みは、解析モデルの簡略化による解析作業の省力化に着目したものであり、3次元骨組みモデルを2次元モデルに置換した場合について最悪入力方向の影響を検証した。

3次元骨組みモデルは、上部構造については弾性部材、橋脚は脚柱基部を弾塑性部材とし他の部材は弾性部材とした（図-1(a)参照）。2次元モデルは、上部構造を弾性の線材モデル、橋脚は360度方向に一樣にせん断バネを分布させた非線形バネモデルを採用した（図-2参照）。ここに、せん断バネの値は、各橋脚について非線形 Push-over 解析を行い、図-3に示した上部構造慣性力作用位置における水平荷重－水平変位関係より求めた。

解析モデルの違いによる最悪入力方向への影響は、任意の一方入力動により非線形時刻歴応答解析を実施し、両者のモデルについて上部構造慣性力作用位置における水平変位応答を求め比較検討を行った。入力地震動は、標準加速度波形¹⁾（Ⅲ種地盤，タイプⅡ）を用いた。

(2) 固有値解析結果

図-4に、固有値解析結果より得られた1次・2次・3次モードの固有周期，有効質量および固有振動モード図を示す。固有周期はほぼ一致している。また固有振動モード図も同様のモード形状が得られており，2次元モデルにより構造系の固有値特性は評価できると考えられる。

(3) 非線形時刻歴応答解析結果

図-5に、3次元モデルと2次元モデルについて非線形時刻歴応答解析結果を示す。ここに、入力地震動は全体座標系に対する60°方向とし、P1橋脚からP5橋脚の上部構造慣性力作用位置の最大応答水平変位を図示した。

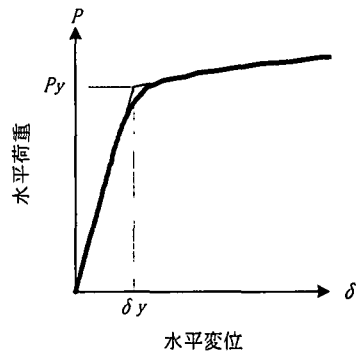


図-3 橋脚の水平荷重－水平変位関係

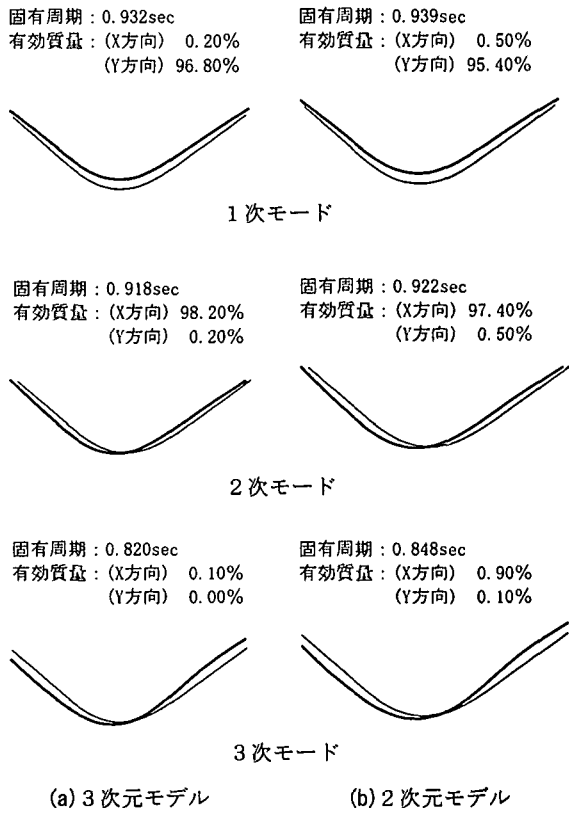


図-4 固有振動モード図

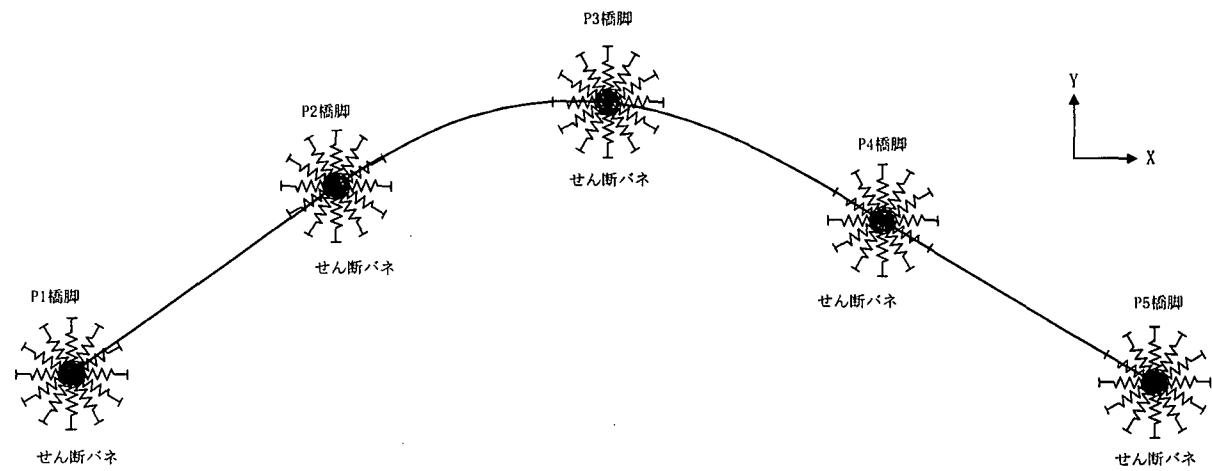


図-2 2次元モデル

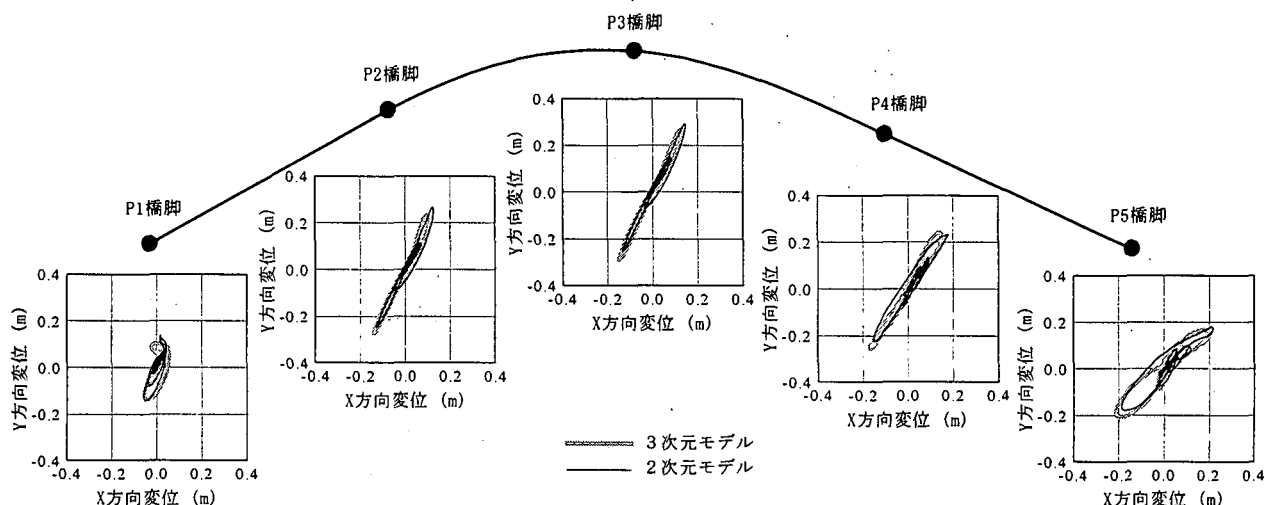


図-5 各橋脚の上部構造慣性力作用位置の最大応答水平変位（入力方向 60°）

これらより、両解析モデルとも、各橋脚の上部構造位置に生じる最大応答変位の方向はほぼ一致した結果が得られ、2次元モデルを採用しても最悪入力方向は推定できることが分かる。なお、本稿では記載しないが他の入力方向についても同様の結果が得られた。

4. 曲線ラーメン橋モデル

(1) 解析手法およびモデル化

当該モデルによる簡易化検討は解析手法に着目したものであり、非線形 Push-over 解析法による静的な解析により最悪入力方向の推定を試みた。

解析モデルは3次元モデルを対象とした。非線形 Push-over 解析法は、全体構造系に対して上部構造慣性力作用位置における水平荷重－水平変位関係を 0° から 30° 刻みに 180° まで7方向別に算出し、解析結果より最悪入力方向を推定した。なお、非線形時刻歴応答解析法についても Push-over 解析と同一の方向別に大規模地震動を入力した解析を行い、解析法の違いによる相互の差異を比較した。

3次元モデルの作成に関しては、上部構造は弾性部材、橋脚は脚柱を10分割し履歴モデルは完全弾塑性型応力度－ひずみ関係より求めた正規バイリニア型を仮定した。ここに、基礎構造についても水平・回転バネにより評価した。図-1(b)に採用した全体系骨組モデルを示す。入力地震動は、標準加速度波形¹⁾（Ⅲ種地盤、タイプⅡ）を用

いた。また、各部材要素の減衰定数としては、表-3に示す値を採用し、粘性減衰の評価としては Rayleigh 減衰により行った。解析は、Newmark のβ法とし、β=0.25、および積分時間間隔 0.002 秒を用いた。

(2) 解析手法の違いによる応答の比較

図-6に、地震動の入力方向別に非線形 Push-over 解析法と非線時刻歴応答解析法による解析結果より得られた、各橋脚の橋脚下端最大応答曲率について示す。なお、図中には、全体座標系 X、Y 軸の2方向別に静的水平荷重を作用させて弾性解析し、この結果を式(1)²⁾に代入し算出した弾性応答下での最悪入力方向を矢印により併記した。

$$\begin{aligned}\theta_{R_{Lmax}} &= \tan^{-1} (R_{Lx}/R_{Ly}) \\ \theta_{R_{Tmax}} &= \tan^{-1} (R_{Tx}/R_{Ty})\end{aligned}\quad (1)$$

ここに、

$R_{Lx} \cdot R_{Tx}$: X 方向に作用させた場合の X、Y 方向反力

$R_{Ly} \cdot R_{Ty}$: Y 方向に作用させた場合の X、Y 方向反力

最大応答曲率が生じる方向について非線形 Push-over 解析法と非線時刻歴応答解析法の結果を比較すると、各橋脚ともほぼ一致した結果を示し動的解析を行わなくても静的解析により最悪入力方向の推定が可能であることが分かる。ただし、P3 橋脚において、最悪方向のずれが若干見られた。これは、静的解析において、どの程度の水平荷重を上限載荷させるかにより相違する結果と考えられる。

(3) 塑性ヒンジの生成状況

図-7に、非線形 Push-over 解析の漸増水平荷重を 0.9G ～1.5G まで変化させた場合の各橋脚の応答結果を、横軸に入力方向、縦軸に最大応答曲率で表示した。また、表-4に荷重の漸増に伴う塑性ヒンジの生成状況を示す。

表-3 各構造要素の減衰定数

構造要素	減衰定数
上部構造	3%
下部構造	2%
基礎	20%

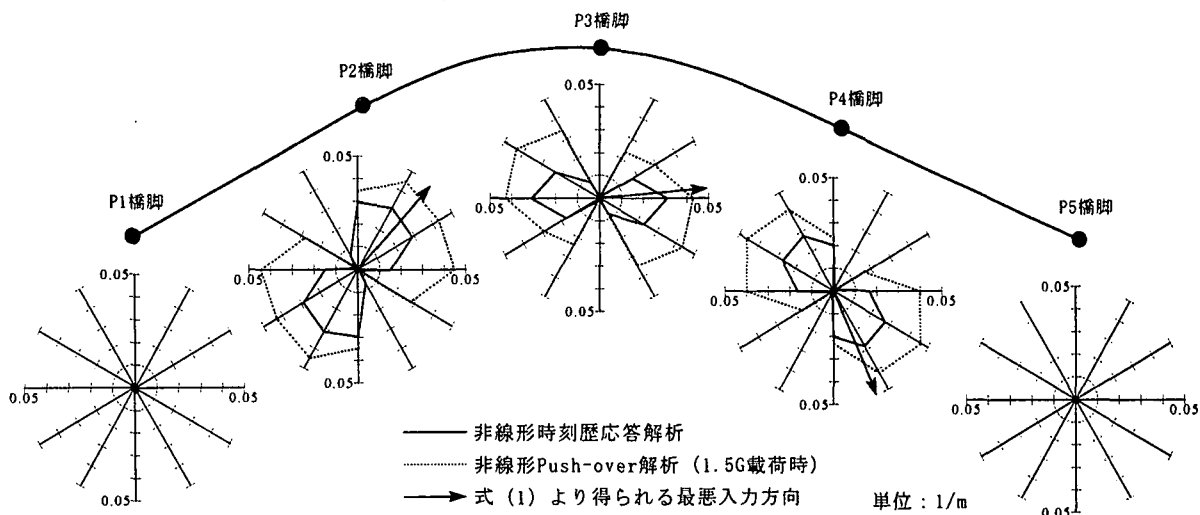


図-6 地震動の入力方向と各橋脚最大応答曲率（脚柱下端）

ここで例えば図-7 に示す P4 橋脚に着目すると、非線形 Push-over 解析法の漸増荷重が 0.9G~1.3G までは最悪入力方向が 60° であるのに対して、漸増荷重が 1.4G~1.5G では、最悪方向が 30° に変化する。これは、表-4 の塑性

表-4 塑性ヒンジの生成状況（脚柱下端）

作用荷重	P2 橋脚	P3 橋脚	P4 橋脚
0.9G	×	×	×
1.0G~1.3G	○	×	○
1.4G~1.5G	○	○	○

ここで、○印は塑性化の生成を、×印は非生成を示す。

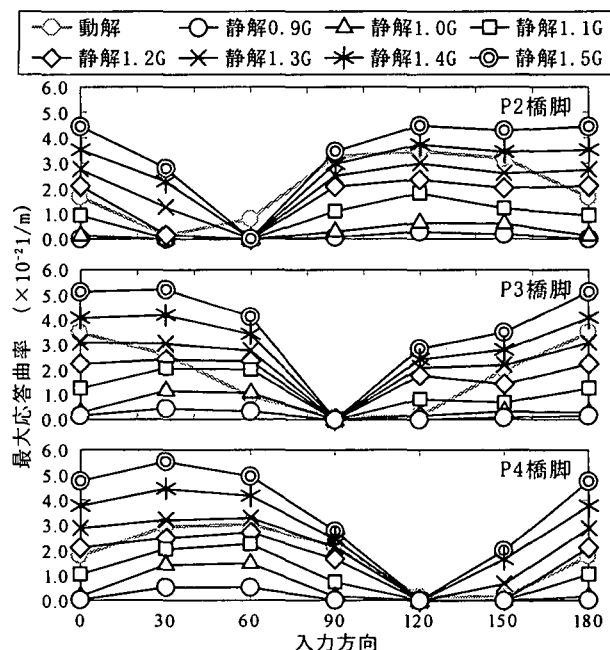


図-7 脚柱下端における最大応答曲率—入力方向関係

ヒンジの生成状況から、1.4G で P2~P4 橋脚が塑性化したことに起因すると考えられる。なお、非線形 Push-over 解析法による最悪入力方向の推定は、先ず、地震動の入力方向別に静的漸増解析で構造全体系の水平荷重—水平変形関係を算出し構造系の変形性能を求めた後、入力方向別の構造系許容変形性能（例えば、構造系全体系が不安定になる時点、あるいは、構造系の一部材が終局に達した時点を終局の変形と定義しこれに安全率を見込んだ値）の下限値に対応した方向を最悪入力方向と判定する手順となる。

5. まとめ

以上の検討結果より以下の知見を得た。

- 1) 3次元モデルを2次元モデルに置換した簡易手法については、曲線けた橋による検証結果より最悪入力方向の推定方法として採用可能であると考えられる。ただし、このモデル化は単柱橋脚を有するけた橋への適用のみに留まる。
- 2) 非線形 Push-over 解析法による最悪入力方向の推定手法は、採用した曲線ラーメン橋モデルにより判断すると非線形時刻歴応答解析法の結果と大差なく概ね採用可能と考えられる。ただし、非線形 Push-over 解析法により推定を行う際は、許容変形性能の設定により最悪入力方向が変化することに注意が必要である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997。
- 2) 土木研究センター：建設省 道路橋の免震設計法マニュアル（案），1992。