

10径間曲線ランプ橋の非線形動的解析による耐震設計

坂本 眞徳¹・丹羽 信弘¹・坪村 健二¹・濱本 浩伸²

¹正会員 中央復建コンサルタンツ(株) 橋梁系グループ (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10)

²正会員 工修 中央復建コンサルタンツ(株) 橋梁系グループ (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10)

1. まえがき

本橋は、約 90° で交差する2つの高速道路本線を結ぶ有効幅員 6.80m の曲線ランプ橋であり、上部工形式は10径間連続P R C 2主版桁橋、下部工形式は起点側端部を逆T式橋台、中間部および終点側端部橋脚は柱式橋脚である。また、基礎工形式は終点側端部のP10橋脚が直接基礎であることを除き、橋台、橋脚ともに場所打ち杭φ1.2mによる。

本橋の平面線形は、両端部付近はほぼ直線橋であるが、中間部のP3～P8間付近は曲線半径R=100mの曲線橋となっており、両端における交角はほぼ90°に達している。また、橋脚高は起点側から終点側にかけて徐々に高くなっているが、支持層の傾斜より基礎杭の長さは反対に短くなっている。

また、支承構造は固有値解析の結果を基に、曲線橋であることに配慮して全方向による免震支承を採用した。これより耐震設計にあたっては1自由度系を仮定するエネルギー一定則の適用が限定され、道路橋示方書V・耐震設計編¹⁾（以下、道示）における地震時の挙動が複雑な橋梁に類するため、地震時保有水平耐力法による耐震設計のみでは不十分となる。したがって、橋脚のM-φ特性および免震支承の水平力F-水平変位u関係に材料非線形特性を考慮した動的解析によるものとし、具体的には単柱による保有水平耐力法で初期設定した下部工に対して2次元モデルによる動的解析を行った後、3次元立体モデルによる動的解析を行い照査するものとした。

本報告は、本橋の耐震設計の手法と結果について概要を述べるものである。

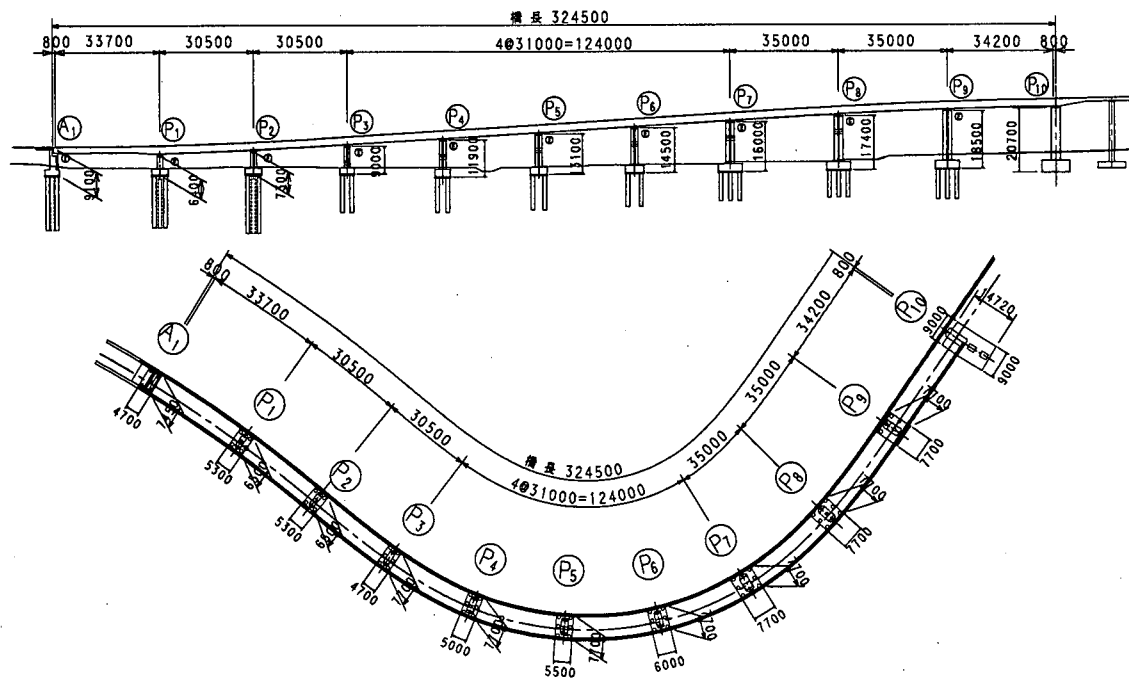


図-1 橋梁一般図

2. 耐震設計の概要

(1) 耐震設計上の問題点の整理

本橋の耐震設計を実施するにあたっての特徴、留意すべき点等を以下に示す。

- ① 上部構造は曲線半径 $R=100\text{m}$ 、両端の交角は約 90° による10径間連続P R C 2主版桁橋である。
- ② 橋脚高はP 1～P 10にかけて高くなっており、下部工剛性は起点側の方が大きい傾向を示す。
- ③ 支承条件に水平反力分散構造（または免震構造）を採用した場合、挙動が複雑な橋梁に分類され、動的解析による耐震設計が必要である。
- ④ 対象箇所の地盤はⅠ～Ⅱ種地盤で安定しており、免震設計の適用が可能であると考えられる。
- ⑤ 動的解析にあたっては、上部工の曲線の影響を適切に考慮する工夫が必要である。
- ⑥ 落橋防止システムとして、端支点部に橋軸直角方向における変位制限装置の設置が必要である。

上記のうち、非線形動的解析にあたって①、⑤の曲線の影響を適切に評価するためには、3次元立体モデルを用いた上で、橋脚断面は全方向のM- ϕ 特性が同一となる円形断面を用いるのが有利であるが、隣接する既設橋脚の柱形状が矩形断面であることによる景観への配慮から、本橋脚についても長方形断面を採用するものとした。

(2) 支承条件の検討

a) ラーメン構造と反力分散構造の比較

ラーメン構造とした場合の適用性について、2次元モデルを用いることにより、常時、震度法地震時における概略の検討を行った。

ケース1： ラーメン構造（中間橋脚）

ケース2： ゴム支承による方法（反力分散）

ラーメン構造とした場合、両端付近の橋脚は温度変化、クリープ等の影響により基礎の規模が著しく大きくなるため、両端部は可動支承とした。

検討の結果、ラーメン構造とした場合には上部工のP Cケーブル本数が大幅に増加して鋼材配置が困難となるため、ゴム支承による方法を採用した。

b) 免震構造の適用性に関する照査

免震設計が適している判定基準の目安としては、

- ①基礎周辺の地盤は堅固で安定していること、②下部工剛性が大きく橋梁の固有周期が短い橋（支承条件を全て固定とした場合、固有周期が1秒以下）、③免震支承を用いた場合の固有周期Tが全固定によ

る場合の固有周期 T_0 の2倍以上であること、などが挙げられる。

そこで、②③の確認のため、3次元非線形解析モデルを用いて固有値解析を実施した。なお、解析に際してA 1、P 10は可動支承扱いとした。

表-1 支承条件による固有値解析結果

検討ケース		固有周期 (sec)	比率
全脚固定とした場合	T_0	0.804	1.000
全脚免震支承とした場合	T	1.679	2.088

$$\ast T_0 < 1.0\text{sec} \quad \text{かつ} \quad 2T_0 < T$$

以上より、本橋では免震設計の適用が可能である。免震構造とした場合、固有周期が長周期化して設計水平震度が小さくなり、反力分散構造よりも経済的な設計が可能となるものと判断し、本橋では免震設計を適用するものとした。

(3) 耐震設計のフロー

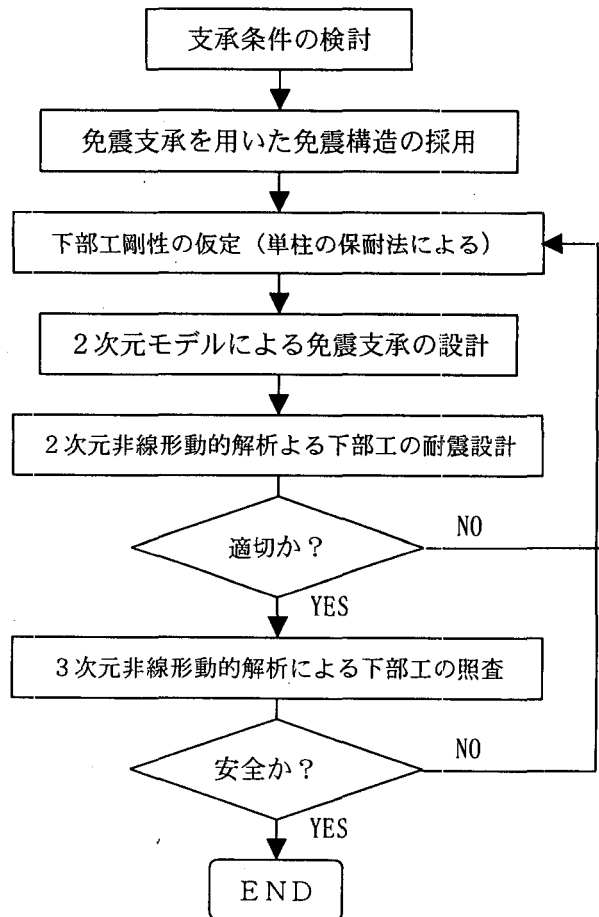


図-2 耐震設計の流れ

3. 非線形動的解析による耐震設計

(1) 解析条件

a) 解析モデル

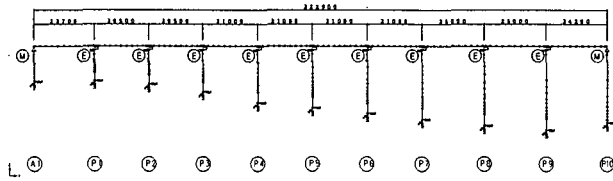


図-3 2次元解析モデル

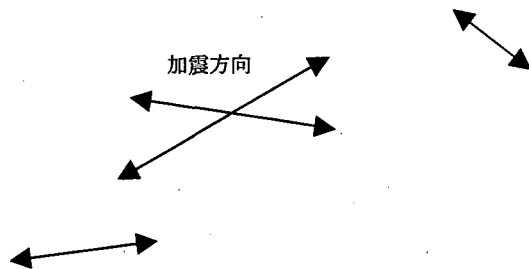


図-4 3次元解析モデル

b) 解析方法

- ・解析手法 : 直接積分法による時刻歴応答解析
- ・積分パラメータ : Newmark β 法
- ・減衰の考慮方法 : Rayleigh 減衰

・材料非線形モデル

- 橋脚塑性ヒンジ部) $M-\theta$ トリリニアモデル
- 橋脚一般部) $M-\phi$ トリリニアモデル
- 支 承) 移動硬化型バイリニアモデル

・履歴モデル

: 武田型履歴則 (橋脚)

・固有周期の計算法

: サブスペース法

・使用プログラム

: TDAP III

c) 入力地震動

- ・タイプ I, II の標準加速度波形²⁾の各3波.

・加震方向

2次元モデル: 橋軸方向, 橋軸直角方向

3次元モデル: 弦方向 (A1-P10), 弦直角方向, A1 支承線方向, P10 支承線方向

(2) 非線形動的解析法での照査基準

a) 橋脚に対して

・塑性ヒンジ部の照査

最大応答回転角 $\theta_{max} < \text{許容回転角 } \theta_{pa}$

・一般部の曲げ降伏の照査

最大応答曲率 $\phi_{max} < \text{許容曲率 } \phi_y$

・橋脚基部せん断の照査

最大応答せん断力 $S_{max} < \text{許容せん断耐力 } P_s$

・残留変位の照査

残留変位 $\delta R < \text{許容残留変位 } \delta Ra$

b) 免震支承に対して

・せん断ひずみの照査

応答支承変形量 $< \text{許容変形量 (250\%ひずみ値)}$

・設計変位の照査

設計変位と支承変形量との比率 $\leq 10\%$



動的解析による応答値は地盤種別毎と、地震動タイプ毎に解析した3波毎の最大応答値の平均値を採用している。

図-5 各部材のモデル化

(3) 解析結果

図-2の耐震設計の流れにしたがい、下部工剛性の仮定から支承設計、2次元非線形動的解析による耐震設計までの一連の作業について、動的解析による各照査基準を満足できるまで繰り返し計算を実施し、各項目を満足させることができた。ここで得られた各部材条件を基に3次元非線形動的解析による照査を行った結果、1回の解析作業で各照査基準をすべて満足させることができた。

これより、本橋のような著しい曲線橋においても、橋軸方向と橋軸直角方向による2次元の動的解析を実施することにより、下部工に関しては3次元立体モデルとしての耐震性能をより安全に評価できる可能性があるものと考えられる。

また、3次元モデルにおける入力地震波の加震方向については、曲線橋の場合各橋脚の最大応答の方向性が異なることに配慮して、比較的密にする場合もあるが、本設計では図-4に示すとおり実施設計としての便宜上、図-4に示す4方向とした。

図-6に、各加震方向における最大応答変位図を示す。これより各橋脚の最大応答変位は概ね各加震方向に変位していることがわかる。

さらに加震方向別の挙動について確認するため、両端の直線区間、中央付近の曲線部の中からP2、P5、P9橋脚における各加震方向別の塑性ヒンジ部における履歴曲線を図-7~9に示した。

図-7、8に示すとおり、両端の直線区間における挙動については、P2橋脚の場合は(a)A1支承線方向と(c)弦方向の挙動が、またP9橋脚では(c)P10支承線方向と(d)弦直角方向の挙動がほぼ同様となった。当初、直線区間の橋脚は支承線方向の加震の場合における応答が最大になると想定したが、全体系としての弦方向、弦直角方向の2方向の加震により概ね直線部分の挙動を表現することができた。

また、図-9に示すとおり、曲線部であるP5橋脚については、両端部の支承線方向における加震に対して、(b)弦方向において最大応答変位が確認された。その他の加震方向は確認していないため詳細は不明であるが、(b)弦方向はP5橋脚の橋軸方向とほぼ同一方向であり、これは長方形断面による橋脚の弱軸断面方向に該当している。

以上より、曲線橋における動的解析における加震方向としては、全体系に対して弦方向、弦直角方向の2方向による加震により概ね評価できるものと考えられる。

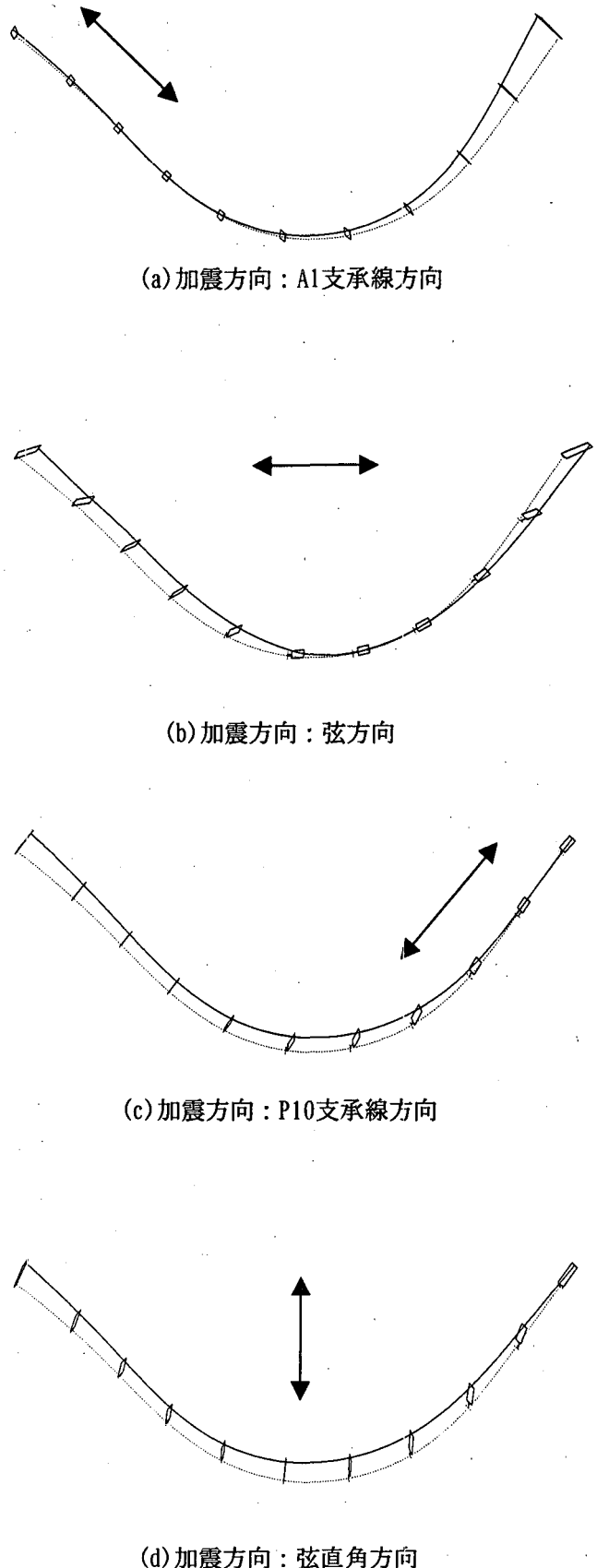
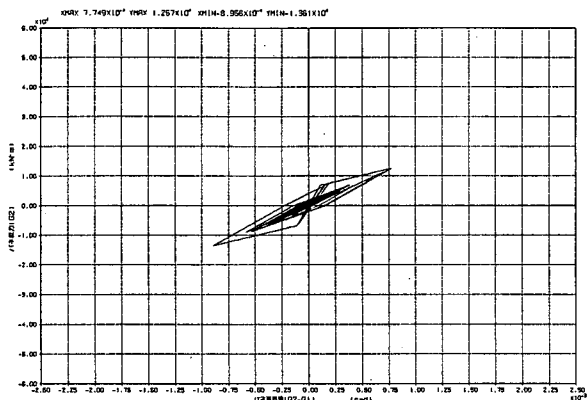
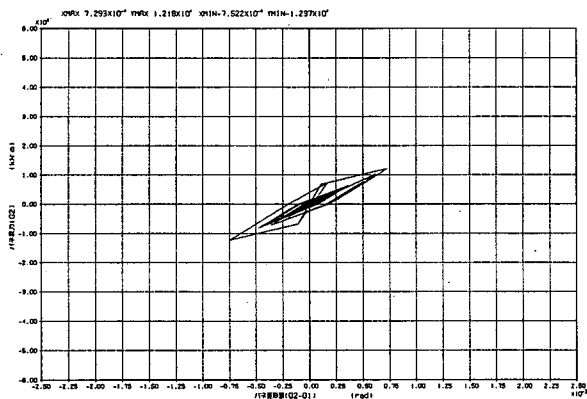


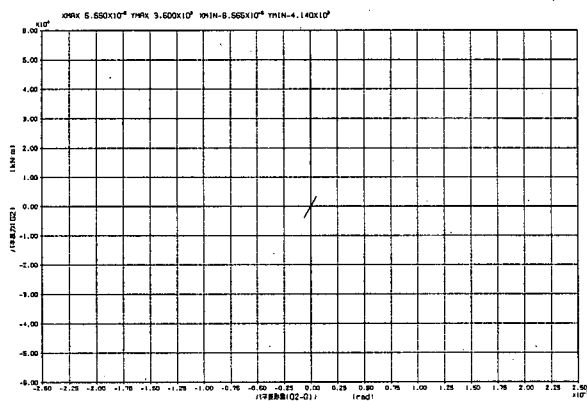
図-6 解析結果：最大応答変位（立体モデル）



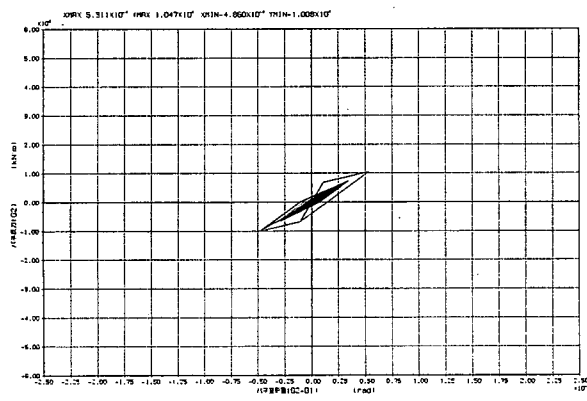
(a) 加震方向：A1 支承線方向



(b) 加震方向：弦方向

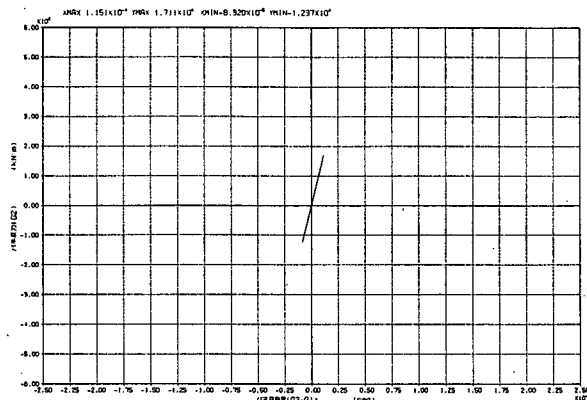


(c) 加震方向：P10 支承線方向

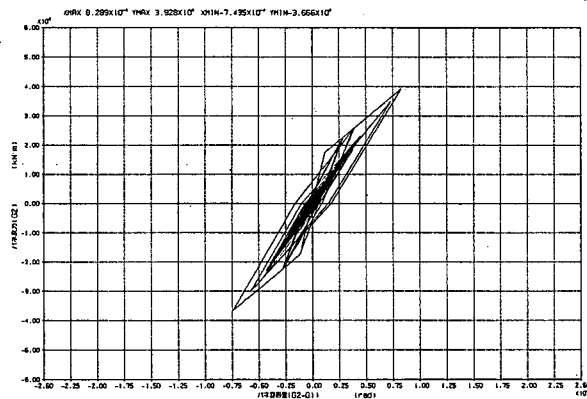


(d) 加震方向：弦直角方向

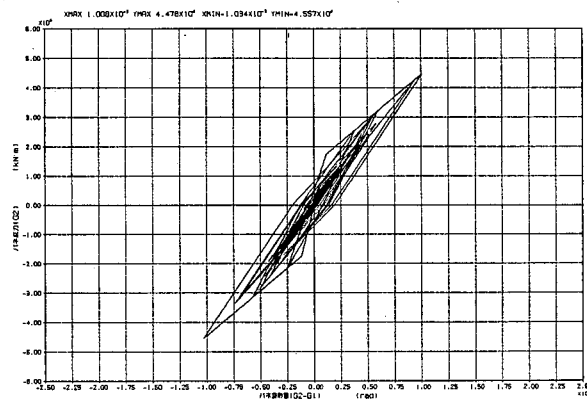
図-7 P 2 塑性ヒンジの履歴曲線 (立体モデル)



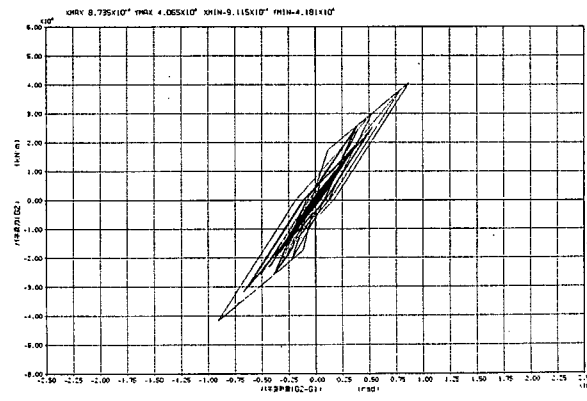
(a) 加震方向：A1 支承線方向



(b) 加震方向：弦方向

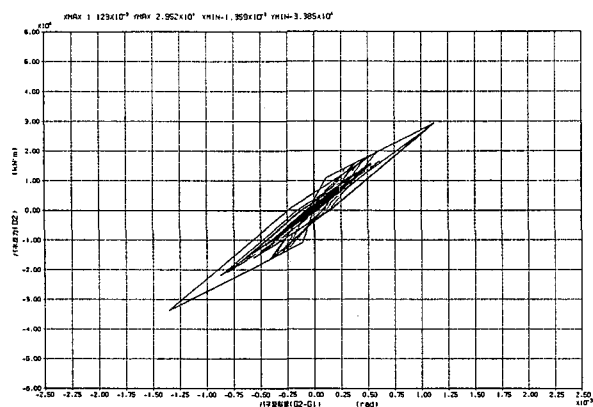


(c) 加震方向：P10 支承線方向

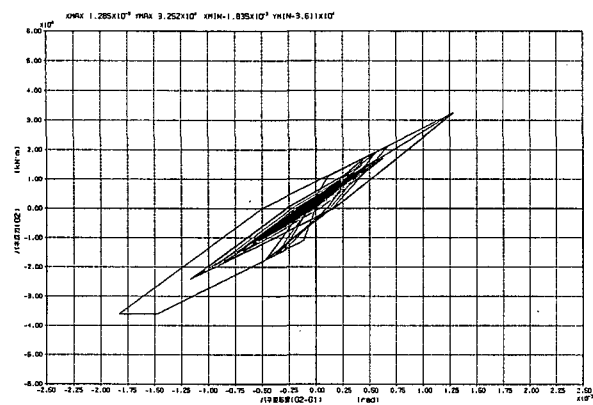


(d) 加震方向：弦直角方向

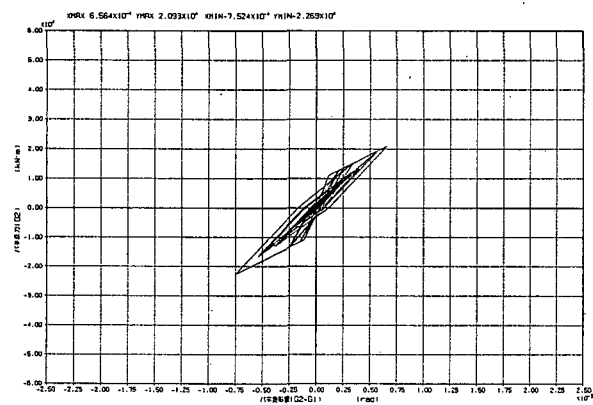
図-8 P 9 塑性ヒンジの履歴曲線 (立体モデル)



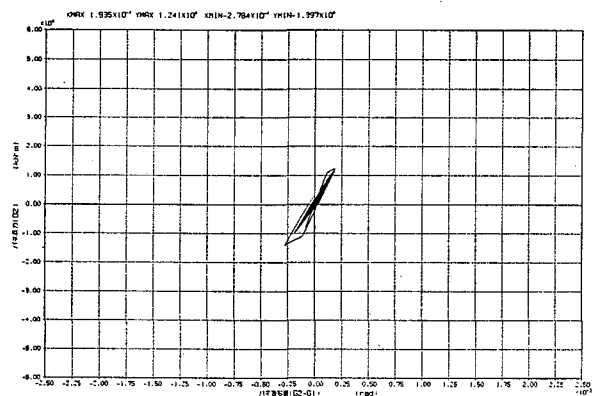
(a) 加震方向：AI 支承線方向



(b) 加震方向：弦方向



(c) 加震方向：P10 支承線方向



(d) 加震方向：弦直角方向

図-9 P5 塑性ヒンジの履歴曲線 (立体モデル)

4. まとめ

- a) 2次元モデルによる支承水平力と等価水平震度を基に算出した上部工重量よりRC単柱の保耐設計により仮定した下部工断面は、2次元非線形動的解析においても適切な結果が得られた。
- b) 2次元モデルによって設計を行った下部工部材は3次元モデルによる照査の結果、より安全側の値が得られた。
- c) 3次元モデルにおける加震方向として、弦方向、弦直角方向、両端部の直線部分の支承線方向の計4方向において検討を行った結果、各橋脚の概略の最大応答を確認する上では、全体系における弦方向、弦直角方向の2方向における加震によって評価できるものとする。

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) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する参考資料，1998.1
- 3) 日本道路公団：設計要領 第2集，H10.7