

平面曲線を有する連続ラーメン橋の耐震検討

水口 和之¹・橋本 昌朗²・山花 豊³

¹日本道路公団 名古屋建設局 建設第二部 構造技術課（〒460 愛知県名古屋市中区栄 4-1-1）

²日本道路公団 名古屋建設局 建設第二部 構造技術課（〒460 愛知県名古屋市中区栄 4-1-1）

³株式会社 銭高組 土木本部 生産システム部 技術課（〒102 東京都千代田区麹町 1-4-4）

1. まえがき

PC連続ラーメン橋は、耐震性や経済性の面から高速道路においても採用されることの多い橋梁形式である。同形式を、ジャンクション部におけるランプ橋のように小さな曲率半径を有する平面線形の橋梁に採用する場合には、直線橋の場合とは異なる曲線橋特有の地震挙動を解析的に明らかにし、設計に反映させる必要がある。

本稿では、東海北陸自動車道 清見JCT・Dランプ橋詳細設計において実施した非線形時刻歴応答解析とその結果に基づく設計について事例を紹介し、PC連続曲線ラーメン橋の大規模地震（レベルⅡ）時における応答特性と耐震設計に関する考察を述べる。

2. 橋梁概要

図-1に示す清見JCT・Dランプ橋は、最小半径 $R=120\text{m}$ の平面線形を有するPC4径間連続ラーメン1室箱桁橋である。P1-P2支間での交角は、道路橋示方書において構造解析上の曲線げた橋に該当する $\phi=36.8^\circ$ となっている。

また、支間の割に橋脚高さが低い（最小橋脚高さ： $1/2$ 固定支間 $\div 1:6$ ）本橋では、端部橋脚には死荷重時に比較的大きな橋軸方向曲げモーメントが作用し、また地震力の分担率も大きくなっている。

橋脚は長方形充実断面であり、基礎形式は大口径深礎杭（ $\phi=8\text{m}$ ）、端支点はゴム支承（タイプB）としている。

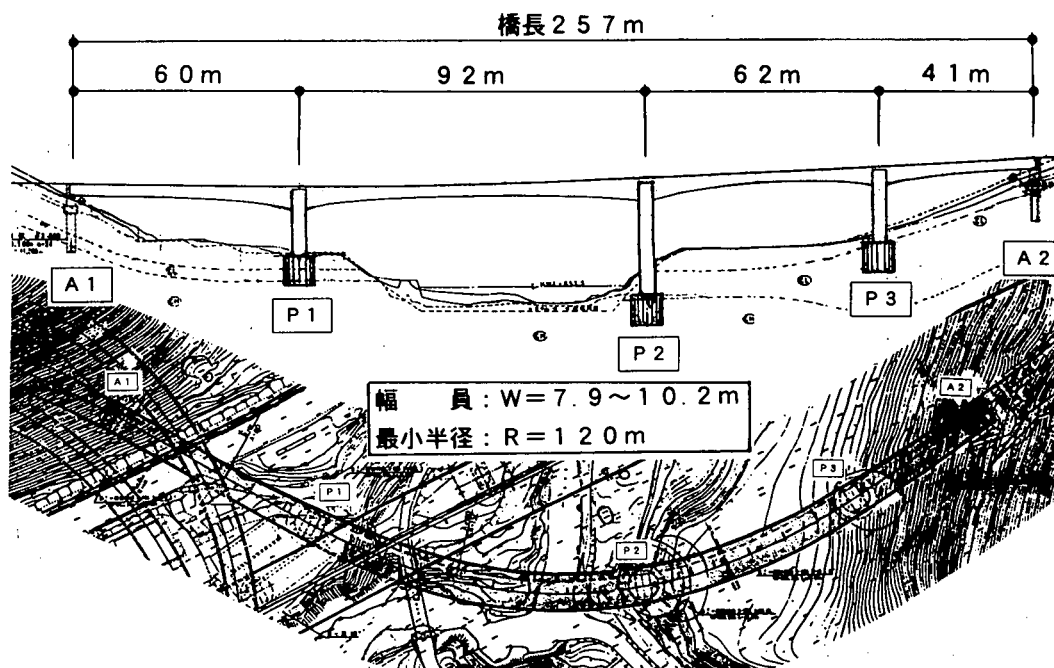


図-1 橋梁全体図

3. 非線形時刻歴応答解析モデル及び解析方法

(1) 解析モデル

図-2に解析モデルを表-1に支点条件及び部材の減衰定数を示す。

端支点及び橋脚下端の支持条件としては、端支点にはゴム支承のせん断及び鉛直方向バネを与え、橋脚下端にはP S 検層に基づく地震時の地盤定数を用いて算出した深礎杭の換算基礎バネを設けた。

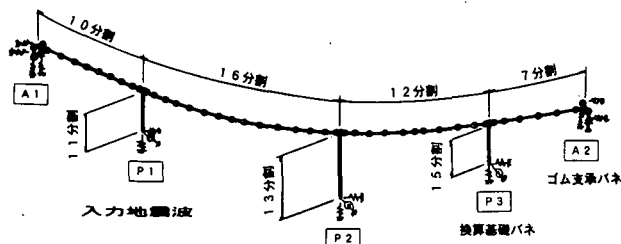


図-2 解析モデル

表-1 支点条件及び減衰定数

支点条件	端支点	橋脚			備考
		並進	回転	鉛直	
減衰定数	上部工	バネ	固定	バネ	他に5%, 7%, 10%でも算出比較
	橋脚	バネ	自由	自由	
	基礎	バネ	自由	自由	
減衰定数	大口径深礎杭	並進	バネ	鉛直	他に5%, 7%, 10%でも算出比較
	深礎杭	回転	バネ	バネ	
	深礎杭	並進	バネ	鉛直	
減衰定数	上部工	3%	考慮		他に5%, 7%, 10%でも算出比較
	橋脚	5%			
	基礎	2.0%			
減衰定数	端支点	2%			他に5%, 7%, 10%でも算出比較
	橋脚	5%			
	基礎	2.0%			

(2) 部材剛性

まず、主桁は線形部材、橋脚は非線形部材とした場合について解析を行った。この時、非線形部材の復元力特性にはびわれ発生時及び引張鉄筋初降伏時を変曲点とするディグレーディングトリリニア型（武田モデル）を採用した。

その結果、主桁部材にも降伏曲げ耐力を上回る応答断面力がみられたため、主桁の非線形挙動によるエネルギー吸収性能を評価する方法として主桁も非線形部材とした場合などについて解析を行った。

尚、曲線橋のため2軸曲げに対する非線形性能評価が必要であるが、解析プログラムの制約から、相直交する部材性能を並列2部材に分けて与えることにより取り扱うこととした。

(3) 地震波入力時間及び解析時間刻み

時刻歴応答解析における地震波入力時間は最大加速度作用時刻を含む20秒間とし、0.005秒間隔で

解析を行った。

4. 非線形時刻歴応答解析結果

神戸海洋気象台（N-S）修正波による解析結果を中心に本橋の地震応答について述べる。

(1) 応答加速度及び変位

P 1 橋脚橋軸方向加振時の橋脚天端（主桁中心高さ位置）における最大応答加速度と変位を表-2に、応答加速度及び応答変位の時刻歴を図-3に示す。

表-2 大応答加速度及び最大応答変位

橋脚	方向	応答加速度	応答変位	部材の状態
P 1	X	7.69 m/s ²	10.7 cm	軸方向：上下端降伏
	Y	5.03	5.6	直角方向：降伏せず
P 2	X	9.16	10.1	軸方向：上端降伏
	Y	6.49	11.5	直角方向：下端降伏
P 3	X	7.67	6.1	軸方向：降伏せず
	Y	5.80	4.4	直角方向：下端降伏

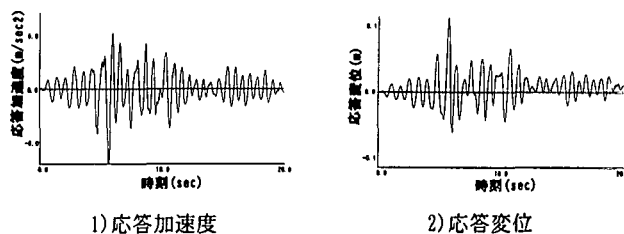
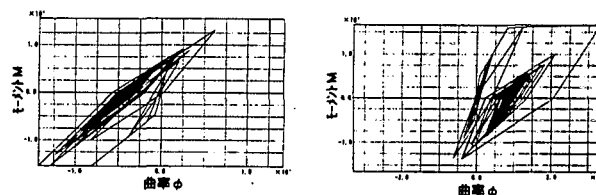


図-3 応答時刻歴

(2) 橋脚部材応答

a) 曲げモーメント

図-4にP 1 橋脚上下端での曲げモーメント～曲率（M- ϕ ）応答履歴曲線を示す。このケースの場合、降伏に至った部材は橋脚下端でP 1が3m（有効高比0.85）、P 2が2m（同0.57）、上端でP 1が1m（同0.29）、P 2が2m（同0.57）、P 3で1m（同0.29）程の区間であり、最大の応答塑性率（降伏曲率との比）はP 1 橋脚下端における $\mu = 4$ であった。



1) P 1 橋脚上端

2) P 1 橋脚下端

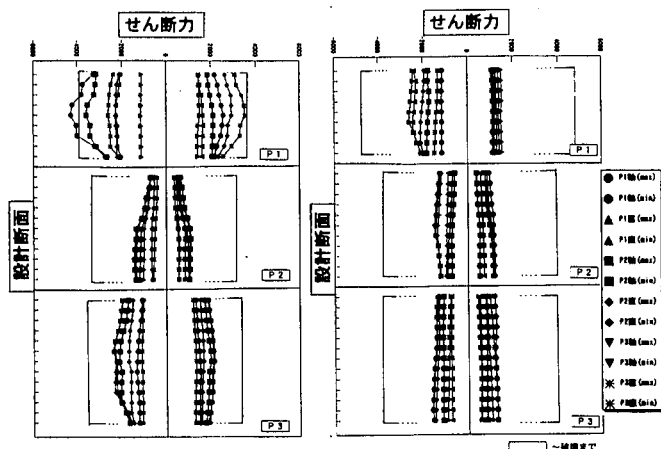
図-4 曲げモーメント～曲率履歴曲線

b) せん断力

せん断力の応答結果を図-5に示す。

P1橋脚において橋軸方向せん断力が僅かに耐力超過する結果となった。下部工は既に完成していたため補橋設計等は今後の対応とした。

当然のことながらラーメン橋脚の橋軸方向では、上下端が固定構造となるため可動橋脚に比べてせん断スパンが短くなる。非線形動解析に先立つ予備検討検討の際にはラーメンとしてのせん断スパンの取り方に留意し、破壊形態がせん断破壊先行型にならぬよう部材寸法及び帯鉄筋量を決定しておく必要がある。



1) 橋軸方向せん断力 2) 直角方向せん断力
図-5 橋脚応答せん断力

c) ねじりモーメント

ねじりモーメントの応答結果を図-6に示す。

当初、端部支承位置における直角方向の支持条件はタイプB支承を可動として用いることから支承のせん断バネ値を与えていた。しかしその場合、直角方向地震時において端部橋脚(P1, P3)には大きなねじりモーメントが発生し、特にP3橋脚ではねじり耐力を超過する応答となることがわかった。そこで、端部橋脚のねじりモーメントを低減するため、桁端部直角方向はサイドブロックの設置により固定構造とした。

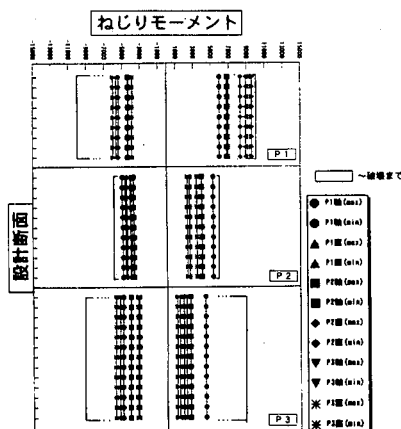


図-6 橋脚応答ねじりモーメント

また、応答断面力がコンクリートのみで受け持てるねじり耐力(コンクリート標準示方書のねじり鉄筋の無い場合のねじり耐力)を越えていたため、橋脚はねじりひびわれ発生後の挙動を示すとして、ねじり剛性を低下(10分の1)させて考えることとした。

(3) 上部工部材応答

図-5に主桁の橋軸曲げについて耐力と応答断面力とを比較した結果を示す。

白抜きポイントが上部工線形とした場合の応答値を示し、黒のものが上部工の非線形性を考慮した解析時の応答値を示す。負の曲げでは部分的に降伏耐力を若干上回る程度、正の曲げでは終局耐力をも越える応答結果が得られた。

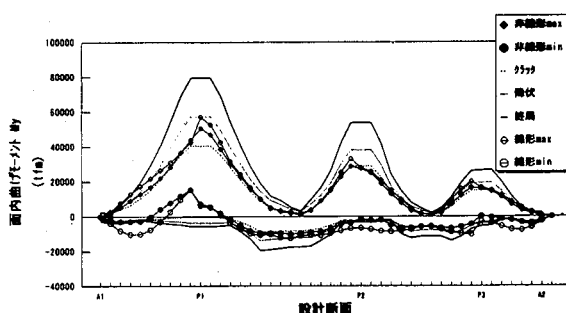


図-7 主桁応答曲げモーメント

想定する地震レベルが大きくなったことから、従来行っていた震度法断面力の割り増し量に対する曲げ破壊安全度の確保では不十分な結果となり、補強鉄筋の配置が必要となった。プレストレスの偏心配置により効率よく外力に抵抗させていた従来の設計に対し、レベル2の地震動に対する設計では設計断面力の幅が正負両方向に大きく広がるため、曲げモーメント交番部(特にプレストレス配置の少ない方向に対して)十分な軸方向鉄筋を配置する等の留意が必要である。

本橋の場合、応答断面力に対し断面を降伏以下に抑えるための補強量は多く、部材厚とのバランスも悪くなってしまうため配置可能量の補強に止め、上部工も非線形部材とした解析により断面力の再分配を評価することとした。

(4) 入力地震波に対する結果の比較

図-8に入力方向をP1橋軸方向とし、入力地震波を変えた場合の応答断面力比較を示す。

I種地盤修正波(タイプII)の場合、入力波の種類による違いは少なく、1波形のみの解析でも十分であると考えられる。

また、タイプIの地震波による応答値はタイプIIの場合の約半分(入力加速度の最大値は0.39倍)であり、本橋の場合では殆どの部材の応答が降伏耐力

以下であった。

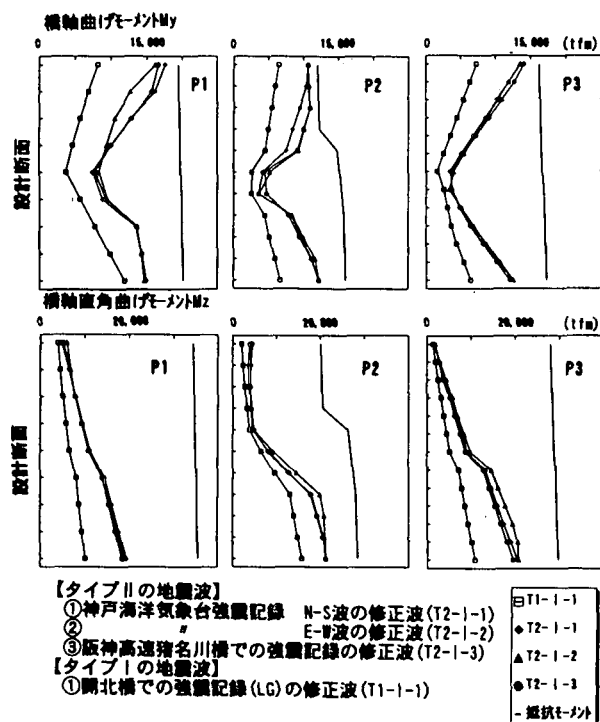


図-8 入力地震波比較（橋脚応答曲げモーメント）

(5) 主桁剛性及び減衰定数に対する結果の比較

図-9に主桁の部材剛性及び減衰定数を変化させた結果の比較を示す。

上部曲線桁の非線形解析は、2軸曲げやプレストレスの問題から厳密に取り扱える解析プログラムも少なく、また、煩雑でもある。このため、主桁の降伏以降の剛性低下やエネルギー吸収性能を主桁の剛性低下率と減衰定数をパラメーターとして置き換えた解析を行ってみたが、10%程度の減衰定数では明確な差異は現れず、また、主桁の剛性低下率も一律のままでは剛結部の橋脚モーメントの低下を表せない結果となった。

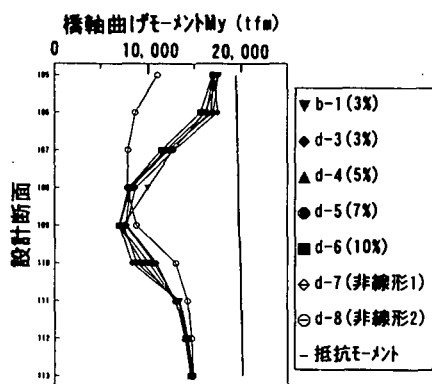


図-9 主桁の剛度及び減衰定数別比較
(橋脚応答曲げモーメント)

5. 上部工補強設計

得られた応答断面力をもとに以下の補強設計を行った。震度法に基づく従来の設計レベルより補強のあった部位を図-10に示す。

- ① 橋軸方向地震時の曲げ及びせん断に対する軸方向鉄筋、スターラップの補強
- ② 橋軸直角方向地震時のねじり及びせん断に対する軸方向筋、横方向筋の補強

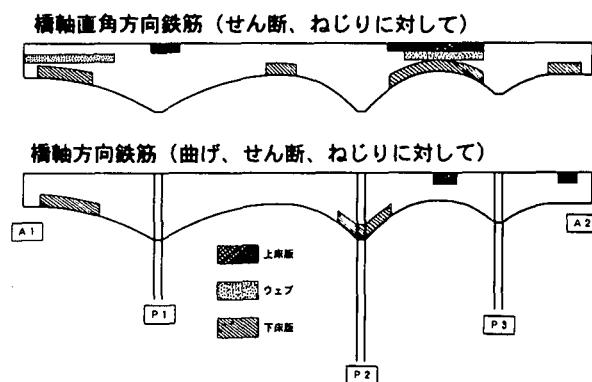


図-10 上部工補強鉄筋配置部位

6. まとめと今後の課題

本橋では現時点で不明な項目に対し以下に示す配慮による非線形解析及び補強設計を行った。

- ① 異方性並列2部材による2方向曲げの非線形性考慮
- ② 橋脚のねじり応答レベルに見合う剛性低下の考慮
- ③ 上部工への塑性ヒンジ発生許容及び非線形性考慮
- ④ 軸方向地震時の曲げ、せん断及び直角方向地震時のねじり、せん断に対する上部工部材の補強

RC、PC部材の立体的な非線形挙動を設計に反映させることは、理論上不明な点が多いことや解析プログラム対応上の問題等からまだまだ困難といえる。

特に、2軸曲げやねじりに対する非線形挙動（降伏剛性や復元力特性）、軸力変動下での曲げ挙動の影響評価が解析結果に及ぼす影響は大きく、断面構成則に関する研究が待たれるとともに解析シミュレーション技術の改善が望まれる。

一方、部材耐力の算定では、特にねじりの問題等において作用地震力の特徴（強度や発生確率）と現在の耐力評価式に関わる部分係数のバランスは適切か。及びねじりによる損傷をどのレベルまで許容するのか等について研究が望まれる。