

P C斜張橋の非線形動的解析による設計例および今後の課題

輿石正己¹・栗原敏広²・山野辺慎一³・矢部正明⁴

¹正会員 工学博士 清水建設(株)土木本部技術第一部 (〒105-07 東京都港区芝浦 1-2-3 シーパンスS館)

²正会員 本州四国連絡橋公団 設計部設計第三課 (〒651 神戸市中央区小野柄通 4-1-22 アーパンス三宮ビル)

³正会員 工学修士 鹿島建設(株)技術研究所 第一研究部(〒182 東京都調布市飛田給 2-19-1)

⁴正会員 (株)長大 技術開発事業本部 構造防災部 (〒305 茨城県つくば市春日 3-22-6)

1. まえがき

平成8年12月における道路橋示方書V編の改訂に伴い、P C斜張橋やR Cアーチ橋のように地震時の挙動が複雑な橋梁については、通常規模の地震に対して震度法による弾性設計を行う他、大規模な地震に対して構造部材のじん性を考慮する非線形動的解析による設計を行うこととなる。本論文は、P C斜張橋の非線形動的解析による設計計算例を示すと共に今後の課題について述べたものである。

2. 設計条件

設計対象としたP C斜張橋の構造概要を以下に示す。

構造形式：3径間連続P C斜張橋

活荷重：B活荷重

支間割：100+200+100m

幅員：全幅員 14.6m(一般部)、12.8m(中間支点部)

支持形式：連続桁方式

支 承：可動型ゴム支承

地域区分：A地域

耐震設計上の地盤種別：I 種地盤

重要度の区分：B種の橋

また、構造一般図を図-1に、使用した材料の一覧を表-1にそれぞれ示す。

表-1 主要材料

種 別	規 格	適用部位
コンクリート	$\sigma_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$	主桁、主塔
	$\sigma_{ck}=240\text{kgf/cm}^2$	橋脚
鉄 筋	SD345	主桁、主塔、橋脚
P C鋼材	SBPR930/1180 $\phi 32$	主桁上床版
	SBPR7B 12S15.2	主桁下床版
	SBPR7B 37S15.2、48S15.2	斜材

3. 設計手順

(1) 解析手法

地震時保有水平耐力法(以下、保耐法という)レベルの耐震設計を行うにあたり、まず橋梁の各部位における非線形型域に入る部材を見極めるため線形動的解析を行い、その結果を基に、主桁、橋脚、主塔、主塔横梁および斜材の非線形性を考慮した時刻歴応答解析法を採用した。数値解析法としては、地震による強制振動の運動方程式を直接数値積分して2階の連立微分方程式を解く Newmark- β 法を用い、非線形解析であるため収束性を考慮して積分時間間隔を0.002秒とした。

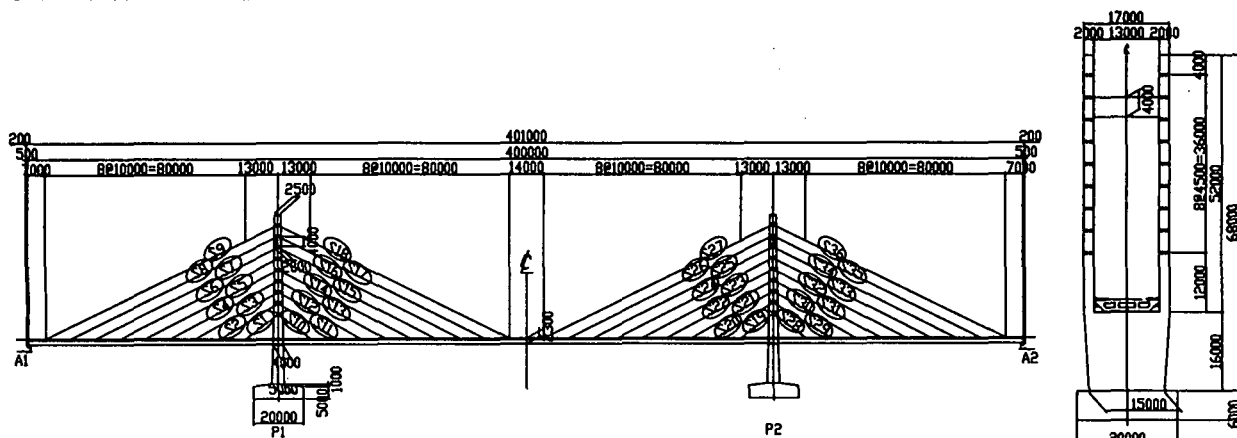


図-1 設計対象P C斜張橋の一般図

(2)解析モデル

本設計計算例で用いた動的解析モデルは、2面吊りのPC斜張橋であることより、図-2に示すように3次元モデルを採用し、塑性化が予想される主塔基部、主塔横梁接合部および橋脚では、節点間隔が部材厚の1/2程度となるように配慮した。

断面力としては、曲げモーメント、軸力、せん断力を考慮し、ねじりモーメントに関しては、変形適合ねじりであると共に保耐法レベルの地震時には斜めひび割れの発生により部材に作用するねじりモーメントが小さくなると考えられるため考慮しないこととした。また、解析モデルにおける横桁は、主桁に比べて十分に剛な部材とし、斜材張力が横桁より主桁へ伝達されるモデルとした。さらに、主塔の断面力を橋脚に伝達させると共に柱頭部の曲げモーメントを適切に把握するため、橋脚上にねじりに対して剛な横梁を採用した。

橋脚および主塔の非線形履歴モデルとしては、図-3に示すように、コンクリートのひびわれ(C点)、鉄筋の初降伏(Y_0 点)を考慮した剛性低下型トリリニアモデル(武田型)を採用した。また、終局曲率は、道路橋示方書V編 9.4におけるコンクリートの終局ひずみをタイプIIの地震動に対して求めた。非線形部材は、線形動的解析の結果を参考にして、主塔の主塔横梁接合部より下側、主塔横梁および橋脚に採用した。

主桁についてはPC部材であり、PC部材の降伏時以降の挙動については、現在十分に解明されていないため、エネルギー吸収を期待しない設計を行った。骨格曲線の剛性としては、原点と初降伏点を結ぶ降伏剛性を用いた。また、斜材に関しては、線形動的解析の結果より最下段の斜材において応答値が大きくなり一時的に圧縮部材となることが判明したため、図-4に示すように圧縮剛性を持たないモデルを採用し、履歴曲線は描かず、骨格曲線上を移動させることとした。

非線形時刻歴応答解析を行うにあたり、入力地震波としては、道路橋示方書V編 6.3(3)に規定される標準加速度応答スペクトルに近い特性を有するように振幅

調整されたものを用いた。また、地震動が作用する前の初期断面力は死荷重状態とした。

減衰としては、モード比例減衰、ひずみエネルギー比例減衰、運動エネルギー比例減衰およびRayleigh減衰等が提案されているが、本設計計算例では、橋軸方向および橋軸直角方向とも低次モードの有効質量比が大きいことおよび高次の振動モードによる発散を防止するために、Rayleigh減衰を採用した。

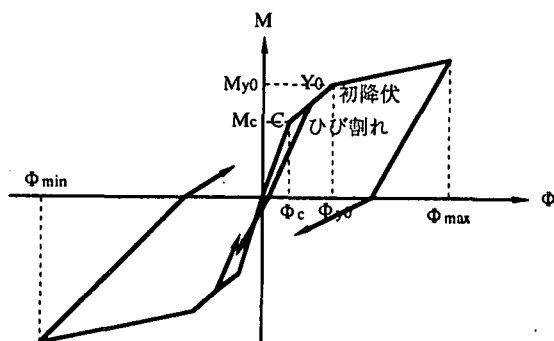


図-3 非線形部材の履歴特性(武田モデル)

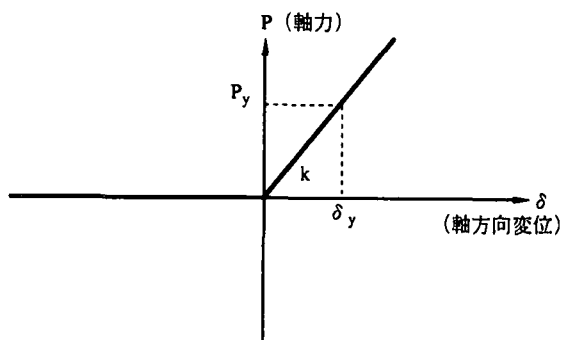


図-4 斜材の荷重-変位曲線

4 設計結果

斜張橋のような大規模な橋梁構造物に対する地震時に許容される限界状態は、その橋の重要度や要求される機能とともに、地震時の構造全体の安定性、地震後の使用性さらに被災後の修復の難易度等に応じて適切に定める必要がある。本設計計算例では、それぞれの構造部

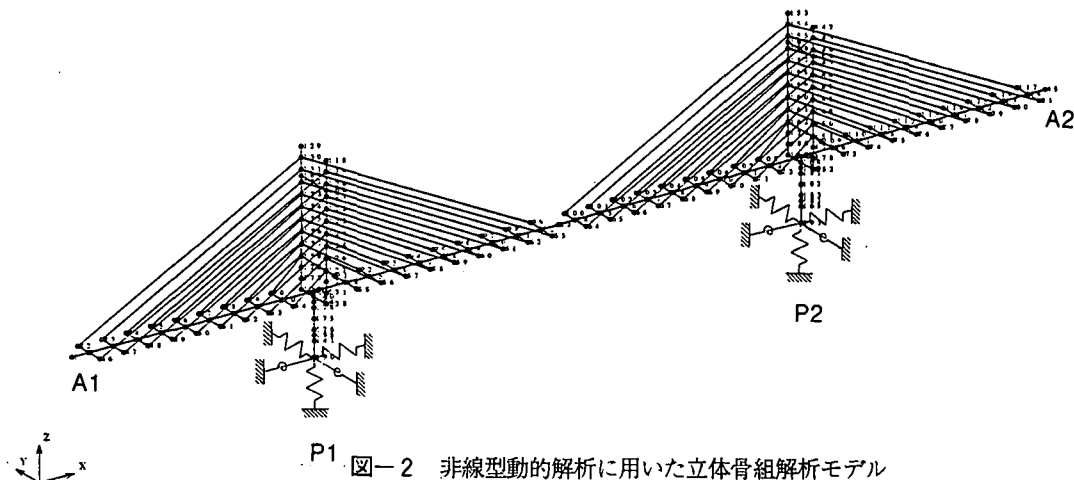


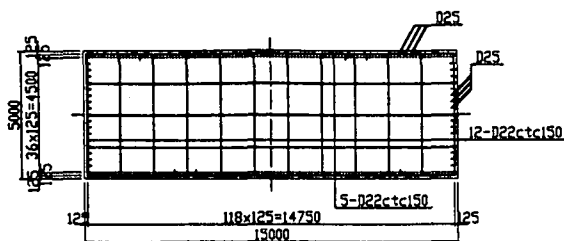
図-2 非線形動的解析に用いた立体骨組解析モデル

表－4 主塔横梁接合部の曲げモーメントに対する設計結果

	橋軸方向	橋軸直角方向	
入力地震波(3波平均)	タイプⅠ	タイプⅠ	タイプⅡ
応答曲げモーメント M_d (tf・m)	2136.4	2921.0	2898.7
初降伏曲げモーメント M_y (tf・m)	3821.3	2874.0	2874.0
M_d/M_y	0.56	1.02	1.01
応答曲率 ϕ_d ($\times 10^{-6}/m$)		2816.9	2096.5
初降伏曲率 ϕ_y ($\times 10^{-6}/m$)		1300.1	1300.1
終局曲率 ϕ_u ($\times 10^{-6}/m$)		13601.9	24611.8
許容曲率 ϕ_a ($\times 10^{-6}/m$)		5400.7	16841.2
ϕ_d/ϕ_a		0.52	0.12

(3) 橋脚の設計

橋脚は、道路橋示方書V編6.4における「じん性を期待してよい部材」と考え、応答曲率が許容曲率を超えないことを設計条件とした。図－9に橋脚基部の配筋図を示す。図中の橋軸方向および橋軸直角方向の軸方向鉄筋は、震度法レベルの設計に比べて表－5に示すように変更したものである。設計結果は表－6に示すように、橋軸方向の地震に対しては、橋脚基部に初降伏曲げモーメントを多少こえる応答曲げモーメントが生じたが、橋軸直角方向の地震に対しては初降伏曲げモーメント以下となった。さらに、表－7に非線形動的解析によって算出した残留変位を示す。これより残留変位は許容値に比べて十分小さく安全性の判定を満足している。



図－9 橋脚基部の配筋図

表－5 橋脚の軸方向鉄筋の変更内容

	震度法による設計	動的解析による設計
橋軸方向の軸方向鉄筋	D 22@125 2段	D 25@125 2段
橋軸直角方向の軸方向鉄筋	D 16@250 1段	D 25@125 1段 D 25@250 1段

表－6 橋脚基部の曲げモーメントに対する設計結果

	橋軸方向	橋軸直角方向	
入力地震波(3波平均)	タイプⅠ	タイプⅠ	タイプⅡ
応答曲げモーメント M_d (tf・m)	39773.5	49290.0	73066.0
初降伏曲げモーメント M_y (tf・m)	39635.5	102112.2	102112.2
M_d/M_y	1.003	0.482	0.715
応答曲率 ϕ_d ($\times 10^{-6}/m$)	758.6		
初降伏曲率 ϕ_y ($\times 10^{-6}/m$)	484.1		
終局曲率 ϕ_u ($\times 10^{-6}/m$)	8348.7		
許容曲率 ϕ_a ($\times 10^{-6}/m$)	3105.6		
ϕ_d/ϕ_a	0.24		

表－7 柱頭部の残留変位

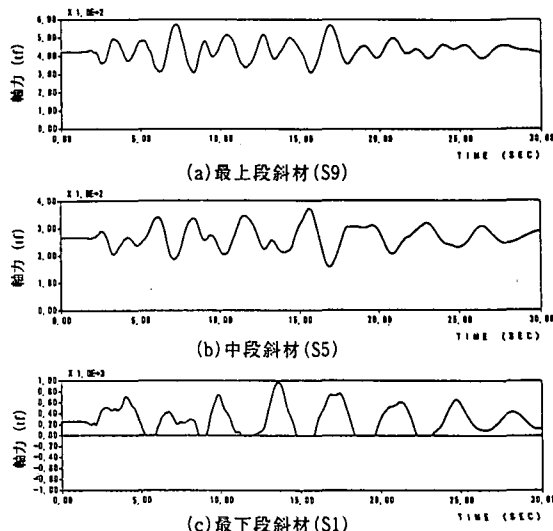
	橋軸方向	橋軸直角方向	
入力地震波(3波平均)	タイプⅠ	タイプⅠ	タイプⅡ
残留変位 (mm)	21.6	1.3	2.1
許容残留変位 (mm)	160.0	176.7	176.7

(4) 斜材の設計

斜材については、斜材に発生する応答引張力が降伏荷重を超えないことを設計条件とした。最下段の斜材は、震度法レベルの設計に比べて37S15.2から48S15.2へ変更している。P 1橋脚の側径間および主径間にかかる最上段、中段、最下段の斜材の設計結果は、表－8に示すように橋軸方向および橋軸直角方向の地震時において、応答引張力がいずれも降伏荷重以下となっており、安全性の判定を満足している。また、図－10に、橋軸方向地震時における最上段、中段、最下段の斜材軸力の時刻歴波形をそれぞれ示す。この図より最下段斜材では、軸力が一時的に圧縮域に達しており、図－4に示したモデル化の妥当性が確認された。

表－8 斜材の設計結果

部材番号	応答引張力 (tf)			降伏荷重 (tf)
	橋軸方向	橋軸直角方向		
	タイプⅠ	タイプⅠ	タイプⅡ	
S 9	569.0	425.8	432.3	1085.3
S 5	362.4	267.1	267.6	836.2
S 1	1048.0	261.0	260.5	1085.3
S 1 8	565.9	434.7	436.3	1085.3
S 1 4	363.9	275.6	276.4	836.2
S 1 0	919.0	307.9	307.3	1085.3



図－10 斜材軸力の時刻歴波形図(地震波Ⅰ－Ⅰ－1)

5. おわりに

本論文は、道路橋示方書V編(平成8年版)に準拠して、P C斜張橋の保耐法レベルの耐震設計例を示したものであるが、今後の課題として、①橋梁の規模、重要度等に応じた限界状態の設定基準。②部材の軸力変動が大きい場合の取扱い。③2軸曲げを考慮する場合の取扱い。④橋脚以外の残留変位の判断基準。⑤構造物からの反射波を考慮した動的相互作用の取扱い等が考えられる。

本論文の内容は、道路協会耐震設計例WGにて著者らが担当した検討結果をまとめたものであり、関係各位に深く感謝する次第であります。