

鋼立体横断歩道橋を対象とした 非線形動的応答解析による耐震設計

清川 喜博¹・大西 隆²・森崎 啓³・馬渡 あかね⁴

^{1,2}正会員 建設省四国地方建設局香川工事事務所 道路調査課 (〒761-0104 高松市高松町 2422-1)

^{3,4}正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島 4-3-24)

立体横断歩道橋の構造的な特徴は、一般の道路橋梁と比較した場合、①橋梁全体の重量が比較的軽量であること、②階段部が併設されており、その方向・形式が全体系の振動特性に影響すること、③橋梁全体の固有周期が比較的短いこと、等が挙げられる。大規模地震を想定した立体横断歩道橋の耐震設計は、「道路橋示方書V耐震設計編」¹⁾(以下、道示と称す。)に準拠することとなる。「道示」では、鋼製ラーメン構造の耐震設計は、非線形履歴特性に基づくエネルギー一定則の適用性が限定されるため、動的解析で行うこととしている。一方、立体横断歩道橋を対象とした耐震設計例は少なく、その知見は限られている状況である。本論文は、橋長・階段部形式が異なる鋼立体横断歩道橋 2 橋を対象に、地震時保有水平耐力法レベルの大規模地震を想定した非線形動的応答解析結果、並びに耐震性の評価について報告する。

Key Words : pedestrian crossing bridge, seismic design, nonlinear dynamic response analysis,

1. はじめに

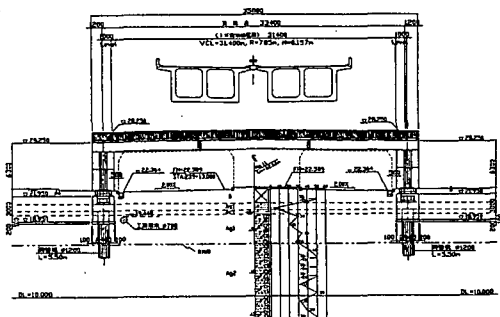
当該歩道橋は、四国横断自動車道路の延伸に伴う一般国道 11 号高松東道路の拡幅計画に伴い、建設計画中の鋼製立体横断歩道橋である。構造一般図を図-1 および図-2 に示す。また構造諸元を表-1 に示す。中森大橋東歩道橋は支間長 33.4 m、上天神西歩道橋は支間長 50.8 m を有し、上天神西歩道橋の階段は螺旋階段で計画されている。

静的な設計は、「立体横断施設技術基準・同解説」²⁾に準拠し、設計震度は $K_h=0.21$ で設計されている。

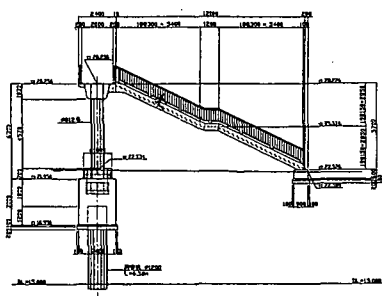
一方、地震時保有水平耐力法レベルの地震動に対する耐

震設計は、非線形履歴特性に基づくエネルギー一定則の適用性が限定されることから、動的解析で行うこととした。解析モデルは、地震時の挙動を精度よく再現するため、上部工～橋脚～基礎を一体とした三次元フレーム・パネ・マスモデルとした。

部材の耐力照査では、上部工は非線形化させないことを基本方針とした。また、先の兵庫県南部地震での歩道橋の被災状況を勘察し、階段取り付け部の耐力照査を実施した。以下、本論文では、主に固有値解析結果、非線形動的解析結果、および部材の耐震安全性の照査結果について報告する。



a) 側面図



b) 階段部側面図

図-1 中森大橋東歩道橋一般図

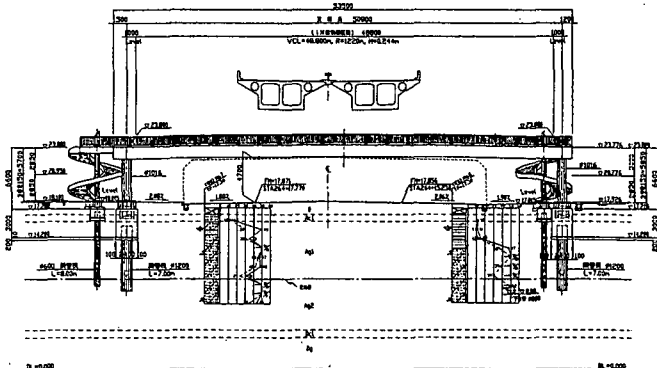


図-2 上天神西歩道橋一般図

表-1 構造諸元

	中森大橋東	上天神西
形式	鋼製ラーメン形式立体横断歩道橋	鋼製ラーメン形式立体横断歩道橋
支間長	33.400 m	50.800 m
設計震度	$k_h=0.21$	
橋脚	鋼管 (φ=812.8 mm)	鋼管 (φ=1016 mm)
基礎工	杭基礎	
使用材料	STK 490 (柱部材)、SKK400 (鋼管桁) STK 400 (その他の部材)	
適示方書	立体横断施設技術基準・同解説 (昭和 54 年 1 月) 道路橋示方書・同解説 (平成 8 年 12 月)	

2. 解析モデル

(1) 梁モデルの概要

解析モデル図を図-3に、各部材のモデル概要を表-2に示す。上天神西歩道橋の螺旋階段部は、等価な剛性を有する一本柱にモデル化した。主桁と階段の取付け部は、可動状態を表現できるようにばねでモデル化した。

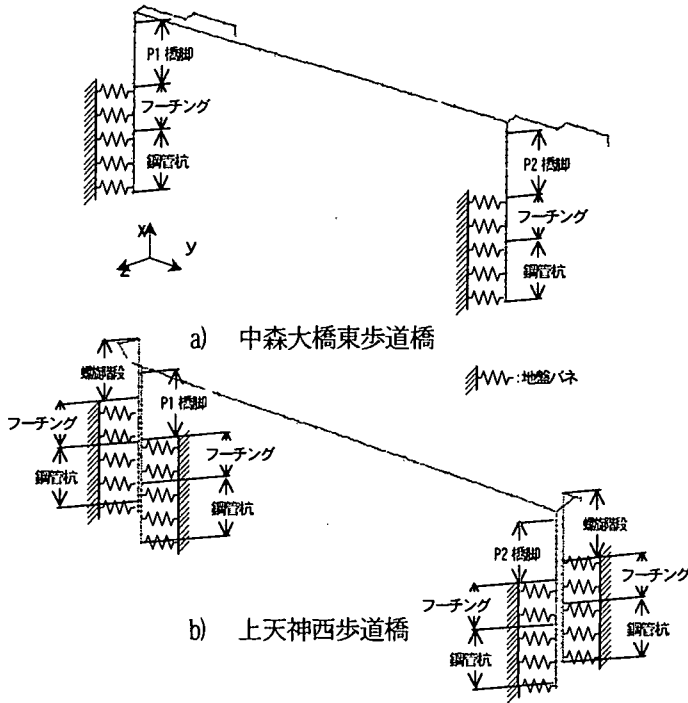


図-3 3次元骨組解析モデル

表-2 各部材のモデルの概要

上部構造 (主桁、階段)	線形はり要素
下部構造 (橋脚)	非線形はり要素
下部構造 (フーチング)	剛部材
基礎 (杭基礎)	非線形はり要素
ラーメン隅角部	剛部材
階段付け根部	剛部材

(2) 材料非線形特性

橋脚、鋼管杭の材料非線形特性 ($M-\phi$ 関係) は、死荷重軸力作用時の全塑性モーメントを上限とした完全弾塑性のバイリニア型にモデル化した。

フーチング、および杭基礎は「道示Ⅳ編 10.10.2」に基づき、フーチング前面および杭軸直角方向に受動土圧を上限值とした完全弾塑性型の地盤バネを配置した。

(3) 入力地震動

入力地震動は、「道示Ⅴ編」に規定される標準加速度応答スペクトル (タイプⅠ、タイプⅡ) に近い特性を有するように振幅調整されたⅡ種地盤の3波形³⁾を採用した。

3. 動的応答解析結果

(1) 固有値解析結果

固有値解析は、主桁・階段部の減衰定数を2%、橋脚の減衰定数を1%、基礎の減衰定数を10%として実施した。主要モードにおける固有値解析結果を表-3に示す。2橋とも、固有周期が比較的短いことが分かる。

非線形動的応答解析では、主要な振動モードに着目したレーリー減衰を用いることとした。動的応答解析に採用したレーリー減衰算出の係数 (α , β) を表-4に示す。着目した主要モードは、中森大橋東歩道橋では、橋軸方向は2次と7次の振動モード、橋軸直角方向は3次と6次の振動モードとした。また上天神西歩道橋では、橋軸方向は2次と3次の振動モード、橋軸直角方向は1次と3次の振動モードとした。

表-3 固有値解析結果

		固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	有効質量比	モード減衰定数
中森大橋東	橋軸	2次	4.67	0.21	0.515
		7次	17.84	0.06	0.236
	直角	3次	5.53	0.18	0.286
		6次	13.35	0.07	0.354
上天神西	橋軸	2次	4.45	0.22	0.356
		3次	6.95	0.14	0.228
	直角	1次	1.58	0.63	0.233
		3次	5.83	0.17	0.267

表-4 レーリー減衰算出の係数 (α , β)

		α	β
大橋東 中森	橋軸方向	0.0008	2.09332
	直角方向	0.0015	0.83220
神西 上天	橋軸方向	0.0009	1.35205
	直角方向	0.0020	0.25525

(2) 動的応答解析結果

a) 最大変位・加速度応答値

応答値が大きいタイプⅡ地震時の最大変位の3波平均値をまとめて表-5に、橋軸直角方向加振時の最大変位図を図-4に、それぞれ示す。

橋軸方向加振時の主桁端部での水平変位は、2橋とも約1.6cm、加速度は中森大橋東歩道橋では1036gal、上天神西歩道橋では905galとなった。

一方、橋軸直角方向の主桁中央部の最大水平変位の3波平均値は、上天神西歩道橋で32.3cmであるが、中森大橋東歩道橋では約1.6cmと小さい変位となった。

これは、中森大橋東歩道橋の階段の設置方向が橋軸直角方向であり、突張り効果が働いた結果であると考えられる。

表-5 最大変位の平均値 (タイプII加振時)

	中森大橋東 (cm)		上天神西 (cm)	
	橋軸方向	橋軸 直角方向	橋軸方向	橋軸 直角方向
主桁端部	1.58	0.75	1.52	4.07
主桁中央部	1.59	1.40	1.54	32.34
橋脚基部	0.50	2.74	0.50	1.44
階段中央部	1.10	0.23	-	-

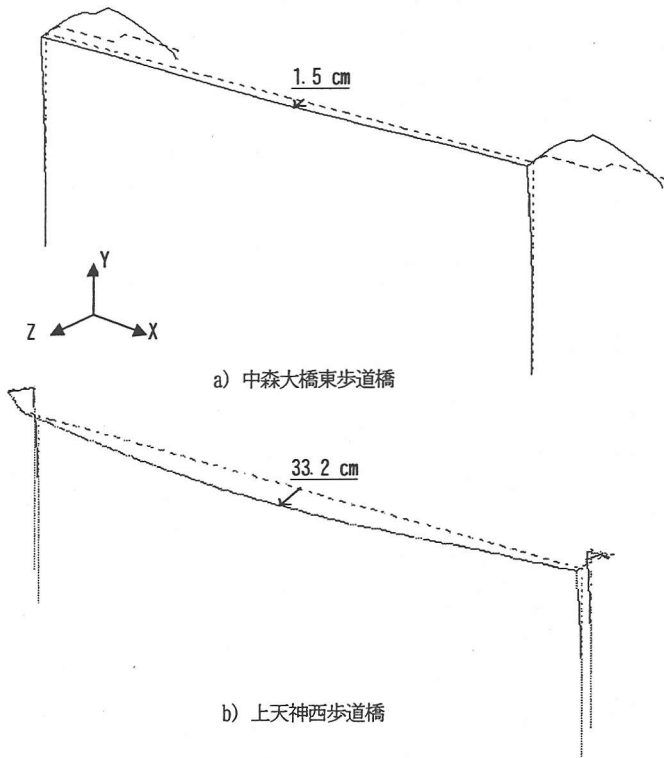


図-4 最大変位図

(タイプII、橋軸直角方向加振時)

表-6 最大断面力応答値 (タイプII加振時)

		中森大橋東歩道橋			
		震度法		動的応答解析結果	
		曲げモーメント(tf·m)	せん断力(tf)	曲げモーメント(tf·m)	せん断力(tf)
上部工	主桁端部 (P2側)	78.7 (死+活+温)	25.2 (死+活+温)	124.0 94.9	19.0 16.3
	主桁中央部	129.8 (死+活)	0.2 (死+活)	82.2 53.5	8.6 2.5
	階段中央部 (P2側)	26.3 (死+活)	8.7 (死+活)	6.4 43.4	10.6 10.9
下部工	P2橋脚基部 (アンカーボルト)	224.4 (死+活+衝+衝)	101.3 (死+活+衝+衝)	70.6 44.2	35.0 12.0
基礎工	P2橋脚基礎杭	267.4 (死+活+衝+衝)	51.0 (死+活+衝+衝)	149.5 66.9	28.9 15.6
階段取付け部のせん断力		-		-	15.92
		上天神西歩道橋			
		震度法		動的応答解析結果	
		曲げモーメント(tf·m)	せん断力(tf)	曲げモーメント(tf·m)	せん断力(tf)
上部工	主桁端部 (P2側)	223.4 (死+活)	39.4 (死+活)	268.4 442.6	34.8 50.7
	主桁中央部	248.7 (死+活)	0.1 (死+活)	176.6 462.0	13.1 5.5
下部工	P2橋脚基部 (アンカーボルト)	247.0 (死+活+衝+衝)	110.3 (死+活+衝+衝)	117.9 330.1	66.1 58.8
基礎工	P2橋脚基礎杭	247 (死+活+衝+衝)	110.3 (死+活+衝+衝)	171.6 365.6	44.9 89.5
階段取付け部のせん断力		-		-	20.86
凡例		* ()内は、断面決定時の荷重組み合わせ 死：死荷重、衝：衝突荷重、温：温度変化の影響 活：活荷重、活・衝：活荷重(衝突時)		* ₁ 上段は橋軸方向、下段は橋軸直角方向 * ₂ 影の断面力は、動的解析>震度法	

b) 応答断面力

P2橋脚側のタイプII地震時の最大応答断面力(曲げモーメント、せん断力)の3波平均値、並びに震度法での断面力をまとめて表-6に示す。

なお、震度法の欄の()内は、断面決定時の荷重の組み合わせケースを示している。また、動的解析結果において、影付きとなっている断面力は、震度法の断面力を上回ることを示すものである。

(3) 部材の耐震照査結果

a) 照査方針

耐震安全性の照査は、下記の照査方針に基づいて行った。

- ① 上部工：曲げモーメントは降伏曲げモーメント以内とする。せん断耐力は降伏せん断耐力以内とする。なお、降伏せん断応力度は Von. Mises の降伏条件を適用した。
- ② 橋脚躯体：「道示IV編 10.10.2」に準拠し、鋼管の降伏モーメント以内とする。せん断耐力の照査は、上部工と同様に行う。
- ③ アンカー部：「道路橋III編 2.2.4」に準拠し、アンカー部の破壊抵抗曲げモーメント以内とする。
- ④ 杭基礎：鋼管の降伏モーメント以内であること、および杭頭の鉛直ばねの反力が、杭の押込み支持力の上限值に達していないことを確認する。せん断耐力の照査は、上部工と同様に行う。
- ⑤ 階段取付け部：階段取付け部に発生するせん断力が、降伏せん断耐力以内であることを確認する。
- ⑥ 残留変位：残留変位は、動的解析において入力地震動終了後の10秒間の自由振動によって求めた。許容残留変位は橋脚高さhに対してh/100とする。

表-7 断面力照査結果一覧表 (タイプII、橋軸直角方向加振時)

	中森大橋東歩道橋					
	曲げモーメント照査			せん断力照査		
	曲げモーメント M(tf-m)	降伏曲げモーメント M _v (tf-m)	判定	せん断力 S(tf)	降伏せん断耐力 P _s (tf)	判定
主桁端部 (P2側)	95	618	M<M _v , OK	-	-	-
主桁中央部				2	859	S<P, OK
階段中央部 (P2側)	45	394	M<M _v , OK	-	-	-
階段取付け部のせん断力				15.92	16.85	S<P, OK
	上天神西歩道橋					
	曲げモーメント照査			せん断力照査		
	曲げモーメント M(tf-m)	降伏曲げモーメント M _v (tf-m)	判定	せん断力 S(tf)	降伏せん断耐力 P _s (tf)	判定
主桁端部 (P2側)	443	668	M<M _v , OK	51	909	S<P, OK
主桁中央部	462	668	M<M _v , OK	6	909	S<P, OK
P2橋脚基部	330	396	M<M _v , OK	-	-	-
アンカーボルト	330	371	M<M _v , OK	-	-	-
P2橋脚基礎杭	366	501	M<M _v , OK	-	-	-
階段取付け部のせん断力				20.86	31.04	S<P, OK

表-8 橋梁の残留変位照査結果一覧表

	橋軸方向			橋軸直角方向		
	残留変位 δ _R (cm)	許容残留変位 δ _{Ra} (cm)	判定	残留変位 δ _R (cm)	許容残留変位 δ _{Ra} (cm)	判定
中森大橋東歩道橋	0.052	5.90	δ _R <δ _{Ra} , OK	0.006	5.90	δ _R <δ _{Ra} , OK
上天神西東歩道橋	0.08	6.10	δ _R <δ _{Ra} , OK	0.310	6.10	δ _R <δ _{Ra} , OK

b) 照査結果

応答値が大きかった直角方向加振時の断面力照査結果一覧表を、表-7に示す。また、橋梁の残留変位照査結果一覧表を、表-8に示す。表-7より明らかなどおり、2橋とも曲げモーメント、せん断力は降伏耐力以内であり、上部工、下部工、基礎とも弾性応答であることが明らかとなった。従って、残留変位はほとんど発生しておらず、許容残留変位以内となった。また、階段取付け部のせん断力は、降伏せん断耐力以内であり、階段取付け部の安全性が確認できた。

4. まとめ

(1) 結論

当該歩道橋 (中森大橋東歩道橋、上天神西歩道橋) は、震度法 (Kh=0.21) で設計された鋼製ラーメン構造であり、地震時の挙動が複雑な橋梁に分類される。地震時保有水平耐力法レベルの地震動を想定した非線形動的解析を実施した結果、上部構造 (主桁、階段部)、橋脚、および基礎における発生断面力は、いずれも部材の降伏耐力を下回る結果となった。また、残留変位に関しても、地盤の非線形化にともなって若干の残留変位が発生するものの、許容残留変位を十分に下回ることが明らかとなった。以上より、地震時保有水平耐力法レベルの地震動に対し、十分な耐力とじん性を有し、耐震安全性に問題ないものと結論づけた。

(2) 当該歩道橋の耐力が非常に高い理由に関する考察

歩道橋の静的な設計は、通常の道路橋梁と同様に、主桁や橋脚・基礎などの設計における主要な設計荷重として、①死荷重、②活荷重、③風荷重、④温度変化の影響、⑤地震の影響、⑥衝突荷重、を考慮する。このうち、当該歩道橋の主桁や橋脚・基礎の断面決定ケースは、上記の②、③、④、⑥、のいずれかの荷重ケースとなっている。なお、当該歩道橋の支間長は30m~50mと大きく、上部工は活荷重 (群集荷重) に対するたわみ制限 (支間長の1/600以下) 並びに温度変化の影響に対応した断面、橋脚・基礎は自動車の衝突時荷重に対応した断面、となっている。これが、総重量が軽量な割に橋梁全体の剛度が非常に高い理由と考えられ、結果的に地震時保有水平耐力法レベルの地震動に対しても十分な耐力を有する結果となったものと考えられる。なお上述した傾向は、当該歩道橋固有の傾向とは考えにくく、同様な設計条件・形式の歩道橋であれば、概ね同様な傾向を示す可能性が高いものと推察する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V、IV、III編、1997。
- 2) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説、1979。
- 3) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、1997。