

R=30mの平面曲線を有する曲線橋の 耐震補強設計

○酒井友紀¹・濱中実¹・伴乙希¹

¹セントラルコンサルタント（株）中部支社（〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦1-18-22）

対象橋梁である木柵大橋は、急峻な山岳地に位置し、平面曲線半径がR=30mと非常に小さく地震時の挙動が複雑な橋梁である。既設橋梁は復旧仕様にに基づき落橋防止構造が設置されているのみであり、現行基準に基づく耐震性能照査の結果、橋脚柱部及び支承部、基礎の曲げ耐力が不足する結果となり、耐震補強が必要となった。耐震補強を行う上で、曲線橋という構造的特徴への対応に加え、橋脚基礎が柱状体深礎であり補強が困難であるため、基礎補強が不要となる補強工法選定も求められた。本稿では、このような特徴や制約条件を踏まえ、3次元非線形動的解析に基づいて実施した耐震補強設計について報告する。

Key Words：曲線橋，3次元動的解析，橋脚補強，橋脚基礎照査，水平力分担構造

1. はじめに

三重県では、「防災・減災，国土強靱化のための3か年緊急対策（H30.12.14，国土交通省）」に基づき、平成33年1月までの整備完了を目標とし、管内橋梁の耐震対策を進めている。

本業務の対象橋梁は、三重県松阪建設事務所が管理する第二次緊急輸送道路である一般国道166号の木柵大橋である。本橋の橋梁諸元を表-1に、位置図を図-1に示す。本橋は平成3年に供用された鋼3径間連続非合成曲線箱桁橋と鋼2径間連続非合成鉸桁橋の2連からなる橋長137.0mの橋梁である。

本橋は昭和55年の道路橋示方書（以下、道示と称す）にて設計されており、平成8年に復旧仕様に落橋防止構造が設置されているものの、橋脚や支承部は未補強であった。本業務にて実施した平成24年道路橋示方書¹⁾に基づく耐震性能照査の結果、橋脚柱部及び支承部の耐力が不足する結果となったため、耐震補強が必要となった。

本橋の構造的な特徴としては、1連目の箱桁部の平面曲線半径がR=30mと非常に小さい曲線橋であること、急峻地形のため下部工の高低差があることから地震時の挙動が複雑な橋梁となっている。また、橋脚の基礎構造が斜面上の柱状体深礎であり、補強が困難な状況であったため、基礎への影響を踏まえた補強工法選定が求められるとともに整備済みの落橋防止システムを極力活用した対策が求められた。

本稿では、上記のような特徴や制約条件を踏まえて、3次元非線形動的解析に基づいて実施した耐震補強設計について報告する。

表-1 橋梁諸元

上部工形式	A1-P3:鋼3径間連続曲線箱桁、P3-A2:鋼2径間連続鉸桁
下部工形式	橋台:逆T式(枕梁式)橋台、橋脚:張出式橋脚(円柱)
基礎工形式	橋台:単列深礎杭、橋脚:柱状体基礎
橋長(支間長)	137.0m(A1-P3:3x30.0m、P3-A2:2x22.6m)
幅員	有効幅員:7.8m、全幅員:10.1m
支持層(地盤種別)	岩盤(I種地盤)
架設年次	平成3年
適用示方書	昭和55年道路橋示方書・同解説

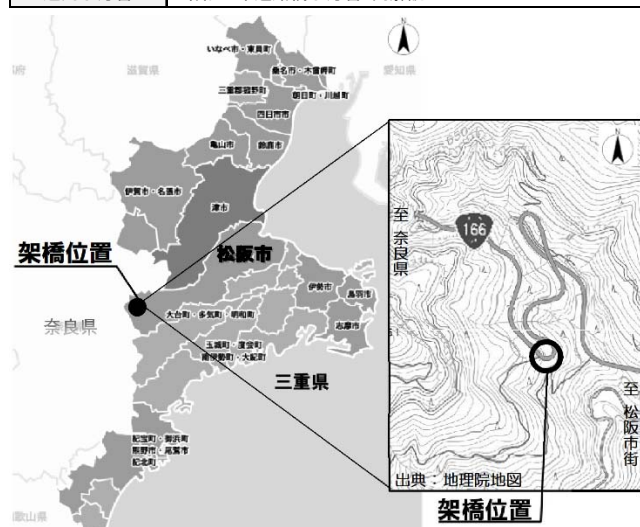


図-1 位置図

2. 既設橋梁の耐震補強整備状況

本橋は、平成8年に復旧仕様にて図-2、図-3及び表-2に示す耐震補強が実施されている。対策は落橋防止構造及び曲線橋部の変位制限構造（落橋防止構造荷重にて設計）のみで、その後、橋脚柱や支承部を含め耐震補強は行われていない。

表-2 既設橋の落橋防止システム整備状況

A1-P3 鋼3径間連続箱桁橋	落橋防止構造	①鋼製突起(主桁下フランジ付) ②鋼製横梁(主桁間)+RC突起(橋座)
	変位制限構造	鋼製突起(横桁付)+RC突起(橋座)
P3-A2 鋼2径間連続箱桁橋	落橋防止構造	①鋼製突起(主桁下フランジ付) ②鋼製横梁+RC突起
	変位制限構造	無し



写真-1 端支点の落橋防止構造 写真-2 中間支点の変位制限構造

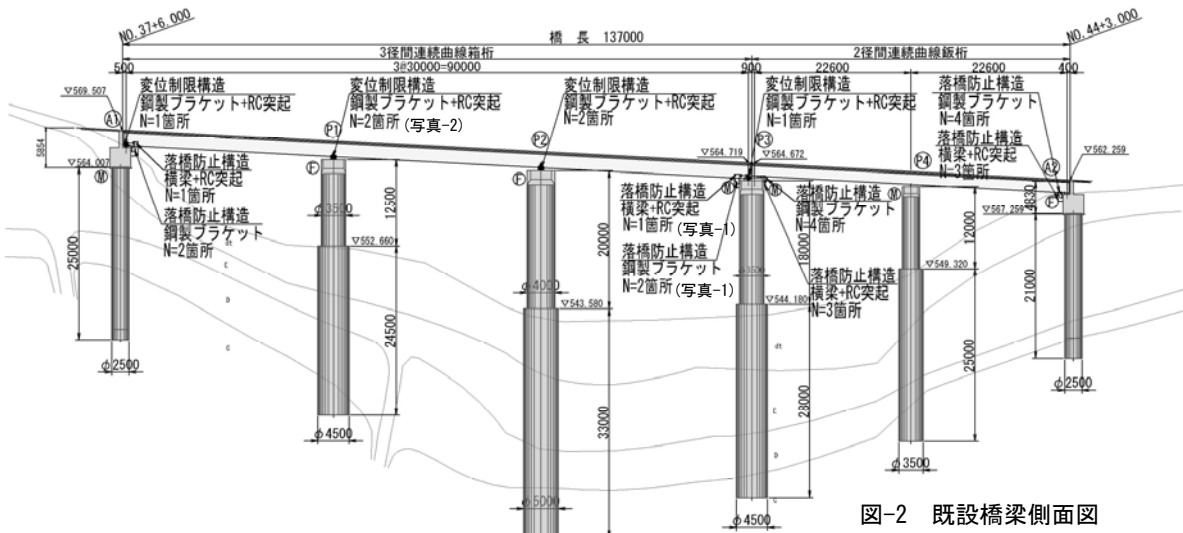


図-2 既設橋梁側面図

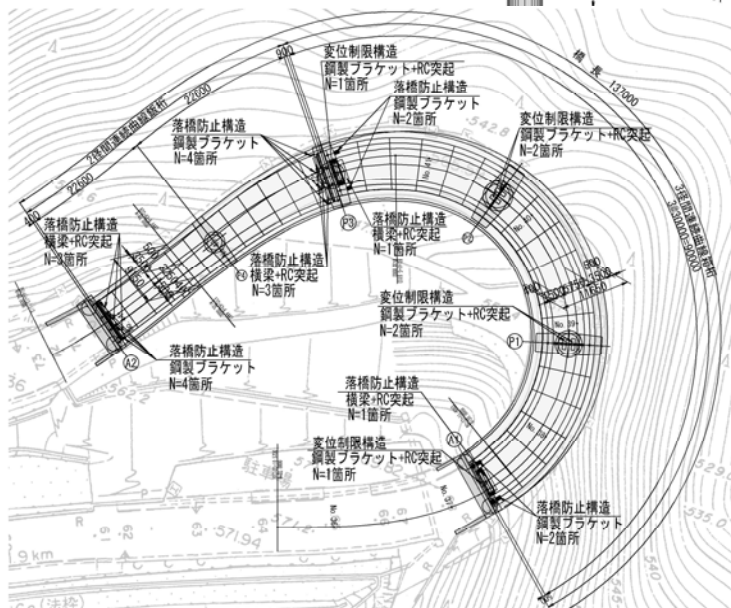


図-3 既設橋梁平面図

3. 既設橋梁の耐震性能照査

(1) 照査方法

1) 解析手法

照査は、平成24年道示に基づき実施した。本橋は曲線橋で複雑な振動挙動をする橋であるため、3次元モデルによる動的照査法（非線形時刻歴応答解析法）を適用した。また、曲線半径がR=30mと小さく、各橋脚にて最も不利となる加振方向が明確でないため、加振方向は15° ずつ変化させた。

2) 解析モデル

各部材のモデル化は以下とおり行った。解析モデル図を図-4に示す。

- ・上部工：線形はり要素（全断面有効）
- ・下部工：橋脚M-φモデル（剛性低下型トリリニア）
橋台線形はり要素
- ・支承：固定・可動（可動は死荷重×摩擦係数を降伏耐力とした弾塑性バネモデル）
- ・基礎工：基礎地盤バネ要素（動的バネ）

なお、減衰定数は平成24年道示に基づき設定した。

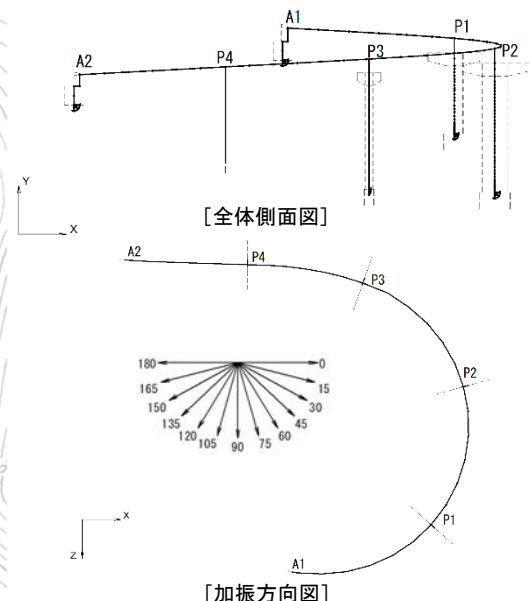


図-4 解析モデル

(2) 照査結果

1) 橋脚柱

橋脚柱は、表-3に示す通り、P1及びP2橋脚にて曲げ耐力、P1橋脚にてせん断耐力が不足するため、両橋脚の補強が必要となった。

2) 橋脚基礎

橋脚基礎は、表-3に示す通り、全ての基礎で曲げ耐力が不足（降伏）するため、補強が必要となった。

3) 支承

支承部については、既設支承はBP-A支承であり耐力及び移動量にて許容値を超過するため、取替もしくは補強が必要となった。

表-3 既設橋脚耐震性能照査結果（レベル2-タイプⅡ）

照査部材	照査項目		P1橋脚	P2橋脚	P3橋脚	P4橋脚	
橋脚柱	残留変位	δ (cm)	8.09	6.53	5.70	2.39	
		δ_a (cm)	14.70	22.20	18.60	12.30	
		比率	0.55	0.29	0.31	0.19	
		判定	OK	OK	OK	OK	
	曲げ耐力 (曲率)	段落し部	ϕ_{max} (1/m)	0.00114	0.00068	0.00049	0.00044
			ϕ_a (1/m)	0.00064	0.00055	0.00062	0.00093
			比率	1.78	1.24	0.79	0.47
			判定	NG	NG	OK	OK
		基部	ϕ_{max} (1/m)	0.00417	0.00196	0.00212	0.00093
			ϕ_a (1/m)	0.00200	0.00182	0.00217	0.00269
			比率	2.09	1.08	0.98	0.35
			判定	NG	NG	OK	OK
	せん断 耐力	段落し部	S_{max} (kN)	7963	5810	3738	2285
			P_s (kN)	6416	6210	4777	3299
			比率	1.24	0.94	0.78	0.69
			判定	NG	OK	OK	OK
		基部	S_{max} (kN)	7847	7279	5376	2814
			P_s (kN)	10466	14079	9887	5922
			比率	0.75	0.52	0.54	0.48
			判定	OK	OK	OK	OK
橋脚基礎	曲げ耐力	M_{max} (kN・m)	91.3	123.8	82.2	28.1	
		M_y (kN・m)	82.8	123.8	82.1	27.4	
		比率	1.10	1.00	1.00	1.03	
		判定	NG	NG	NG	NG	
	せん断耐力	S_{max} (kN・m)	9033	10258	7545	6734	
		P_s (kN・m)	9927	11634	9199	12502	
		比率	0.91	0.88	0.82	0.54	
		判定	OK	OK	OK	OK	

4. 耐震補強設計

(1) 設計上の課題

1) 基礎への影響を踏まえた耐震補強工法の選定

本橋の基礎は斜面上に位置する柱状体深礎であり、一般的な杭基礎で行うような増し杭対策では、既設基礎との剛性差が大きすぎて、補強効果が期待できない。また、地形及び岩盤支持層傾斜が大きいため、剛性の高い鋼管矢板基礎なども採用できず、現実的な補強が困難な状況である。

したがって、基礎の補強が不要となるような耐震性能評価手法の適用及び耐震補強工法の選定が必要であった。

2) 既設落橋防止システムを踏まえた耐震補強工法の選定

本橋は、復旧仕様での整備により、2種類の落橋防止構造が設置されている。このうち、鋼桁下フランジ付の鋼製突起については、両端橋台の場合では問題ないが、本橋のような片側が橋脚の場合では機能しない。もう1種類の落橋防止構造は主桁間の鋼製横梁と下部工のRC突起により構成されており問題なく機能する上に、規模が非常に大きく、撤去も容易でないことから極力活用することが望ましいと判

断した。しかし、免震化など上部工の変位が大きくなるような対策を行った場合、移動量が大きくなり既設落橋防止構造の遊間が不足し、下部工に想定外の外力が作用することが懸念される。したがって、既設落橋防止構造を極力活用可能な耐震補強工法の選定を行う必要があった。

(2) 基礎の耐震性能評価手法の見直し

平成24年道示では、柱状体深礎の場合、基礎の塑性化は許容されていない。しかし、先に示したように、本橋は基礎の補強が現実的でないことから、地震時の供用性や修復性に配慮した上で、基礎の塑性化を考慮した評価手法を適用することとした。

1) 基礎の降伏を許容した評価方法の適用

基礎の降伏を許容した耐震性能評価手法としては、土木研究所での研究成果²⁾や国土交通省道路局の事務連絡³⁾に示される基礎の限界状態（損傷度）に応じた許容塑性率に基づく手法とした。これらの資料には、柱状体深礎の許容塑性率は示されていないが、地震時の挙動が同様な式(1)に示すケーソン基礎の許容塑性率を準用して評価を行った。

$$\mu_{FL} = 1 + \frac{\delta_{Fu} - \delta_{Fy}}{\alpha \cdot \delta_{Fy}} \quad \dots \text{式(1)}$$

ここに、

μ_{FL} ：基礎の許容塑性率

δ_{Fu} ：基礎終局時の上部工慣性力作用位置での水平変位

δ_{Fy} ：基礎興福寺の上部工慣性力作用位置での水平変位

α ：安全係数（損傷度Ⅲの場合1.8）

本橋における限界状態（損傷度）としては、本橋が緊急輸送路上に位置すること、迂回路がないことから、橋の耐震性能2を確保することとし、基礎の最大強度点を超えず、十分な安全性を有するとともに、残存復元力及び残存変形性能も十分に有する状態（損傷度Ⅲ）とした。

2) 照査結果

上記の照査手法による既設橋脚基礎の耐震性能照査の結果、表-4に示すように、全ての基礎で損傷度Ⅲの許容塑性率を満足する結果となった。

表-4 塑性率照査結果

照査項目		P1橋脚	P2橋脚	P3橋脚	P4橋脚
応答塑性率	μ_{FR} (-)	1.40	1.14	1.06	1.21
許容塑性率	μ_{FL} (-)	2.62	2.64	2.67	1.82
比率		0.53	0.43	0.40	0.66
損傷度		Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
判定		OK	OK	OK	OK

(3) 補強工法検討

耐震補強工法の検討では、まず、部材補強と免震化といった橋梁全体での補強方針を決定した上で、決定した方針の具体的な補強工法を検討した。本稿では、紙面の都合上、耐震補強設計のうち、橋脚補強についてのみ示す。

1) 補強方針案の抽出

橋梁全体での補強方法としては、下記の案が挙げられる。本橋の場合、一般的な部材補強案だけでな

く、支承部の補強が必要であることや基礎への影響を最小化することが求められるため、免震支承への取替による免震化案についても検討を行った。ここで、ダンパーは方向依存性があるため、曲線橋である本橋における対策効果が期待できないと判断し検討しないこととした。

第1案 全免震化

第2案 部分免震化（A1橋台－P3橋脚間のみ）

第3案 部材補強

各案の概要を以下に示す。

a) 第1案 全免震化

全支点の支承を免震支承に取替え、免震支承でのエネルギー吸収により下部・基礎工への影響を抑えることを期待した案である。レベル2地震に対応した支承に取替えるため、別途支承補強が不要であり、維持管理にも配慮した案である。

b) 第2案 部分免震化（A1橋台－P3橋脚間のみ）

第1案の場合、現況照査で満足している可動橋脚を免震化することにより、現況よりも大きな地震時水平力を負担し耐力不足となることが懸念されたため、現況照査にて耐力不足となる曲線箱桁部（A1－P3）のみ免震化した案である。P3－A2間は支承の取替えを行わないため、支承部の補強が必要となる。

c) 第3案 部材補強

現況照査における耐力が不足するP1・P2橋脚及び支承部を補強（水平力分担構造の追加設置）した案である。

2) 補強方針案の決定

各案の検討結果一覧を表-4に示す。結果として、以下の理由から、第3案 部材補強案を採用することとした。

- ・第1案、第2案の免震化案は、地震時の移動量が大きく桁遊間量及び既設落橋防止構造の遊間量が不足する結果となったため、現道通行止めを伴う桁切欠きや落橋防止構造の全取替えが必要となり、現実的な補強とならなかった。
- ・免震化案に対しては、遊間確保を前提としない桁衝突モデル及び緩衝材を桁端部に設置したケースでの耐震性能照査を実施したが、いずれも免震支承の変位が拘束され、期待する免震効果が発揮されず、橋脚補強が不要とはならなかった。
- ・部材補強案については、耐力が不足するP1橋脚、P2橋脚を補強した場合にも、基礎の応答塑性率は、要求性能である損傷度Ⅲの範囲に収まること、既設の落橋防止システムも桁端部の落橋防止構造の遊間を広げる程度の比較的容易な改良で対応可能であった。

3) 補強工法検討

a) P1橋脚

本橋脚は基部の曲げ耐力が大きく不足するため、アンカー定着を伴う基部補強が必要となる。補強工法としては、RC巻立て工法や鋼板巻立て工法が考えられるが、経済性で優位となるRC巻立て工法を採用した場合でも、基礎の応答塑性率の増加が小さく、損傷度Ⅲに十分収まっているため、同工法を採用することとした。

b) P2橋脚

本橋脚は段落し部の補強が主であるため、考えられる下記案にて比較検討を実施した結果、基礎への影響や経済性から第2案 連続繊維巻立て工法（炭素繊維シート）を選定した。比較表を表-5に示す。

第1案 RC巻立て工法
第2案 連続繊維巻立て工法（炭素繊維シート）
第3案 連続繊維巻立て工法（アラミド繊維シート）

表-5 耐震補強方針検討結果一覧

下部工名			A1橋台	P1橋脚	P2橋脚	P3橋脚		P4橋脚	A2橋台
支承条件(橋軸)			可動	固定	固定	可動	可動	可動	固定
既設 照査結果	橋脚	曲げ	OK	NG (基部・梁端)	NG (基部・梁端)	OK	OK	OK	OK
		せん断	OK	NG (梁端)	OK	OK	OK	OK	OK
	支承		NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
第1案	全免震化	橋脚補強	---	不要	不要	不要		不要	---
		支承補強	取替 (免震)	取替 (免震)	取替 (免震)	取替 (免震)	取替 (免震)	取替 (免震)	取替 (免震)
		桁端改良	必要	---	---	必要	必要	---	必要
		既設落防 改良	必要	必要	必要	必要	必要	---	必要
		基礎補強	---	不要	不要	不要		不要	---
第2案	部分免震化	橋脚補強	---	不要	不要	不要		不要	---
		支承補強	取替 (免震)	取替 (免震)	取替 (免震)	取替 (免震)	水平力 分担構造	水平力 分担構造	水平力 分担構造
		桁端改良	必要	---	---	必要	不要	---	不要
		既設落防 改良	必要	必要	必要	必要	不要	---	不要
		基礎補強	---	不要	不要	不要		不要	---
第3案	部材補強	橋脚補強	---	RC巻立	繊維シート 巻立	不要		不要	---
		支承補強	水平力 分担構造	水平力 分担構造	水平力 分担構造	水平力 分担構造	水平力 分担構造	水平力 分担構造	水平力 分担構造
		桁端改良	不要	---	---	不要	不要	---	不要
		既設落防 改良	必要	不要	不要	必要	不要	---	不要
		基礎補強	---	不要	不要	不要		不要	---

5. おわりに

本業務では、既設橋梁の構造特性を踏まえて解析手法を選定した上で、基礎の降伏を許容した基礎照査手法を適用したことにより、基礎補強が必要となることなく、既設落橋防止構造も最大限活かした耐震補強設計を行うことができた。

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）,2012.
- 2) 土木研究所資料：既設道路橋基礎の耐震性能簡易評価手法に関する研究, 2010.
- 3) 国土交通省道路局：既設道路橋の耐震性能照査及び耐震補強設計,2015.