

既設大規模橋梁の耐震補強対策

加藤真吾¹・新井雅之²・森崎啓²・西村学²

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 中国支社 技術部
（〒730-0051 広島市中区大手町2丁目1番1号）

²正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社 交通技術部
（〒532-0011 大阪市淀川区西中島4丁目3番24号）

1. はじめに

山口県屋代島大島町と本土を結ぶ一般国道437号大島大橋は、昭和51年の開通から約25年の併用を経て現在に至るが、その間、海上橋梁という過酷な環境から鋼材の腐食やコンクリートのひび割れ、劣化、変状などが生じている。また、この間の社会情勢の変化から道路橋に要求される性能も変化しており（活荷重の25ton対応、大規模地震対応）、県内の交通の要所として本橋がこれからも適切な維持管理のもと半恒久的な使用に供するためには、現時点で可能な対策を選定してこれを講じることが必要となっている。

本検討は、橋長1020mの大規模な既設橋梁に対する本格的な耐震補強設計を全国に先駆けて実施し、大規模地震動に堪え得る耐震補強対策の設計を行ったものである。解析は、橋梁規模が大規模かつ複雑な構造であることから、非線形動的解析（橋梁全体系立体トラスモデルを用いた時刻歴応答解析）を実施し、橋梁全体系のリダンダンシーの確保に着目した耐震補強設計を行った。

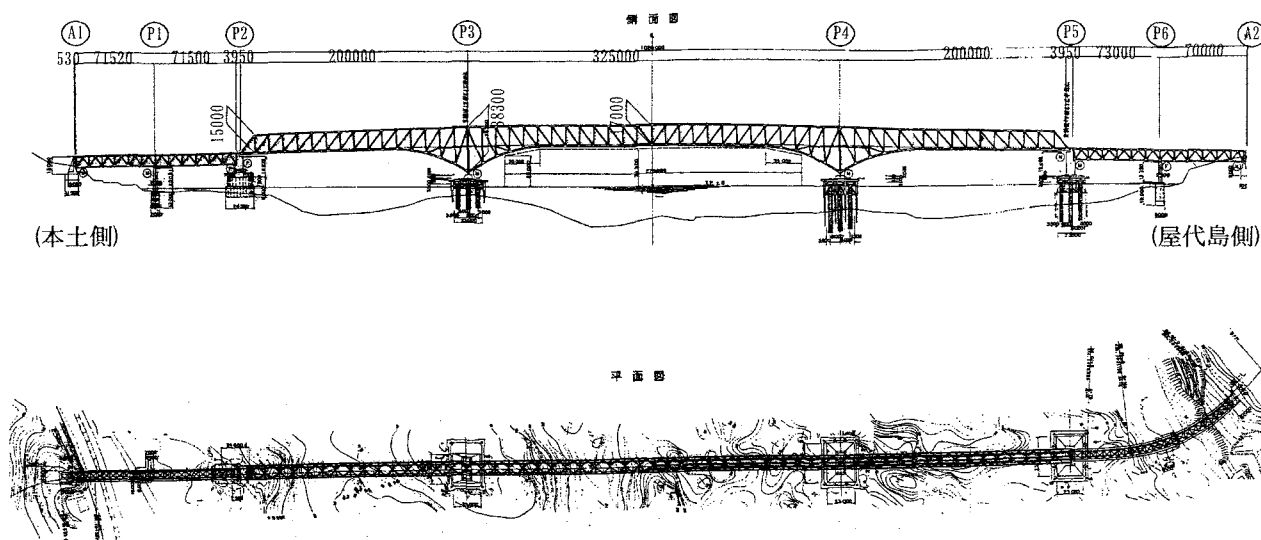


図-1. 検討対象橋梁の全体一般図（上：側面図、下：平面図）

2. 対象橋梁の概要

検討対象橋梁は、図-1に示すように屋代島と本土を結ぶ海上橋梁であり屋代島側はR=150mの曲線橋となっている。

《橋梁の諸元》

路線名：県道大島玖珂線（大島大橋有料道路）
→一般国道437号

起終点：起点 山口県大島郡大島町小松瀬戸
終点 山口県玖珂郡大島町神代

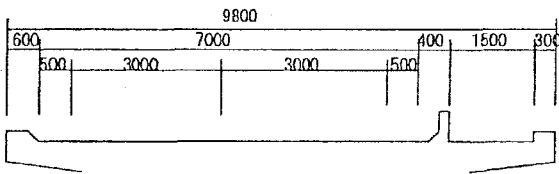
道路規格：第3種第3級

設計速度：V=40km/h

橋長：L=1020.0m

支間割り：A1～P2（大島側） 71.520m+71.500m
P2～P5 200.000m+325.000m+200.000m
P5～A2（大島側） 73.000m+70.000m

幅員構成：総幅員 W=9.800m
車道 7.000m
歩道 1.500m



適用示方書：道路橋示方書 S47.3

設計活荷重：TL-20

完成年：昭和51年

計画交通量：14,200台/日

現況交通量：9,177台/12h, 11,321台/日
(H.9センサス, 平日)
: 10,266台/12h, 13,128台/日
(H.9センサス, 休日)

表-1. 構造形式

区分	名称	構造形式
上部工	大島側取付け橋	鋼2径間連続上路式トラス
	主橋梁	鋼3径間連続下路式下弦曲弦トラス
	大島側取付け橋	鋼2径間連続上路式曲線トラス
下部工	A1橋台	逆T式橋台，箱型オープンケーソン基礎
	P1橋脚	矩形柱壁式橋脚，小判型オープンケーソン基礎
	P2橋脚	矩形柱壁式橋脚，円形重力式直接基礎
	P3橋脚	多柱式基礎（鋼管杭φ3.5×9本）
	P4橋脚	多柱式基礎（鋼管杭φ3.5×12本）
	P5橋脚	矩形柱中空壁式橋脚，多柱式基礎（鋼管杭φ3.5×12本）
	P6橋脚	矩形柱壁式橋脚，小判型ニューマチックケーソン基礎
防衛工	A2橋台	逆T式橋台，箱型オープンケーソン基礎
	P3橋脚用	鋼立体トラス+ケーブル式防衛工（岩国側のみ）
	P4橋脚用	鋼立体トラス+ケーブル式防衛工（柳井側のみ）
	P5橋脚用	鋼立体トラス

3. 橋梁の3次元非線形動的解析

本橋梁は大規模でかつ複雑な構造であることから、3次元トラスモデルを用いた非線形動的解析を実施し、レベル2地震動タイプⅠ、タイプⅡ各3波形の入力地震動による応答値に対して耐震安全性の照査を行い、耐震補強検討箇所を特定した。

(1) 解析モデル及び解析条件

表-2に解析モデル一覧表、図-2に解析モデル図を示す。

表-2. 解析モデル一覧表

部 材		モ デ ル
上部構造	床版、縦桁	床版と縦桁の剛性を合成した等価線形はり要素
	その他の部材	線形はり要素
下部構造		非線形はり要素（M-φ関係 トリリニア型）
基礎構造	ケーソン基礎	線形ばね要素
	多柱式基礎	海中部：線形はり要素 地中部：線形ばね要素
支承	鋼製支承	線形ばね要素
	免震支承	非線形ばね要素（Q-δ関係 バイリニア型）
	ダンパー	非線形ばね要素（Q-δ関係 バイリニア型）

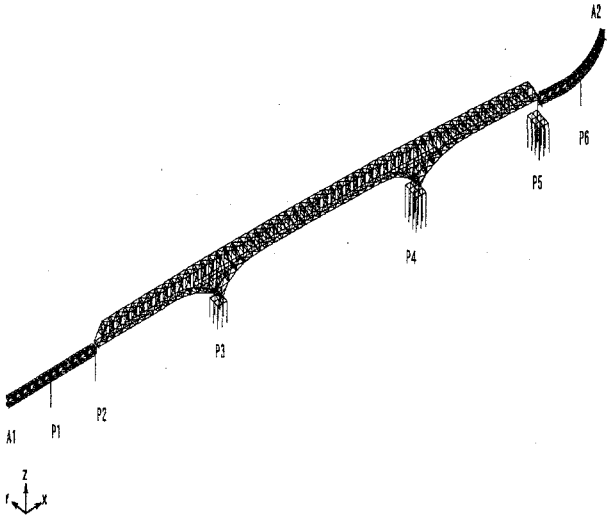


図-2. 解析モデル図

(2) 支承形式の決定

動的解析を行うに先立ち、橋梁全体の耐震安定性向上のため現在の支承を取り替える事を前提に、当該橋梁に最も適した支承条件の組み合わせを検討した。

a) 取付橋（鋼2径間連続上路式トラス）

取付橋は、本土側、大島側ともに地盤は堅固で安定しており、多径間連続橋であることから固定可動支承を免震支承に取り替えた免震構造とした。

b) 主橋梁（鋼3径間連続下路式下弦曲弦トラス）

主橋梁は、地盤は堅固であるが基礎形式が海中の多柱式基礎であるため、地震時には基礎の応答が大きくなる。また、固有周期も2秒以上と長いことや、P3橋脚、P4橋脚の支承反力も23267kNと大きいことから、鋼製支承を用いた固定可動構造が適している。また、橋梁全体の地震時慣性力を大幅に低減する方策として、可動支承部に免震ダンパーとして併用可能な高減衰ゴム支承を設置した。

表-3に現況の支承条件、表-4に支承条件の選定結果を示す。

表-3. 現況の支承条件

方向	A1	P1	P2 (本土側)	P2 (主橋側)	P3	P4	P5 (主橋側)	P5 (大島側)	P6	A2
橋軸方向	可動	可動	固定	固定	可動	可動	可動	可動	固定	可動
橋軸直角方向	固定	固定	固定	固定	固定	固定	固定	固定	固定	固定

表-4. 支承条件の選定結果

方向	A1	P1	P2 (本土側)	P2 (主橋側)	P3	P4	P5 (主橋側)	P5 (大島側)	P6	A2
橋軸方向	免震	免震	免震	固定	可動 + ダンパー	可動 + ダンパー	可動 + ダンパー	免震	免震	免震
橋軸直角方向	免震	免震	免震	固定	固定	固定	固定	免震	免震	免震

(3) 解析結果及び最大応答値

表-5に最大応答値総括表を、図-3に橋軸方向の最大応答変位図、図-4に橋軸直角方向の最大応答変位図を示す。

* 大島大橋 橋軸方向 * TYPE2-1 3波平均
 応答変位 3波平均値 (Tx) (Ty) (Tz)
 縦断スケール 0 100 (m)
 横断スケール 0 2.0 (m)



図-3. 最大応答値図
 (地震動タイプⅡ、橋軸方向)

* 大島大橋 直角方向 * TYPE2-1 3波平均
 応答変位 3波平均値 (Tx) (Ty) (Tz)
 縦断スケール 0 100 (m)
 横断スケール 0 2.0 (m)

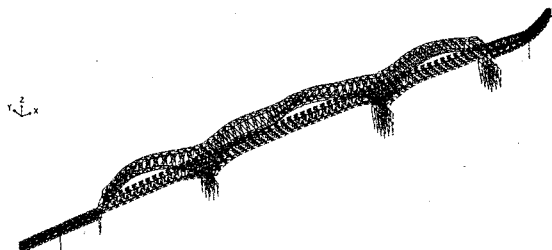


図-4. 最大応答値図
 (地震動タイプⅡ、橋軸直角方向)

表-5. 最大応答値総括表

応答種別	入力地震動		橋軸方向		直角方向		
			タイプⅠ	タイプⅡ	タイプⅠ	タイプⅡ	
最大応答加速度 α (gal)	上部工慣性力作用位置 (床版)	A1	270	341	419	768	
		P1	270	340	385	550	
		P2 (本土側)	270	338	562	1046	
		P2 (主橋側)	496	810	774	2298	
		P3	465	666	669	1331	
		P4	556	1001	770	863	
		P5 (主橋側)	632	1268	577	842	
		P5 (大島側)	525	551	878	1083	
		P6	517	570	298	448	
		A2	313	447	305	591	
		橋脚天端	P1	357	691	341	818
			P2 (本土側)	560	1606	608	1773
	P2 (主橋側)		692	2016	742	2194	
	P5 (主橋側)		637	1027	574	823	
	P5 (大島側)		557	795	526	713	
	P6		437	883	348	742	
	橋脚基部 (7-7' 天端)	P1	234	560	227	540	
		P2	403	1145	434	1260	
		P3	510	1533	405	959	
		P4	454	569	479	531	
		P5	463	562	476	614	
		P6	248	550	251	557	
	最大応答変位 δ (cm)	上部工慣性力作用位置 (床版)	A1	10.9	11.8	5.1	9.2
			P1	10.9	11.8	10.4	11.4
P2 (本土側)			10.9	11.8	12.7	14.5	
P2 (主橋側)			26.9	26.7	4.8	13.2	
P3			27.2	26.2	19.0	18.4	
P4			29.7	28.7	26.0	22.6	
P5 (主橋側)			305.0	29.7	19.2	23.4	
P5 (大島側)			21.4	23.6	22.3	29.8	
P6			21.2	23.6	8.8	13.8	
A2			11.5	13.1	3.0	6.4	
橋脚天端		P1	3.2	4.0	1.3	1.6	
		P2 (本土側)	3.6	8.9	3.7	10.4	
		P2 (主橋側)	4.5	10.8	4.4	12.5	
		P5 (主橋側)	23.5	27.5	18.9	23.3	
		P5 (大島側)	21.2	24.8	17.7	21.9	
		P6	2.0	3.4	0.9	1.3	
橋脚基部 (7-7' 天端)		P1	0.3	0.4	0.3	0.4	
		P2	2.6	6.4	2.7	7.5	
		P3	4.9	13.1	6.4	7.7	
		P4	16.5	18.1	16.9	15.4	
		P5	17.9	21.0	16.2	20.1	
		P6	0.6	0.9	0.3	0.5	
支承 (上下部工間 相対変位)		A1	10.5	10.5	4.3	8.4	
		P1	6.4	8.3	7.8	9.3	
		P2 (本土側)	8.7	15.2	11.1	17.2	
		P2 (主橋側)	---	---	---	---	
		P3	14.2	18.4	---	---	
		P4	30.6	32.0	---	---	
		P5 (主橋側)	43.6	48.3	---	---	
		P5 (大島側)	8.3	11.5	2.7	8.1	
		P6	14.5	16.2	6.6	11.5	
		A2	11.6	12.4	1.3	3.0	
最大応答 モーメント 曲げ M (kN・m)		橋脚基部	P1	59029	63835	93761	116477
			P2	411887	547077	311183	772843
			P5	212733	308850	248580	284183
			P6	66191	68596	62682	84599
	最大断力 応答 S (kN)	橋脚基部	P1	4058	5027	4929	8045
P2			32724	61745	29320	82560	
P5			18996	26311	19788	24406	
P6			4170	6262	4079	6810	

数値は3波平均値を示す。

4. 耐震補強対策工法の検討

(1) 耐震補強設計方針

動的解析により発生する最大応答値に対する各部材の照査方法は、道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編¹⁾に準じるものとし、表-6に本橋の設計に対する照査方法を示す。

また、照査の結果要求性能を満足しない部材に対し、補強または別構造を検討することとする。

なお、支承取替に伴う補強、落橋防止構造設置に関する補強は、耐震性能の照査に関係なく行うものとする。

部材毎の耐震補強設計方針を表-7に示す。

表-6. 耐震性能の照査方法

部 材		照 査 方 法	備 考
上部工	一次部材	応力度が降伏応力度以下となることを照査する。(断面力の常時換算係数: $\alpha=1.70$)	弦材、支材、垂直材、斜材
	二次部材	応力度が引張強度以下となることを照査する。注①(断面力の常時換算係数: $\alpha=2.33$)	横橋、対横橋
	遊間	桁端部の応答相対変位が遊間量以下であることを照査する。	
下部工	①橋脚基部の応答塑性率が許容塑性率以下となることを照査する。注②② 橋脚基部の応答曲率が許容曲率以下となることを照査する。安全係数 $\alpha=6.0$ (地震動タイプⅠ) $\alpha=3.0$ (地震動タイプⅡ) ②残留変位が許容残留変位以下となることを照査する。		
基礎工	ケーソン基礎	基礎が降伏に達しないことを照査することを原則とするが、既設橋であることから、基礎に塑性化が生じることも考慮する。この場合には、基礎の応答塑性率及び応答変位が許容塑性率及び許容変位以下となることを照査する。	P2橋脚基礎は根入れの浅いケーソン基礎であり、直接基礎として扱えるため、照査の対象としない。
	多柱式基礎		
支承	ピンローラ	①橋軸方向については、応答移動量が許容移動量以下であることを照査する。 ②橋軸直角方向については、支承本体及び取り付け部材に生じる断面力が、当該部材の耐力以下となることを照査する。	
	ピン固定	支承本体及び取り付け部材に生じる断面力が、当該部材の耐力以下となることを照査する。	
	免震支承	①支承本体及び取り付け部材に生じる断面力が、当該部材の耐力以下となることを照査する。 ②支承本体に生じるせん断ひずみが許容せん断ひずみ以下であることを照査する。 ③支承本体の座屈に対して安全であることを照査する。	①については、動的解析結果の断面力を用いて取付部材を設計するため、照査の対象としない。

注① 基本設計時の土木研究所との協議結果を基に、二次部材が座屈した場合でも全体的な構造の不安定となることはないと考えられるため、引張強度に対する照査を行うこととした。

注② 当該下部工は軸方向鉄筋の段落しが行われているため、まず「既設道路橋の耐震補強に関する参考資料」(平成9年8月、日本道路協会)に基づいた損傷断面の判定を行う。損傷断面の判定結果、段落し部で損傷が先行すると判定された場合には、既設橋脚を補強し、損傷が躯体基部先行の曲げ破壊型に移行した上で、耐震性能の照査を行うこととする。

表-7. 部材毎の耐震補強設計方針

部 材	耐震補強設計方針
上部工	・ 応力度が許容値を超過する部材に対し、断面増厚やリブによる補強を行うものとする。 ・ 支承取替を行う場合は、ジャッキアップ用の補強を行うものとする。 ・ 落橋防止構造を設置する部位では、落橋防止構造の種類に応じた補強を行うものとする。
下部工	・ 当該橋脚は、軸方向鉄筋の段落しがあるため、損傷が「躯体基部先行の曲げ破壊型」となるように、RC巻立てによる補強、またはそれに代わる補強を行うものとする。 ・ 動的解析による耐震性能の照査で、橋脚基部の応答断面力が耐力を超過する場合には、耐震性能を満足するように、補強鉄筋量の増加や、補強断面の増加を行うものとする。
基礎工	・ ケーソン基礎の断面力が耐力を超過する場合は、断面力が耐力以下となるように地震時水平力の分担等を調整し、原則として、ケーソン基礎の補強が生じないようにするものとする。 ・ 多柱式基礎の全ての杭において、杭の降伏が確認された場合は、増杭による補強を行うものとする。 ・ P2橋脚基礎は、有効根入れ深さと基礎短辺幅の比が1/2以下であり、根入れが浅いことから、直接基礎として扱うこととし、レベル2地震動に対する照査は行わないものとする。 ³⁾
けた遊間、伸縮装置	・ 支承を免震支承に取替えた場合、けたと橋台(または橋脚)の遊間は、免震支承の設計変位以上設けるものとする。 ・ 橋軸直角方向の支承条件を弾性支持とする場合は、橋軸直角方向にも変位吸収が可能な伸縮装置を採用するものとする。ただし、伸縮装置はレベル1地震動に対して損傷を生じないように設計する。

(2) 耐震補強設計の概要

動的解析による最終照査結果から、耐震補強を必要とする部材、および支承取替に伴う補強を必要とする部材に対する耐震補強設計の概要を、表-8および図-5に示す。

表-8. 耐震補強設計の概要

橋梁	部 位	耐震補強設計概要	備考	
本土側 取付橋	上部工	端支点部	落橋防止装置設置工と支承取替に伴うジャッキアップ用補強を兼ねた RC 巻立工	①
		中間支点部	ジャッキアップ用補強工	②
	支承	全支点	支承取替工 (鋼製支承→免震支承)	③
		A1 橋台	落橋防止設置工	④
	下部工	P1 橋脚	PC 巻立補強工	⑤
		P2 橋脚	・落橋防止設置工	⑥
			・PC 巻立補強工	⑦
			・桁遊間を確保するための胸壁頂部切欠工(100mm)	⑧
	主橋梁	端支点部	落橋防止設置工	⑨
		中間支点部	・補助支承設置のための部材張出工	⑩
・ダンパー設置部の水平材補強工			⑪	
上部工		支材	断面増厚補強工 7 部材	⑫
		上横橋	断面増厚補強工 22 部材	⑬
		下横橋	断面増厚補強工 10 部材	⑭
		P5 橋門端対横橋	断面増厚補強工 2 部材	⑮
支承		中間支点部	・補助支承設置工	⑯
			・ダンパー設置工	⑰
下部工		P2 橋脚, P5 橋脚	落橋防止設置工	⑱
	P3 橋脚, P4 橋脚	補助支承およびダンパー据付部の台座補強工	⑲	
大島側 取付橋	上部工	・落橋防止装置設置工と支承取替に伴うジャッキアップ用補強を兼ねた RC 巻立工	㉔	
		・ダンパー設置のための部材張出工		
	中間支点部	ジャッキアップ用補強工	㉕	
		支承	全支点	支承取替工 (鋼製支承→免震支承)
	端支点		ダンパー設置工	㉗
	下部工	P5 橋脚	・落橋防止設置工	㉘
			・ダンパー設置工	㉙
		P6 橋脚	・PC 巻立補強工	㉚
			PC 巻立補強工	㉛
	A2 橋台	・落橋防止設置工	㉜	
・ダンパー設置工		㉝		
・桁遊間を確保するための胸壁頂部切欠工(50mm)		㉞		

※) 備考欄の番号は、図-5の番号に対応

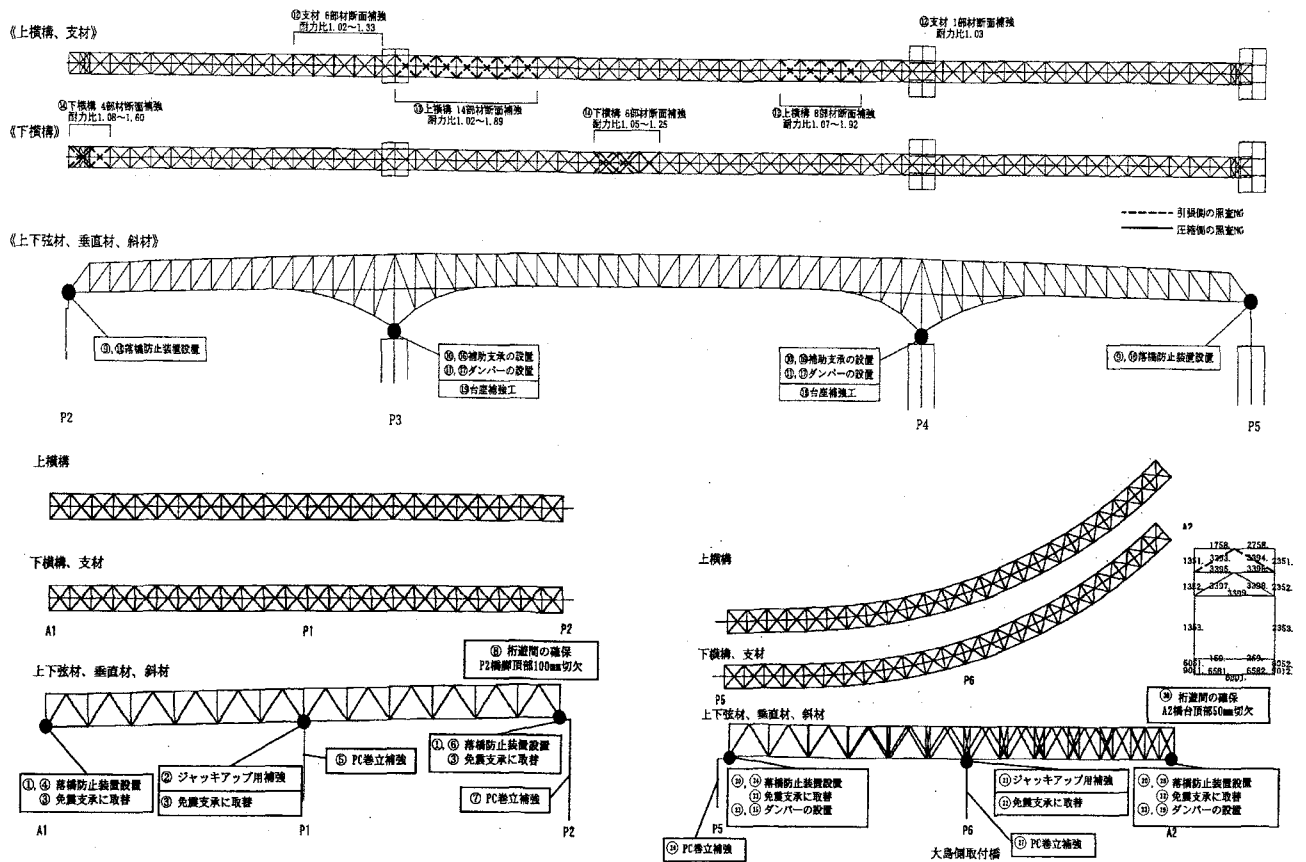


図-5. 耐震補強設計概要図

(3) 上部工耐震補強設計工法

a) 上部工主部材の補強工法

部材に鋼板によるカバープレートを取り付ける、『カバープレート工法』を採用する。

図-6に概念図を添付する。

b) 支承取替え工の補強

支承取替え工による補強と落橋防止構造取り付けによる補強を併用できる方法を採用する。

①端支点 (A1, P2, P5, A2) では、支承取替え時のジャッキ支点反力を受け持つための補強工法として、落橋防止構造と併用させた「下支材RC巻き立て工法」を採用する。

②中間支点 (P1, P4) では、支承取替え時のジャッキ支点反力を受け持つための補強工法として、軽量で済む鋼板による補強を採用する。(中間支点のため落橋防止構造は取り付けられない)

c) 落橋防止構造取り付けによる補強工

落橋防止構造は、既設橋であることや現地の狭い空間でも設置ができ、尚かつ経済的な、「下部工からのRC突起を上部工にぶつけるタイプ」を採用する。

①A1, P2, (P1側), P5 (P6側), A2では、上記「下支材RC巻き立て工法」によるRC部材を補強工として併用する。

②P2 (P3側), P5 (P4側) では、主桁下フランジにブラケットを設置して落橋防止構造とする。

d) 補助支承取り付けによる補強工

図-7に補助支承取り付けのための補強工法図を示す。

この構造は既設支承を存続させ、既設支承が分担できる地震時鉛直反力を超える鉛直反力に対して増設する補助支承 (ピンローラー支承) で受け持たせる構造である。また、地震時に発生する上揚力に対してはアンカーボルト形式の補助支承で受け持たせる構造である。

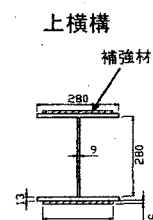


図-6. カバープレート工法

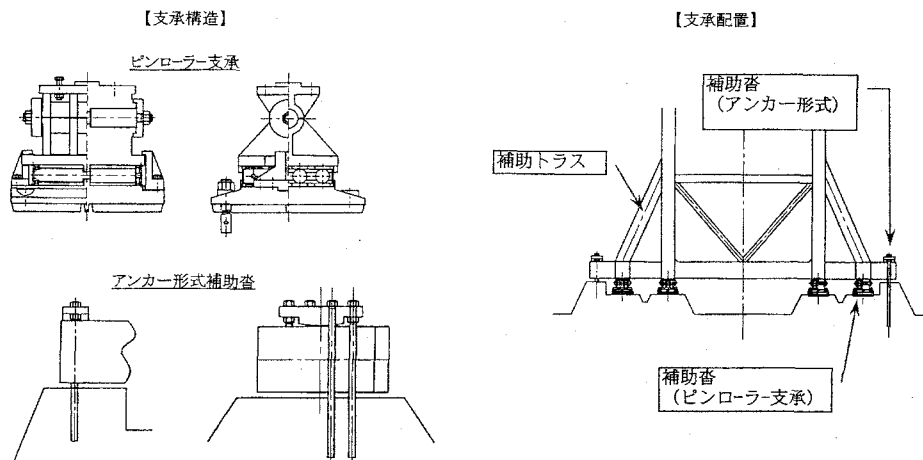


図-7. 補助支承取付け図

(4) 橋脚耐震補強工法

橋脚耐震補強工法の選定においては、経済性以外に、

- ・限られたスペースでの施工となる事から、現地での施工性に優れる工法である事。
 - ・大島大橋は車両通行量が多く迂回路が確保できないため、でき得る限り交通規制を設けない事。
- などの施工性に特に着目して工法を選定する必要がある。

本橋においては、RC巻き立て工法とPCコンファインド工法を比較検討した結果、経済的で施工性に優れる『PCコンファインド工法』を採用した。

5. おわりに

本検討では、耐震補強設計に先立ち、現況の構造条件・支承条件に対し、地震時振動性状、応力集中箇所を把握する目的で耐震診断を実施した。

その結果を踏まえ、レベル2地震動に耐え得るための耐震補強対策の詳細設計を行った。

本橋の様な大規模な既設橋梁に対する耐震補強対策を行った事例はほとんどなく、本検討が今後の耐震補強の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：既設道路橋の耐震補強に関する参考資料、1997. 3.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説；IV下部構造編、2002. 3
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説；V耐震設計編、2002. 3