

橋梁全体系モデルを用いたRC立体ラーメン部の 耐震補強検討

小林 寛¹・流田寛之²・濱田信彦³

¹正会員 阪神高速道路(株) 大阪管理部調査設計グループ(〒552-0006大阪市港区石田3-1-25)

²正会員 工修 阪神高速道路(株) 大阪管理部調査設計グループ(〒552-0006大阪市港区石田3-1-25)

³正会員 工博 阪神高速道路(株) 大阪管理部調査設計グループ(〒552-0006大阪市港区石田3-1-25)

1. はじめに

阪神高速道路環状線の環P342~353(図-1)は、RC立体ラーメンを含む区間で、路下は木津卸売市場が占用しており、現在も店舗や事務所等が営業している。この区間の耐震補強については平成10年度に橋軸方向・橋軸直角方向それぞれの代表断面について平面動的解析を実施し、その結果に基づき全部材に鋼板巻立てを行う耐震補強計画を立案していた。しかしながら、上記路下占用者の退去が遅れており、平成18年度に至っても着工できる状況にない。その間近年の解析技術の発達や計算機能力の向上により、さらに精緻な解析を実施することでより合理的な設計が期待できることから、この区間について橋梁全体の3次元非線形動的解析を主とした再検討を実施し、耐震補強規模の縮小およびコスト縮減を検討することとした。本稿では再検討の内容およびコスト縮減効果の試算について概説する。

2. 検討対象構造物

検討対象区間の一般図を図-2に示す。下部構造は環P342についてはRC単柱、環P343~環P346及び環P347~環P350はRC立体ラーメン、環P351、352、353はそれぞれRCラーメン橋脚であり、上部構造は立体ラーメン区間を除いて全てRC単純桁となっている。また、この区間ではなんば出路も一部含まれているため、なんば出P7(RC単柱)も検討対象区間に含まれる。いずれも昭和42年(1967年)に供用されており、変形性能を考慮した耐震設計はなされていない。

設計条件等については、設計年次が古く、設計計算書等十分な資料が残っていないところもあったが、耐震検討を行う際の地盤種別は、地質資料¹⁾よりⅡ種地盤とした。また既設構造物の使用材料

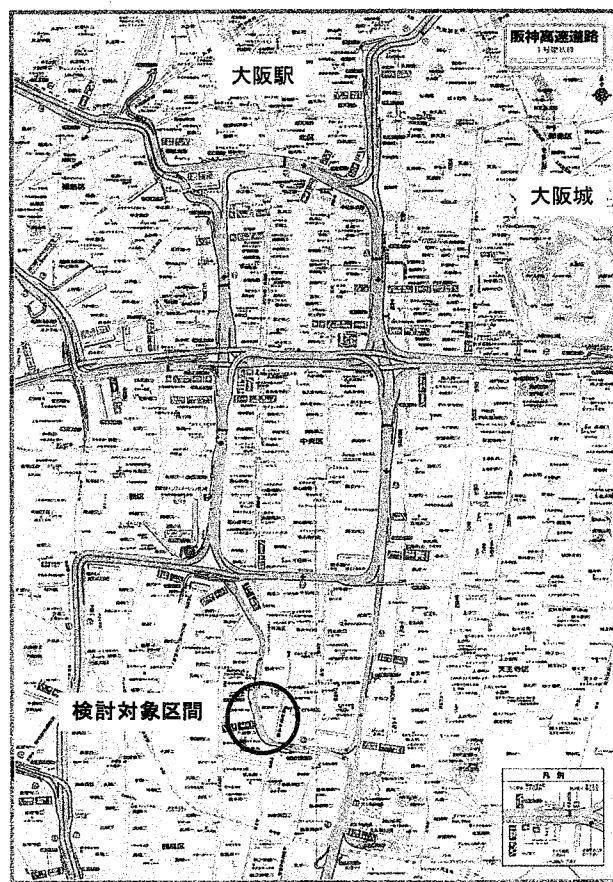


図-1 検討対象区間位置図(大阪市浪速区)

は、竣工図や当時の設計基準からコンクリートについては $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ とし、鉄筋については上部構造でSD295、下部構造でSR295として現況評価を行った。

路下条件については、写真-1に示す通りRC単柱部を除いて全て占用者の建物と一体になっている。ただし、耐震補強工事实施時には建物部分は占用者において撤去する条件となっているため、検討は図-2に示す道路構造物単独で行うこととした。また、耐震補強工事完了後の使用形態は未定である

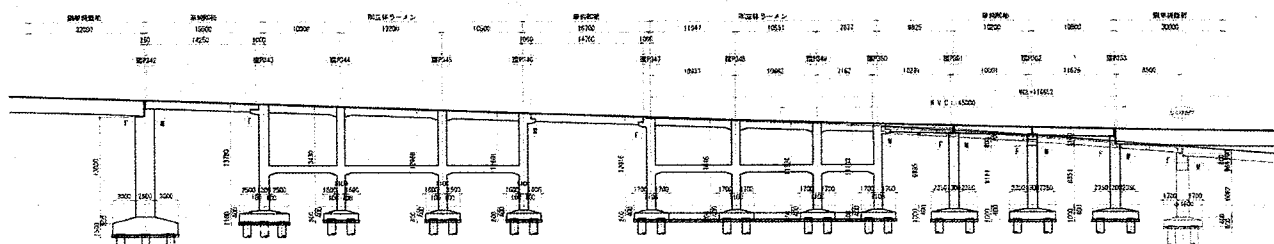


図-2 対象区間構造一般図

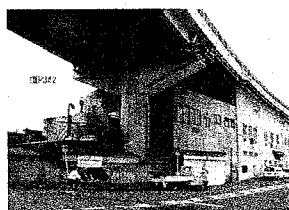
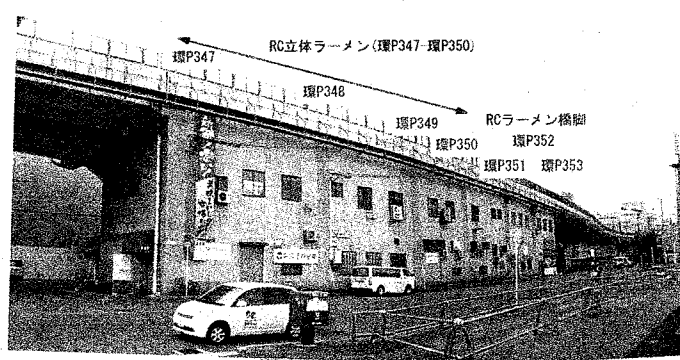
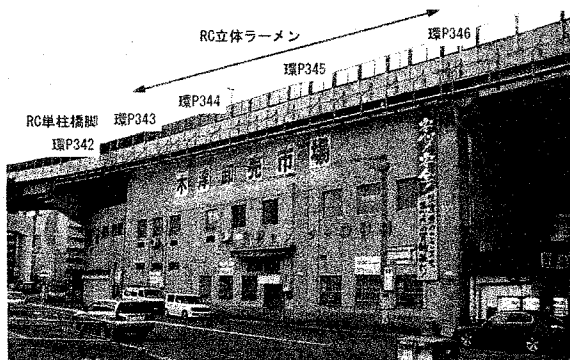


写真-1 対象区間全景

が、現況のような建物との一体化は認めないものとして補強工法の検討を行った。

3. 検討方針

今回の検討対象区間は、構造が複雑であるため、検討区間全体に対して損傷から崩壊への過程を明らかにし、それを保証するキャパシティデザインの考え方を採り入れることを基本とした。

目標とする耐震性能は、道路橋示方書^{V2)}に示されるように、『レベル2地震動に対して地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能回復が速やかに行いうる性能』(耐震性能2)として検討を行った。具体的手順としては図-3、図-4に示すように検討対象区間の隣接径間まで含めた橋梁全体系の3次元モデルを作成し、これを用いて橋軸方向および橋軸直角方向にプッシュオーバー解析(以下PO解析)および非線形時刻歴応答解析(以下動的解析)をそれぞれ実施した。

検討の順序としては、まずPO解析により橋梁全体系の破壊順序及び破壊形態を明確にした。この時せん断耐力を満足できない箇所については補強対策を実施する事を前提とし、曲げ破壊先行型として損傷箇所および順序を特定した。次に動的解析を実施して各部材の応答値を求め、最終的に補

強対象箇所及び補強内容を決定した。この時せん断補強箇所についてはPO解析並びに動的解析での応答値のうち大きい方の値を用いて補強対策を実施するものとし、曲げ補強箇所については動的解析応答値により補強対策を実施することとした。

補強工法については、通常の鋼板巻立て工法と炭素繊維巻立て工法を比較して選定することとした。この時、炭素繊維巻立て工法については、目付量の大きいシートの採用により巻立て層数を減らすなどの工夫により工費縮減を目指すこととした。

4. 解析方法及び解析結果

解析モデルは図-3、図-4に示す通り隣接橋脚を含む橋梁全体系を対象とし、はり要素及びバネ要素を用いた多質点系の骨組みモデルとした。各部材のモデル化について表-1に示す。

(1)PO解析

PO解析は橋軸方向、橋軸直角方向に対して正負方向にそれぞれ実施した。PO解析結果の総括を表-2に示す。表中の kh_* 、 δ_* はそれぞれの状態発生時の水平震度、水平変位を示し、添字の y_0 、 y 、 u はそれぞれ初降伏限界、降伏限界、終局限界の状態を

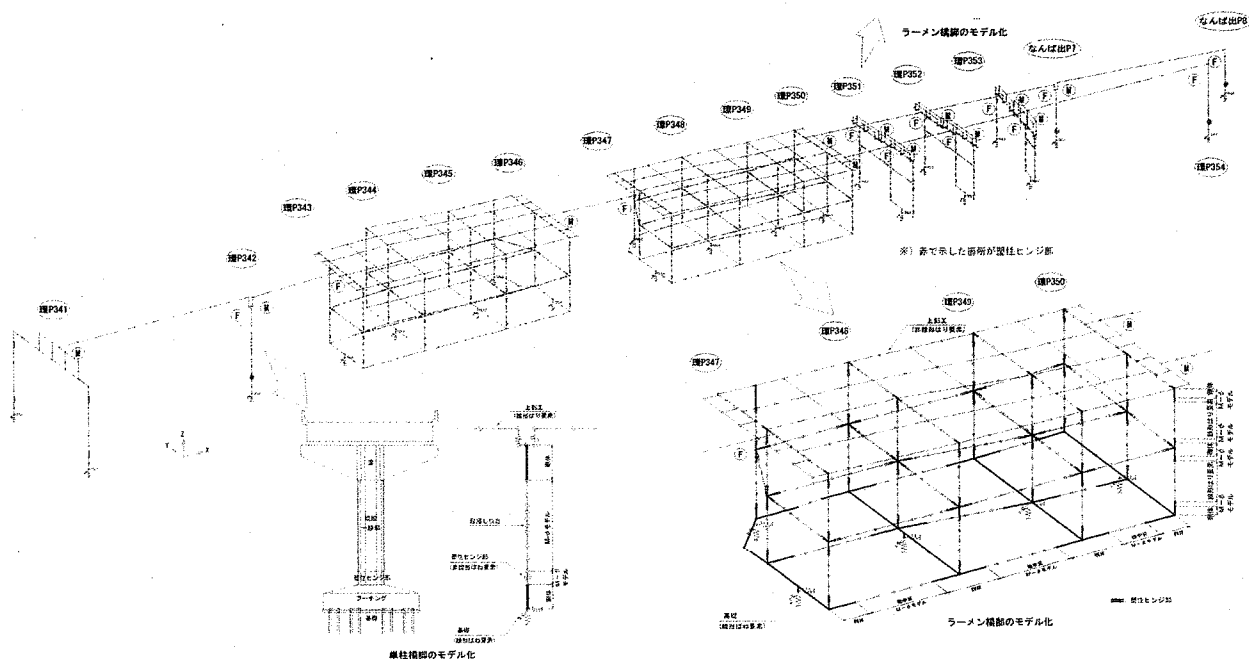


図-3 動的解析モデル

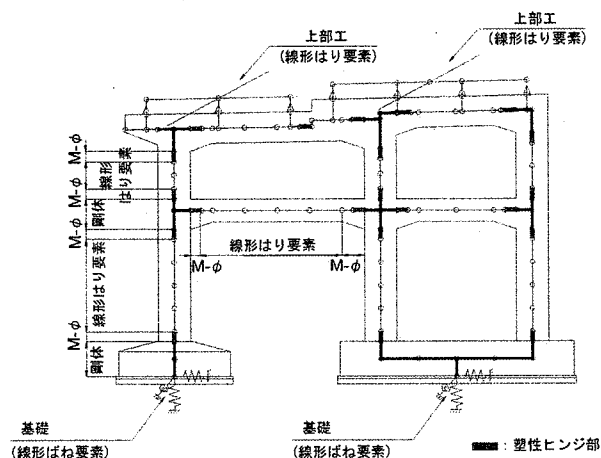


図-4 動的解析モデル(ラーメン橋脚)

表-1 部材のモデル化

部位		モデル化	減衰定数	
上部構造	立体ラーメン部	非線形はり要素 (M-φトリリニア)	0.03	
	単純桁橋部	線形はり要素	0.03(RC) 0.02(鋼)	
支承構造		線形バネ要素	0.00	
下部構造	ラーメン 橋脚	柱・横梁(塑性 ヒンジ部)	非線形はり要素 (軸力変動M-φトリリニア)	0.02
		柱・横梁 (一般部)	線形はり要素	0.05
		地中梁	非線形はり要素 (軸力変動M-φトリリニア)	0.02
		フーチング	剛体	0.05
	単柱	柱(塑性ヒ ンジ部)	非線形バネ要素 (M-φトリリニア)	0.02
		柱(一般部)	非線形はり要素 (M-φトリリニア)	0.02
		フーチング	剛体	0.05
基礎構造		線形バネ要素	0.20 (杭基礎)	

表す。ここで終局限界の定義は、曲げ破壊型と判定されたRCラーメン橋脚と同様に全塑性ヒンジが終局曲率に達するか、塑性ヒンジの一つが終局曲率の2倍に達したときとした。PO解析の過程ではせ

表-2 プッシュオーバー解析総括

		kh _{y0}	kh _y	kh _u	δ _{y0} (m)	δ _y (m)	δ _u (m)
橋軸方向 (終点側方向へ 加振)	環P343-環P346	0.26	0.74	0.74	0.021	0.059	0.105
	環P347-環P350	0.26	0.74	0.74	0.014	0.041	0.095
	環P351	0.30	0.42	0.42	0.041	0.058	0.181
	環P352	0.32	0.44	0.44	0.042	0.058	0.166
	環P353	0.40	0.66	0.66	0.043	0.071	0.159
直角方向 (起点側から見て 左方向に加 振)	環P343-環P346	0.28	0.76	0.76	0.021	0.057	0.105
	環P347-環P350	0.28	0.74	0.74	0.016	0.043	0.089
	環P351	0.30	0.42	0.42	0.037	0.052	0.168
	環P352	0.32	0.44	0.44	0.036	0.05	0.146
	環P353	0.42	0.70	0.70	0.032	0.054	0.128
橋軸方向 (起点側方向へ 加振)	環P343-環P346	0.32	0.80	0.80	0.023	0.057	0.121
	環P347-環P350	0.38	0.86	0.86	0.019	0.042	0.104
	環P351	0.38	0.92	0.92	0.01	0.024	0.048
	環P352	0.40	1.00	1.00	0.01	0.024	0.043
	環P353	0.34	0.96	0.96	0.011	0.032	0.061
直角方向 (起点側から見て 右方向に加 振)	環P343-環P346	0.32	0.76	0.76	0.023	0.055	0.111
	環P347-環P350	0.40	0.84	0.84	0.02	0.042	0.097
	環P351	0.54	0.98	0.98	0.013	0.023	0.043
	環P352	0.56	1.10	1.10	0.012	0.024	0.039
	環P353	0.30	1.00	1.00	0.009	0.03	0.066

ん断破壊はしないものとし、最後まで曲げ破壊型として破壊過程を追跡した。

(2) 動的解析

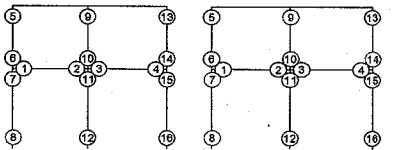
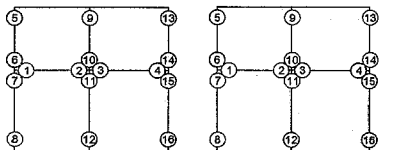
動的解析においては、入力地震波として道路橋示方書V²7.2(2)に規定されるタイプI, IIの標準加速度波形の各3波を用いた。

各部材に対する照査は解析による応答値(3波平均)が各部材の許容値以下であることとした。具体的には立体ラーメン部、ラーメン橋脚においては応答曲率、せん断力についてそれぞれ最大応答が許容値以下であることを照査した。ただし上部構造曲率の許容値は、主桁については降伏曲率、横桁については構造系の主たる破壊要因とならないものと考え、降伏曲率の2倍とした。

また、単柱橋脚においては橋脚基部の塑性ヒンジ回転角、せん断力についてそれぞれ最大応答が許容値以下であることを照査するとともに、段落し部の最大応答が初降伏曲率以下であること、残

表-3 解析結果に基づく判定結果の例(環 P346)

●環P346

橋軸方向							橋軸直角方向						
曲げ照査			せん断照査				曲げ照査			せん断照査			
													
※)赤で示した箇所が補強必要箇所。							※)赤で示した箇所が補強必要箇所。						
断面	曲率に対する照査($\mu \cdot 1/m$)						断面	曲率に対する照査($\mu \cdot 1/m$)					
	最大曲率		許容曲率		判定	最大曲率		許容曲率		判定			
	動解	PO解	ϕ_a	ϕ_a/ϕ_{max}		動解		PO解	ϕ_a		ϕ_a/ϕ_{max}		
(1)	179.0	122.4	17723.7	99.02	144.80	OK	(1)	20129.1	24184.2	16064.5	0.80	0.66	OUT
(2)	108.4	62.4	17723.7	163.51	283.98	OK	(2)	19386.4	25155.0	16064.5	0.83	0.64	OUT
(3)	76.9	54.5	17678.7	229.89	324.27	OK	(3)	16930.3	22089.9	20983.3	1.24	0.95	OK
(4)	26.4	41.9	17678.7	669.00	421.61	OK	(4)	17122.9	23673.0	20983.3	1.23	0.89	OK
(5)	1913.1	4410.0	4860.6	2.54	1.10	OK	(5)	1887.5	904.8	4860.6	2.58	5.37	OK
(6)	196.2	66.5	4813.7	24.53	72.36	OK	(6)	161.3	40.6	4813.7	29.83	118.49	OK
(7)	361.5	251.8	4746.0	13.13	18.85	OK	(7)	521.6	310.4	4746.0	9.10	15.29	OK
(8)	10267.7	13292.1	5301.4	0.52	0.40	OUT	(8)	10433.2	13648.1	5301.4	0.51	0.39	OUT
(9)	6046.9	8199.9	7237.4	1.20	0.88	OK	(9)	9021.2	13151.1	6938.3	0.77	0.53	OUT
(10)	1039.5	496.6	7122.0	6.85	14.34	OK	(10)	1485.3	1216.5	6836.7	4.60	5.62	OK
(11)	506.3	121.4	6957.4	13.74	57.31	OK	(11)	406.3	236.2	6707.8	16.51	28.40	OK
(12)	6497.8	10224.5	8133.8	1.25	0.80	OK	(12)	6367.6	11086.3	7724.6	1.21	0.70	OK
(13)	4870.0	8227.9	7692.4	1.58	0.93	OK	(13)	4194.2	12953.6	7345.9	1.75	0.57	OK
(14)	385.5	89.2	7575.1	19.65	84.91	OK	(14)	555.2	528.1	7241.1	13.04	13.71	OK
(15)	348.6	190.0	7403.6	21.24	38.97	OK	(15)	246.1	544.9	7087.4	28.80	13.01	OK
(16)	5017.0	8451.8	8096.5	1.73	1.03	OK	(16)	6464.2	11432.0	8213.3	1.27	0.72	OK
断面	せん断に対する照査(kN)						断面	せん断に対する照査(kN)					
	最大せん断力		せん断耐力	P_s /Pmax	判定	最大せん断力		せん断耐力	P_s /Pmax	判定			
	動解	PO解				P_s					動解	PO解	P_s
(1)	66.6	59.5	959.6	—	14.41	OK	(1)	1027.5	905.8	662.6	—	0.64	OUT
(2)	30.8	11.3	959.6	—	31.20	OK	(2)	950.8	814.3	662.6	—	0.70	OUT
(3)	49.7	46.5	959.6	—	19.32	OK	(3)	574.6	477.7	662.6	—	1.15	OK
(4)	40.0	44.0	959.6	—	24.00	OK	(4)	589.8	385.5	662.6	—	1.12	OK
(5)	1658.1	1727.2	2285.8	—	1.38	OK	(5)	1486.5	817.0	2448.6	—	1.65	OK
(6)	1832.3	1854.4	2448.6	—	1.34	OK	(6)	1625.5	951.0	2448.6	—	1.51	OK
(7)	2844.4	2366.8	2448.6	—	0.86	OUT	(7)	2533.5	2609.1	2448.6	—	0.97	OUT
(8)	2388.2	2492.3	2285.8	—	0.96	OUT	(8)	2261.9	2741.3	2285.8	—	1.01	OUT
(9)	1233.6	1150.4	1173.4	—	0.95	OUT	(9)	1672.4	1535.5	1173.4	—	0.70	OUT
(10)	1384.4	1256.8	1291.8	—	0.93	OUT	(10)	1623.8	1650.7	1291.8	—	0.67	OUT
(11)	1084.2	1226.1	1291.8	—	1.19	OK	(11)	1486.9	1123.1	1291.8	—	0.87	OUT
(12)	1108.6	1308.8	1873.0	—	1.69	OK	(12)	1485.3	1212.7	1873.0	—	1.26	OK
(13)	1148.3	916.8	1173.4	—	1.02	OK	(13)	1180.6	1235.8	1173.4	—	0.99	OUT
(14)	1359.6	1026.8	1291.8	—	0.95	OUT	(14)	1328.4	1345.7	1291.8	—	0.97	OUT
(15)	1210.4	954.3	1291.8	—	1.07	OK	(15)	1225.5	912.7	1291.8	—	1.05	OK
(16)	1208.0	1040.2	1873.0	—	1.55	OK	(16)	1217.5	1001.0	1873.0	—	1.54	OK

※赤色着色は補強必要部材

黄色着色はブッシュオーバー解析結果にて補強実施の部材

留変位が許容値以下であることを照査した。

全体モデルに対してPO解析及び動的解析を行った結果、対象橋脚の全てに耐力が不足する部材を有するものの、上部構造並びに地中梁に対しては許容値を満足する結果となった。例として環P346の解析結果を表-3に示す。前述の通り曲げ破壊型の破壊過程を保证するため、せん断については動的解析或いはPO解析の最大応答のうち大きい方の応答値を満足するように補強することとし、曲げについては動的解析の応答値を満足するよう補強するものとした。これにより部材のせん断破壊を防ぐことが出来、予期せぬ崩壊を招かずPO解析で特定した損傷過程を満足することができるものである。

5. 補強方針

部材の曲げ補強・せん断補強とも、対策工法と

してはRC巻立て工法、鋼板巻立て工法、炭素繊維シート巻立て工法といった工法が一般的である。本検討においては、路下の利用状況から脚柱断面積の増大を招くRC巻立て工法は不向きと考え、検討から除外して残りの2工法の比較を対象構造物毎に行った。

(1) RC立体ラーメン

RC立体ラーメン構造部は、補強施工時には占有建物が無い条件となっている。ただし、補強完了後の占有状態等は未定であるため、柱間を繋ぐ構造等は採用できない。現況の動的解析結果によると、橋軸方向は柱・梁部材のせん断耐力の不足が目立ち、橋軸直角方向に関しても、ほぼ同様の傾向であるが、柱・梁部材の曲げ耐力の不足箇所が増える結果となっている。せん断耐力の不足を補強する目的で柱・梁部材を巻立て補強することでじん性が向上し、結果として曲げ耐力も満足できる結果となることから鋼板巻立て工法と炭素繊維

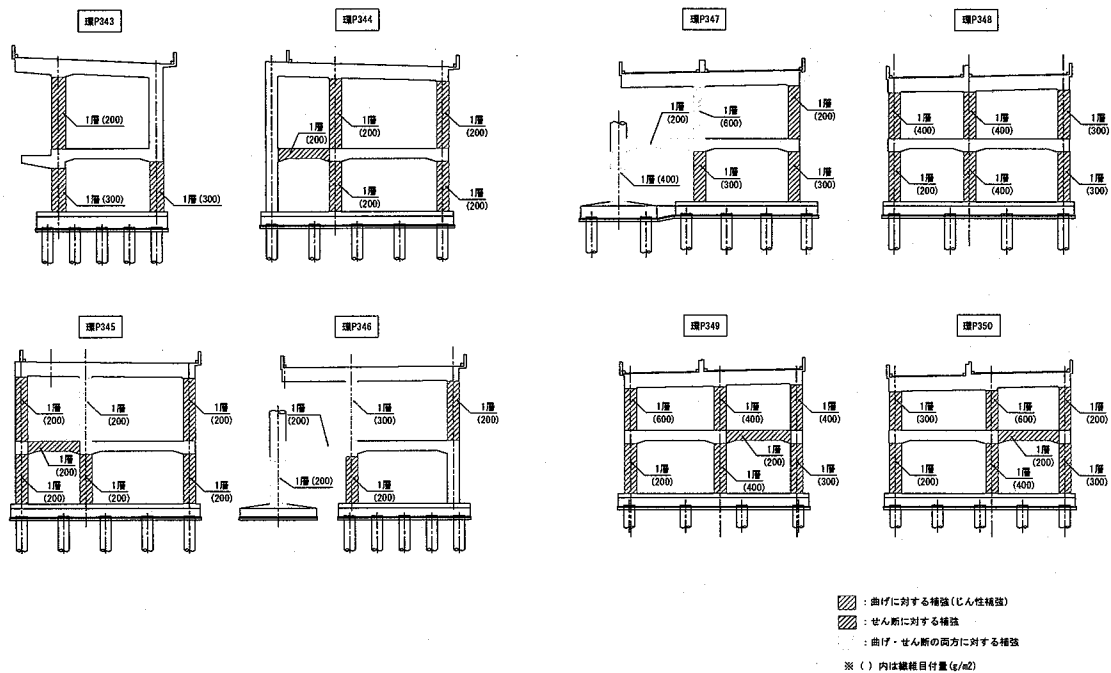


図-5 補強対策(環 P343~350)

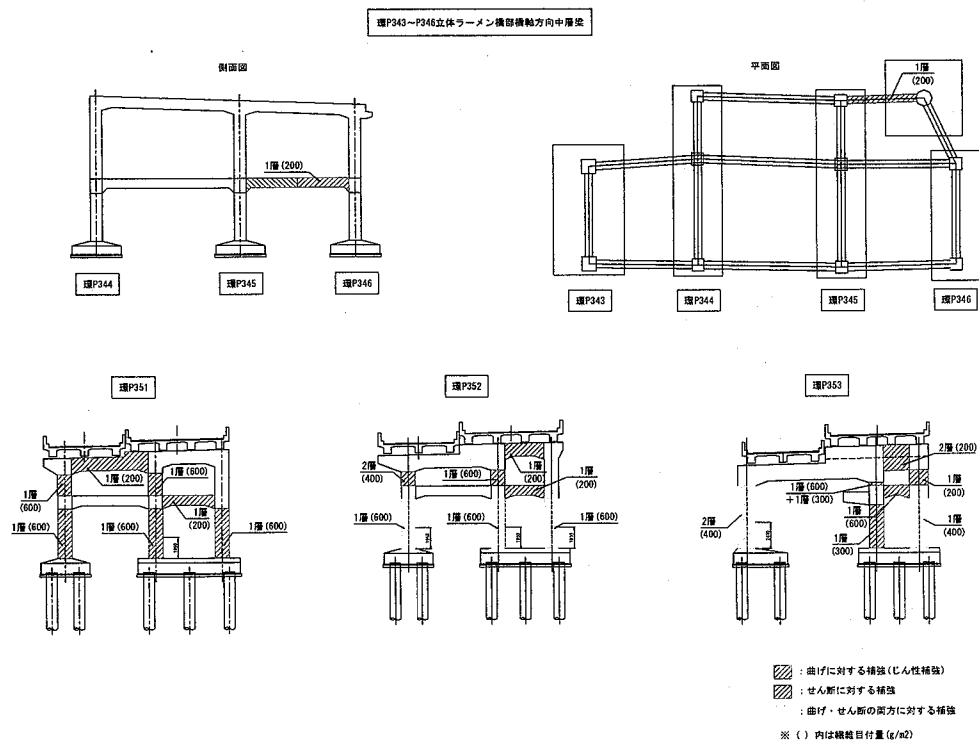


図-6 補強対策(環 P343~350 橋軸方向梁, 環 P351~353)

シート巻立て工法の経済比較を行った。

その結果、環P343~環P346における鋼板巻立て工法と炭素繊維シート巻立て工法の工費(足場工含む)の比は1.56:1.00となり、環P347~環P350では

1.49:1.00となったため、両区間とも経済性に優れる炭素シート巻立て工法を採用することとした。

(2) RCラーメン橋脚

RCラーメン橋脚についてもRC立体ラーメンと解析結果の傾向はほぼ同様であった。環P351、環P352、環P353の3橋脚における鋼板巻立て工法と炭素繊維シート巻立て工法の工費(足場工含む)の比はそれぞれ1.44:1.00, 1.41:1.00, 1.37:1.00となり、ここでも経済性に優れる炭素シート巻立て工法を採用することとした。

(3) RC単柱橋脚

RC単柱橋脚については、動的解析結果によると、橋軸方向・橋軸直角方向共に段落し部・基部共に耐力不足の結果となっており、特に段落し部の曲げは応答値が耐力に対して5倍程度発生する結果となった。

環P342橋脚の補強対策としては、曲げ耐力が大きく不足することより、じん性の向上のみでは満足しない。そのため、アンカー鉄筋を有する補強が必要となることから炭素繊維シート巻立て工法は適当でないと判断され、鋼板巻立て工法(アンカー一定着有り)を採用することとする。

なんば出P7橋脚に関しては、じん性の向上により耐力を満足する結果となることから、鋼板巻立て工法と炭素繊維シート巻立て工法の経済比較を行った。

その結果、両者の足場工を含む工費の比は1.00:1.19となり、鋼板巻立て工法(アンカー一定着無し)を採用することとした。この橋脚では段落し部の耐力不足が大きく、炭素繊維シートの巻立て層数が多く必要となることから、鋼板巻立て工法が経済性に優れる結果となったものである。

6. 補強範囲とコスト試算

以上を踏まえ、RC単柱部を除くラーメン区間の

補強範囲、補強内容を図-5及び図-6に示す。炭素繊維シートが目付量は従来200g/m²、300g/m²が一般的に使用されてきたが、今回の検討では近年使用実績の増加している目付量400~600 g/m²の炭素繊維シートの使用ににより巻立て層数を少なくして施工コストの低減と品質の確保を期待することとした。

平成10年度の検討ではラーメン部の全ての柱、横梁に鋼板を巻立てることとしていた。そのため、ラーメン区間について今回検討とのコスト比較を行った結果、直接工事費で元の検討案で130百万円、今回の検討結果(図-5、図-6)で約62百万円となり、約68百万円の縮減が期待できることとなった。

7. まとめ

RC立体ラーメン区間を含む環状線環P342~353について、隣接橋脚を含む橋梁全体系について3次元モデルを作成し、詳細なPO解析及び動的解析を実施した。両解析の結果を基に、破壊過程を保証するキャパシティデザインの考え方を採り入れて補強箇所及び補強規模を決定した。さらに補強工法については、近年採用事例の見られる目付量の多い炭素繊維シートの採用によりコスト縮減を図った。これらの結果、平面モデルを用いた解析に基づく従来の検討に比べて1/2程度のコスト縮減が見込まれることとなった。

参考文献

- 1) 阪神高速地質資料Ⅲ難波編、阪神高速道路公団、1968.
- 2) 道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、日本道路協会、2002.3