

(42) 主桁分岐を有するPC連続ラーメン橋 (夏厩高架橋) の設計

JH名古屋建設局建設第二部構造技術課 橋本 昌朗
 (株) 錢高組名古屋支店土木部 正会員 山花 豊
 (株) 錢高組土木本部技術部技術課 ○梅枝 寿臣

1. はじめに

東海北陸自動車道清見JCTに位置する夏厩高架橋(上り線)(A1~P5、以下「本線橋」という。)と清見JCT・Aランプ橋は、P2橋脚柱頭部で両橋を剛結一体化するという特殊構造を採用した多径間連続PCラーメン橋であり、分岐したAランプ橋と本線橋との平面方向の離れが大きいことから、立体的な特性を有する構造物となっている。

本報告は、本橋の挙動把握のために行った、①コンクリートの材令差および施工手順を考慮したクリープ・乾燥収縮解析、②動的地震応答解析、③主桁分岐部FEM解析を中心に本橋の構造特性と詳細設計について述べたものである。

2. 橋梁概要および検討概要

本橋の概略図を図-1に、設計諸元を表-1に示す。

P2柱頭部を境に主桁が分岐する構造の本橋は、合流部2径間、本線橋およびAランプ橋の単独部それぞれ3径間からなるPC(5+3)径間連続ラーメン橋であり、片持ち架設工法により施工される。詳細設計では、本橋の特殊性から以下の検討等による問題解決を行った。

① 逐次クリープ・乾燥収縮解析

クリープ・乾燥収縮による2次応力をより正確に把握するため、立体骨組モデルを用いて架設中の複雑な載荷履歴や構造系変化、およびコンクリートの材令差を考慮した逐次解析を行った。解析トライアルにより、主桁の許容応力度を満たすプレストレス量を決定した。

② 動的地震応答解析

地震時挙動を把握し設計に反映するため、立体骨組モデルによる動的地震応答解析検討を行った。解析手法は、震度法レベルでは線形応答スペクトル法解析、保有水平耐力レベルでは非線形時刻歴地震応答解析とし、保有水平耐力照査レベルの応答断面力に対して上部工の鉄筋補強を行った。

③ 主桁分岐部FEM解析

分岐部周辺の応力状態を確認するため、FEM解析を行った。活荷重作用時の主桁応力度が許容

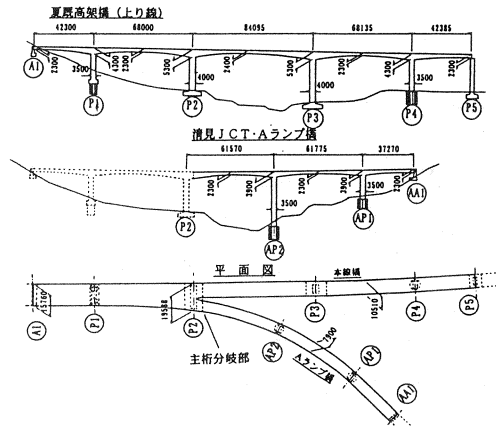


図-1 夏厩高架橋 本線・清見JCTAランプ橋

表-1 設計諸元

橋名	東海北陸自動車道 夏厩高架橋(上り線) 清見JCT・Aランプ橋			
道路規格	第1種 第3級 B規格			
構造形式	PC(5+3)径間連続ラーメン箱桁橋			
断面形状	(本線) 2重箱桁 → 3重箱桁 → 1室箱桁 (Aランプ) 1室箱桁			
橋長	(本線) 306.000 m、(Aランプ) 272.906 m			
支間	(本線) 42.3+68.0+84.0+68.0+42.3 m (Aランプ) " + " +61.9+62.0+37.3 m			
平面線形	(本線) R = ∞ ~ 2500 m (Aランプ) A=90m, R=200m, A=140m			
幅員	(本線) 15.760~18.071(P2)~10.510m (Aランプ) 7.900m			
活荷重	B活荷重			
設計震度	(橋軸方向) kh = 0.20 (直角方向) kh = 0.20			
主要数量	コンクリート	σ _{ck} = 40 N/mm ²	4, 775 m ³	
	PC鋼材	縦縮	SWPR7B 12T12.7	141 t
		横縮	SWPR19 1T21.8	29 t
	引張鉛直筋	SBPR930/1180 φ32		11 t
鉄筋	SD345		592 t	

内にあることを確認し、柱頭部横桁および底版に作用する地震時局部応力に対して補強を行った。

3. 逐次クリープ・乾燥収縮解析

本橋のように端部橋脚高に比べ固定支間の長い橋梁では、コンクリートのクリープ・乾燥収縮による2次応力が構造物の設計に大きな影響をおよぼすため、その影響について適切に評価する必要がある。

部材のクリープ性状がほぼ均一で、架設段階での構造系変化も少ない中小規模の橋梁では、平均残留クリープ係数による Dischinger の近似式によりその影響を考慮するのが一般的である。これに対し本橋では、多くの構造系変化を経て架設され、また、桁完成時に残留するクリープ性状が部材間で大きく偏ることなどから、逐次解析によりその影響評価を行うこととした。

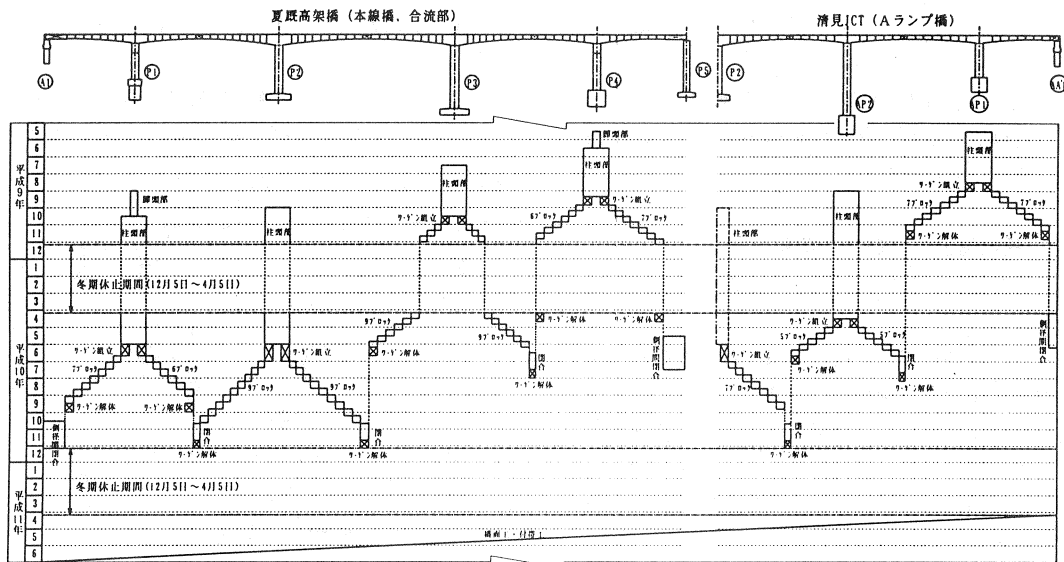


図-2 上部工施工工程

3.1 解析条件

本橋の上部工施工工程を図-2に示す。施工の順序および条件を検討し、逐次解析では以下に考慮した条件設定を行った。

- ① セメントの種類(主桁:早強セメント、橋脚:普通ポルトランドセメント)、有効部材厚によるクリープ進行速度の違い
- ② 冬期休止により最大500日にも及ぶ主桁コンクリートの材令差および材令分布の偏り
- ③ 施工時期が異なることによる橋脚の材令差
- ④ 施工中の構造系変化および荷重履歴

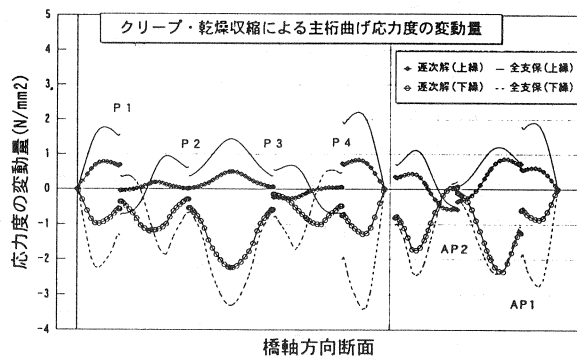


図-3 クリープ・乾燥収縮による主桁応力変動量

3.2 解析結果

クリープ終了時における全死荷重作用時の曲げモーメントについて、逐次解析と全支保工時(全死荷重を完成構造系に一度に載荷した場合の弾性解析値)を比べると、端部橋脚および端部柱頭部において側径閉閉

合手順や上部工コンクリートの乾燥収縮による影響が大きく現れ、断面力の差異がみられた。

クリープ・乾燥収縮による主桁曲げ応力度の変動量を図-3に示す。支間部下縁は引張方向へ1.0~2.3(N/mm²)程度、AP2を除く中間支点部上縁は概ね圧縮方向へ0~0.7(N/mm²)の変動がみられた。

4. 動的地震応答解析

本橋の固有値を表-2に、橋軸1次モードの変位図を図-4に示す。以降、耐震性能照査で行った解析検討の中から、保有水平耐力照査レベル(タイプII地震)に対する非線形時刻歴地震応答解析について述べる。

解析に用いた地震波はI種地盤であることから以下を選定し、加震方向は、本線橋軸方向、AP1橋軸方向、AP2橋軸方向およびその直角方向、合わせて6方向とした。

- ① 神戸海洋気象台強震記録(N-S)修正波
- ② 神戸海洋気象台強震記録(E-W)修正波
- ③ 阪神高速猪名川橋での強震記録の修正波

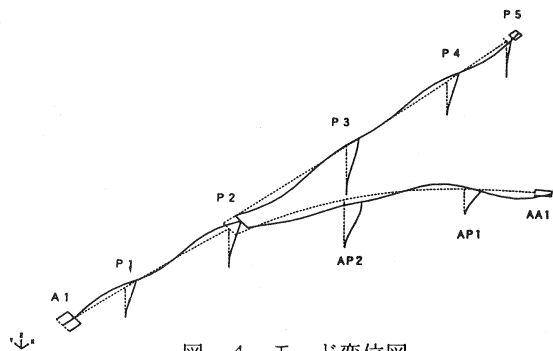


図-4 モード変位図

4. 1 解析モデルおよび解析方法

(1) 解析モデル

支持条件として、端支点にはゴム支承のせん断および鉛直方向バネを、橋脚下端にはPS検層に基づく地震時の地盤定数を用いて算出した深礎杭の換算バネを設けた。部材減衰定数は上部工3%および橋脚5%とし、基礎および支承の減衰定数は基礎20%、支承2%とした。

(2) 部材剛性

主桁は線形部材、橋脚は非線形部材とした解析の結果、主桁部材にも降伏曲げ耐力を上回る断面力応答がみられたため、主桁の非線形性も考慮した解析を行った。この時、主桁非線形部材の復元力特性にはひびわれ発生時および引張鉄筋降伏時を変曲点とするデグレイディングトリリニア型(武田モデル)を採用した。また、橋脚のねじり剛性についてもひび割れ発生を踏まえ低減剛性(10分の1に低減)を用いるとした。

尚、本橋ではその立体的特性から2軸曲げに対する非線形性能評価が必要となった。しかし、解析プログラムの制約から同時に考慮できる非線形性の方向が1方向に限られたため、通常の1部材を並列2部材に分けてモデル化し、相直交する部材性能を別々に与えた。個々の曲げ剛性に非線形性を持たせたことで、2軸相関はないものの2方向同時の非線形性が考慮でき、1方向のみの場合に比べより現実的な結果が得られた。

表-2 固有値

モード	周期(sec)	刺激係数 / (累積有効質量比)		
		Tx	Ty	Tz
1	0.742	0.385	1.455	-0.014
		2%	29%	0%
2	0.716	0.728	0.063	-0.019
		8%	29%	0%
3	0.605	0.960	-0.164	-0.003
		61%	30%	0%
4	0.526	-0.856	0.490	-0.004
		62%	31%	0%
5	0.511	0.202	0.502	0.030
		63%	33%	0%

表-3 応答変位および加速度

位置	(cm)		(M/sec ²)	
	X	Y	X	Y
P1	15.5	0.2	7.77	0.34
P2	15.5	0.4	8.03	0.49
P3	15.5	0.8	9.11	0.69
P4	15.5	0.3	9.51	0.45
AP2	19.1	16.5	8.99	7.54
AP1	9.6	5.3	9.54	5.44

4. 2 解析結果

神戸海洋気象台(N-S)修正波で本線橋軸方向に加震した解析結果を例に示し述べる。

(1) 応答加速度および変位量

応答加速度、変位を表-3に示す。

本線橋ではいずれの柱頭部をとっても同様の応答を示しているのに対して、AP2柱頭部はほぼ弾性範囲であるものの大きな応答値を示した。これは、橋脚高が他に比べ高く、断面が小さいことのほか、曲線部主桁の橋軸方向剛性が軸線の湾曲により小さく表れることによると考えられる。

(2) 橋脚の応答

橋脚部材の応答値を表-4に示す。

応答塑性率は最大でも3.3程度とさほど大きくなく、多くの部材が2以下の値に収まっている。

Aランプ橋の橋脚では、加震方向によって2軸が同時に降伏域を越える場合も現れており、2軸曲げの非線形性をより正確に表せるモデルの採用が望まれる。

(3) 主桁の応答

主桁部材の曲げ応答を図-5に示す。

負の曲げは部分的に降伏耐力を若干上回る程度、正の曲げは終局耐力をも越える応答が得られた。地震時保有水平耐力法による設計地震レベルの増大により、上部工においても以下の鉄筋補強が必要となった。

- ① 曲げおよびせん断に対する軸方向鉄筋、スターラップの補強
 - ② 橋軸直角方向地震時のねじりおよびせん断に対する軸方向筋、横方向筋の補強
- 曲げに対する軸方向筋の不足は、曲げモーメント交番部のプレストレス配置が少ない方向に多く見られた。特に、連続ケーブルの定着により正のプレストレスが大きく減少する断面では、曲げ耐力の急変を避け、周辺部一体のじん性を高めるよう配慮し補強量を決定した。

表-4 橋脚の応答断面力および塑性率

部材	(1/m)	×10 ³ (N・m)	
		応答曲率	応答曲げモーメント
P1	上端	6.95E-04	269,134
	下端	2.42E-03	301,908
P2	上端	8.47E-04	230,594
	下端	1.46E-03	295,161
P3	上端	8.04E-04	155,416
	下端	1.02E-03	190,837
P4	上端	5.49E-04	155,798
	下端	1.35E-03	220,708
AP2	上端	6.42E-04	69,673
	下端	8.04E-04	88,343
AP1	上端	2.79E-04	75,415
	下端	7.82E-04	173,813

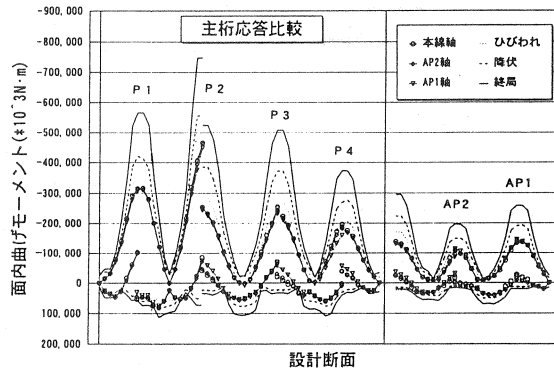


図-5 主桁応答曲げモーメント

5. 分岐部FEM解析

5. 1 解析モデルおよび荷重載荷方法

主桁分岐部は、合流側3重箱桁と2つの分岐側1室箱桁が中空橋脚頭部を介し剛結される構造となっている。分岐部FEM解析では、境界条件の設定誤差が解析結果に及ぼす影響に留意した上、分岐部周辺の主桁および橋脚を取り出し、8節点立体要素によりモデル化した。

境界条件は、橋脚下端を鉛直固定および水平せん断面バネ支持し、主桁断面縁端に骨組み構造解析より得た既知断面力を与えるとした。検討ケースは、設計荷重作用時および地震時より①各主桁の面内外曲げ、ねじりの最大、最小、②本線橋、Aランプ橋間の面内外曲げ、ねじりの差の最大、最小の状態を選出し決

定した。荷重は、モデル部分に直接作用する荷重および境界条件として端部桁断面に与える荷重に大別し、その組み合わせにより載荷した。

5. 2 解析結果

(1) 活荷重作用時(常時)

合流部活荷重負曲げ最大時の橋軸方向応力度分布を図-6に示す。P1の主桁上縁応力度は、棒理論に基づく設計では1.2(N/mm²) (許容応力度0(N/mm²)、主方向P/C鋼材量は分岐側の必要量で決定)と余裕があったのに対し、FEM解析の応力度分布では本線側とAランプ側との間で最大3.0(N/mm²)もの応力差があり、Aランプ側では許容値に対する余裕が無くなるほどの応力レベルとなっている。

これは分岐側の断面で決定された主方向プレストレス配置の偏りによるものであり、構造特性の異なる主桁を分岐接合した構造では、全体バランスにも配慮したプレストレス配置が必要であるといえる。

(2) 地震時

神戸海洋気象台(N-S)修正波に対する全体骨組みモデルの非線形時刻歴地震応答解析結果を用いて、保有水平耐力法レベル(タイプII)相当に対する線形FEM解析を行った。また、その解析値を応答加速度の比でスケールダウンしたものをタイプI(60%)および震度法レベル(33%)に対する応力値として考えることとした。本線橋軸直角方向曲げ最大時の隔壁および底版の応力度分布を図-7に示す。

保有水平耐力法レベルの地震に対する解析では、部材の線形範囲を大きく超える結果となった。こうした場合、非線形解析によるのが望ましいと考えられるが、梁部材の検討から耐震補強を行っており応力分布性状は異なるものの相応の引張力伝達性能は有しているとの考えから、線形解析の値をそのまま用いるとした。

5. 3 補強検討

(1) 保耐法レベルに対する検討

一般に柱頭部など部材の結合点は、大地震時でもその剛性を保つため構成部材を降伏させないように設計するのがよいと考えられるが、タイプIIの地震波に対して算出した必要補強鉄筋量は多く、不経済であるばかりか配筋の困難が予想される結果となった。

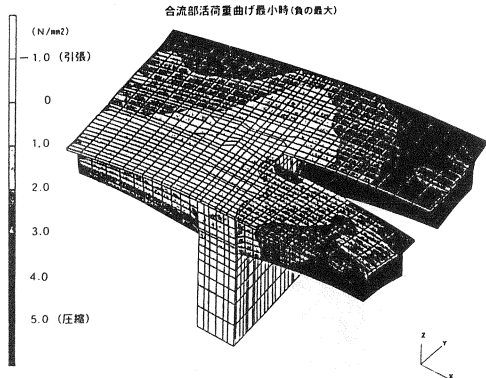
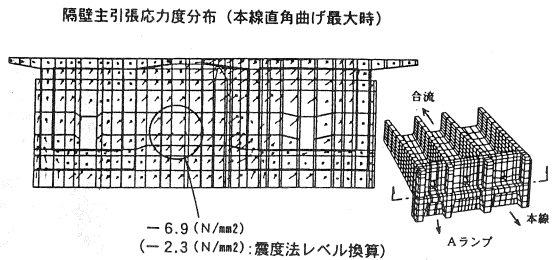


図-6 橋軸方向応力度分布



隔壁主引張応力度分布(本線直角曲げ最大時)

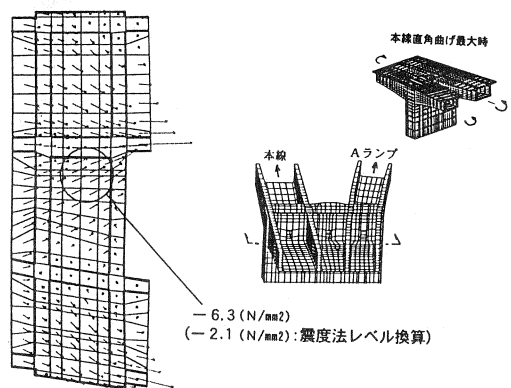


図-7 地震時主引張応力度分布図

その結果を踏まえ、発生確率が低く継続時間が短い地震であること、および該当部材が損傷しても直ちに交通への支障がなく、補修が比較的容易な部材であること等の判断からタイプIIの地震波に対する補強は行わないものとした。ただし、タイプI相当の地震応答に対して隔壁および底版の剛性低下を見込んだ解析による耐力照査を付加して行った。

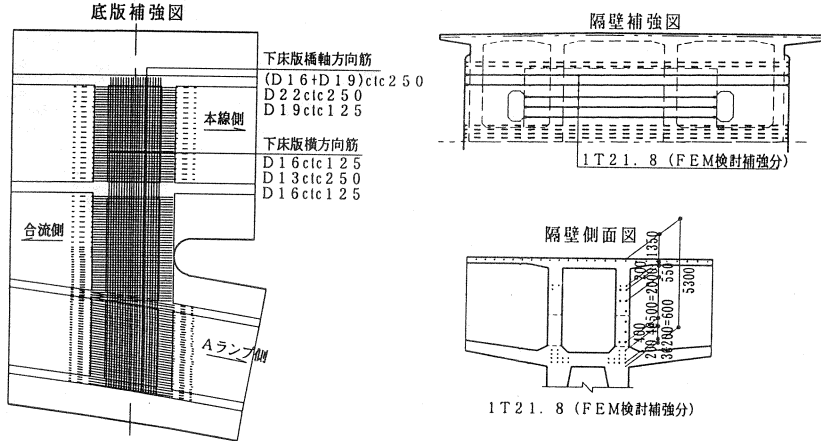


図-8 補強図

(2) 震度法レベルに対する検討

隔壁で-2.3(N/mm²)、底版で-2.1(N/mm²)の主引張応力度に対し、面内力を受ける面材としての検討を行い、鉄筋応力度が降伏以下となるよう横締P C鋼材および鉄筋の補強を行った。隔壁および底版の補強内容を図-8に示す。

6. まとめ

本橋の詳細設計では、本橋の特殊性および耐震設計法の見直し等から数々の検討を実施した。橋梁分野では、景観デザインや維持管理費縮減のための多径間連続化などにより、今後、益々複雑かつ特殊な構造形式の採用が検討されるものと予想される。本報告が今後の一助となれば幸いである。

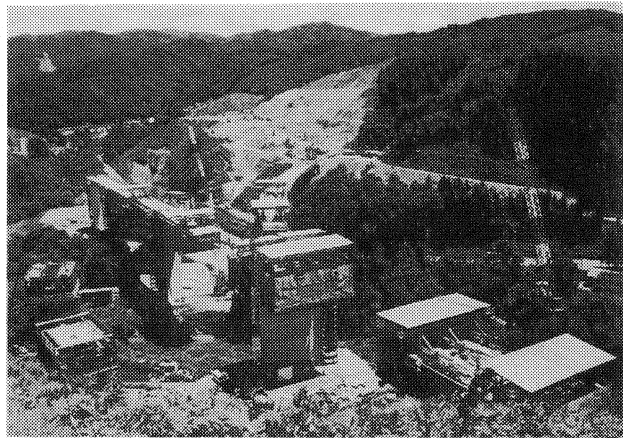


写真-1 架設中の夏夏高架橋

起点側より終点側を望む(右下:P1,左上:P5,中央上AA1,左下はDランプ橋)

1998年7月現在、本橋の施工は2ヶ所の張出し施工を終え、分岐部主桁の同時張出しおよび側径間閉合工事が本格化し、最盛期を迎えている(写真-1)。本橋は、施工面でも分岐主桁のほか、急曲線・急横断の張出し架設、支柱併用の側径間吊り支保工など特徴の多い橋梁であるため、またの機会を得て報告したい。

最後に、本設計検討に際し熱心なご指導とご助言を頂いた関係者各位に深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 水口, 橋本, 山花: 平面曲線を有する連続ラーメン橋の耐震検討 第1回橋梁の耐震設計に関するシンポジウム論文集 A2-4, 土木学会 1998
- 2) 徳嵩, 梅枝: 主桁分岐を有するPC連続ラーメン橋の分岐部FEM解析 第53回年次学術発表会論文集 I-1, 土木学会 1998