

奥山橋の計画と設計

山口 良弘^{*1}・富田 穰^{*2}・西田朋仁郎^{*3}・酒井 博士^{*4}

1. はじめに

阪神高速道路北神戸線は、神戸市北部の六甲山系の北側に位置し、西は第二神明道路、東は中国縦貫自動車道に接続する総延長 32.3 km の路線である。このうち、第二神明道路伊川谷ジャンクションから箕谷出入口までの 18.3 km が供用しており、箕谷以東の残る区間の工事が、明石海峡大橋と同じ平成 10 年春の供用を目指して現在急ピッチで進められている。この区間のうち、裏六甲山系に位置する唐櫃地区は急峻な地形で、橋梁やト

ネル等の大規模な構造物が連続して計画されており、北神戸線建設工事の難所の一つとなっている（図-1）。

本橋は、このような地区に計画された 3 径間連続 PC 箱桁橋で、最大斜度 40° の急峻な山岳斜面の中腹に沿って奥山川の沢づたいに曲線状に建設される。この付近の斜面はかつて地滑りを起こした経緯があることから、斜面の切削を伴う支保工施工は困難であり、しかも、従来の桁橋では桁高が高くなりすぎて斜面に接触するなどの問題があるため、片持ち張出し施工が可能で、かつ桁高が低く抑えられる構造が要求された。

計画当初では、このような立地条件を満足する構造形式として斜版付 PC 箱桁橋¹⁾（以下斜版橋と呼ぶ）と PC 斜張橋について比較検討され、主に景観面や経済性から斜版橋が選定された。斜版橋とは主塔と主桁を結合する斜部材（以下斜版と呼ぶ）を PC 版構造としたもので、施工実績としてはスイスのガンター橋が有名である。特徴は、従来の斜張橋に比べて低い主塔と、‘面’を強調したそのデザイン性にあり、斜版中の斜材が従来の桁内ケーブルと同様な条件下で機能することにある。一方、斜版橋の斜版を単にケーブルに置き換えた構造としてエクストラードス橋²⁾³⁾がある。本構造の特徴は、斜版橋とは対照的に‘線’を強調した形式（写真-1）である。これらの構造は、主塔と主桁を結合する斜部材の構造によって斜版橋の内ケーブル方式に対し、エ

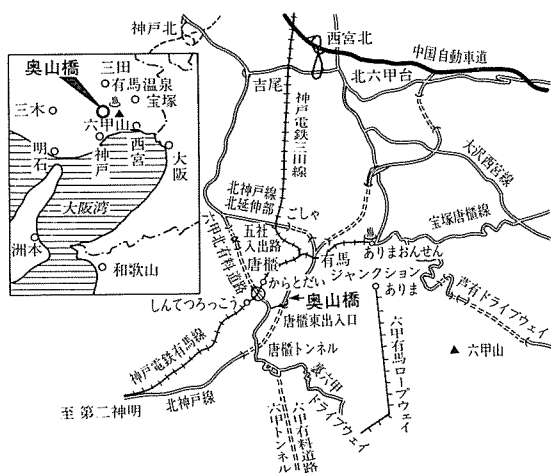


図-1 位置図



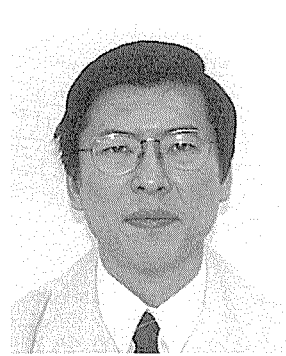
^{*1} Yoshihiro YAMAGUCHI
阪神高速道路公団
神戸第一建設部
設計課長補佐



^{*2} Minoru TOMITA
阪神高速道路公団
神戸第一建設部
北神戸工事事務所所長



^{*3} Tomojiro NISHIDA
ピーエス・オリエンタル
・日本高圧建設工事共同企業体
所長



^{*4} Hiroshi SAKAI
ピーエス・オリエンタル
・日本高圧建設工事共同
企業体
設計 主任

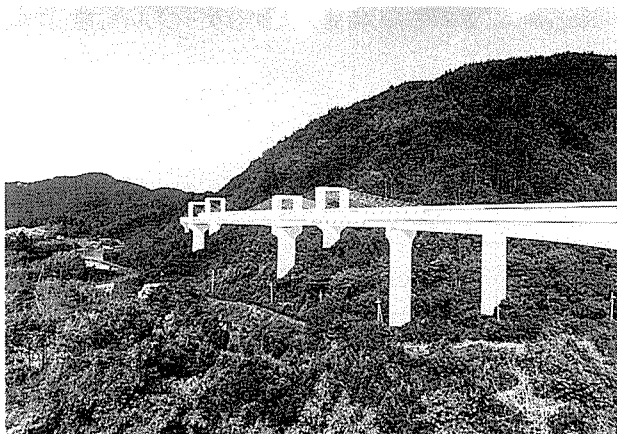


写真-1 完成予想図（左が東方面）

エクストラードード橋は外ケーブル方式とも分類でき、両者ともに桁橋と斜張橋の中間的性状を有している。

最終計画では、両者の構造について種々の観点から比較検討した結果、施工の合理化が図れる構造、工程短縮が可能な構造および経済性、などから総合的に判断してエクストラードード橋を採用した。また、斜版をなくすことで上部工自重を軽減し、さらに地震時慣性力を中間両橋脚に分散することで橋梁全体の耐震性能を高める構造とした。

本文は、以上のような検討の結果採用されたエクストラードード橋の計画および設計について報告するものである。本橋は西行と東行の分離構造となっており、それぞれの橋梁諸元は表-1に示すとおりである。また、代

表-1 橋梁諸元

路線名	阪神高速北神戸線	
架設位置	神戸市 北区有野町唐櫃	
道路規格	第2種第2級（設計速度 60 km/h）	
設計活荷重	B活荷重	
構造形式	3径間連続エクストラードード PC 箱桁橋	
	西行	東行
橋長	285 m	260 m
支間	74.1 m+140 m+69.1 m	66.1 m+120 m+72.1 m
有効幅員 （主桁幅）	8.89 m~15.355 m (11.69 m~18.155 m)	8.7 m~8.89 m (11.5 m~11.69 m)
平面線形	R=5 500 m~A=200~R=400 m	
縦断線形	4.0%	
横断線形	2.0%~5.0%	-2.0%~5.0%

表で西行の構造一般図を図-2に示す。

2. 斜版橋とエクストラードード橋の比較

2.1 構造比較

本橋の構造形式について、斜版橋を採用した当初の計画が文献¹⁾に示されている。それによれば、張出し長 70 m~100 m 規模の橋梁を対象にした場合、主塔高さや斜版取付け長を適切に設定すれば、桁橋や斜張橋に比べて斜版橋が経済的に有利とされている。さらに、斜張橋と比較した場合、斜版中の斜材の耐久性能や疲労に対する安全性が高まり、かつ橋梁の全体剛性が増して変形量が小さくなり安定性に優れるなど、多くの長所を有する

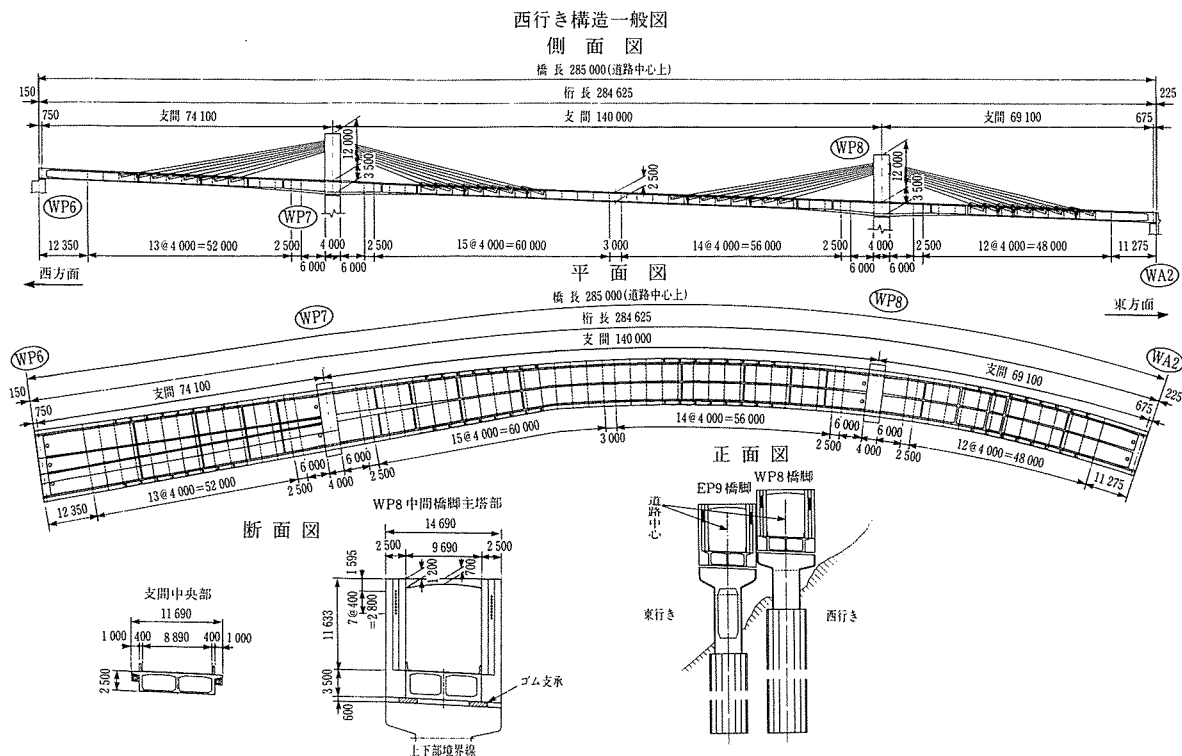


図-2 構造一般図（西行）

構造形式であることが報告されている。

このような当初計画の斜版橋をさらに発展させた構造として、エクストラードズド橋がある。この場合、斜材が直接外気にさらされるため、その耐久性や疲労等に配慮しなければならない反面、斜版コンクリートが不要となるため、①上部構造自重の減少による耐震性向上、②構築部材の減少および構造細目や斜材緊張手順の簡素化による施工の合理化と工程短縮など、斜版橋にはない多くの構造的な長所を有している。

西行を例に両者の形状比較を図-3に示す。当初計画と最終計画では設計活荷重がそれぞれ TL-20 と B 活荷重で異なるが、支間桁高比や支間塔高比は、両者ともにほとんど同一である。主塔幅は、エクストラードズド橋ではサドル構造を採用することで斜材を主塔頂部に集中配置し、主塔での斜材定着をなくすことで一定としている。また、斜版橋は斜版が主桁外ウェブ直上に位置するため、斜材定着は箱桁内となり構造的に複雑となるのに対し、エクストラードズドでは主桁外側に定着突起を設けることで簡素な構造としている。さらに、主桁と斜版を結合する桁上面の突出鉄筋が不要となることで、施工中架設車の走行や据え付け等の問題も同時に解決されている。

主要数量の比較を表-2に示す。上部工の全死荷重を支配するコンクリート体積は、斜版が不要となるエクストラードズド橋では約 15% 減少している。一方、桁内ケーブルや斜材等の PC 鋼材重量は、エクストラードズド橋の方が、設計活荷重が大きくなっているにもかかわらず約 20% 減少している。

表-2 エクストラードズド橋と斜版橋の数量比較（西行）

項 目	部材	単位	数 量				エクストラ／斜版橋
			エクストラードズド橋		斜版橋		
コンクリート	主桁	m ³	3 553	0.84	3 791	0.76	0.94
	主塔		678	0.16	666	0.13	1.02
	斜版		0	0.00	540	0.11	0.00
	合計		4 231	1.00	4 997	1.00	0.85
桁内 PC 鋼材	主桁	t	85	0.65	117	0.70	0.73
	横桁		15	0.11	22	0.13	0.68
	床版		31	0.24	27	0.16	1.15
	合計		131	1.00	166	1.00	0.79
斜 材		t	93		118		0.79

2.2 工 程 比 較

図-4にエクストラードズド橋と斜版橋の施工手順を、図-5に両者の標準的な施工日数と本工事で計画している施工日数を比較して示す。両構造ともに斜材架設を併用しながらの張出し架設方式であるが、斜版橋では、主桁完成後に斜版コンクリートを打設して斜材の二次緊張を行うことから、斜版工が追加される分だけ工種、施工日数ともに増加する短所がある。一方、エクストラードズド橋はこのような工種が不要となり、標準工程が約 15% 短くなる。しかし、本工事は今回供用予定区間の最終工区となるため、施工日数をさらに短縮できる工法が重要な課題となっている。したがって、エクストラードズド橋を計画し、その構造に適した新しい施工技術を採用することで、このような問題の解決を図ることとしている。

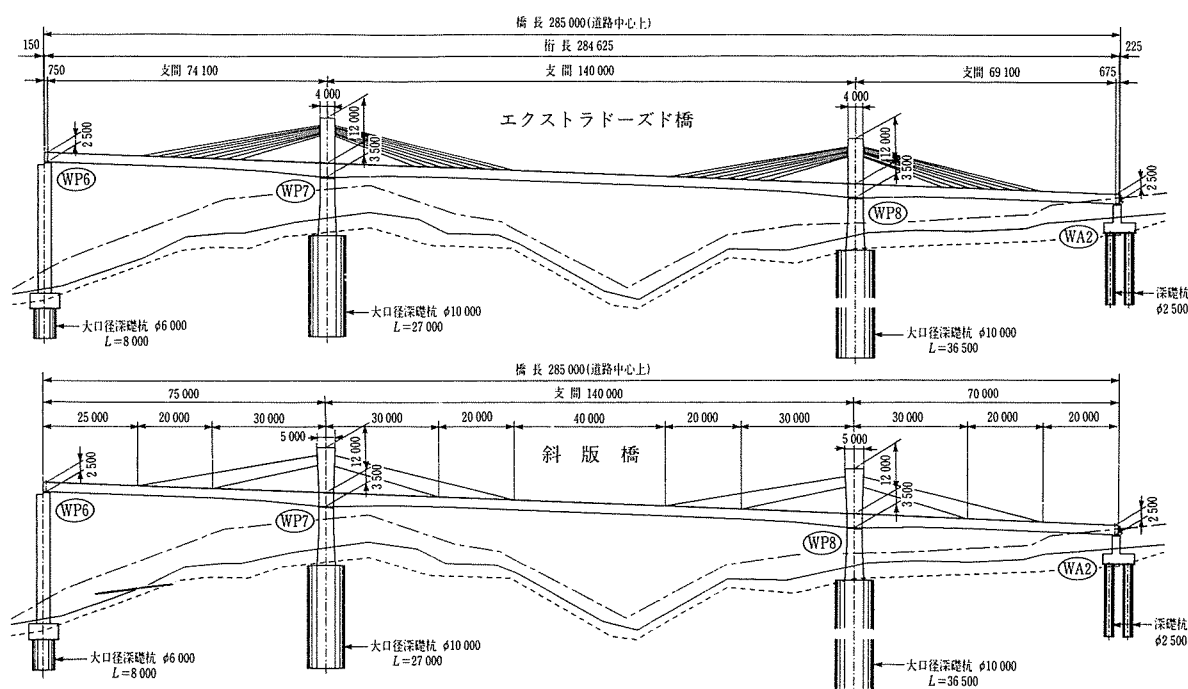


図-3 斜版橋とエクストラードズド橋の形状比較

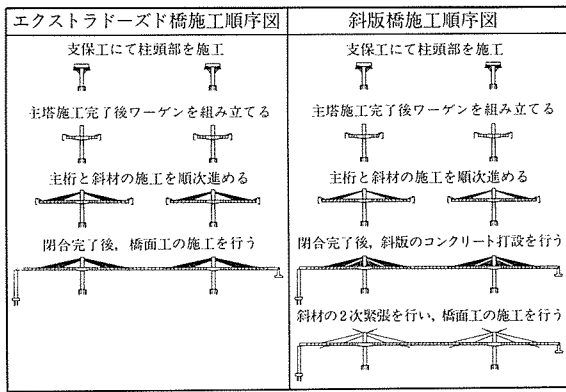


図-4 斜版橋とエクストラードズド橋の施工手順の比較

3. 詳細設計

3.1 主桁ブロック分割長

柱頭部の大きさは、問題のない範囲でできるだけ長くすることが工程上有利となる。本橋程度の地盤高では支柱式が一般的ではあるが、斜面安定上、支柱を斜面上に設けることが出来ず、支保工の構造は柱に固定されるブラケットタイプに限定され、その構造から柱頭部の大きさが決定されている。主桁ブロック長も柱頭部と同様に出来るだけ規模を大きくして、架設車のサイクル数を少なくすることが工程上有利と考えられる。しかし、ブロック規模を大きくするにつれて架設車の規模も大きくなることから、架設車組立時の揚重機械能力や柱頭部の長さ等から適切に設定する必要がある。本橋ではこれらのことを総合的に判断して、ブロック長を4mとしている。

3.2 支承構造

橋脚頭部は、柱、主桁および主塔の3部材が集まる部位で、それらの結合や支持については多くの形式が考えられるが、本橋では主に耐震構造に主眼をおいて検討した。当初の計画は、中間2橋脚のうち一方を主塔・主桁・橋脚のすべてを剛結するラーメン構造とし、他方を粘

性ダンパーを用いて上下部工をピン結合とし、両橋脚それぞれ異なった構造で地震時慣性力を橋脚に伝達させる計画であった。この場合、両橋脚が受ける地震時慣性力の分担割合が異なることから、ピン結合の橋脚基部に断面力が集中し、想定以上の地震動に対しては問題が残る。したがって、地震時慣性力を両橋脚にできるだけ均等に分担させ、想定した地震動に応じて塑性ヒンジを順次生じさせることで橋梁全体の耐震性能を高める構造を採用することとした。

表-3は、このような考え方で、部材結合方法について比較検討したものである。CASE-1では、レベル2地震動で橋脚基部に塑性ヒンジが生じた場合、主塔の大きな変形によって斜材張力が急激に変化し、場合によっては橋梁全体の崩壊が予想される。一方、CASE-2では地震時慣性力は主塔にあまり伝達されず、中間両橋脚に塑性ヒンジが生じても上部構造としては安定していることから、橋梁全体の崩壊に至ることはない。このような橋梁全体の耐震性の観点から、工事費は若干高くなるがCASE-2を採用することとした。

3.3 主桁の一般構造設計

主桁の設計は、一般の斜張橋と同様な手順で行っている。西行の結果を例に述べる。図-6に設計荷重時における主桁の曲げモーメントを示すが、形状的には連続桁の曲げモーメントを斜材で負方向に吊り上げたものとなっている。図-7は桁内ケーブル緊張力の合計を示したものであるが、架設ケーブルは、従来の桁橋と異なり中間支点部から斜材定着部にかけてなだらかな減少となっている。設計荷重時の主桁コンクリートの縁応力度を図-8に示す。側径間部の最下段斜材定着部付近の下縁圧縮応力度が許容値に対して余裕がないが、これは中央径間長に対する側径間長の比率が小さく、側径間の負のモーメントが卓越することに起因していると思われる。東行は省略しているが、このような傾向が見られず許容値に対して比較的余裕のある結果となっており、こ

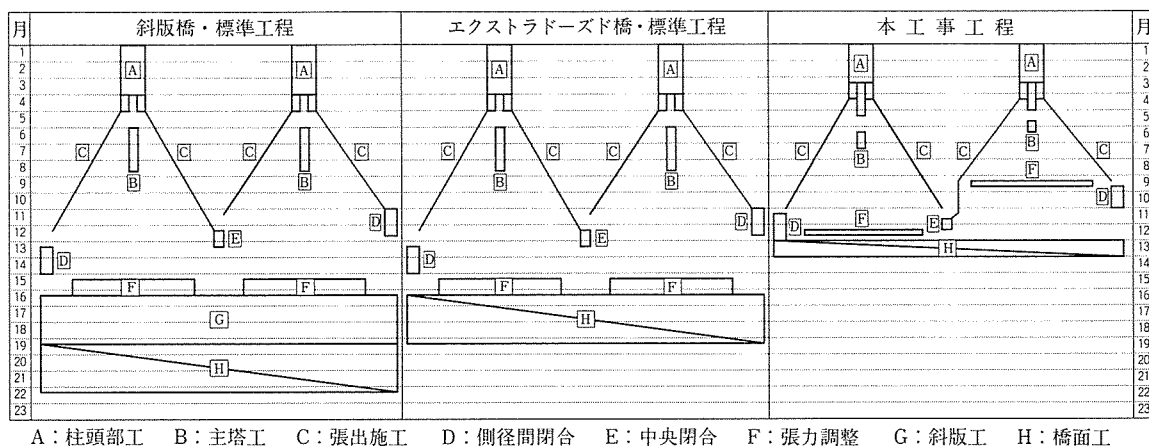
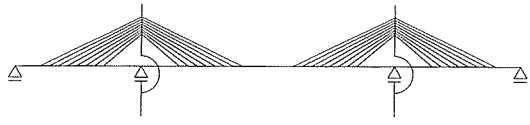
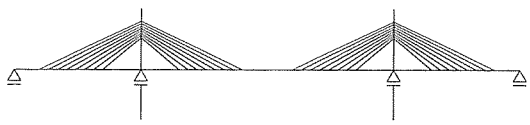


図-5 施工日数の比較

表-3 支承条件の比較検討

	CASE-1	CASE-2
構 造		
結 合 条 件	<ul style="list-style-type: none"> ・主塔と橋脚：剛結構造 ・主桁と橋脚：水平力分散ゴム支承+ストッパー 	<ul style="list-style-type: none"> ・主塔と主桁：剛結構造 ・主桁と橋脚：水平力分散ゴム支承+ストッパー
完成系構造特性	<ul style="list-style-type: none"> ・活荷重偏載荷による斜材張力変動が小さい ・主塔に発生する断面力が大きくなる 	<ul style="list-style-type: none"> ・斜材の張力変動が比較的大きい ・主塔に発生する断面力が小さくなる
支 承	・比較的小規模なゴム支承	・上部工全体の反力を受け持つことから、大規模なゴム支承が必要で、工事費が高くなる
耐 震 性 能	<ul style="list-style-type: none"> ・主桁の慣性力は、斜材を通じて主塔から橋脚へ伝達され、斜材の減衰効果が期待できる ・橋脚基部の変形は主塔や斜材へ伝達されるため、上部構造の受ける影響が大きい 	<ul style="list-style-type: none"> ・主桁および主塔の慣性力はゴム支承を介して橋脚へ伝達される構造 ・上下部工が完全分離構造であるため、耐震性能は橋脚基部で決定されるが、橋脚の変形等が上部工へ及ぼす影響は小さい

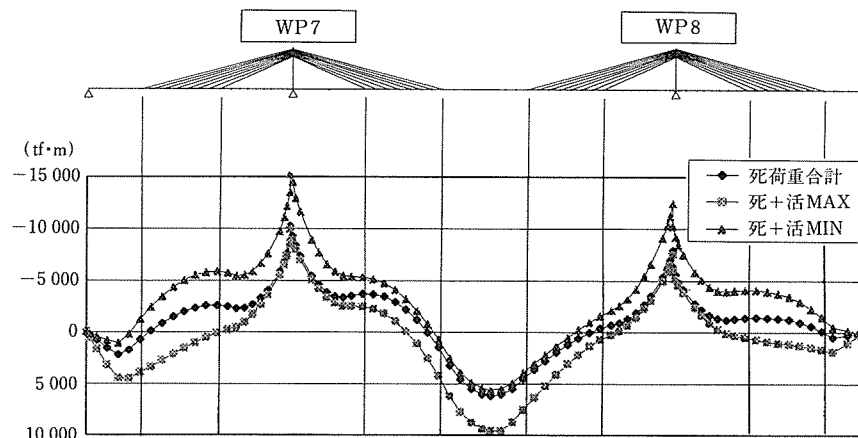


図-6 設計荷重作用時曲げモーメント

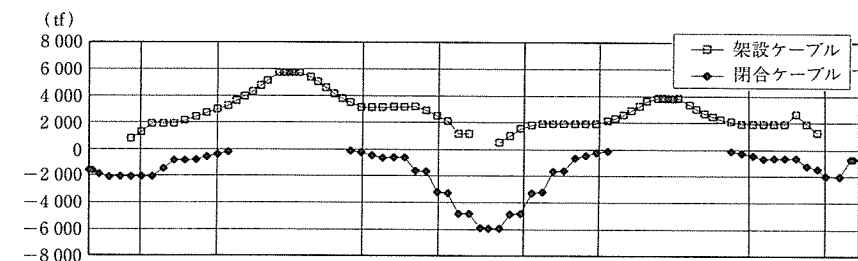


図-7 桁内ケーブル緊張力

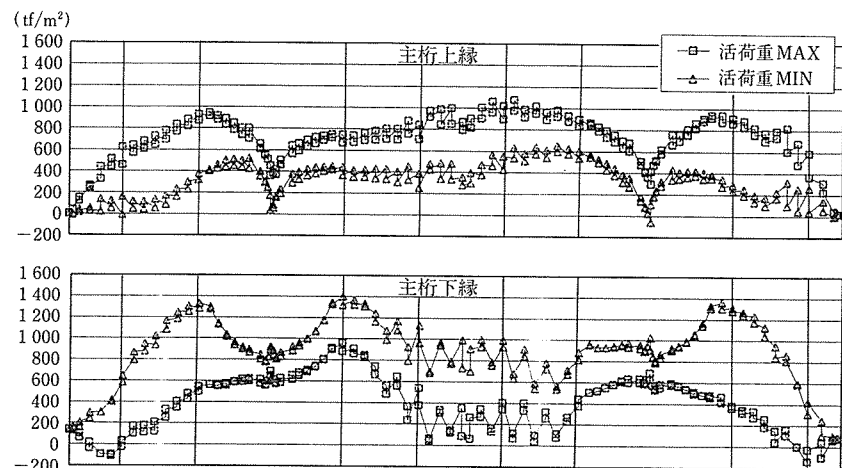


図-8 設計荷重時主桁コンクリート縁応力度

これらの結果から、理想的な支間比（側径間長／中央径間長）は、東行の0.55～0.6程度と考えられる。

3.4 斜材の設計

静荷重時とB活荷重による斜材の張力、応力度および引張強度比を図-9に示す。WP 7側は、道路幅員が端支点に向かって拡幅しており、施工中のアンバランスモーメントを小さくするために、中央径間側の張出し長を長くしていることから、斜材張力が大きくなっている。

通常のPC橋の場合、桁橋に用いられる内・外ケーブルや斜張橋の斜材などのケーブル設計は、主に疲労の観点から、簡易的に使用状態における張力の上限値を規定することでその安全性を確保するよう行われている。規定される張力の水準は、文献⁴⁾によれば、橋梁の構造形式で分類されており、桁橋と斜張橋の場合それぞれ破断荷重の60%および40%となっている。一方、本橋のような構造のケーブル設計においては、桁橋と斜張橋のどちらの構造形式を適用して設計するかは、現時点では明確な規定がない。そこで、表-4に示す数種類の手法で疲労設計を行い安全性を検討することとした。手法①および②では応力の下限値を強度の60%とした場合の200万回における設計疲労強度を算出したものである。③の手法では、以下の手順で検討を行った。まず、阪神高速道路網の交通量実態調査より、大型車の中から過積載車（軸重11t以上）の占める割合を求め（4%）、本橋の設計期間における大型車計画交通量にそれに乗じて算出されたものを繰返し回数（300万回）とする。そして、疲

労設計用車両をTT 43として、マイナー則により200万回に対する換算応力振幅を求めたものである。

一方、DIN 1073では自動車荷重による最大変動応力度を50%低減して疲労設計されているようであり、わが国でも同様の低減率が採用されている事例⁵⁾がある。

以上の検討結果を総合的に判断して、施工中および使用状態における張力の上限値を破断荷重の60%に設定することとした。ただし、ケーブルの振動等による横方向曲げなどの2次応力に対しては、その影響がほとんどないように定着装置やサドル装置を工夫して設計した。

3.5 耐震設計

本橋の耐震設計は、修正震度法や保有水平耐力の照査等に加えて、時刻歴応答解析による検討を追加した。解

表-4 斜材の疲労設計結果一覧

(kg/mm ²)			
橋脚番号		WP 7	WP 8
斜材番号		8-L	8-R
引張強度		190	
持続荷重応力度		94.9	93.2
B活荷重変動 応力度	最大応力	100.2	99.1
	最小応力度	92.0	90.3
	全応力振幅	8.2	8.8
B荷重	① コンシ応力振幅の限界値	12.4	12.1
	② グッドマン線図の限界値	16.4	16.0
実交通	TT-43 を1台載荷の応力振幅	1.4	1.6
	③ TT 43 200 万回換算応力振幅	1.6	1.8

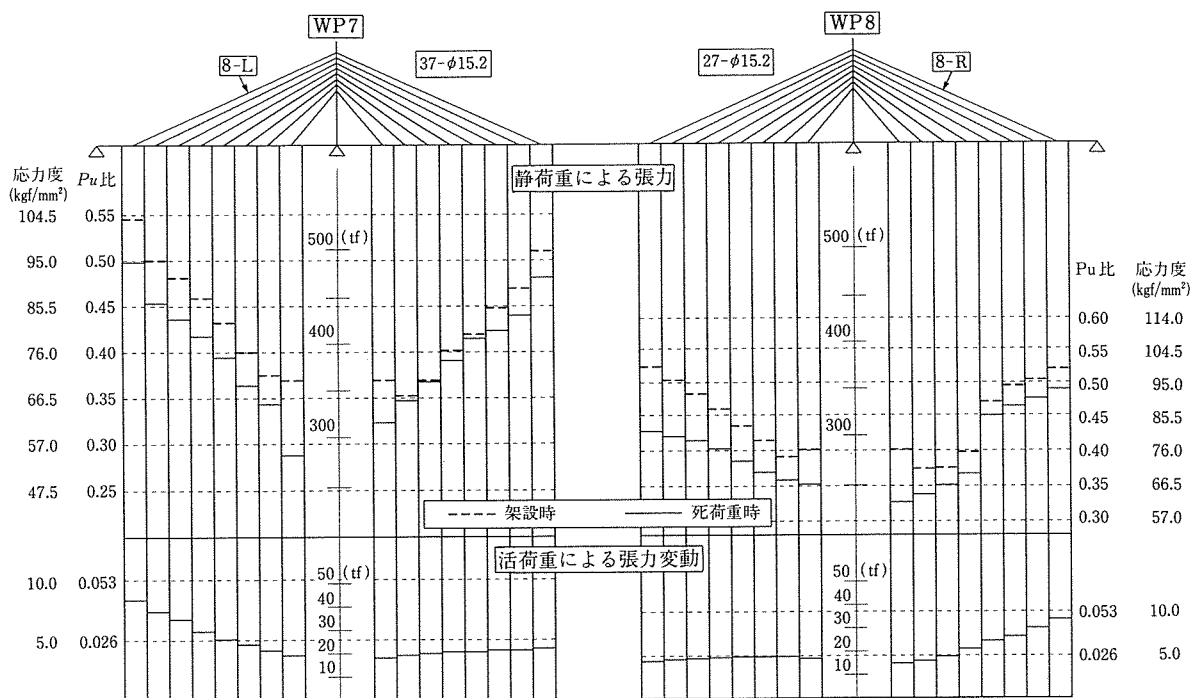


図-9 斜材張力図

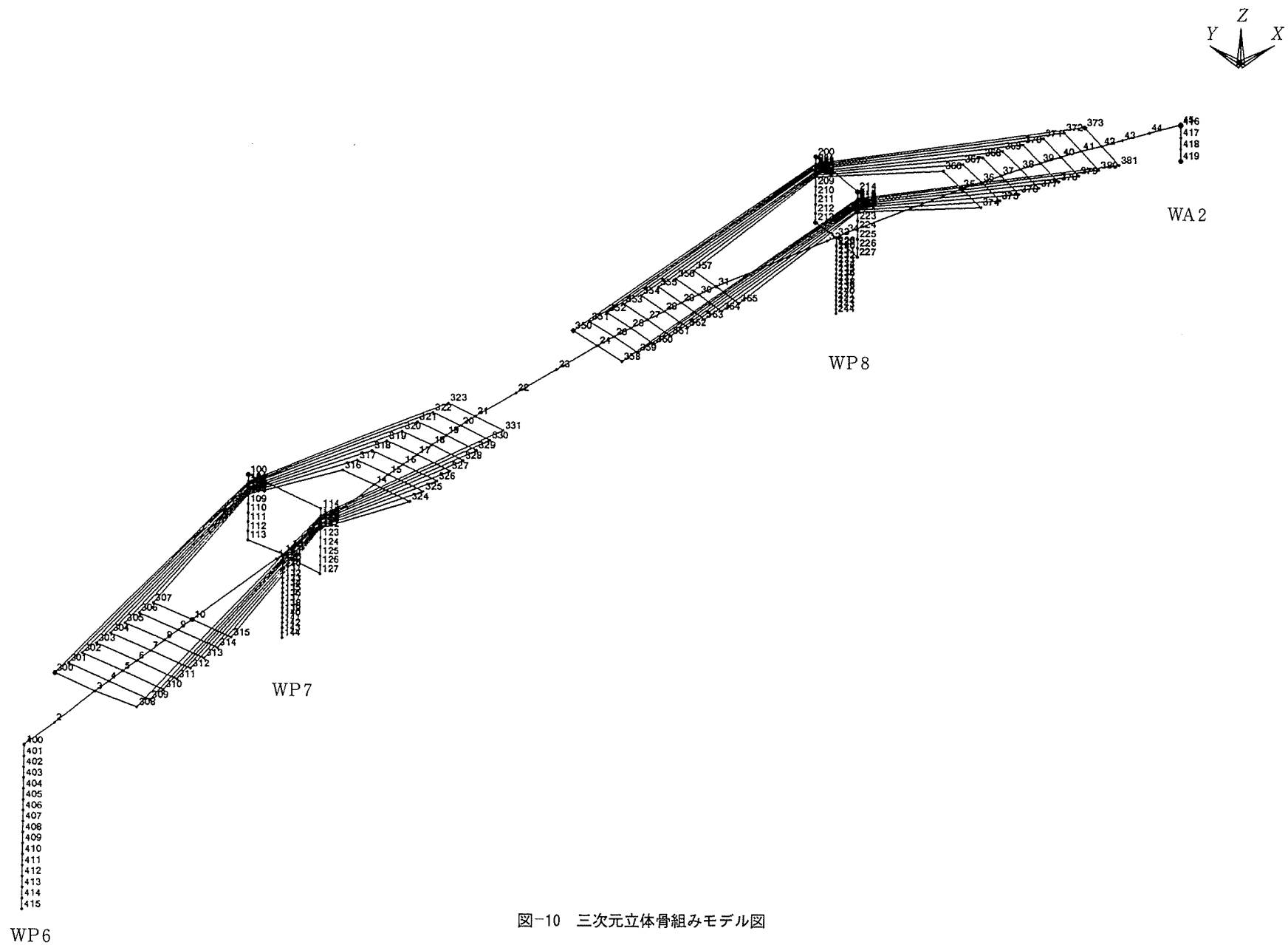


図-10 三次元立体骨組みモデル図

表-5 橋脚下端曲げモーメントおよび破壊モード (tm)

橋脚番号				WP 7	WP 8
曲げ 耐力	ひびわれモーメント			15 305	13 888
	降伏モーメント			24 530	25 805
	終局モーメント			31 601	30 717
非線形 静的	破壊 モード	Kh	0.140		ひびわれ
			0.160	ひびわれ	
			0.260	降 伏	
			0.265		降 伏
			0.360		終 局
非線形時刻歴最大モーメント				22 100	23 700

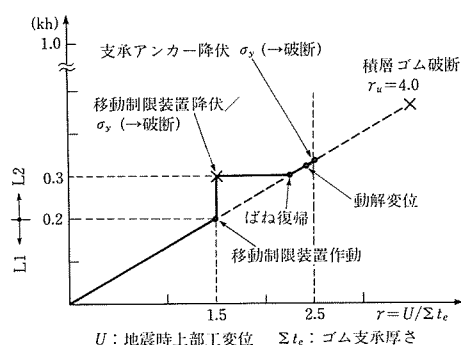


図-11 支保装置破壊メカニズム

析は、図-10に示す3次元立体骨組みモデルにより線形時刻歴、非線形静的および非線形時刻歴の順に行った。西行の非線形解析の結果を表-5に示す。表中の非線形静的解析では、橋軸方向に水平慣性力を静的に漸増させて橋脚下端が破壊に至る過程を示しているが、片側の橋脚のみが降伏から終局に至ることはない。これは、中間両橋脚が順次降伏から終局へ至るようにゴム支承の水平バネ値が決定されていることによるといえる。また、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台 N-S 成分を入力地震波とした非線形時刻歴解析では、最大応答曲げモーメントが橋脚の降伏モーメント以下となっている。

一方、中間橋脚の支承装置は、ゴム沓に対するフェイルセーフの一種として、移動制限装置がロックオフするときのエネルギー吸収に期待するとともに、考慮される

地震動の大きさにより図-11に示すようなメカニズムで設計されている。まず、本橋の設計水平震度 0.2 までのレベル 1 の地震動に対しては、ゴム沓のせん断変形のみで抵抗し変形量をゴム厚さの 150% まで許容する。次に、レベル 2 の地震動では、水平震度 0.2 から移動制限装置が作動を始め、水平震度 0.3 に至るまで装置がエネルギーを吸収した後に降伏する。それ以降の水平震度では、ゴム沓のみの抵抗となり、ゴム沓に設置されたアンカー降伏の後、ゴム沓厚さの 400% 以上の変形量で沓が最終的に破壊に至る。

また、端支点可動支承に設置された落橋防止装置は、端橋脚に過大な水平力が伝達されないように、中間橋脚が降伏した後に作動するようにしている。

4. おわりに

以上、奥山橋の計画および設計の概要について報告させていただいた。本工事の施工面の特徴は、周辺が山岳地帯であり工事用地に制限されるだけでなく、急峻な斜面上における建設と施工日数の短縮にある。これらを克服するために新しい施工技術が要求されており、現在鋭意検討中である。工事はまだ着工したばかりで、橋脚の梁部を施工している段階であり、平成 9 年夏頃には最盛期を迎える。

最後に、京都大学教授藤井委員長をはじめとした技術審議会の委員各位、そして(株)東京建設コンサルタント、新構造技術(株)および関係の皆様方には多大な御指導をいただきました。ここに記して謹んで謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 幸左ほか：PC 斜版付箱桁橋（奥山橋）の設計，阪神高速道路公団，技報第 12 号，1992，pp. 75-86
- 2) J. Mathivat：「Recent Development in Prestressed Concrete Bridges」FIP notes, 1989.2
- 3) 城野ほか：エクストラード PC 橋の計画と設計，橋梁と基礎，1992. 12 pp. 11-17
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，平成 6 年 2 月
- 5) 松本ほか：大和川橋梁上部工の設計，橋梁と基礎，1979. 7 pp. 10-17