

橋梁と基礎

11

2003
Vol.37
No.11

BRIDGE AND FOUNDATION ENGINEERING

姥山高架橋
(千葉県道路公社)
東急建設株式会社
佐伯建設工業株式会社
日本ヒューム株式会社



おぼろ

臙大橋の景観デザインとその構造的合理性

Aesthetic and Structural Rationality of Oboro Bridges

Yamada 山田	Yoshihiro 好広*	Ura 浦	Kenji 憲治****
Otsu 大津	Shigeru 茂**	Terayama 寺山	Mamoru 守*****
Takematsu 武末	Hironobu 博伸***	Tamaki 玉置	Kazukiyo 一清*****

まえがき

臙大橋が建設された路線は一級町道下横山東西線と称し、過疎化が進む山間部の奥八女地方と近隣地方都市である久留米市とを直接結ぶことにより緊急医療体制の確立、生鮮食料品の早期搬出、さらには通勤通学圏内の拡大により若者の定住化を図り、地域の活性化を促すことを目的としたバイパス道路である(図-1)。また、奥八女地方は、“蛸と石橋の里”として親しまれている上陽町や星野村など、「福岡県立筑後川自然公園区域」に属する耳納山脈を借景とする緑豊かな自然に囲まれた景勝地であり、年間約100万人の観光客が訪れ、大自然とそれを利用して造られた様々な体験館を満喫している。臙大橋は、秘境奥八女観光地の玄関口にあたる“広川溪谷”を跨ぐ、橋長293m、アーチ支間172mの鉄筋コンクリートアーチ橋として計画された。

本橋の橋梁形式および主要部材は、「臙大橋検討会議(東京大学篠原修教授ほか15名)」により、橋梁という巨大構造物により周辺環境を乱さないことを前提として、模型、CG等により周辺地形とのボリューム、バランスを繰り返

し検討した。このような条件下のもと誕生した臙大橋の、景観デザインおよびそれに付随した構造的合理性について、一連の成果をここに報告する。

1. 工事概要

1-1 橋梁概要

本橋の橋梁諸元を以下に示す。橋梁一般図を図-2に、完成写真を写真-1、2に示す。

路線名：一級町道下横山東西線

架橋位置：福岡県八女郡上陽町大字下横山字臙

構造形式：鉄筋コンクリート固定アーチ橋

橋長：293.0m

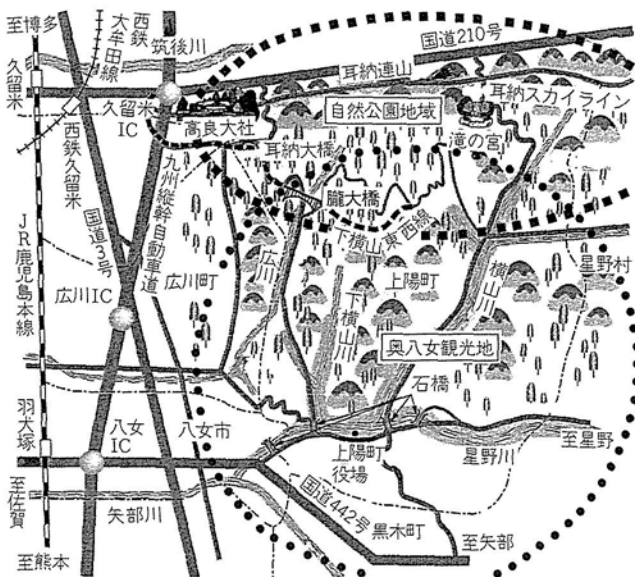


図-1 臙大橋の位置

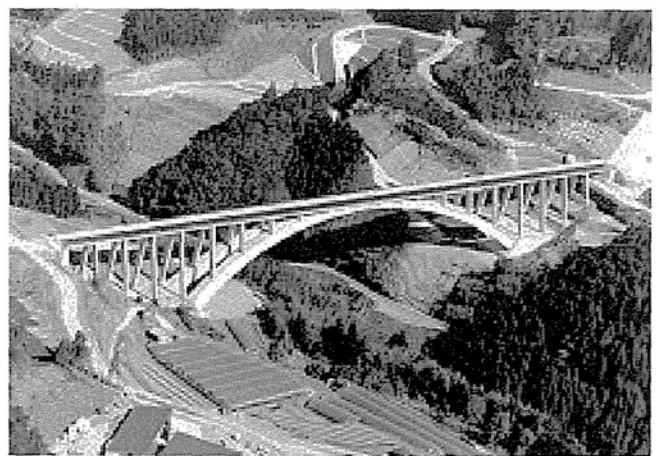


写真-1 臙大橋の全景

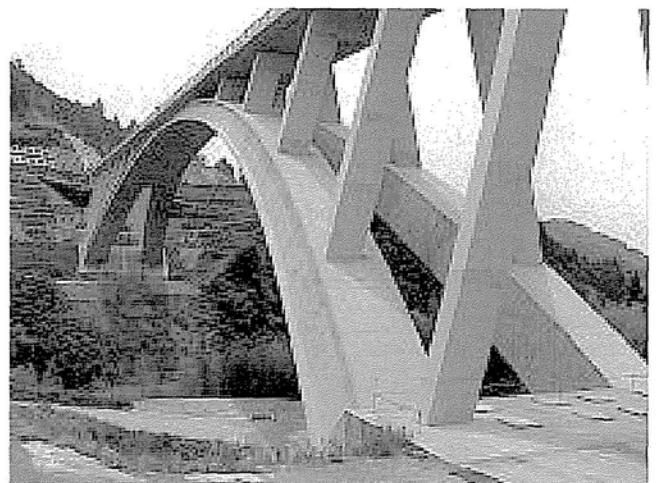


写真-2 下からの全景

*福岡県 土木部 道路建設課 橋梁係長
 **韓建設技術センター 技術本部長
 *** 〃 技術第1部長
 **** 〃 技術第2部長
 *****三井住友建設機 九州支店 (元:住友・富士ビーエス共同企業体 所長)
 ***** 〃 技術研究所 (元:住友・富士ビーエス共同企業体)

キーワード：アーチ橋、景観デザイン、耐震設計、情報化施工

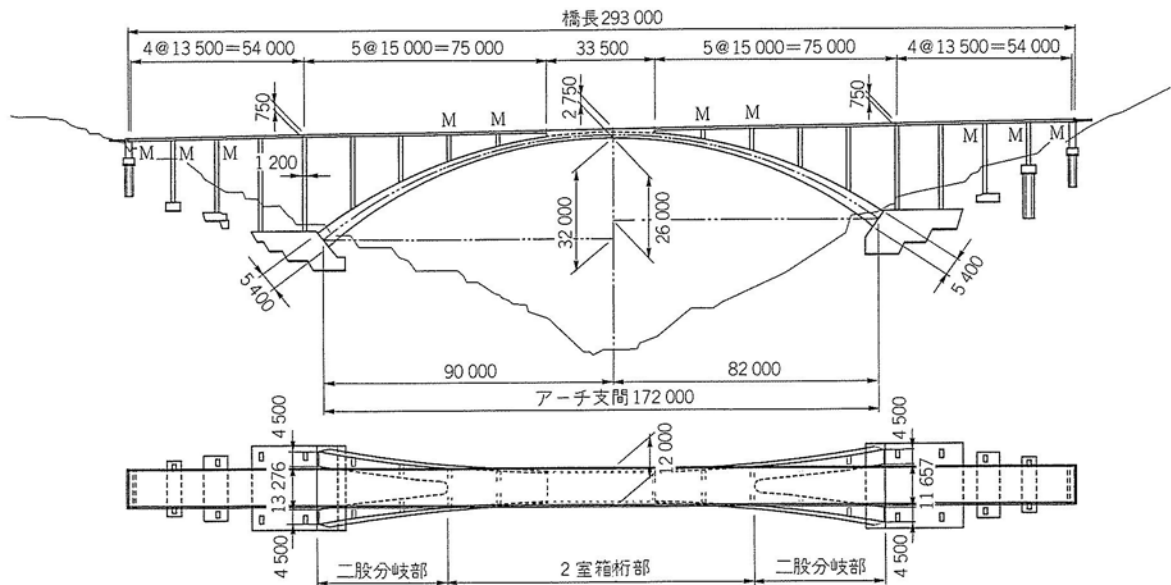


図-2 龐大橋の一般図

アーチ支間：172.0m

有効幅員：車道部7.5m，歩道部3.5m

縦断勾配：1.462%

活荷重：B活荷重

架設工法：メラン併用斜吊り張出し工法

1-2 架設工法の特徴

本橋の施工には、コストの縮減、環境への配慮を目的とした下記の計画を盛り込んでいる。

1-2-1 架設材の転用使用

図-3にアーチリブの施工概要を示す。通常のワーゲン施工が困難なアーチリブ基部の二股分岐部には、斜吊り材を利用した吊り支保工施工を採用している。この吊り支保工材として、アーチクラウン部に埋設されるメラン鋼材を先行使用する計画とし、全体の鋼重量を大幅に軽減させている。写真-3、4に吊り支保工の施工状況および解体状況を示す。

また、斜吊り材・バックステーは、アーチリブ閉合後に撤去し、その一部を補剛桁のPC鋼材として転用する目的からPC鋼棒を選択し、廃棄物の発生を抑制している。

1-2-2 情報化施工の活用

1) 架設材の軽減（コストの縮減）

情報化施工を橋梁計画段階から盛り込むことにより、変

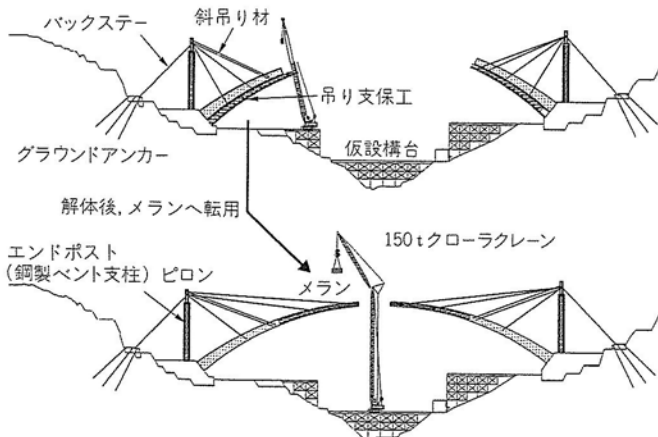


図-3 アーチリブの施工概要



写真-3 吊り支保工の施工

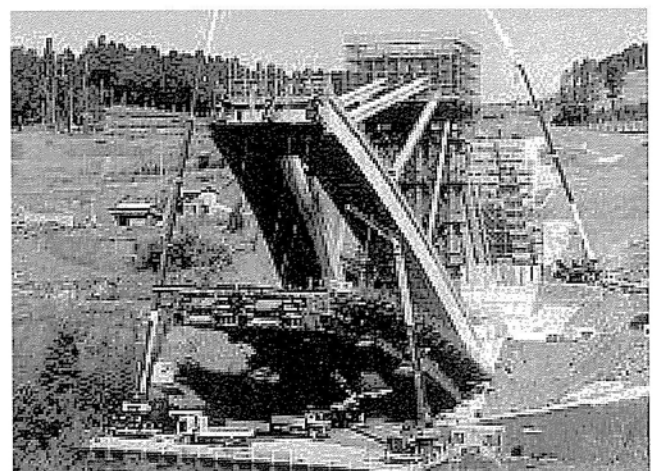


写真-4 吊り支保工の解体

位が小さい剛な施工法から、ある程度の変位を許容する柔な施工法の選択が可能になると考えた²⁾。これにより、完成系では不必要となる架設材の軽量化（高強度化）を積極的に図ることが可能であり、これが揚重設備の軽減など、コストの縮減、解体撤去の容易さなどからの工程の短縮に大いに貢献したものとする。その一例として、バックステーのコンクリート巻立ての省略について説明する。

概要図	<p>(a)コンクリート巻立て構造 プレストレス導入 (1回のみ)</p>	<p>(b)PC鋼材 (今回) 張力調整 (8回)</p>
長所	1) エンドポストの応力変化が小さい 2) バックステーへのプレストレス導入は1回のみでよい	1) 支保工およびコンクリート解体工事が不要 →環境面への配慮, 工費の削減
短所	1) 大規模な支保工が必要 2) 巻立てコンクリートの解体が困難 産廃処理が必要 3) 工程日数が(b)に比べて増大する	1) エンドポストの変形, 応力変化が大きい 2) バックステーの張力調整が必要 →自動計測システム (情報化施工) の導入
工費の比較	・バックステー支保工 ・巻立てコンクリート ・解体・産廃処理 合計 1.0	・張力調整 ・自動計測システム (エンドポスト関係のみ) 合計 0.3

図-4 バックステー構造の比較

表-1 架設部材に設置した計測器具

着目部材	計測項目	計測機器	台数
グラウンドアンカー	張力	① 2 MN ロードセル	4
斜吊り材	張力 温度	② 1 MN ロードセル 熱電対	24
バックステー	張力	③ 1 MN ロードセル	20
エンドポスト (鋼製バンド支柱)	変位	▼自動視準光波	4
(ピロン)	基部応力	④溶接型ストレインゲージ	20
	基部アンカー	⑤500kN ロードセル	6
	傾斜	⑥傾斜計	2
	基部応力	⑦溶接型ストレインゲージ	36

張出し架設される長大アーチ橋では、バックステーにはエンドポストの応力変動が小さく、施工管理が容易となるコンクリート巻立て構造が採用されることが多かった。しかし、このバックステーは完成系では不必要な部材であるため、斜面上で困難となる解体工事や廃棄物処理が発生する。本橋では、解体が容易なPC鋼棒のみのバックステーを採用することとし、コンクリート巻立てを省略することによって生じる施工管理の煩雑さを、情報化施工の活用により対応している。図-4にバックステー構造によるコストの比較と架設部材に設置した自動計測システムの一部を示す(表-1)。

2) 品質管理の向上

メラン併用斜吊り張出し工法では、斜吊り材やメラン材など多くの鋼製の架設部材で構成されるため、架設中のアーチリブは、季節による温度変化のみならず、昼夜の温度

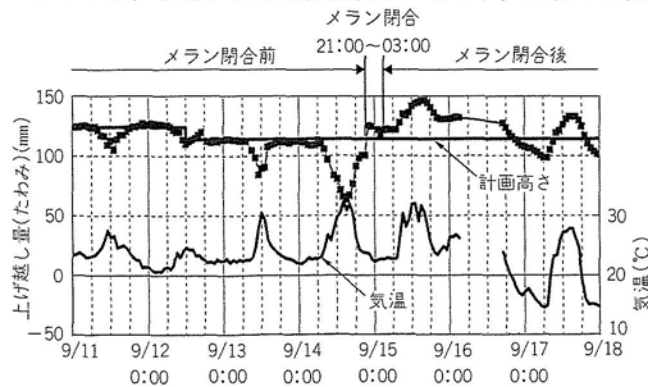


図-5 メラン仮閉合前後における上げ越し管理



写真-5 メラン閉合の直前

変化によっても、最大で±50mm程度の高さ変動が生じる。特に、水平方向に自由であるメラン仮閉合前は斜材の伸縮により夜間に高くなり、仮閉合後ではメランの伸縮により昼間に高くなるなど、その挙動は構造系の変化に伴い複雑多岐にわたる³⁾。現場施工において不確定要素のある温度変化の影響を正確に把握し、アーチリブの高さ管理を行うことは極めて難しい。本橋では、施工全期を通じて24時間、構造物の挙動を自動計測するシステムを構築し、これらのデータを迅速に分析把握することにより、温度変化の影響に配慮した上げ越し管理を実施し、その結果、ほぼ計画どおりの形状管理を行うことができた。その一例として、図-5にメラン閉合前後のメラン先端部のたわみ履歴を示す。

2. 景観デザイン

2-1 デザインテーマ

「過疎活性化を促し、秘境奥八女観光地の玄関口として、「石橋の里・上陽」の一頁として永年に耐えるデザイン」を目指し、テーマを「立体感=躍動感」として掲げた。

2-2 主要部材の検討

1) アーチリブ

図-6に示すように、アーチ支間の約1/4付近からスプリング方向に平面的に曲線で拡幅し、ムダとなる部材中

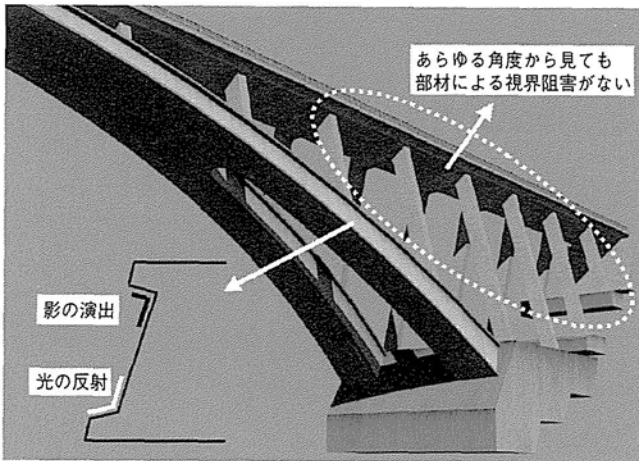


図-6 CGによる検討

中央部を取り除いた結果、二股分岐構造となる斬新なアーチリブ形状を採用した。この二股分岐構造は長大橋梁の課題である橋軸直角方向地震に対して構造的な有利性を有するものであり、その検討結果を次章に示す。一方、スプリング部でのアーチリブ幅は約22mと橋面幅員の約2倍となり、アーチアバットも広く必要となる。しかし、本橋の場合、建設地の地盤は変成岩類の片岩で、節理、片理の発達が著しく地盤反力も長期で500kN/m²程度と低いため、支持地盤から決まるアーチアバット幅も同程度必要となることからコストアップにはつながっていない。

アーチリブ側面の上下縁に幅500mmの突起を設け、影の演出および光の反射によって、その輪郭を際立たせる工夫を施している。

2) 鉛直材

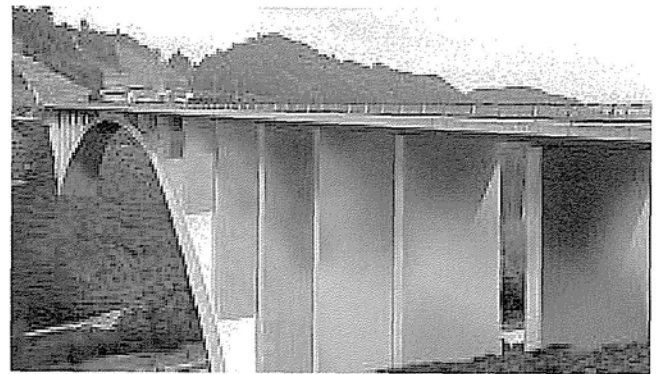
写真-6、7にホワイト模型を用いて、地形を対象とし



写真-6 ホワイト模型（橋詰公園より）



写真-7 ホワイト模型（上流より）



(a) 一般的な構造



(b) 本橋で採用した構造

図-7 橋詰公園からの眺めのシミュレーション

た空間検討および実際の人の目に合わせたファイバースコープによる検討を示す。鉛直材は、アーチリブを平面的に拡幅させているためπ字形とし、すべての鉛直柱と視覚上含まれる橋脚柱の勾配を一致させ、アーチリブ補剛桁とのバランスを検討した。

図-7に、一般的なコンクリートアーチ橋を建設した場合と、本成果の構造を用いた場合のシミュレーションを示す。秘境奥八女観光地へ訪れる人がまず目に入る「橋のもと公園・展望所」からの眺めである。一般的な構造の場合、各部材により周辺地形が大きく妨げられるばかりか圧迫感さえ感じるが、本橋の場合、橋梁奥の景色も眼に飛び込み、自然の開放感を保ちながら躍動感を感じることができる。

2-3 地域への密着

上陽町では、上陽町第4次総合計画の中で“森の学校”と位置づけ、各種の自然体験施設、都市との交流を図るテーマ館などが本橋に隣接して整備が進められている。歩



写真-8 歩道照明

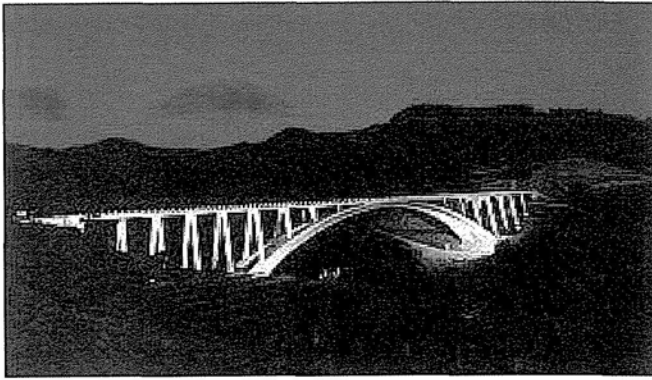


写真-9 ライトアップ

道部はそのエリアの主園路としての役目があるため、誘導、安全確保を目的に写真-8のような歩道照明を設置している。夏前に乱舞する“ホタル”のイメージである。写真-9は、村祭りのときのライトアップの状況である。このように龐大橋は、町のシンボルとして、石橋の大きな子孫として可愛がられ、単なる交通機能に加え村おこしとしても活躍し続けている。

3. 地震時構造特性

3-1 概要

本橋は、アーチリブを二股に分岐することにより、橋軸直角方向にもアーチ作用が期待でき、橋軸直角方向地震に対する抵抗性が高くなることを期待した構造である。その力学的挙動は、橋軸直角方向地震により基部に発生する曲げモーメントを、分岐アーチリブの軸力変動として抵抗するメカニズムとなるので、規模の大きなレベル2地震動に対しては、非常に高いレベルの圧縮部材となる。また、引張り側となる分岐アーチリブは、ある段階から全引張り部材となり、鉄筋のみで抵抗する部材になると想定される。

ここでは、二股分岐アーチリブの橋軸直角方向地震に対する挙動を確認するとともに、一般的な2室箱桁断面を有するアーチリブとの比較検証を行う。

3-2 固有値解析

表-2に、本橋の固有値解析結果を示す。橋軸方向には、16次に比較的大きな有効質量比を有する振動モードがあり、構造全体の動的挙動は複雑なものとなる。一方、橋軸直角方向は2次モードが支配的であり、静的照査法により、その破壊挙動をほぼ推定することができるものと考えられる。

本橋の橋軸方向地震に対しては、2次元骨組モデルによる非線形動的解析を実施し、その安全性を照査しているが、これは本橋特有の二股分岐の構造特性を特に反映するものではない。ここでは、二股分岐の特性が顕著に現れる橋軸直角方向地震に対する検討を取り上げる。

表-2 固有値解析結果

モード	固有周期 (s)	有効質量比 (%)	
		橋軸方向	橋軸直角方向
1	0.825	27.3	0.0
2	0.772	0.0	62.1
5	0.328	0.0	14.7
8	0.260	7.3	0.0
16	0.198	36.0	0.0

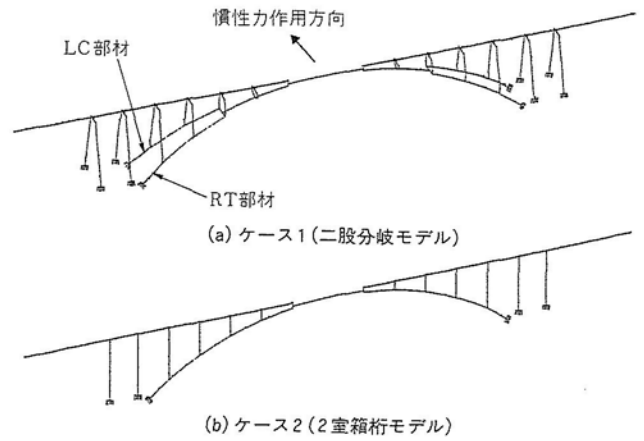


図-8 骨組モデル

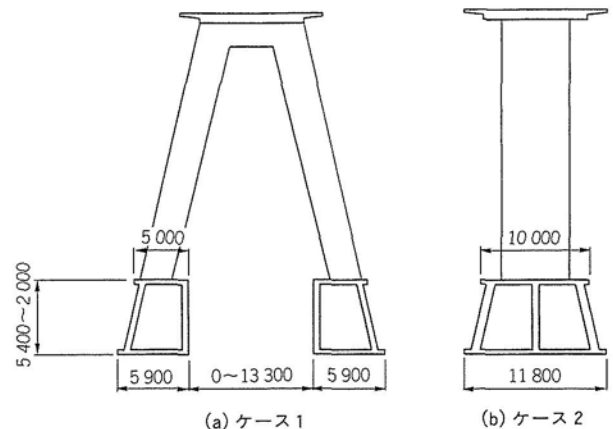


図-9 断面図

3-3 解析条件

二股に分岐したアーチリブを有する本橋を3次元骨組でモデル化したケース1と、本橋のアーチリブ分岐断面をほぼ同じ断面積を有する2室箱桁としたケース2に対して、軸力変動の影響を考慮することできるファイバーモデル⁴⁾を用いた非線形静的解析を実施する。図-8に骨組モデルを、図-9に断面図を示す。

本橋の軸方向鉄筋は、レベル1地震による設計（応答スペクトル法）において、鉄筋が許容応力度を満足するよう決定し、床版にはD32ctc150を配置している。橋軸直角方向地震に対してウェブに配置する軸方向鉄筋は、ケース1、ケース2ともにD13ctc150で許容値を満足する結果となった。しかし、本橋の構造特性として、レベル2地震に対して高軸力部材となることに配慮し、道路橋示方書IV編7.3の規定を適用し、ウェブ断面積の0.8%に相当するD19ctc150を配置するものとしている。ここでは、比較のため、ケース2にもまったく同じ配筋と設定した。

構造としての終局条件は、アーチリブのコンクリート圧縮縁ひずみが1断面でも終局ひずみに達したときと設定した。本橋のアーチリブ断面は基部からほぼ1D(6m)の区間のみを無垢断面とし、地震時において鉄筋の降伏が想定されるこの区間には中間拘束筋D19を有効長90cm、軸方向に15cm間隔で配置している〔図-10(a)〕。箱形断面となる区間からは床版横方向鉄筋（橋軸直角方向地震に対するせん断補強鉄筋）を横拘束筋とし、有効長は安全側に考慮して桁高と設定した〔図-10(b)(c)〕。表-3に主要断面の

表-3 主要断面のコンクリート終局ひずみ

		横拘束筋	有効長 (cm)	体積比 (%)	σ_{cc} (kN/mm ²)	ε_{cc} (μ)	ε_{cu} (μ)
無垢部	(スプリング部)	D19	90	0.85	42.3	2 980	4 382
箱桁部	(二股分岐部)	D19	540	0.14	40.4	2 163	2 387
	(結合部)		400	0.19	40.5	2 221	2 523
	(2室箱桁部)		200	0.38	41.0	2 441	3 053

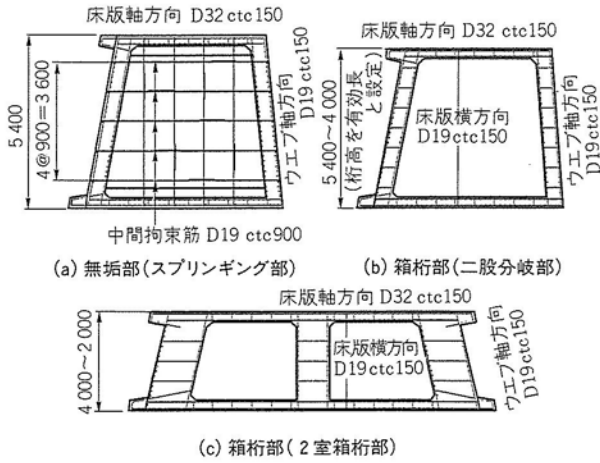


図-10 主要断面における鉄筋配置

終局ひずみを示す。

3-4 非線形静的解析 (Push-Over)

図-11に、橋軸直角方向に慣性力を静的に作用させた場合のクラウン部の橋軸直角方向変位を、また、図-12にアーチリブ基部の断面力履歴を示す。縦軸は、全重量に対する慣性力の比であり、水平震度 k_h で表すものとする。

図-11より、二股に分岐させたケース1は、橋軸直角方向のアーチ作用により、ケース2に比べ初期剛性が約2倍程度高くなっていることがわかる。また、ケース1は、ケース2に比べ終局変位は若干劣るものの、終局時における震度は1.5倍程度大きくなる結果となった。二股分岐構造の構造的有利性はマクロには確認されたが、その破壊メカニズムに関して詳細な考察を行う。

ケース1は、橋軸直角慣性力により引張り力が作用する右側アーチリブ（以後、RT部材；図-9）の主鉄筋が $k_h = 0.48$ において先に降伏する。しかし、図-11に示すように $k_h = 0.2$ 以降、RT部材の曲げモーメントはほとんど停滞しており、コンクリートの圧縮縁ひずみは以後ほとんど増加しない。一方、圧縮力が作用する左側アーチリブ（以後、LC部材；図-9）の鉄筋に降伏が認められるのは k_h

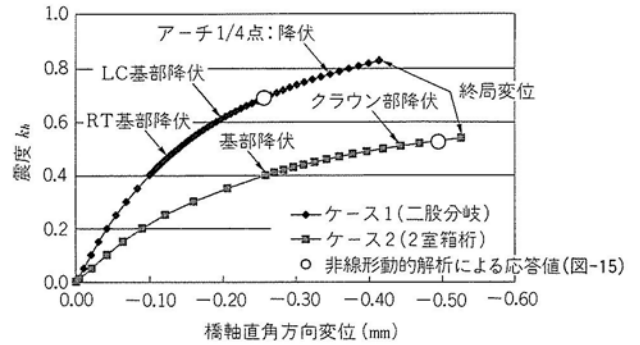


図-11 非線形静的解析 (Push-Over) による橋軸直角方向変位履歴 = 0.62と遅れるが、その後、急激にコンクリート圧縮縁ひずみが増大し、 $k_h = 0.83$ においてLC基部が先に終局ひずみに到達する結果となった。また、ケース2では基部の終局までにクラウン部での鉄筋降伏も生じているのに対し、ケース1ではクラウン部での鉄筋降伏は生じないとその優位性が認められる。

しかしながら、ケース1では二股分岐構造特有のアーチ1/4付近に設けた二股分岐部が結合する断面急変部において鉄筋の降伏が認められた。また、この断面において非線形動的解析時にねじり耐力が不足する結果となったため、図-13に示すこの領域の横方向の鉄筋をD22にランクアップすることとした。ただし、日本道路協会・道路橋の耐震設計に関する資料⁹⁾では、ねじりひび割れ発生後のねじり

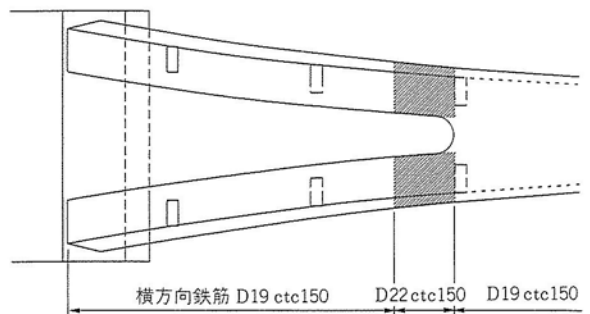


図-13 横方向鉄筋の配置

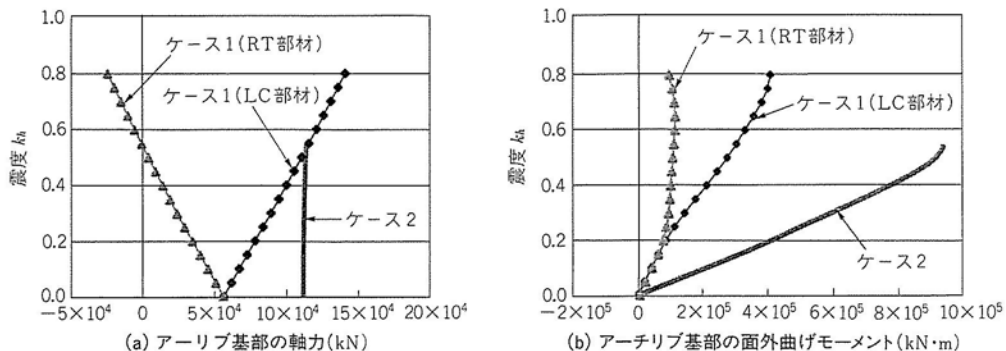


図-12 アーチリブ基部の断面力履歴

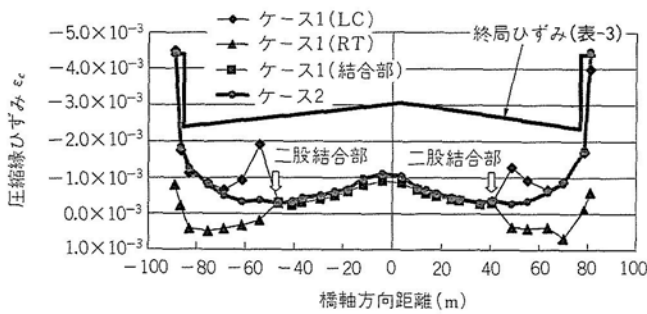


図-14 終局時におけるアーチリブのコンクリート圧縮縁最大ひずみ分布

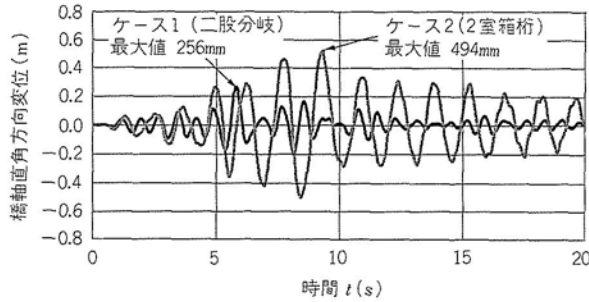


図-15 非線形動的解析(時刻歴応答解析)による応答変位履歴
剛性を1/10とする設計手法が示されているが、本橋のねじりモーメント算出は、レベル2地震時においてもねじり剛性を低減せずに全断面有効と仮定して行っている。

図-14に終局時におけるアーチリブコンクリートの圧縮縁ひずみの最大値分布を示す。RT部材の最大圧縮ひずみがスプリング部の一部を除き引張りひずみであるのは、全断面でひび割れが生じ、鉄筋のみで引張り軸力を負担している状態であることを示している。鉄筋に生じる引張りひずみの最大値は終局時で1.5%程度であり、破断に対しては十分に安全であった。

3-5 非線形動的解析(時刻歴応答解析)

全断面を有効とした固有値解析では、橋軸直角方向に対する1次モードが卓越していたが、弾塑性時には複雑なモードを呈する可能性があるため、非線形動的解析を実施し、静的照査の検証を行った。図-15に、時刻歴応答解析の結果を示す。入力地震動は、兵庫県南部地震(NS波)に、福岡県の地域係数0.7を乗じたものである。

ケース1では、アーチリブ基部の最大応答圧縮ひずみが2000 μ 程度であり、軽微な損傷であると推定される。一方、ケース2は、最大応答圧縮ひずみが3600 μ であり、安全性は確保されているが、かぶりの剥落などの大きな損傷が想定される。

静的照査で懸念されたアーチ1/4点での鉄筋降伏は、結果的にレベル2地震においては生じないということがわかった。この分岐アーチリブの結合位置の設定は、二股分岐構造を検討するにあたって、特に留意を要する部位であると考えられる。

3-6 まとめ

最大応答値を図-11に○印でプロットしてみると、ケース1とケース2の間にエネルギー一定則がほぼ成立していることがうかがえる。レベル2地震に対して、一般的な構造である2室箱桁がほぼ能力限界であるのに対し、二股分

岐構造は同一配筋で余力を有していることがわかる。このことは、二股分岐構造における橋軸直角方向へのアーチ作用により、構造系全体としてのたわみ剛性を高め、なおかつ直角方向に対する不静定次数の増加による靱性能の向上が、橋軸直角方向地震に対するエネルギー吸収能を著しく向上させていることを意味するものである。

今回の検討で、面外方向に対する二股分岐構造の構造的優位性が明らかとなった。鉛直荷重に対して極めて合理的であり、コンクリート橋梁の歴史の中で常に支間記録を更新し続けるアーチ橋にとって、高軸力部材であるがゆえに特に面外方向への座屈は更なる長大化への大きな課題と言える。面外の細長比入が50程度である本橋では、座屈に対する照査を特に幾何学的非線形性を考慮しないでDIN 1075による簡易検討のみとしたが、さらに長支間のコンクリートアーチ橋では材料非線形性に加え幾何学的非線形の影響も考慮した検討を行う必要がある。この場合、面外方向へのたわみの小さい本構造の優位性はさらに増加するものと考えられ、本構造は更なる長大アーチ橋への可能性を秘めた構造であると考えられる。

あとがき

明治から大正にかけ、1世紀前の架橋技術の粋を集めて築かれた石造アーチ橋の里に、現代の最先端の情報化施工とコンクリート技術を駆使した“躍動感あふれる長大コンクリートアーチ橋”が都市との交流の場として、そして新たなランドマークとして完成した。地域の人々は橋の姿から「おぼろ月夜にウサギが跳ねる」イメージを創造し、石橋の子孫として、新たな観光のシンボルとしてのまちづくりに余念がない。その活動を見ていると、龐大橋が確実に過疎活性化のトリガー(ひきがね)となり、永年にわたって可愛がられるものと確信できる。広義な意味でのデザインとは、単なるイメージの創出にとどまらず、建設する時代の趨勢を十分踏まえて総合的に行うことが大切と考える。

龐大橋は、周辺環境との調和を重視した構造とその合理性、施工上の工夫による環境配慮、コスト縮減が実現され、さらに地域に強く密着している橋である。この一連の成果が今後の橋梁技術に寄与できれば幸いである。

最後に、指導を賜った篠原修・東京大学教授をはじめとする龐大橋検討会議参加者の方々、そして本建設工事に多大な理解と協力をいただいた地域住民の方々に、深く感謝の意を表す次第であります。

【参考文献】

- 1) 本村, 武末, 寺山, 柴田: 龐大橋の設計と施工, コンクリート工学, Vol. 38, No. 7 (2000. 7)
- 2) 本村, 寺山, 柴田, 玉置: 龐大橋における情報化施工, プレストレストコンクリート技術協会第10回PCシンポジウム論文集 (2000. 10)
- 3) 江崎, 武末, 寺山, 柴田, 玉置: 龐大橋の施工—メラン併用施工におけるアーチリブ形状管理—, プレストレストコンクリート, Vol. 44, No. 5 (2002. 9)
- 4) 玉置, 新井, 板井, 山崎: 非線形解析プログラムの外ケーブル構造への適用と今後の標準化について, 第5回PCシンポジウム論文集 (1995. 10)
- 5) 財団法人道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料 (1998. 10)