

(110) 士狩大橋の設計と施工

北海道開発局帯広開発建設部帯広道路事務所

渡邊 政義

同 上

本田 秀敏

北海道開発コンサルタント(株) 橋梁部

正会員 ○梅木 宏也

鹿島・オリエタル・ピーエスJV 士狩大橋工事事務所

正会員 山本 徹

1. はじめに

帯広・広尾自動車道は、北海道横断自動車道の帯広市近郊から分岐し、帯広空港を經由しながら太平洋側の重要港湾十勝港を有する帯広町までを結ぶ延長80kmの高規格幹線道路である。

そのうち、士狩大橋は当道路が一級河川十勝川を渡河する地点に計画された橋梁で、橋長610m、最大支間140mを有する大偏心外ケーブル方式(エクストラドーズド)PC5径間連続箱桁橋である。

本橋は近接するIC部の縦断線形の設定にあたり桁高の抑制(用地面積の縮小)が必要であることや、最大支間長140mに対して経済的であること等から本形式が採用された。なお、設計を行うにあたって、施工実績が極めて少ない形式である本橋特有の構造的特性から生じる課題を解決するため、技術検討委員会(委員長:角田 北大教授)を設置し、外ケーブルの疲労試験等の必要な検討を行った。

本報告は士狩大橋技術検討委員会での審議内容のうち外ケーブルの疲労試験・ウェブのせん断力分担比(完成系立体FEM)・終局荷重作用時の曲げ破壊安全度と、上部工の施工状況(H9.7)について報告する。

2. 計画概要

2.1 構造諸元

路線名: 帯広・広尾自動車道 帯広川西道路

道路規格: 第1種第2級B規格

設計荷重: B活荷重

構造形式: 大偏心外ケーブル方式PC5径間連続箱桁橋

橋長: 610.000m

支間: 94.000+3@140.000+94.000m

全幅員: 22.000~29.117m

平面線形: $R = \infty$

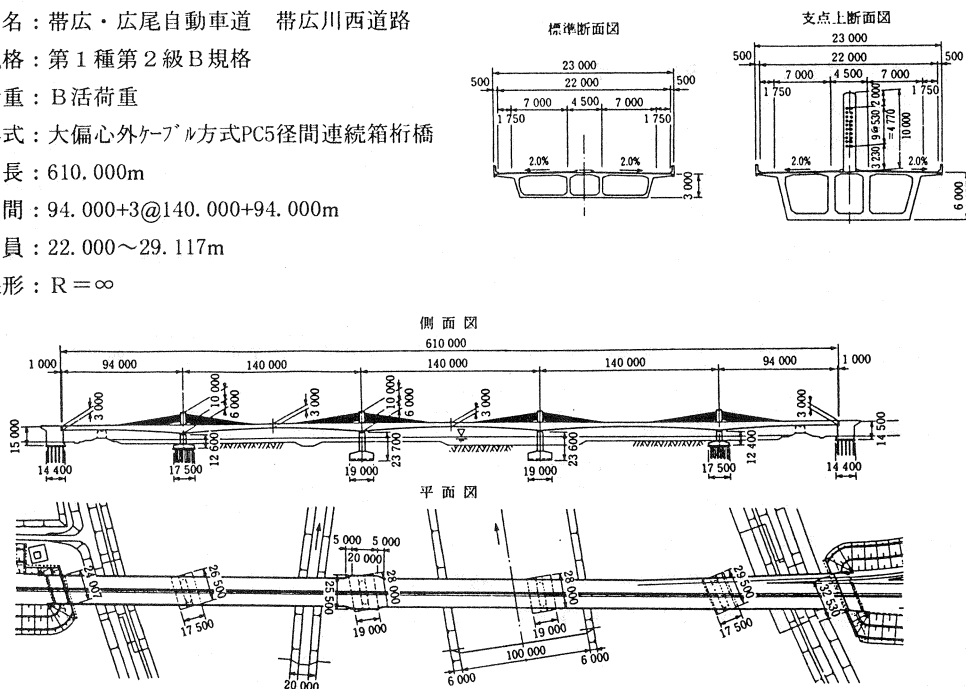
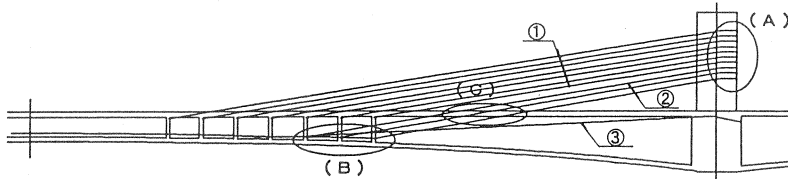


図-1 一般図

2. 2土狩大橋の構造的特徴

本橋は他のエクストラドーズド橋に比べ、以下に示す特徴を有している。

- ①下3段の大偏心外ケーブルは主塔（土狩大橋では以下、偏向塔と称する）間を桁内のデビエーターにより偏向させて偏向塔で定着する形式（以下、大偏心連続外ケーブル）を採用
- ②上7段の大偏心外ケーブル（以下、大偏心定着外ケーブル）は桁と偏向塔で定着させる形式を採用
- ③拡幅によるウェブ数の変化を伴う広幅員の斜角構造かつ1面吊り構造を採用
- ④橋脚高が低いことによる水平力分散を伴った連続桁形式を採用



① 大偏心定着外ケーブル ② 大偏心連続外ケーブル ③ 桁内外ケーブル

図-2 土狩大橋の大偏心外ケーブル配置

大偏心方式の外ケーブルの設計は通常の外ケーブルよりも張力変動が大きく、設計当初において国内唯一の外ケーブル構造の基準となっていた「外ケーブル方式の設計・施工ガイドライン（高速道路調査会）」の適用範囲外であったことや、大偏心連続外ケーブルのデビエーター部でのすべりによる疲労の影響も設計上の重要な項目であった。土狩大橋で用いる外ケーブルの構造特性（設計値）を表-1に示す。

表-1 土狩大橋の外ケーブル特性

	①定着ケーブル	②連続ケーブル		③桁内外ケーブル
	(A)	(B)	(C)	(B)
ケーブル曲げ半径	4.0 m	3.0 m	8.0 m	3.0 m
軸応力変動 (kgf/mm ²)	4.5	1.9		0.5
偏曲部ずれ量	—	5.1 mm		—

3. 技術検討委員会での審議内容（一部）

3. 1 曲げ部の疲労試験

ケーブルの疲労特性には鋼材の応力度と曲げ半径の双方が大きく影響するため、定着部、偏向部に着目した2種類のケーブルの疲労試験を行うことにより、その安全性の確認と許容応力度、曲げ半径の設定を行うこととした。以下に2種類の試験の概要及び载荷条件を示す。ただし、応力振幅は両試験とも5kgf/mm²とし、また、試験2のずれ量はトラック荷重に相当するp1荷重によるずれ量と疲労試験機の能力を考慮して1.4mmとした。

試験 1	偏向塔定着部（R=4.0m）に着目した軸方向引張力の変動により、曲げ部に生じるフレットング*疲労に対する安全性の確認を行う。
試験 2	主桁内偏向部（R=3.0m）に着目したずれの可能性を考慮したフレットング*疲労に対する安全性の確認を行う。

※ フレットング：互いに押しつけられ接している物体が相対的に微小振幅の繰り返し滑り運動を行う現象
安全性を確認する評価方法¹⁾は以下の2点により行った。

- ① 200万回の繰り返し载荷で全素線本数の2%破断（3本）以下であること。
- ② 疲労試験後の静的载荷試験で規格降伏荷重の95%以上の強度を有すること。

表-4に疲労試験結果を示す。試験2では計画したずれ量より小さな値となったが、これは当初正確に予測できなかった摩擦の影響がでたものであるが、上述した評価方法①及び②は満足しているため、詳細設計においてP C鋼材の許容応力度は0.6σ pu、最小曲げ半径は3.0mとした。

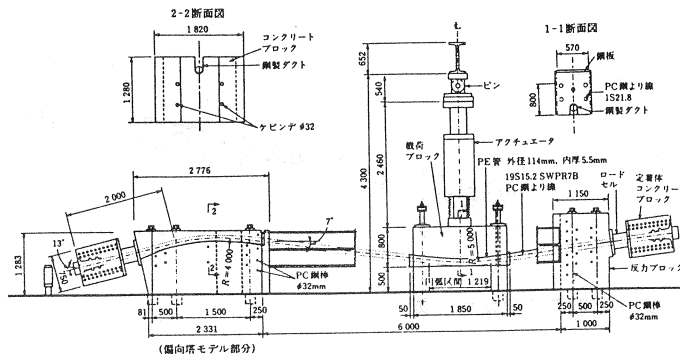


図-3 試験1

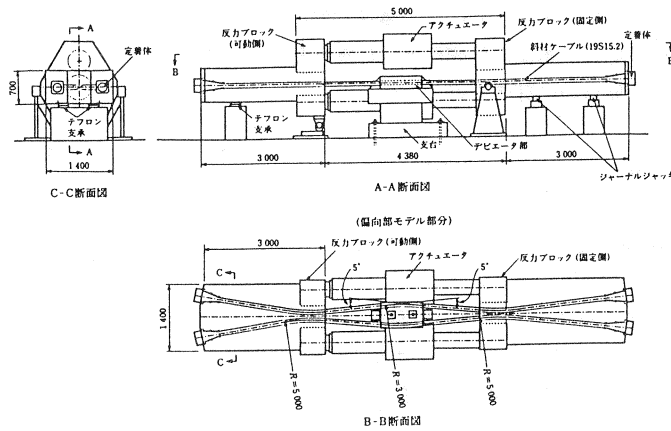


図-4 試験2

表-2 载荷条件

	試験1	試験2
PC鋼材張力	上限値 $\sigma_{pmax}=119 \text{ kgf/mm}^2 (0.63 \sigma_{pu})$ 下限値 $\sigma_{pmin}=114 \text{ kgf/mm}^2 (0.60 \sigma_{pu})$	
曲げ半径	4.0 m	3.0 m
応力振幅	$\Delta\sigma_p=5 \text{ kgf/mm}^2$	$\Delta\sigma_p=5 \text{ kgf/mm}^2$
ずれ量	—	1.4 mm (0.05 mm)*
載荷振動数	0.6 Hz	0.6 Hz
載荷回数	200万回(300万回)*	200万回(300万回)*

(*)の値は実際に行った値

表-3 疲労試験結果

	試験1	試験2
実際のずれ量	—	0.1 mm
破断素線本数	0本	0本
引張試験	降伏荷重の95%以上	降伏荷重の95%以上
安全性の評価	安全	安全

3. 2 完成系立体FEM解析

(1) 検討項目

主桁の設計は梁理論により行うが、本橋の構造的な特徴から3次元の挙動を把握して設計に取り入れる必要があるため、立体FEM解析を行った。委員会で取り上げた検討項目は、大偏心外ケーブル張力による軸力分布・せん断力分担比・主桁の曲げ応力度であった。以下にせん断力分担比の検討結果を示す。

(2) ウェブのせん断力分担比

ウェブのせん断力分担比とは、全せん断力を各ウェブに均等に作用するとしたとき(ウェブ厚さの違いを考慮)のせん断力(A)に対するFEM解析結果による各ウェブのせん断力(B)の比(B/A)である。

死荷重及び活荷重によるせん断力分担比は、梁理論で算出したせん断力に対して以下の割増計数Kを設定した。

標準幅員部： $K_1=1.15$
 拡幅幅員部： $K_2=1.30$

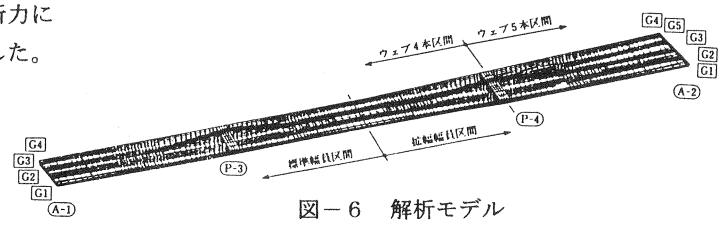


図-6 解析モデル

3.3 終局荷重作用時の曲げ破壊安全度の照査

(1) 検討内容

部材断面の破壊抵抗曲げモーメントの算定にあたって、外ケーブルのように付着のない緊張材は平面保持の仮定ができないため、内ケーブルと同様な取り扱いができない。そのため終局荷重作用時におけるコンクリート部材の安全性を厳密に検討するためには、幾何学的非線形及び材料非線形を考慮した構造系としての終局耐力を算定する必要がある。本橋の詳細設計では線形解析を基本とするが、非線形解析を用いたより厳密な解析との比較により終局耐力の評価を行うものとした。

(2) 解析方法

線形解析による破壊抵抗曲げモーメントの算出方法として、①部材評価法、②換算内力載荷法があるが、両方法の検討を行った結果、各ケースでの差はみられないことから①部材評価法を採用した。

非線形解析方法はファイバーモデルを用いた平面解析を行った。道路橋示方書（以下、道示）に示される3種類の荷重組み合わせに対して表-4の下線部の係数を破壊が生じる（コンクリートの圧縮歪みが 3500μ ）まで逐次増分して非線形解析を行った。着目断面及び活荷重載荷ケースを図-7に示す。

(3) 解析結果

表-5に非線形解析結果を示すが、すべてのケースにおいて破壊時の荷重係数 α は、道示に示される組合せ係数を越えており、道示の終局荷重作用時の曲げ破壊安全度を満たしている。表-6に荷重係数 α の最も小さな組合せ1の主要解析結果を示す。

表-4 荷重組合せ

組合せ No.	荷重の組合せ式	備 考
1	$1.7 (D+L)+1.0 P_{re}$	D: 死荷重
2	$1.0 D+2.5 L+1.0 P_{re}$	L: 活荷重+衝撃
3	$1.3 D+2.5 L+1.0 P_{re}$	P_{re} : プレストレス2次力

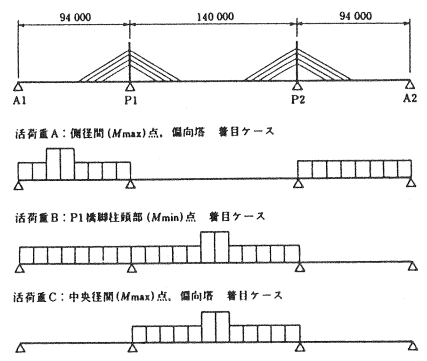


図-7 載荷ケース

表-6 組合せ1 $\alpha (D+L)$ の主要解析結果

ケース	破壊時の荷重係数	破壊断面	破壊断面曲げモーメント	
			終局荷重作用時	破壊荷重作用時
活荷重 A	2.18	側径間 3	16 883	20 312
活荷重 B	2.27	P 1 柱頭部 36	-144 410	-173 530
活荷重 C	2.29	P 1 柱頭部 36	-131 070	-176 520

終局荷重作用時：道示に示される荷重の組合せ載荷時

表-5 非線形解析結果

	組合せ1 $\alpha (D+L)$		組合せ2 $1.0 D+\alpha L$		組合せ3 $1.3 D+\alpha L$	
	α	破壊断面	α	破壊断面	α	破壊断面
活荷重 A	2.18	(3)	2.18	(6)	2.18	(6)
活荷重 B	2.27	(36)	2.27	(67)	2.27	(67)
活荷重 C	2.29	(36)	2.29	(9)	2.29	(67)

以上から、非線形解析を考慮した解析は、線形解析の結果に比べ、曲げ破壊安全度には余裕がある。つまり、曲げ破壊安全度の照査は線形解析がより安全側であるといえる。

4. 施工計画概要

本橋の施工上の主な特徴は以下のとおりである。

①斜角を有する構造

- 下部工：A1, P1(約73°)、P2, P3(約80°)、P4, A2(約67°)、上部工：P1, P2, P3(80°)、P4(75°)の斜角

②拡幅を有する構造

- P3, P4径間中央よりA2方向に拡幅(拡幅巾約7m)を有し、3室箱桁から4室箱桁へと変化するため、移動作業車もそれぞれ縮小対応、拡幅対応のものが必要
- P4系でのアンバランスモーメントが大きくなるため、A2側に仮支柱が必要

③後ひずみ調整型水平反力分散支承の採用

- 大規模積層ゴム支承(2900t)をP1, P2, P3橋脚に4基、P4橋脚に5基配置

④大偏心連続外ケーブルの採用

- 大偏心外ケーブルは大偏心主塔部で曲線管を用いて非常に密に交差定着
- 10段ある斜材のうち下側3段は床版を通過する連続外ケーブルとして使用

このような複雑な構造を有する本橋を施工するに当たっては、合理的な施工技術が不可欠となるため、現在、斜角を有しかつ拡幅縮小対応の移動作業車、偏向主塔部における大偏心外ケーブル定着部のユニット化、大規模支承の後ひずみ調整方法、および大偏心連続外ケーブルの施工方法等に関し検討を実施中である。また、技術検討委員会での審議事項を踏まえ、設計施工の妥当性を確認するための計測、地震観測や振動実験を計画している。なお、これらの詳細に関しては別の機会に報告する。

本橋の主要工事数量を表-7に、全体工程を図-8に示す。

表-7 主要工事数量

工種	仕様	単位	数量	備考
コンクリート	$\sigma_{ck} = 40\text{N/mm}^2$	m ³	16,000	早強
型枠		m ²	47,000	
鉄筋	SD295A	t	2,100	
PCケーブル	19S15.2B	t	420	外ケーブル
〃	12S12.7B	t	470	内ケーブル、横桁横縮ケーブル
〃	12W8	t	120	床版横縮ケーブル
〃	1B32B2	t	100	せん断鋼棒 他

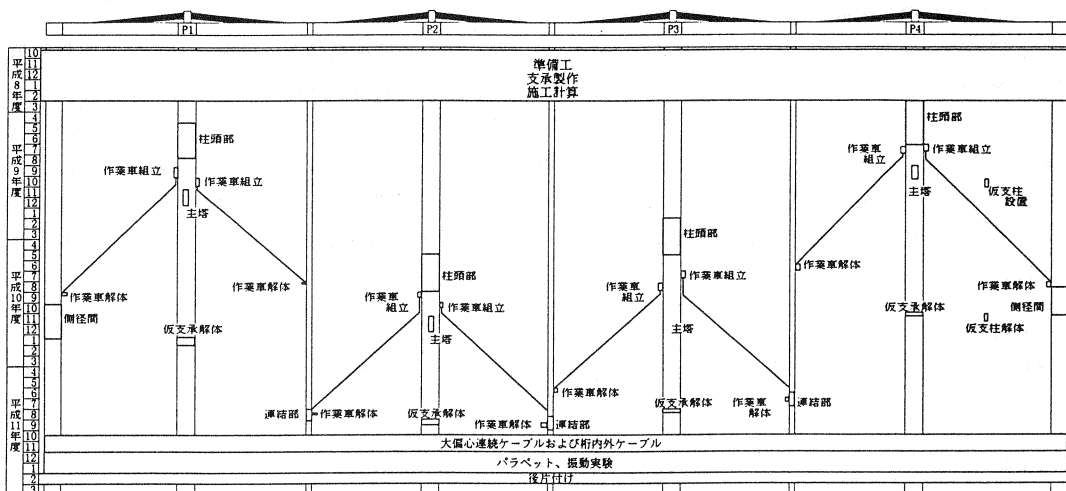


図-8 全体工程表

5. 施工状況

ここでは、P4系で既に完了している支承と柱頭部の施工状況について報告する。

5.1 支承工

P4系には全反力2,900tf、重量18tfの積層ゴム支承が5基、設計水平力800tf、重量4tfの鋼角ストッパーが4基配置されている。支承は、将来の後ひずみ調整を考慮してベースプレート側アンカーバー中心と下沓中心が設計後ひずみ調整量分だけずらして組み立てられており、設置に関しては方向性を十分確認の上、形鋼を用いて架台を作成して配置精度を確保した。無収縮モルタル打設に際しては、施工時期が冬期であったことから事前にアンカーバーとストッパー用箱抜部の余熱を十分に行い、打設後も給熱養生するとともに熱伝対による温度計測を実施し、養生の妥当性を確認した。さらに打設方法としては、支承ベースプレートが2,780mm×2,460mmと非常に大きいため、シュートから配管によりアンカーバー箱抜を一つずつ充填することにより無収縮モルタルの充填性を確保した。

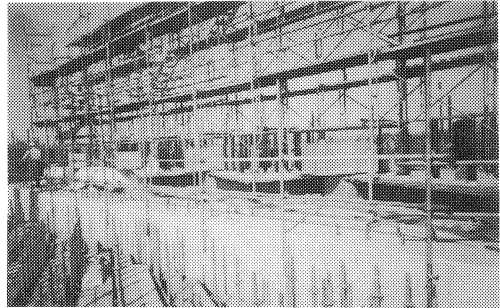


写真-1 P4支承配置状況

5.2 柱頭部工

柱頭部は長さ12m、桁高6m、コンクリート体積が約900m³で、これを桁内外ケーブルの定着突起部に境に2層に分けてコンクリートを打設する計画とした。

第一層目は、底版より4.5mの範囲であり、仮沓コンクリート打設後、底版型枠、側面型枠、棲型枠を組み立てた。特に側面型枠に関しては、柱頭部が斜角を有する拡幅区間であることから相対する型枠を通してセパレータを設置すると型枠とセパレータが直角とならないため、鉄筋架台の形鋼や張出床版部の支保工を利用して型枠を保持した。その後、鉄筋、横桁横締ケーブル、せん断鋼棒を配置し、コンクリートを打設した。

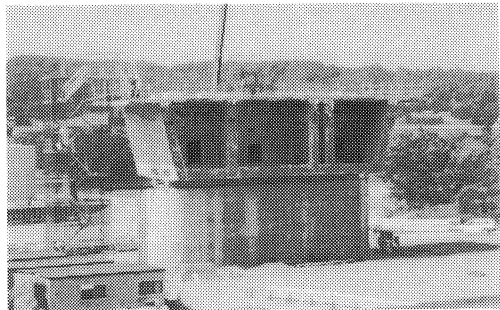


写真-2 P4柱頭部施工状況

なお、柱頭部はマスコンクリートとなることから、硬化熱に伴う内部拘束状況の把握を目的に非定常熱伝導解析を事前に実施し、養生条件の設定を行うとともに、熱伝対と有効応力計を用いて、解析結果の妥当性を確認した。

第二層目には主ケーブル、桁内外ケーブル、横桁横締ケーブル並びに床版横締ケーブルが設置された。鉄筋やこれらのPC鋼材の配置に当たっては、橋脚に平行な横桁と上部工の斜角が異なることから作業が煩雑となることが予想されたため、横桁内の床版横締ケーブルの配置形状を横桁と平行にするなどの工夫により施工性の向上を図った。

6. おわりに

なお本橋の設計・施工に当たり「土狩大橋技術検討委員会」の委員各位ならびに関係者の皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Post-Tensioning Institute Committee on Cable-Stayed Bridges: Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation, August, 1993