

論文・報告

高強度 PC 鋼材を用いた合理化設計

～東海北陸自動車道 恵里美橋の設計～

Rationalized Bridge Design Using High-Strength PC Tendon

田村 和弘 *1
Kazuhiro TAMURA

鈴木 聡 *2
Satoshi SUZUKI

尾畑 暢一 *3
Nobukazu OBATA

新開 大輔*4
Daisuke SHINKAI

三野 剛志 *5
Takashi SANNO

切立橋他 1 橋（PC 上部工）工事は、東海北陸自動車道の 4 車線化工事（白鳥 IC～飛騨清見 IC）として、下り線側となるⅡ期線の橋梁を構築するものである。架設位置が高鷲 IC 付近で有数の豪雪地域ということもあり、降雪時期を想定しながらの工程調整が必要とされた。本橋では、架設ケーブルに高強度 PC 鋼材を採用することで、床版断面を縮小するとともに張出しブロック数を減じて大幅な工程短縮を実現する合理化設計を行った。本稿では、これらの検討事項に関する詳細について報告するものである。

キーワード：ブロック割、大型移動作業車、床版断面、高強度 PC 鋼材、定着ブロック試験

1. はじめに

切立橋他 1 橋（PC 上部工）工事は、東海北陸自動車道の 4 車線化工事（白鳥 IC～飛騨清見 IC）として、下り線側となるⅡ期線の橋梁を構築するものである。本工事は切立橋と恵里美橋 2 橋からなり、そのうちの恵里美橋（以下、本橋）は、橋長 170.5 m、最大支間 86.8 m の PRC2 径間連続ラーメン波形鋼板ウェブ箱桁橋である。本橋の最大張出し長は 77.2 m と波形鋼板ウェブ橋の中でも最大級である。図 1 に橋梁位置図、写真 1 に張出し施工中の写真を示す。

2. 橋梁概要

路線名：高速自動車国道 東海北陸自動車道
橋名：恵里美橋
工事箇所：岐阜県郡上市
橋梁形式：PRC2 径間連続波形鋼板ウェブ箱桁橋
橋長：170.500 m
支間長：86.800 m + 81.300 m
有効幅員：9.225 m（視距拡幅 0.600 m）
縦断勾配：3.000 %
平面線形：A=300 m ～ R=700 m
横断勾配：-0.825 % ～ 6.000 %
活荷重：B 活荷重
雪荷重：積雪深 1.69 m（1.0 kN/m³）

図 2 に橋梁一般図を、図 3 に断面図を示す。



図 1 橋梁位置図



写真 1 張出し施工中の状況

*1 川田建設(株)東日本統括支店北陸支店技術課 課長

*2 川田建設(株)技術部技術開発課 係長

*3 川田建設(株)東日本統括支店北陸支店事業推進部工事課 次長

*4 川田建設(株)東日本統括支店北陸支店事業推進部工事課 工事長

*5 川田建設(株)東日本統括支店北陸支店事業推進部工事課

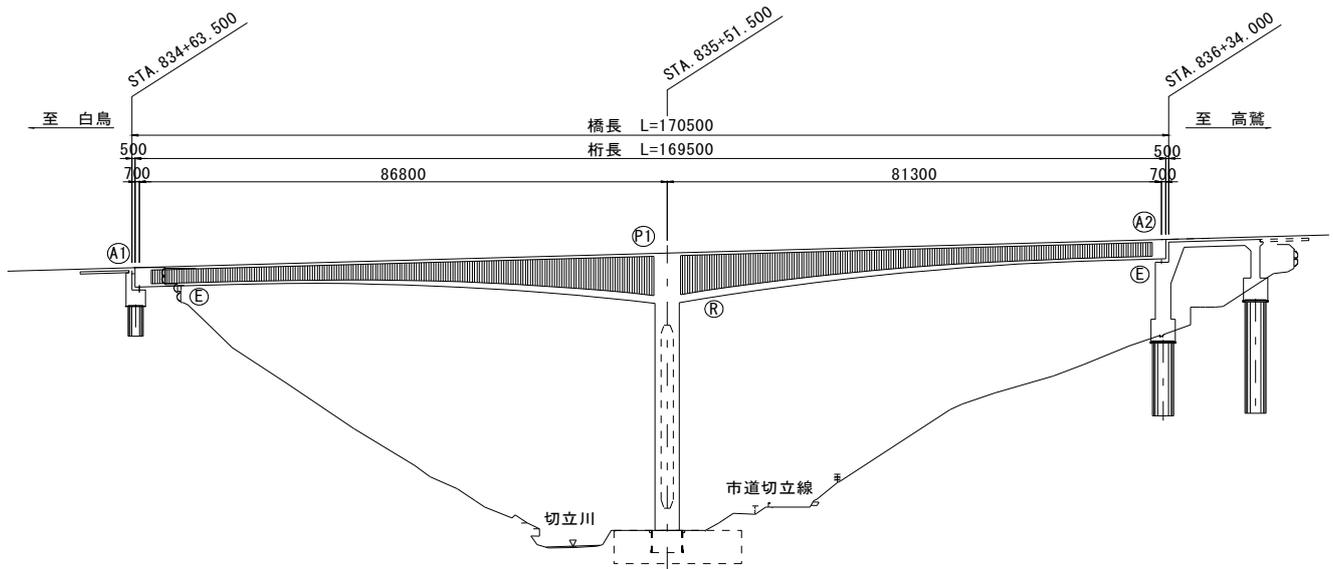


図 2 構造一般図

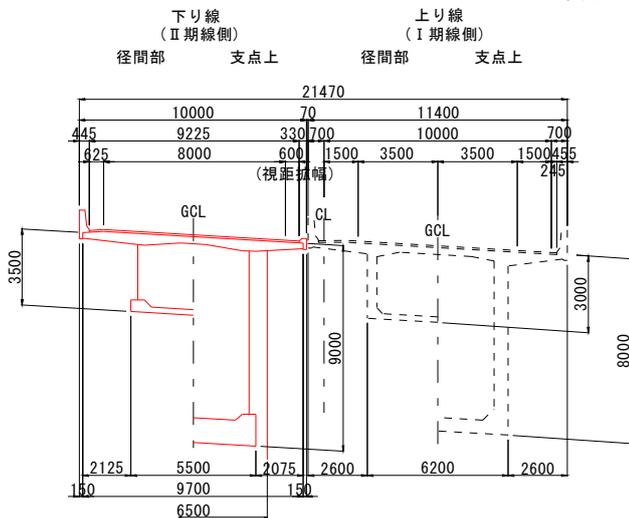


図 3 断面図

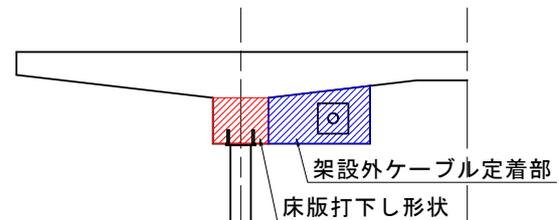


図 4 基本設計時床版形状

3. 高強度 PC 鋼材の検討

(1) 概要

本橋の最大張出し長は 77.2 m と波形鋼板ウェブ橋の中でも最大級であるが、幅員が 10 m 程度と狭いために、基本設計において張出し施工時に必要となる架設ケーブル (JIS 規格品の普通 PC 鋼材 12S15.2B) が床版内に配置しきれず、内ケーブルに加えて架設用の外ケーブル (19S15.2) 8 本が配置されていた。架設用の外ケーブルを定着するため、上床版には外ケーブルの定着部が配置され、外ケーブルの定着部を上床版とウェブにより 2 面で拘束されるように、上床版を打ち下す形状としていた(図 4)。

この打下し部と外ケーブルの定着部を無くすことが出来れば、施工性が向上し、工程短縮につながると考え、高強度 PC 鋼材を使用することにより、架設ケーブルが全て床版内に配置できないか検討した。

(2) 高強度 PC 鋼材使用時の PC 鋼材配置確認

ブロック割の検討に先立って、床版内に配置できる架設ケーブルの本数を検討した。床版内に配置できる本数を検討する上で、2 段配置とする案も考えられたが、下段に配置された PC 鋼材について、PC グラウトの充填確認が行えないことから 1 段配置とした。床版内に配置できる架設ケーブルは、PC 鋼材、鉄筋、排水桝等の取り合いを考慮し、張出し施工時の架設ケーブルの最大配置可能本数(図 5)を 40 本とし架設検討を行った。

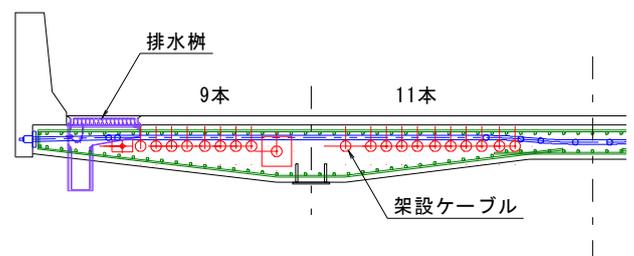


図 5 架設ケーブルの最大配置可能本数

架設ケーブルの検討に用いた高強度 PC 鋼材は、普通 PC 鋼材と径の等しい 15.2 mm (12S15.2H) と径の

太い 15.7 mm (12S15.7H) の 2 種類にて比較検討した。使用した高強度 PC 鋼材は、JIS 規格品の普通 PC 鋼材に比べ、初期導入時の許容応力度が約 2 割程度大きくなり¹⁾、初期導入力を 12S15.2H で約 2 割、断面積が 1 割程度増加する 12S15.7H で約 3 割程度大きくできる。高強度 PC 鋼材の許容値を表 1 に示す。

表 1 高強度 PC 鋼材の諸元

	JIS規格品	高強度PC鋼材	
		①12S15.2B	②12S15.2H
引張強度 (N/mm ²)	1850	2250	2250
降伏点応力度 (N/mm ²)	1600	1900	1900
プレストレッシング中 (N/mm ²)	1440	1710	1710
プレストレッシング直後 (N/mm ²)	1295	1575	1575
設計荷重時 (N/mm ²)	1295	1575	1575
鋼材断面積 (mm ²)	138.7	138.7	150.0
初期導入力の仮定値※ (N/mm ²)	1339	1590	1590
初期導入力の仮定値 (kN)	185	220	238
JIS規格品に対する割合	1.00	1.19	1.29

※初期導入力の仮定値は、低減率7% (ジャッキロス3%+余裕量4%) を考慮した。

概略検討の結果、高強度 PC 鋼材を使用した場合に、架設ケーブルを最大本数の 40 本以内に行うことができた。

ただし、PC 鋼材 40 本は張出しブロック数で決まる本数(柱頭部を含め 20 ブロックに 1 ブロックあたり 2 本定着すると 40 本)であったため、架設時の発生応力に余裕があり、ブロック数の変更と合わせて、必要鋼材本数の詳細検討を行った。

4. ブロック割の変更

(1) 概要

基本設計のブロック長は、実績の多い波形鋼板の 1 波長 1.6m より、その倍数の 4.8 m, 4.0 m, 3.2 m, 2.4 m とし、標準型移動作業車の最大能力 (2450 kN・m) を満足するようにブロック割が決定され、ブロック数が 19 ブロックと決定していた (図 7)。

詳細設計では、ブロック長は基本設計と同様に 4.8m, 4.0 m, 3.2 m, 2.4 m としたが、移動作業車を大型移動作業車 3 920 kN・m(写真 2)に変更しブロック割を再検討した。



写真 2 大型移動作業車

(2) 変更効果

ブロック割を再検討した結果、基本設計で移動作業車の能力で決定していたブロック長 2.4 m および 3.2 m であったところを詳細設計で 4.0 m および 4.8 m にすることができた。その結果、ブロック数が 19 ブロックから 15 ブロックに削減できた (図 7)。施工ブロック数の削減により、工程は、13 日/ブロック×4 ブロック=52 日と 2 カ月程短縮することが可能となった。

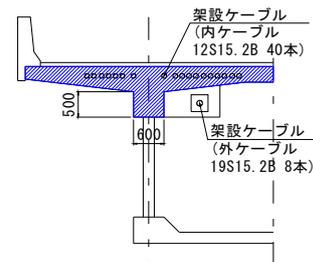
また、張出し時に必要な架設ケーブルは高強度 PC 鋼材 12S15.7H で 38 本とすることができ、外ケーブルが不要となったため、床版形状を変更した (図 6)。

さらに、高強度 PC 鋼材 12S15.7H を使用した場合には、上床版の打下しを無くすることができたため、床版荷重を削減でき、波形鋼板高も高くできた。その結果として、板厚を薄くでき、鋼重を減らす効果もあった。

なお、高強度 PC 鋼材 12S15.2H は、必要ケーブル本数が 42 本となり、床版内に配置しきれないため、外ケーブルを配置する必要が生じた。

以上の結果を受けて経済比較を行ったところ、移動作業車の損料は大型化することにより増えるが、コンクリートや PC 鋼材、波形鋼板ウェブの数量を削減することができた。また、移動作業車の大型化により、工程を短縮できる分、タワークレーンやエレベータといった機材損料を削減できた。経済比較の結果、高強度 PC 鋼材 12S15.7H を使用した方が経済的に有利となったため、高強度 PC 鋼材 12S15.7H を採用した。

基本設計



床版断面の縮小と鋼板断面の拡大

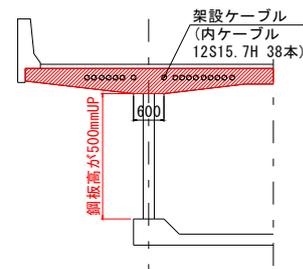
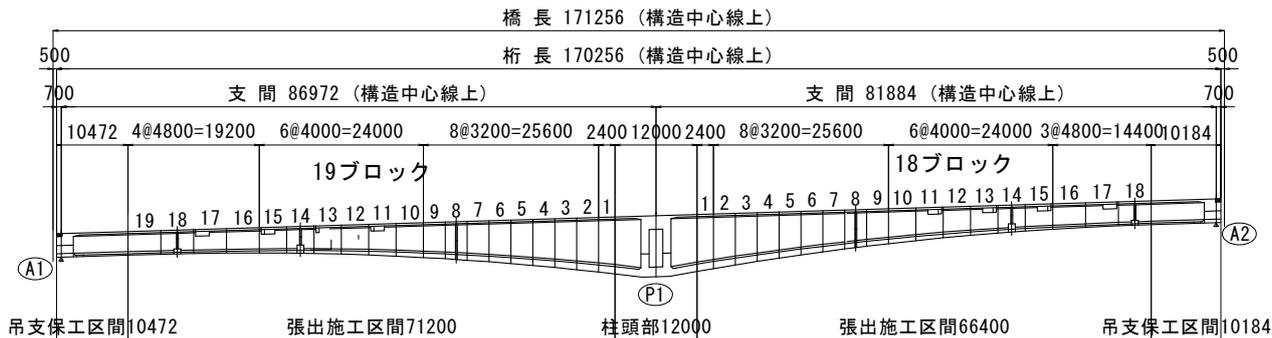


図 6 床版断面の変遷

基本設計



ブロック数変更

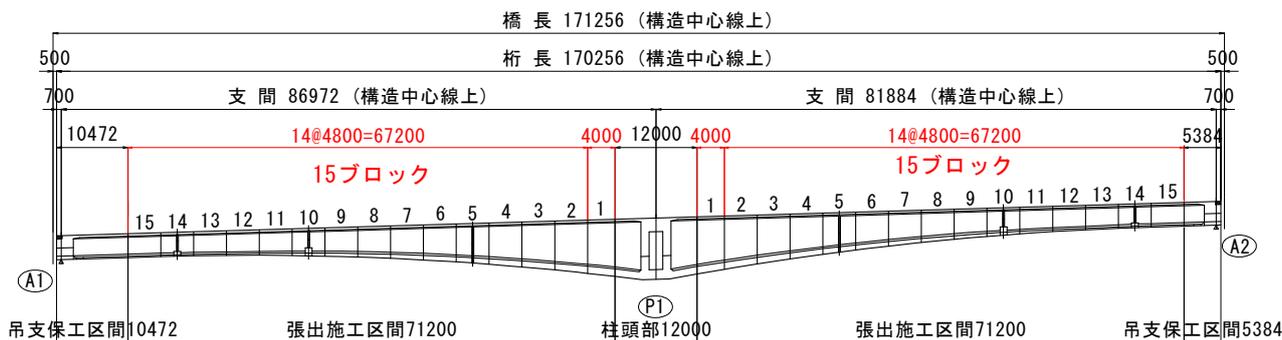


図7 ブロック割の変遷

5. 高強度 PC 鋼材確認試験

(1) 概要

定着具は FKK フレシナー工法の定着具 12V15H を採用した。高強度 PC 鋼材の実績が少なく、同定着具が実橋での初採用となるため、定着具メーカーでの定着ブロック試験とは別に、実橋の部材寸法や配筋を考慮した定着ブロック試験を実施することとした。

本橋の定着具周辺は波形鋼板との接合部であることもあり、床版鉄筋や孔あき鋼板ジベルの貫通鉄筋、定着部補強筋が配置されるため、鉄筋が密集するような状況であった。そのため、コンクリートの充てん性や施工性に配慮し、配置鉄筋を見直した (図 8)。

(2) 事前解析の実施

定着ブロック試験を実施するにあたり、実橋の定着部付近の FEM 解析と定着ブロック試験の FEM 解析を実施し、実橋の FEM 解析結果と応力分布が概ね等しく、ブロック試験の結果が安全側になるように試験体の寸法を決定した。なお、試験体の長さは、JSCE-E503²⁾に示される緊張材の長さ 3 m を最低寸法として、FEM 解析より決定している。定着ブロック試験の試験体を図 9 に示す。

定着ブロック試験の配置鉄筋は、FEM 解析結果より、鉄筋応力とひび割れ幅を計算し、鉄筋応力 120 N/mm² 以下かつひび割れ幅が 0.10 mm 以下となるよ

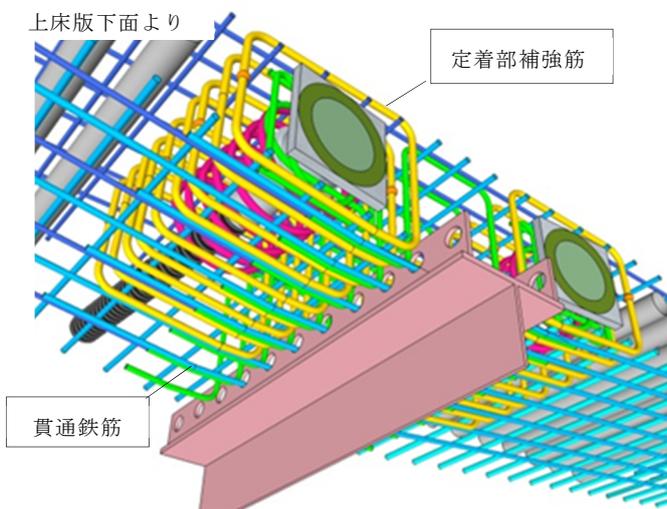


図8 床版配筋イメージ図

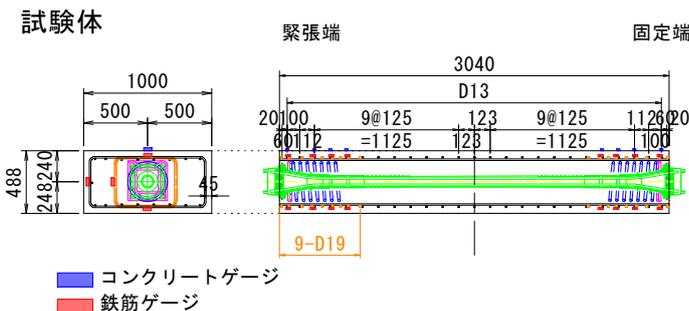


図9 定着ブロック試験体

うに決定した。なお、鉄筋応力は鉄筋周辺に発生する引張力をすべて鉄筋が負担するものとして算出し、ひび割れ幅はコンクリート標準示方書の曲げひび割れ幅の式³⁾に鉄筋応力を代入し算出した。鉄筋応力およびひび割れ幅の算出結果を図 10 に示す。

(3) PC 鋼材確認試験

定着ブロック試験結果を表 2 に示す。定着ブロック試験の最大荷重および判定基準は、JSCE-E503 および建築学会の規準⁴⁾を参考に表 2 に示すように決定した。また、試験体に発生する引張応力を確認するため、試験体にひずみゲージを貼りつけた(図 9)。

載荷荷重はジャッキマノメータ示度にて管理し、50 MPa までは 5.0 MPa 刻みで、以降は 52.9 MPa (プレストレス導入直後許容値)、57.9 MPa (プレストレッシング

中許容値)、最終荷重 60.1 MPa まで加圧し、最終荷重を 5 分以上保持した。試験の結果、最終荷重 60.1 MPa まで加圧しても、ひび割れ幅は 0.03~0.04 mm 程度であり、基準を満足する結果であった。次に、ひずみ計測結果を図 11 に示す。図には、ひび割れの発生が認められた上面の鉄筋ひずみを示す。試験体に発生するひずみは位置 2 と位置 3 で最大となり、ひび割れ発生前までは FEM 解析結果と概ね等しくなった。また、ひび割れ発生後の鉄筋ひずみより鉄筋応力を算出すると、40~60 N/mm² 程度であり、鉄筋の許容値 120 N/mm² 以下であることを確認した。

以上の結果より、コンクリートの充てん性や施工性を考慮した配筋方法を採用した。

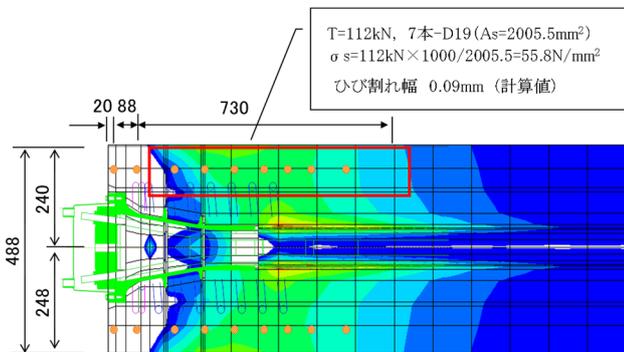


図 10 定着ブロック試験の FEM 解析結果

表 2 定着ブロック試験結果

マノメータ示度	載荷荷重		ひび割れ幅(mm)	
	緊張端	固定端	緊張端	固定端
1 0.0MPa	0kN		-	-
2 5.0MPa	266kN		-	-
3 10.0MPa	532kN		-	-
4 20.0MPa	1064kN		-	-
5 30.0MPa	1596kN		-	-
6 40.0MPa	2128kN		-	-
7 50.0MPa	2660kN		0.03未満	0.03未満
8 52.9MPa	2814kN	0.7Pu	プレストレス導入直後	0.03未満 0.03未満
9 57.9MPa	3078kN	0.90Py	プレストレッシング中許容値	0.03 0.03
10 60.1MPa	3198kN	1.1×0.85Py 5分間保持	最終荷重	0.03 0.04

判定基準: 1.1×0.85Pyに相当する荷重を5分間保持し、ひび割れ幅0.10mmを超えるひび割れが生じないこと、ひび割れが生じた場合、5分間保持しひび割れが進展しないことを確認する。

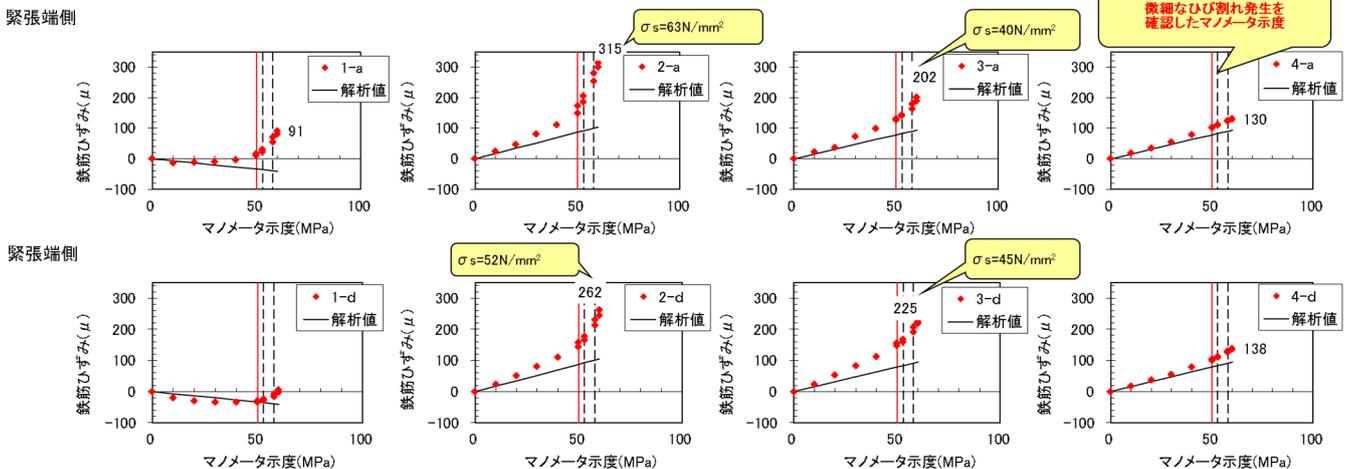
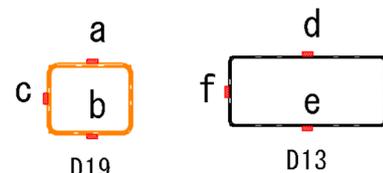
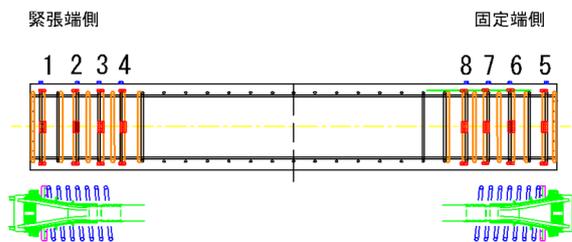


図 11 試験体の鉄筋ひずみ

引張力算出方法		シャイベの図表による解法	Guyonの数表による解法	FEM解析結果の反映
引張力 (kN)	隔壁部	3237 (1.00)	3192	2266 (0.70)
	下床版部	2277 (1.00)	1703	2277 (1.00)
補強要領図		側面図	側面図	側面図

図 12 柱頭部横桁の算出方法による補強鋼材量比較

6. その他

一般的に、ラーメン橋の柱頭部横桁の設計は、『コンクリート道路橋設計便覧』の考え方に従い、せん断力および軸力差により生じる引張力を簡易式により算出し、せん断力で隔壁部、軸力差で下床版部の鉄筋あるいは PC 鋼材の配置を決定する。簡易式には、シャイベの図表による解法⁵⁾や Guyon の数表による解法⁶⁾が用いられる。本橋の柱頭部横桁では、2つの簡易法にて、補強筋や PC 鋼材配置を算出したところ、どちらの簡易法でも過密配置となった。

設計の合理化および現場施工の省力化の観点より、3次元 FEM 解析を行い補強筋や PC 鋼材の配置を見直すこととした。なお、FEM 解析に用いた荷重は、『コンクリート道路橋設計便覧』の考え方に準拠した。

また、他橋の設計でも利用できるように、FEM 解析結果より、簡易法による解法の低減係数を算出した。

FEM 解析と簡易法の検討結果を図 12 に示す。せん断力に対する検討では、FEM 解析の引張力は、2つの簡易式の 7 割程度となり、軸力差に対する検討結果では、FEM 解析の引張力とシャイベの図表による解法の引張力が、概ね等しくなった。

したがって、柱頭部の設計に用いる簡易式としてはシャイベの図表による解法を用いることとし、せん断力による引張力はシャイベの図表による解法より算出した引張力の 7 割、軸力差による引張力はシャイベの図表による解法から算出した引張力から補強鋼材量を算出することとした。

7. おわりに

以上、本橋の詳細設計時に実施した事項について述べた。

本橋は、張出し施工中にひび割れは発生しておらず、2016 年 12 月に張出し施工完了した。張出しブロック数を減らしたことにより、2016 年の冬期閉鎖になる前に閉

合作業ができ、橋体工は無事完了した。2017 年の 7 月に、舗装工事に引き渡した(写真 3)。同工事の切立橋も含め、2017 年の降雪前に橋面工、付帯工、全工程を完成することを目標に施工中である。

本稿が、類似構造の参考となれば幸いである。



写真 3 2017 年 7 月現在 恵里美橋

参考文献

- 1)プレストレストコンクリート技術協会：高強度 PC 鋼材を用いた PC 構造物の設計施工指針 平成 23 年 6 月、2011.
- 2) 土木学会：PC 工法の定着具および接続具の性能試験方法 (JSCE-E503-1999), 1999.
- 3) 土木学会：2012 制定コンクリート標準示方書 設計編, pp.223-224, 2012.
- 4) 建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規程 同解説, pp.429-434, 1998.
- 5) F・レオンハルト, E・メニッヒ：レオンハルトのコンクリート講座 2 続鉄筋コンクリートの設計, 横道英雄 監訳, 鹿島出版会, pp.21, 1983.
- 6) 猪股俊二：プレストレストコンクリートの設計および施工, 土木学会監修, 技報堂, pp.261, pp.272, 1957.