

ストラットに支持された張出床版を有する PC 箱げた橋の設計

- 新間谷川橋 -

東京土木支店	PC 事業部	井筒浩二
東京土木支店	PC 事業部	若松賢司
東京土木支店	PC 事業部	黒田友紀
東京土木支店	PC 事業部	今津正裕

概要:新間谷川橋は、安倍川水系の新間谷川(二級河川)が流れる急峻な山岳部を横断する橋長 231m の PC3 径間連続ラーメン箱げた橋である。構造的には、張り出し床版をストラットで支持することで、従来は 2 室箱げたで計画されるような広幅員断面に 1 室箱げたの採用が可能になった。海外では既に 18 橋の施工実績があるが、国内では完成 1 橋、現在施工中が 3 橋、設計中が本橋含めて 3 橋である。

Key Words: 広幅員, ストラット, 突起, エッジビーム

1. はじめに

第二東名高速道路では、静岡県内で本線約 147km、および現東名と接続のため 2 カ所の連絡路約 17km の建設が進められている。この区間は山岳地が多く、100m を超える支間を有する橋梁は本線で 21 橋あり、高さ 50m を超える橋脚も 18 橋で計画されている。また、標準部の有効幅員は 16.5m の広幅員が採用されている。このような広幅員の山岳橋梁においては、特に死荷重の軽減ならびに基礎構造・下部構造の縮小化が要求されており、海外では既に施工実績のあるストラット構造が採用となった。この構造の特徴は、

上部工の軽量化

従来の 2 室箱桁を 1 室箱桁にできるため、主げた断面積が小さくなり、死荷重が軽減される。

橋脚・基礎の縮小化

張り出し床版長が大きくなり下床版幅を小さくできるため、橋脚の直角方向幅も小さくなり、基礎構造もコンパクトになる。また、地山掘削量も小さくなるため自然にもやさしい。

コスト縮減

全体工費の 15% 程度(上部工で約 10%、下部・基礎工で約 25%)の縮減が可能。



図-1 新間谷川橋(下り線) 完成予想図

2. 橋梁概要

- ・工 事 名: 第二東名高速道路 新間谷川橋(PC 上部工)下り線工事
- ・施 主: 日本道路公団静岡建設局
- ・工事場所: 静岡県静岡市新間
- ・工 期: 平成 15 年 3 月 25 日 ~ 平成 17 年 11 月 9 日
- ・形 式: PC3 径間連続ラーメン箱桁
- ・支 間 割: 61.5m + 106.6m + 61.5m

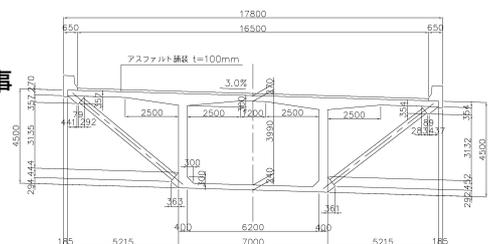


図-2 標準部断面図



井筒浩二



若松賢司



黒田友紀



今津正裕

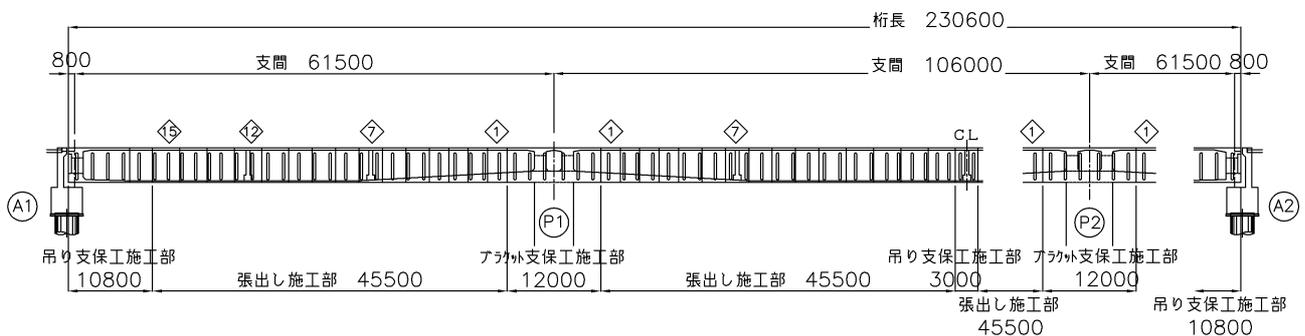
3. 主方向の設計

基本設計では、主桁コア断面を張出し架設により完成した後に張出床版の場所打ち施工で計画されていた。詳細設計・施工にあたり、工期の短縮、コスト削減を目指し、大型移動作業車を用いた全断面一括の張り出し施工に変更となったため、構造寸法、ケーブル種別ならびに配置の再検討を行った。

(1) 構造寸法の決定

基本設計では全長に渡って等桁高 4.5m であったのが、全断面一括の張り出し架設となり架設時断面力が増加したことから柱頭部桁高を 6.0m に変更した。柱頭部における架設時断面力の増加は約 20% で、桁高 4.5m ではコンクリートの圧縮応力度が許容値を満足しない。したがって、下図に示すように張出し施工 3 ブロックまでの区間で標準桁高 4.5m から柱頭部桁高 6.0m に擦り付ける形状に変更した。

《 基本設計 側面形状図 》



《 詳細設計 側面形状図 》

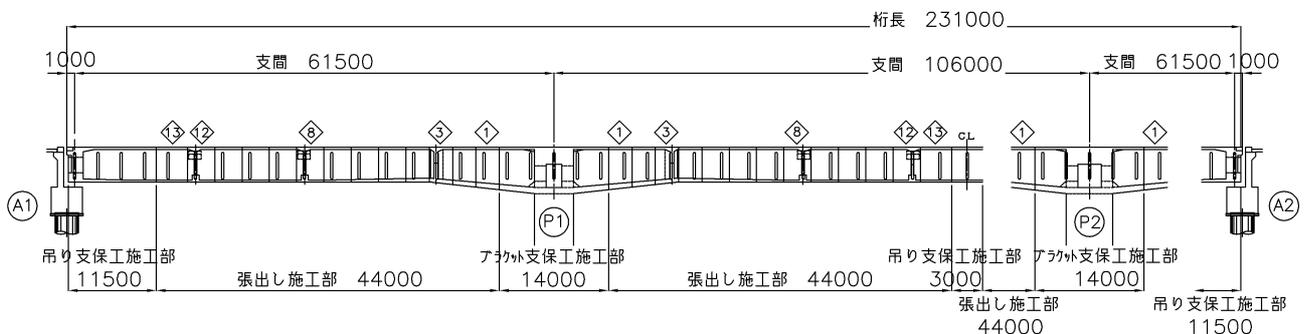


図-3 基本設計と詳細設計の側面形状図

張出し施工ブロック数は、移動作業車耐力およびストラットの配置を考慮して決定した。ストラットの橋軸方向間隔は張出し床版長や床版厚ならびに床版支持方式等の形状寸法によるもの、および架設工法によって異なることが考えられる。本橋は張出架設で計画されており、基本的に張出ブロックに 1 箇所配置している。

(2) ケーブル配置の検討

前述したように、本橋は内外併用のケーブル配置であるが採用にあたっては「全外ケーブル」、「内外併用」の場合の配置検討を行っている。全外ケーブルとした場合、桁内空間が狭いストラット付き箱桁橋では配置上の制約を受ける。また、全外ケーブルの張出し施工では各ブロックに定着突起とフェイルセーフ鋼材の配置が不可避であり、検討の結果、施工性、経済性等の面から「内外併用」の組合せが採用された。

以下に、本橋における特徴的なケーブル配置条件と最終的に決定したケーブル配置図を示す。

- 1) 架設ケーブルは内ケーブルを主体とし、架設外ケーブルは極力少なくする。
- 2) 架設外ケーブルの定着は連続ケーブルの偏向突起、隔壁のあるブロックとする。

- 3) 架設時内ケーブル(グラウトタイプ)は上床版内に並列配置とし、鉛直方向に多段配置しない。
- 4) 架設内外ケーブルは、できる限り鉛直方向の角変化の無い配置とする。
- 5) 外ケーブルは透明シーソを用いたグラウト方式とする。

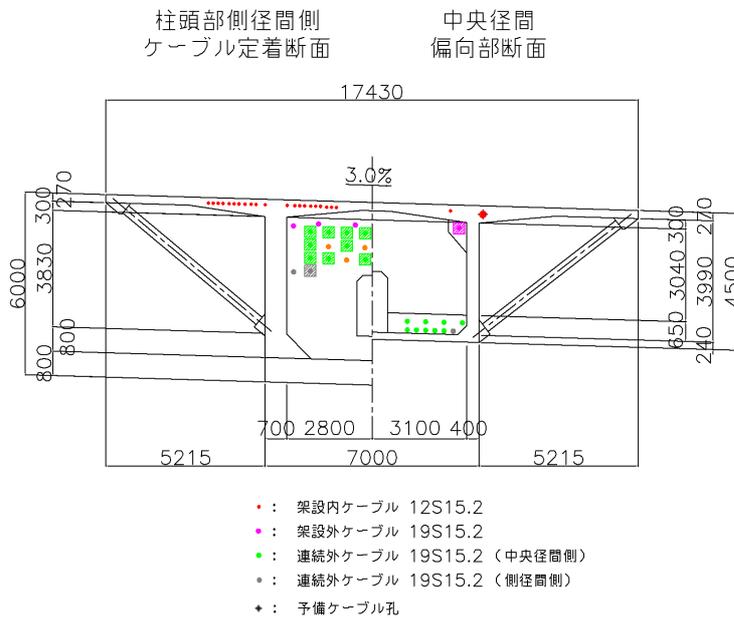


図-4 鋼材配置断面図

1)および 2)に関しては、突起定着を伴う張出しブロックの施工サイクル、経済性等を考慮したものである。

3)の上床版内に1段で並列配置する内ケーブルは、グラウトの充填性を考慮して直線配置とし、非破壊検査の容易さのため、ウェブ直上への配置を避けている。万が一、空隙が発生した場合でも最注入が容易な配置となっている。同時にケーブル図心が高くなることから、架設時断面力に対して有効に働くこととなる。また、ウェブ内にケーブルを配置しないことからウェブ厚の減少を図ることができる。

4)に関しては、グラウトの先流れによる空隙が起きにくい配置であり、5)の透明シーソの使用は点検が容易となる。

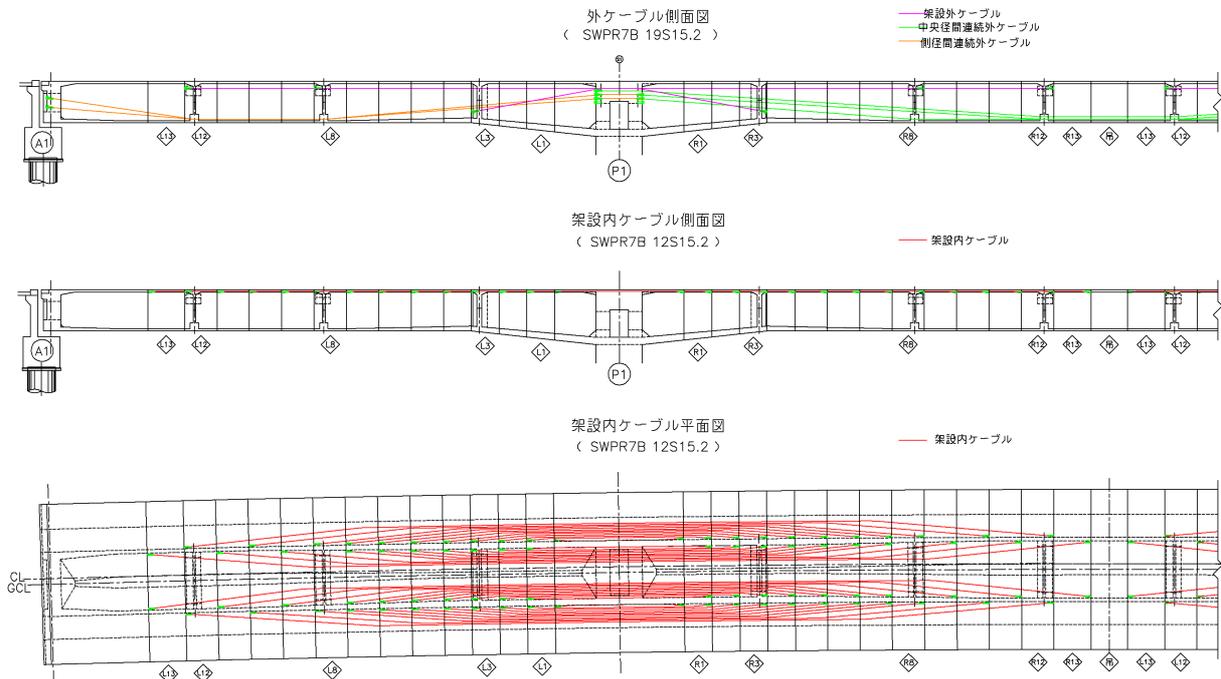


図-5 鋼材配置図

以上のように、本橋は桁内空間の狭いストラット付き箱桁の張出し架設工法という条件のもとで、工期短縮、コスト縮減、施工の確実性と維持管理の総合的な判断から最適と考えられるケーブル配置を決定した。

4. ストラットの仕様

(1) ストラットの材料, 形状選定

ストラットは、鋼製とコンクリート製の実績がある。本橋では、構造特性、耐久性、経済性および施工性を考慮してコンクリート製ストラットを採用した。特に、ストラット部は重要部材であるにもかかわらず維持管理が困難な部位であるため、耐久性に十分配慮する必要がある。将来のコンクリートの劣化および剥落防止のために、FRP製の外套管を用い、製作時の型枠も兼用した。断面形状は円形とし、コンクリートの応力照査による必要断面、鉛直打設時の充填性、管の経済性、景観等を考慮して内径 300mm の FRP 外套管を使用する断面に決定した。

(2) ストラットの設計および接合方法

ストラットの設計に用いる設計断面力は FEM 解析により算定した。設計断面力算定に用いる活荷重は T 荷重とした。ストラット部材は軸圧縮力の卓越する部材であり、RC 部材として曲げモーメントおよびせん断に対して必要鉄筋量を検討した。疲労耐久性については、他橋梁で輪荷重走行試験を行い、その安全性が確認されている。

構造上重要な部位であるストラットと上床版および主げたとの接合部の接合方法は、図-6 に示すような差し筋による接合とした。また、ストラット接合部付近にはストラットの影響によって生じる局部的応力に対して十分抵抗できる鉄筋を配置した。さらに、雨水がストラットに沿って下端接合部へ浸入することを防ぐため、ストラットには水切りリングを設けている。

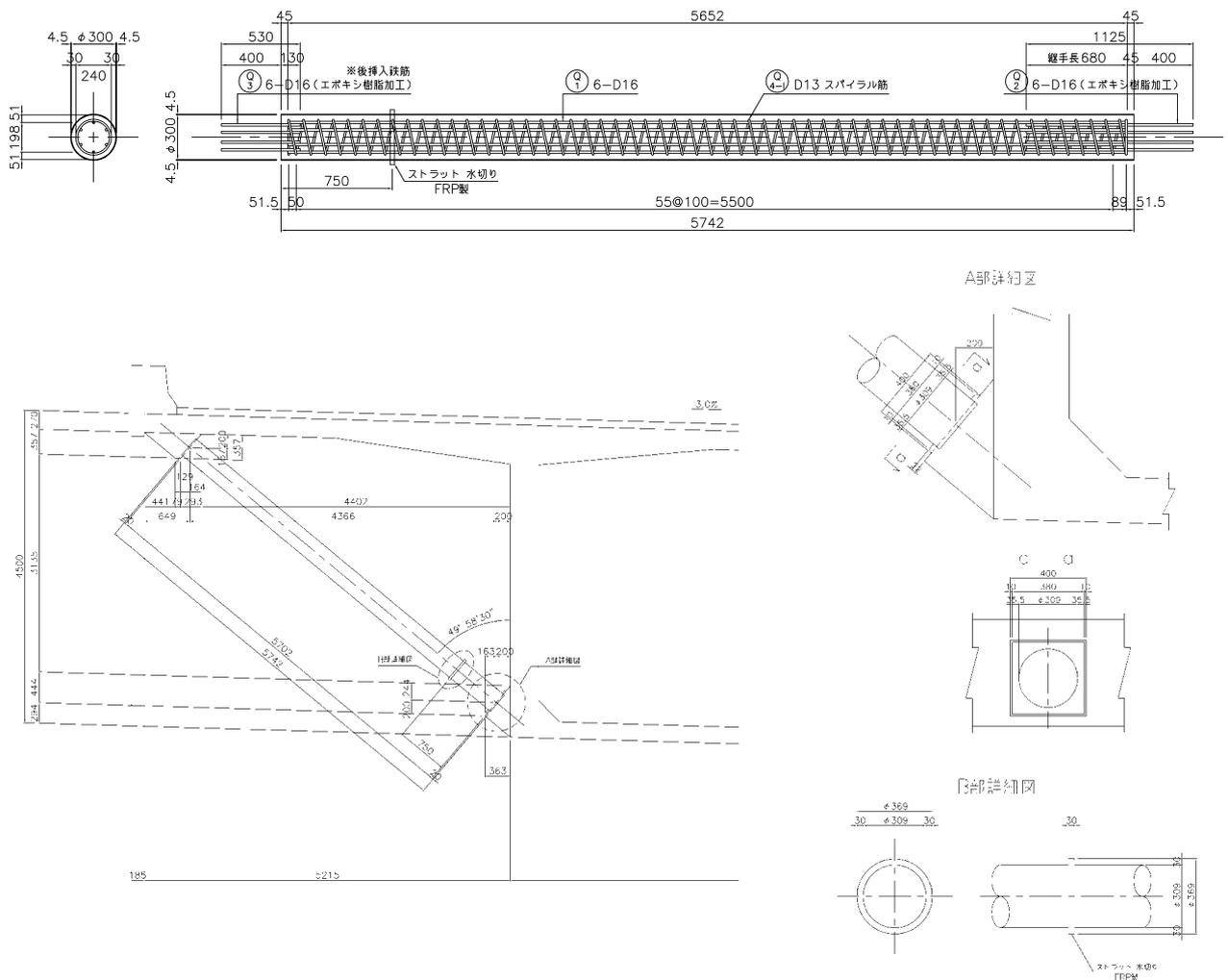


図-6 ストラット詳細図

5. ストラット接合部の形状検討

ストラット接合部の形状は、図-7 に示すような突起タイプとエッジビームタイプの実例がある。この2つの形状を比較するにあたり、ストラットに支持された床版を有する本橋には、道示の規定が適用出来ないため、断面力は、3次元FEM解析により算定した。

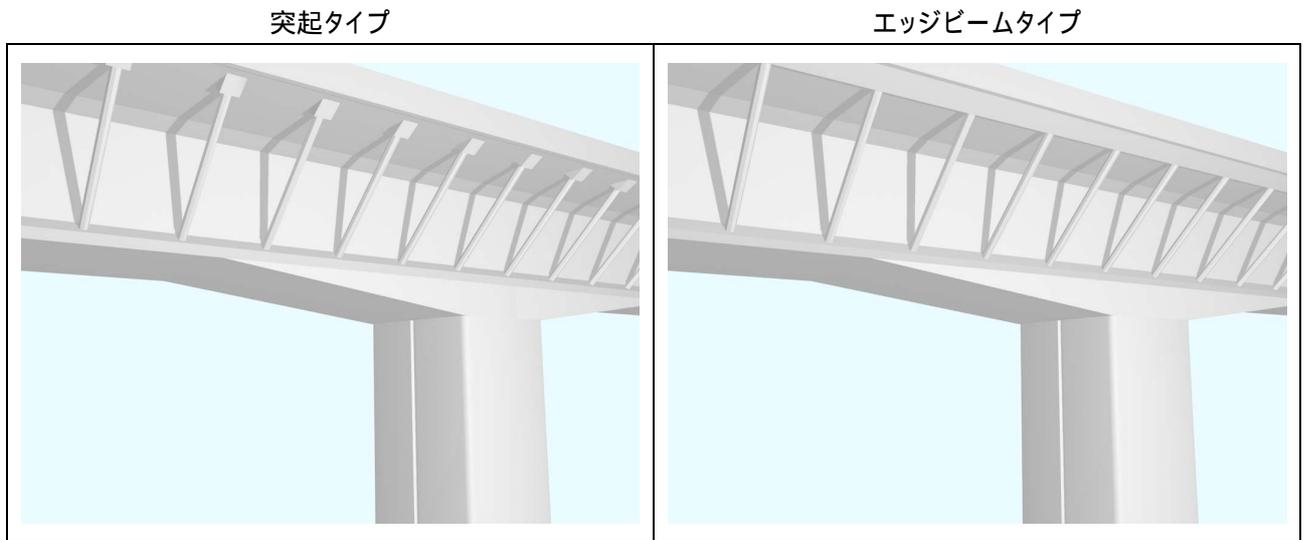


図-7 上床版接合部の検討

(1) ストラット接合位置の検討

張出し床版にストラットが接合されることから、直角方向に正負の曲げモーメントが発生する。この正負のバランスが最適となるような接合位置を決定することで、床版のPC鋼材量および鉄筋量を合理的に配置出来る可能性があるため、2次元フレーム解析により接合位置を検討した。橋軸方向3.5mの自重、橋面荷重、T荷重を考慮して、張出床版端より1.0m、1.1m、1.2mと接合位置を変化させた時の結果を図-8に示す。張出し床版先端から1.100mの時に、正負とも100kN・m程度となる。エッジビームの場合には排水柵の形状・取付位置を考慮して接合位置を決定する必要がある。

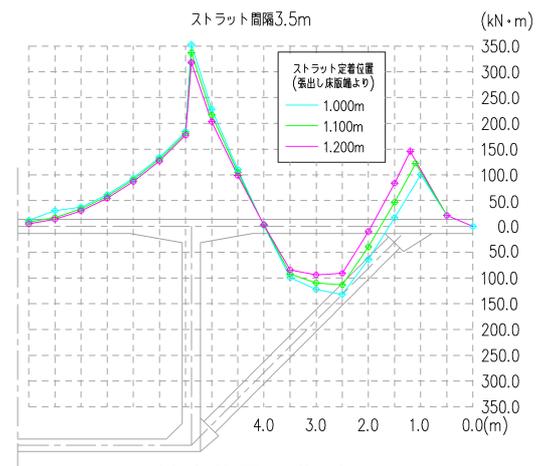


図-8 接合位置と曲げモーメント

(2) FEM解析

1) 解析モデル

解析モデルは半断面のソリッド要素とする。解析は変位法を用いた有限要素法による3次元線形解析とした。図-9に示すように、接合形状と接合位置をパラメータにとる3ケースとし、CASE1とCASE2の比較で接合位置の影響をCASE2とCASE3で接合形状の影響を検討する。図-10にFEM解析モデルを示す。

	CASE1	CASE2	CASE3
断面形状			
接合位置	床版端 (エッジビームタイプ)	床版端から1.2m (エッジビームタイプ)	床版端から1.1m (突起タイプ)

図-9 解析ケース

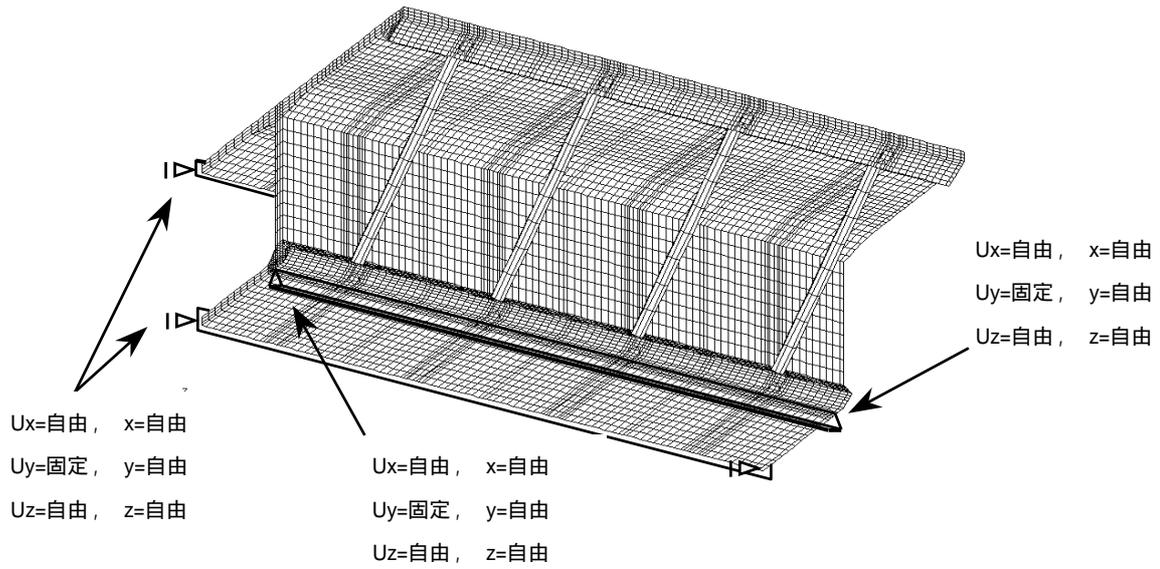


図-10 FEM解析モデルと拘束条件

2) 材料特性

	主桁コンクリート	ストラット
ヤング係数(N/mm ²)	3.1 × 10 ⁴	3.1 × 10 ⁴
ポアソン比	0.167	0.167
単位体積重量 (N/mm ³)	24.5 × 10 ⁶	24.5 × 10 ⁶

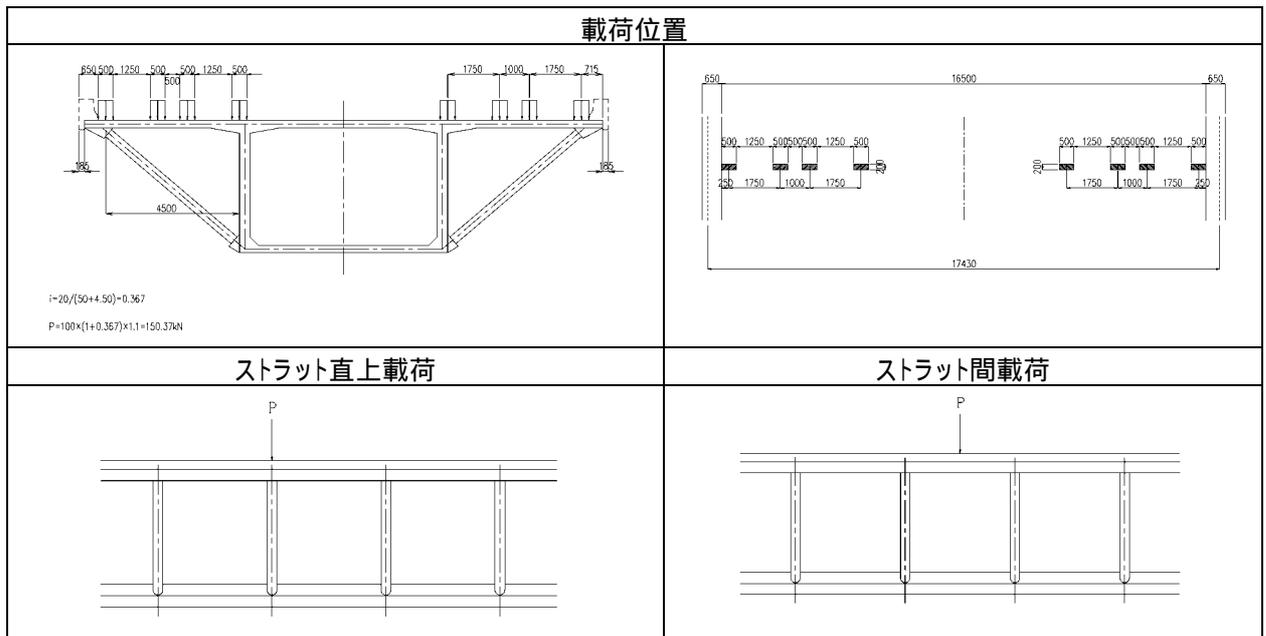
3) 荷重条件

a) 死荷重

主桁自重		自動計算による
橋面荷重	舗装	2.25kN/m ²
	壁高欄	10.996kN/m
	遮音壁	3.5kN/m

b) 活荷重

活荷重は、T荷重 100kN に衝撃係数, 安全係数 1.1 を考慮した。

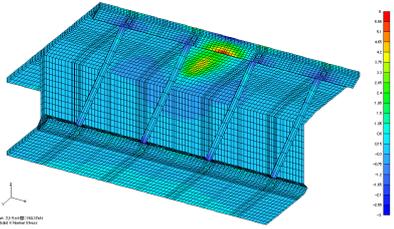
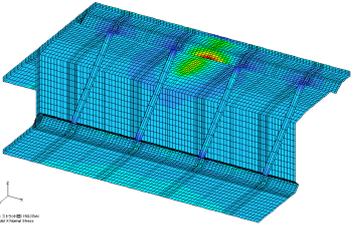
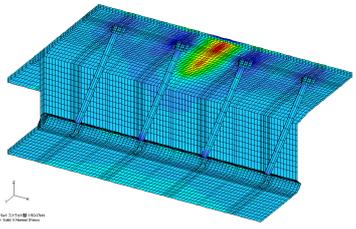
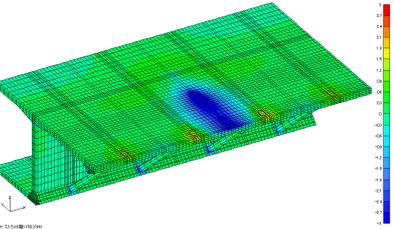
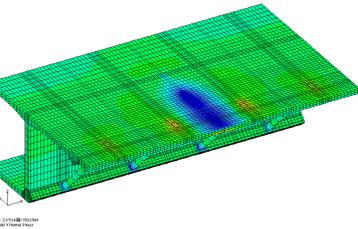
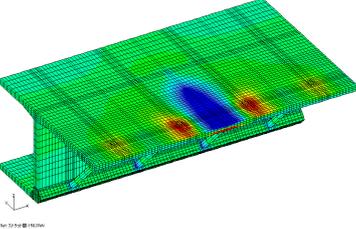
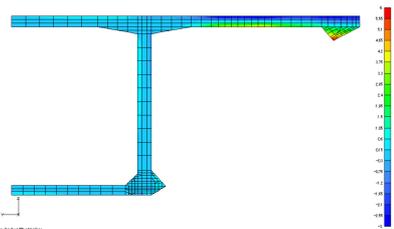
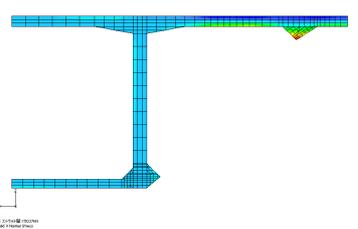
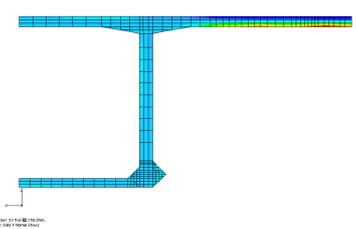


4) 解析結果

橋軸方向, 橋軸直角方向の応力状態を以下に示す.

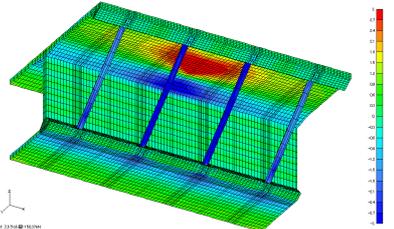
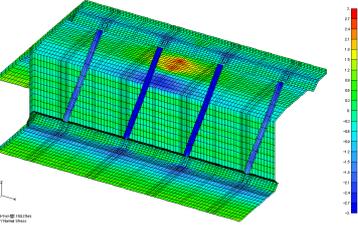
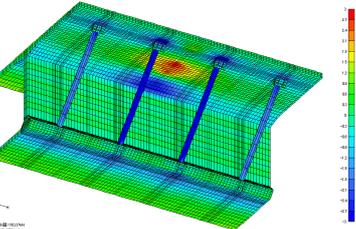
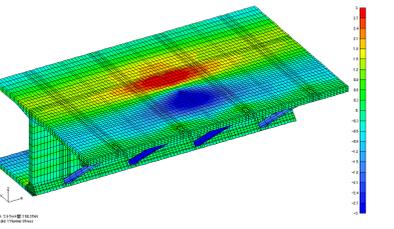
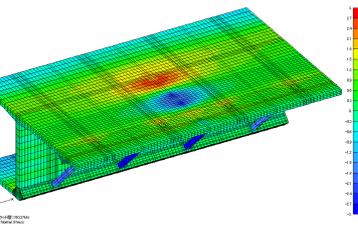
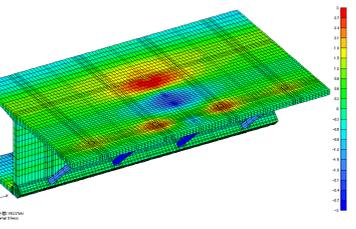
a) 橋軸方向結果一覧(ストラット間載荷時)

+ 引張, - 圧縮

	CASE1	CASE2	CASE3
下縁			
	引張 MAX=5.781N/mm ²	引張 MAX=6.067N/mm ²	引張 MAX=6.040N/mm ²
上縁			
	圧縮 MAX=-4.804N/mm ²	圧縮 MAX=-4.379N/mm ²	引張 MAX=2.670N/mm ² 圧縮 MAX=-6.323N/mm ²
断面			
	引張 MAX=5.781N/mm ²	引張 MAX=6.067N/mm ²	引張 MAX=6.040N/mm ²

b) 橋軸直角方向結果一覧(ストラット間載荷時)

+ 引張, - 圧縮

	CASE1	CASE2	CASE3
下縁			
	引張 MAX=4.388N/mm ²	引張 MAX=2.563N/mm ²	引張 MAX=2.925N/mm ²
上縁			
	引張 MAX=3.221N/mm ² 圧縮 MAX=-4.630N/mm ²	引張 MAX=2.549N/mm ² 圧縮 MAX=-2.694N/mm ²	引張 MAX=2.915N/mm ² 圧縮 MAX=-2.938N/mm ²

橋軸方向において CASE2 と CASE3 を比較するとエッジビームタイプはビーム下縁に引張応力が集中しており、突起タイプはストラット接合部を支点とした連続構造のように正負の曲げ応力が発生している。引張力に対してプレストレスを導入する場合エッジビームタイプでは、ビーム下縁に PC 鋼材を直線配置することとなり PC 鋼材の配置は可能と考えられる。それに対し突起タイプでは、ストラット間中央付近の床版下縁に発生する引張応力とストラット接合部の床版上縁に発生する引張応力に対し、軸力配置もしくは、床版厚 270mm 内で PC 鋼材を上下に変化させて配置しなければならない。配筋、床版横締め(ctc625)、ケーブルの曲げ半径等でケーブルの配置上制約が多い。

橋軸直角方向においても、突起タイプには正負の曲げ応力が発生している。また、CASE1 と CASE2 の比較により接合位置は床版端から 1.2m 離れている方が 60～80%の応力になっている。

以上の事項を考慮した結果、接合方法はエッジビームタイプを採用した。

突起形状に着目した比較を表-1 にまとめる。

表-1

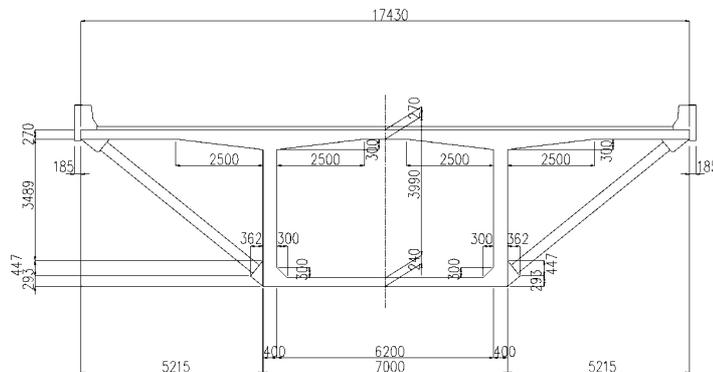
	エッジビームタイプ	突起タイプ
橋軸方向	<ul style="list-style-type: none"> ・ビーム下縁に応力が集中 ・接合位置を変更しても発生応力および応力分布は、ほぼ等しい 	<ul style="list-style-type: none"> ・ストラット接合部を支点とした連続構造のように、大きな正負の応力が発生
橋軸直角方向	<ul style="list-style-type: none"> ・エッジビームとウエブを支点とした連続構造のような正負の応力が発生 	<ul style="list-style-type: none"> ・ストラット接合部とウエブを支点とした連続構造のような正負の応力が発生

6. 張出し架設時の温度応力解析

図-11 のようにストラットを有する構造であるため、張出床版長は 5.215m と通常の箱桁断面に比べ長くなっている。張出し架設時に温度変化、乾燥収縮により発生する軸方向引張力により、床版端のブロック継ぎ目部にひび割れが生じる可能性があるため、温度応力解析を行い張出床版先端に発生する橋軸方向応力を算出する。

解析は A1～P1 間の 13 ブロック張出架設を実施通りモデルする。

断面図



側面図

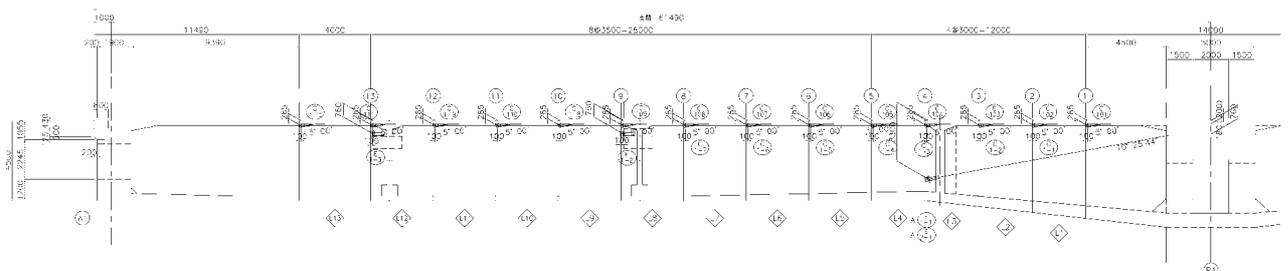


図-11 主桁断面とブロック割り

(1) 解析モデル

A1～P1間で施工ステップを考慮した半断面張出モデルを作成し解析を行う。ブロックの打設サイクルは15日とした。なお柱頭部はコンクリート打設からある程度の時間が経過し、コンクリート温度が一定(20)になった状態としてモデル化する。

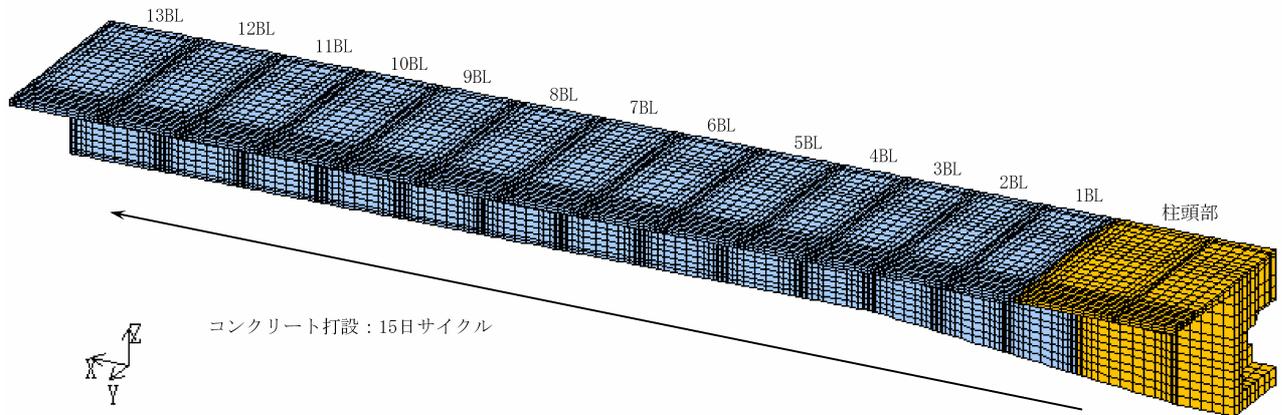


図-12 解析モデル

1) コンクリート物性値

解析に用いたコンクリートの物性値を表-2に示す。

表-2 物性値

物性値		備考
コンクリート種別	早強(普通)	張出施工部(柱頭部)
圧縮強度 (N/mm ²)	40(材令 28 日)	材令に伴う強度発現は、コンクリート標準示方書[施工編]を参照
配合	単位セメント量 (kg/m ³)	347(338) 張出施工部(柱頭部)
	単位水量 (kg/m ³)	149(154) 張出施工部(柱頭部)
熱伝導率 (W/m)	2.7	"
比熱 (kJ/kg)	1.15	"
線膨張係数 (×10 ⁻⁶)	10	道路橋示方書より
ポアソン比	0.167	"
乾燥収縮 (×10 ⁻⁶)	150(収束値)	" , 履歴はコンクリート標準示方書[構造的 性能照査編]を参照した,
打設コンクリート温度 ()	15	

(2) 温度解析条件

1) 熱伝達境界条件

施工ブロックの熱伝達境界を図-13に示す。

熱伝達境界条件		
色	種類	熱伝達率(W/m ²)
黄色	合板	8
青	外気	14
緑	マット	5
紫	FRP	10
	断熱	

図-13 境界条件の設定モデル

(3) 温度応力解析条件

温度応力解析で用いた拘束条件, 外気温を図-14 に示す

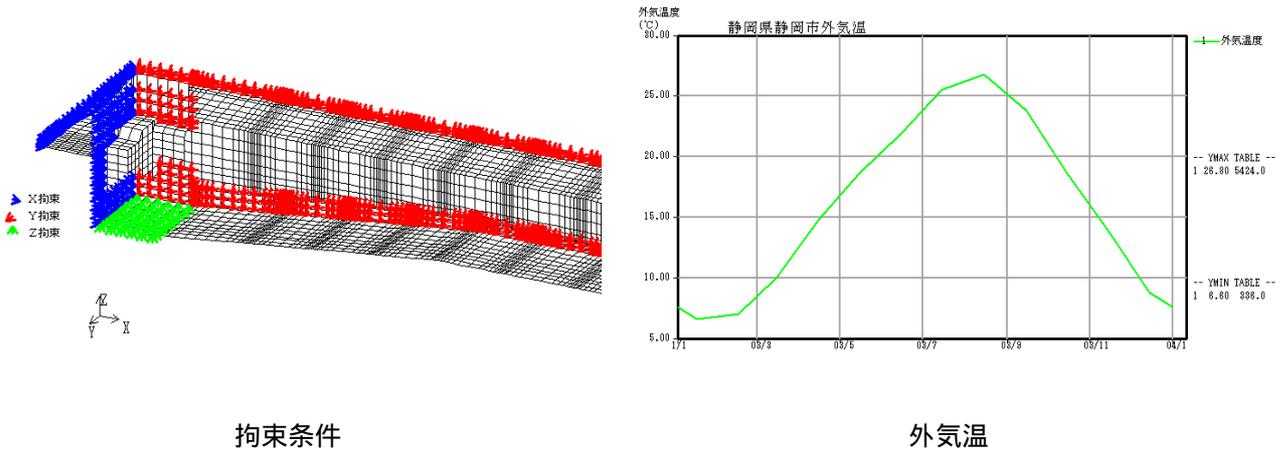


図-14 解析条件

(4) 解析結果

1) 橋軸方向の応力状態

13 ブロック施工後ワーゲン撤去時のカラーコンター(平面図,断面図 ~)を図-15 に, 床版先端部の応力履歴(断面 ~)を図-16 に示す. + 引張, - 圧縮

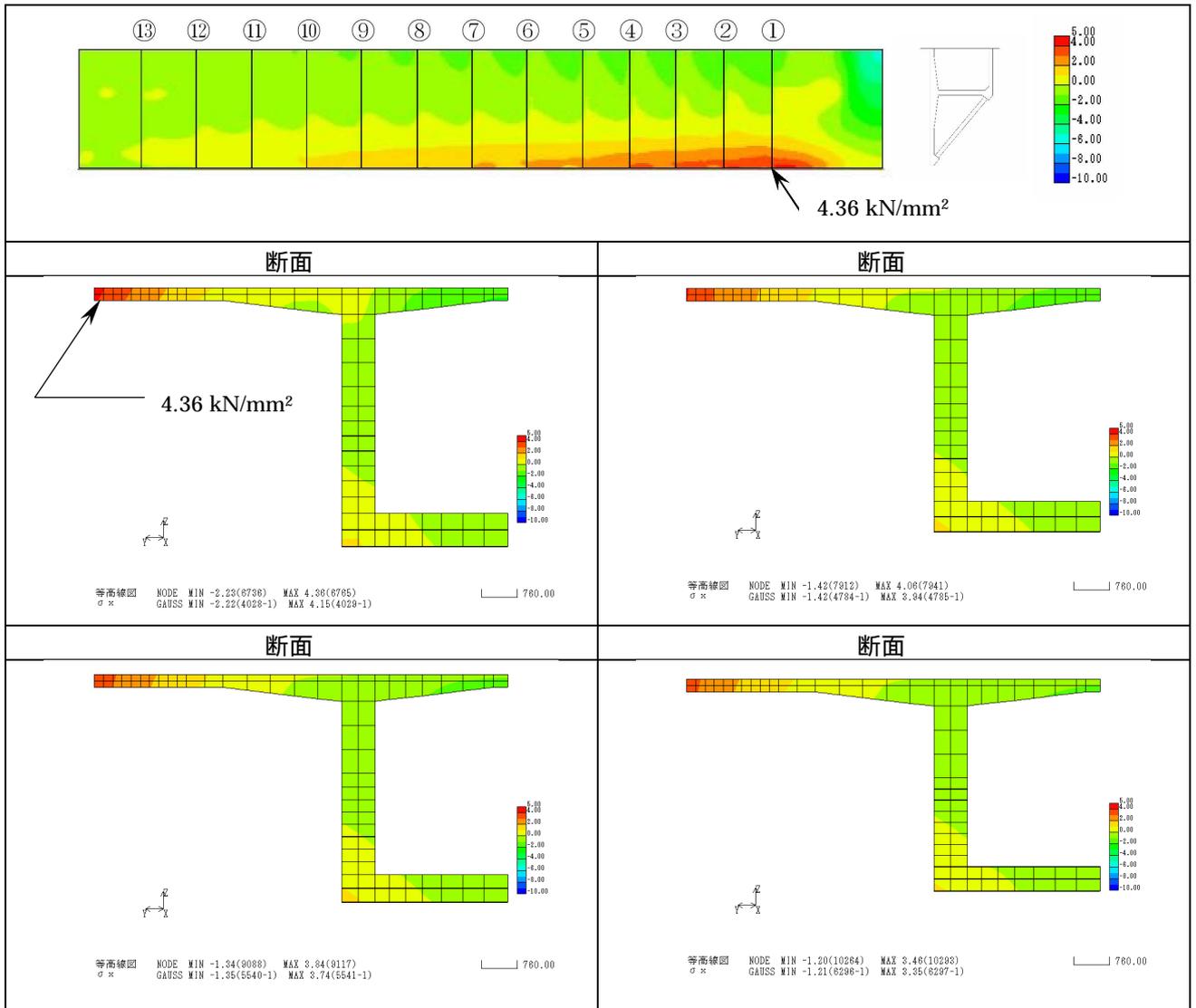


図-15 橋軸方向の応力分布

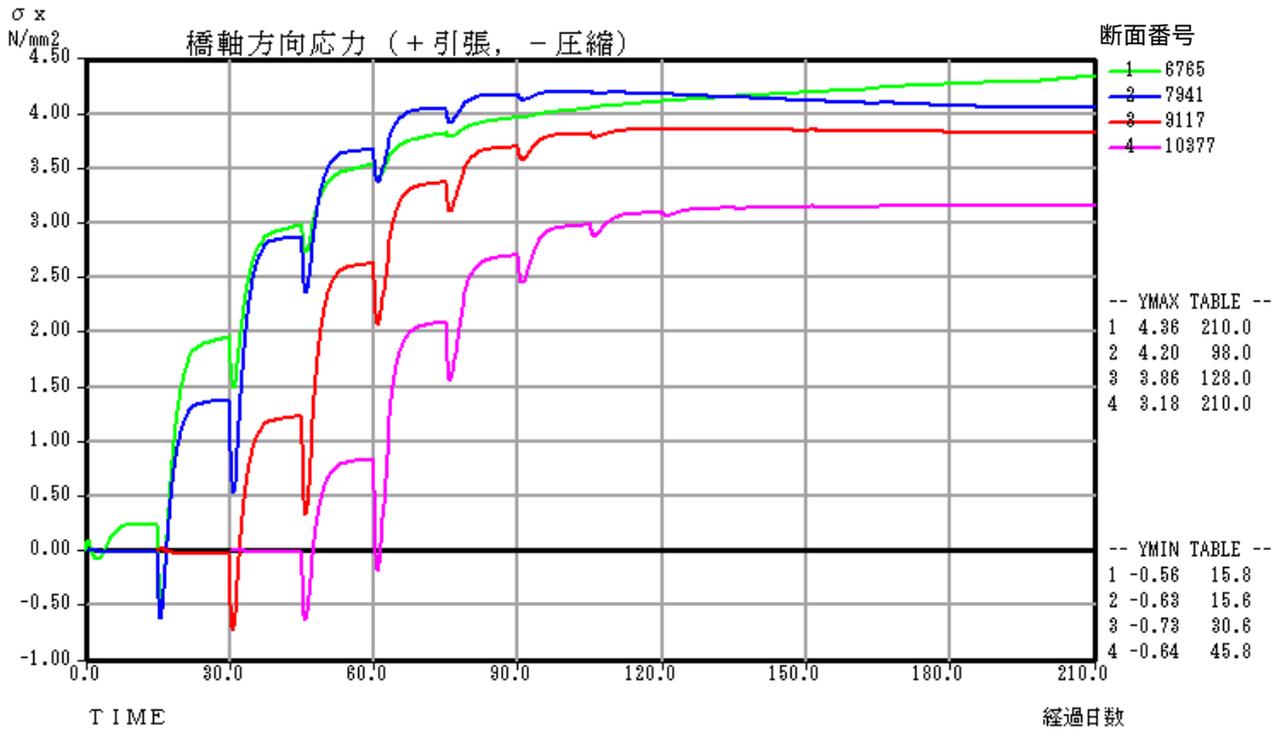


図-16 橋軸方向の応力履歴

2) 温度応力に解析による張出床版先端応力度 (N/mm²)

各断面の施工段階毎の応力度を下表に示す。黄色は各断面のMAX値、水色は開き止め鋼材緊張時、赤文字の数値は各断面の開き止め鋼材が必要な施工段階をそれぞれ示し、開き止め鋼材プレストレスを導入する時期はひび割れ指数が1.0を下回る時期を目安とした。

表-3

+ 引張, - 圧縮

断面	1BL 施工	2BL 施工	3BL 施工	4BL 施工	5BL 施工	6BL 施工	7BL 施工	8BL 施工	9BL 施工	10BL 施工	11BL 施工	12BL 施工	13BL 施工	ワゴン 撤去
	0.21	1.96	2.98	3.54	3.83	3.97	4.05	4.11	4.16	4.19	4.24	4.27	4.30	4.36
	----	1.35	2.86	3.67	4.04	4.17	4.19	4.18	4.15	4.12	4.10	4.07	4.05	4.06
	----	----	1.21	2.62	3.38	3.70	3.82	3.85	3.85	3.85	3.84	3.83	3.82	3.84
	----	----	----	1.09	2.36	2.98	3.26	3.37	3.41	3.42	3.43	3.43	3.43	3.46
	----	----	----	----	0.88	1.91	2.43	2.66	2.75	2.79	2.82	2.83	2.83	2.87
	----	----	----	----	----	0.70	1.63	2.10	2.32	2.42	2.47	2.50	2.51	2.56
	----	----	----	----	----	----	0.55	1.37	1.80	2.01	2.12	2.16	2.19	2.24
	----	----	----	----	----	----	----	0.40	1.13	1.52	1.72	1.81	1.85	1.91
	----	----	----	----	----	----	----	----	0.27	0.91	1.27	1.44	1.52	1.59
	----	----	----	----	----	----	----	----	----	0.15	0.69	0.99	1.14	1.23
	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	0.01	0.44	0.70	0.80
	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-0.14	0.21	0.32
	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-0.29	-0.23

3) 開き止め鋼材本数の決定

各断面で発生している MAX の引張応力度から、引張力を算出しほぼ同程度のプレストレスを導入する、PC 鋼材の引張力は次式による、

$$\begin{aligned} \text{有効引張力: } P_e &= 1260.0 \times 0.85 \times 532.4 / 1000 \\ &= 570.2 \text{ kN/本} \end{aligned}$$

ここに、初期緊張応力度: 1260 kN/mm²

有効係数: 0.85

PC 鋼材断面積: 532.4 mm² (SWPR19L 1S28.6)

表-4

断面													
引張力 (kN)	50	243	449	613	751	929	1010	1182	1226	1390	1544	1695	1748
PC 鋼材引張力 (kN/本)	570.2	570.2	570.2	570.2	570.2	570.2	570.2	570.2	570.2	570.2	570.2	570.2	570.2
必要本数	0.1	0.4	0.8	1.1	1.3	1.6	1.8	2.1	2.2	2.4	2.7	3.0	3.1
配置本数	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3

4) 鋼材配置

PC 鋼材の配置は張出架設を考慮し、1 ブロック毎に配置するため千鳥配置とした。

図-17 に鋼材配置図を示す。

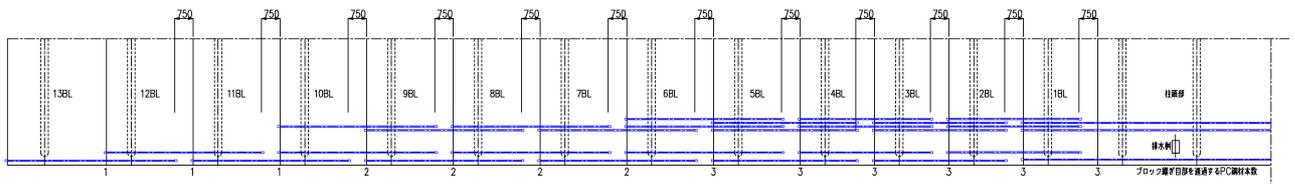


図-17

7. あとがき

平成 10 年度より、リブやストラットを組み込んで床版を合理的に支持する構造を検討するために、JH 静岡建設局の委託を受けた(財)高速道路技術センター内に技術検討委員会が設置され、設計・施工の確立に取り組んできた。現在はその成果を反映させて、ストラット構造の実施工も進行中である。この構造は、張出床版長、床版厚、ストラット角度、ストラット間隔、接合部形状等のパラメーターが多種にわたっており最適構造という面では、まだまだ未開発な部分が残されている。逆に言えば、今後も進化を続けていく技術であり今後の展開に大いに期待している。

謝辞

本橋の設計では、JH 静岡建設局構造技術課および静岡工事事務所構造工事区の方々には多大なご支援を頂いており、関係各位に心よりお礼申し上げます。

参考文献

1. 高速道路技術センター: 第二東名高速道路 ストラット・リブに支持された床版を有する PC 橋の設計施工に関する技術検討, 2002.3
2. 高速道路技術センター: 第二東名高速道路 ストラット・リブに支持された床版を有する PC 橋の設計施工に関する技術検討, 2001.3