

鋼・コンクリート複合トラス橋（椿原橋）の設計

Design of a Steel/Concrete Composite Truss Bridge (Tsubakihara Bridge)

永山 弘久*¹ 西岡 秀和*² 永谷 秀樹*² 能登 宥愿*³
Hirohisa NAGAYAMA Hidekazu NISHIOKA Hideki NAGATANI Hiroyoshi NOTO

Summary

The Tsubakihara Bridge is a 322-m-long, three-span, continuous composite truss bridge in which the upper cord of the truss and the cast-in-place PC floor slab are act together as a composite unit. This bridge has a simplified structure to reduce construction costs. The design omits the floor system of the bridge and the upper lateral bracing, which are generally adopted for conventional truss bridges. In design, the rigidity of the floor slab is increased effectively by arranging PC tendons beneath it in two directions; one direction is longitudinal to the bridge axis and the other is transverse to the bridge axis. The construction method adopted for this bridge is to act the truss members and the cast-in-place PC floor slabs as composite step-by-step, and thus continually extends the bridge from the finished sections. This paper describes the design of the Tsubakihara Bridge.

キーワード：複合トラス橋，スタッド，フェールセーフ，張り出し架設，PC床版

1. まえがき

椿原橋は、日本道路公団が建設する東海北陸自動車道の白川I.C.から更に北上した富山県との県境に近い岐阜

県白川村に位置し、椿原ダムの下流側の谷あいにかかる橋長322mの3径間連続複合トラス橋である。本橋の完成予想図を図-1に示す。

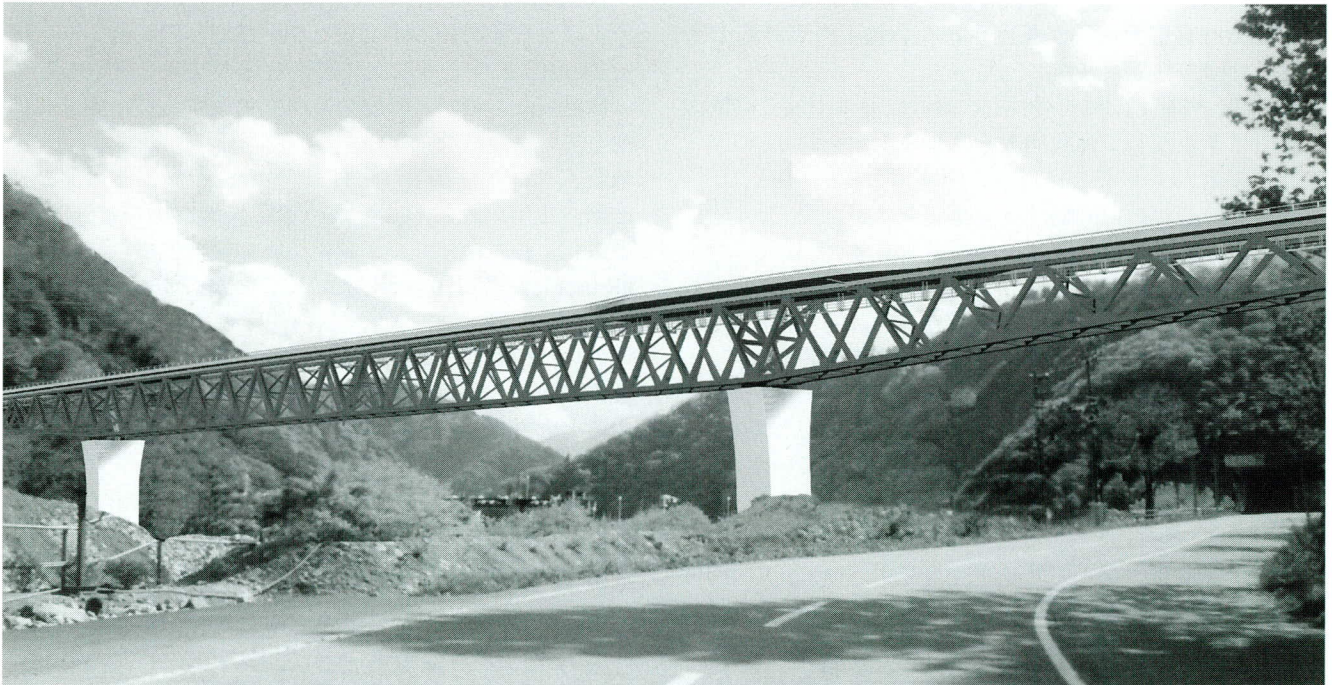


図-1 椿原橋完成予想図

*技術本部設計部設計一課課長代理
 *技術本部設計部設計一課

*技術本部技術開発部部长

本橋は、鋼トラス上弦材とプレストレストコンクリート床版（以下、PC床版）とを合成し、PC床版に主構としての機能を持たせた複合トラス橋であり、床版の2方向にプレストレスを導入することにより床版の耐力を高め、**図-2**に示すように上横構や床組構造を省略して、構造の合理化・コスト縮減をめざしている。また中間支点で主構高を低く抑え、側径間の主構高を端支点に向かって漸減させることにより橋梁全体に軽快感を与え、さらにトラス上塗り色には周辺の美しい緑と補色対比をなしながら落ち着いた色彩である錆色を採用するなど景観にも配慮している。

本論文では、椿原橋（鋼上部工）工事のうち詳細設計について報告する。

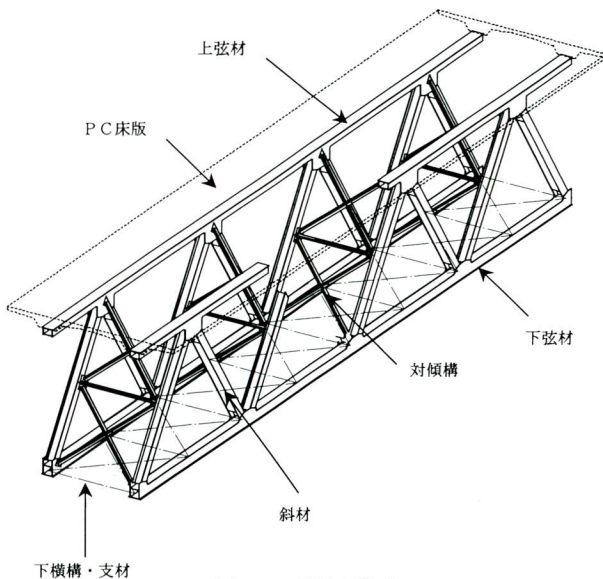


図-2 部材の構成

2. 橋梁概要

(1) 設計思想

本橋の設計にあたっては技術基準の解釈を柔軟に行い、基準が無いかあるいは適用範囲を超える点については、既往の研究や載荷実験などから得られた知見を合わせて設計を行うこととした。

設計は道路橋示方書に準拠して行うことを基本とし、限界状態設計法を取り入れて行うこととしたが、現状では鋼部材や鋼部材とコンクリート部材の接合部に関しては、限界状態設計法の適用手法が確立されているとは言いがたいため、鋼部材とコンクリート部材の照査水準を整合させることを目指し、疲労限界状態や終局限界状態の

照査により安全性を確認するものとした。

また鋼トラス上弦材の断面寸法は合理的な設計とするため、架設上最低必要な断面寸法かつ万一PC床版に過大なひび割れが生じ上弦材としての機能を果たせなくなった終局時においても、落橋という最悪の事態を回避できるようにフェールセーフとしての機能を持つ最小の断面寸法とした。

(2) 設計条件

本橋の構造一般図を**図-3**に、設計条件を以下に示す。

道路規格	第1種 第3級 B規格
設計速度	V=80km/h
設計荷重	B活荷重
橋 長	322.000m (CL上)
構造形式	3径間連続複合トラス橋
支間割り	82.300m+155.000m+82.300m (CL上)
有効幅員	10.060m (標準部)
斜 角	90°
平面線形	R=1300m
勾 配	縦断 ↘ 1.370% 横断 ↙ 3.50%
床 版	コンクリート $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$ (場所打ち) プレグラウトPC鋼材 縦締め 1S28.6, 横締め 1S21.8
支 承	端支点 水平反力分散支承 中間支点 免震支承 (LRB)

(3) 施工方法

本橋の架設方法としては、中間橋脚の斜バント上でPC床版3パネル分を先に施工し、それ以降鋼トラス上弦材とPC床版とを逐次合成させながら張り出し架設を行う方法（**図-4**）を採用した。これにより床版橋軸方向の必要プレストレス量が非常に多くなるため、プレストレスングの際、鋼トラス部材の拘束を受けないような施工方法が要求された。このため**図-5**に示すようにスタッド部を箱抜きし、それ以外の鋼トラス上弦材とPC床版の間にゴムパッドを敷設し、縁切りした状態でプレストレスングを行い、その後箱抜き部にコンクリートを打ち込むことにより合成構造とする施工方法を採用した。

また主方向PC鋼材（橋軸方向のPC鋼材）の緊張は**図-6**に示すように、未合成部のコンクリート床版のみにプレストレスを与え、合成済みの床版にはプレストレスが与えられないように、2パネルごとに定着しながら順次接続していく方法を採用した。

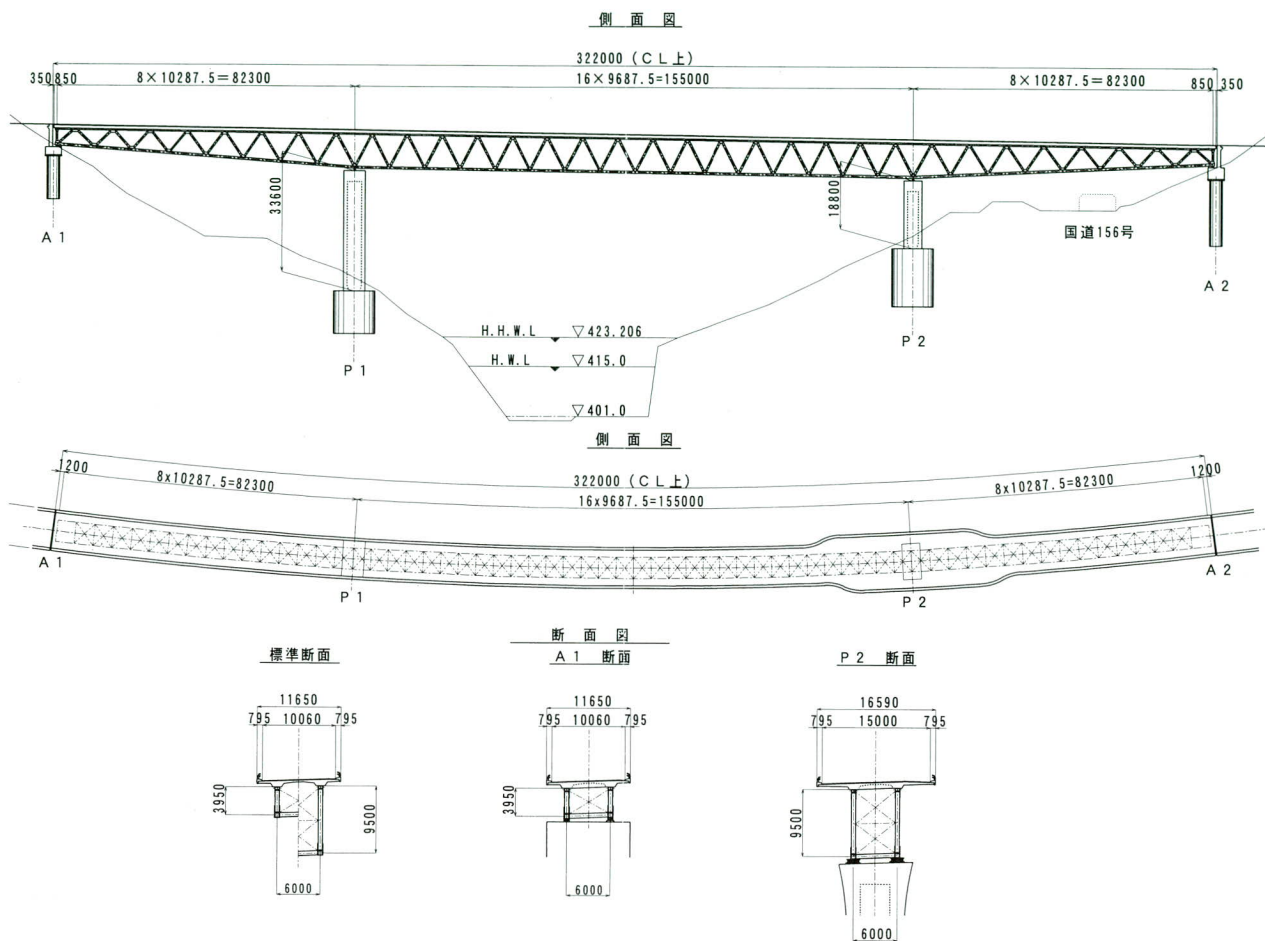
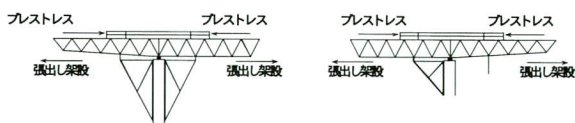


図-3 構造一般図

STEP-1 鋼部材を架設し、3パネル選りて床版を施工する。



STEP-2 床版は、プレストレスを与えてから合成していく。

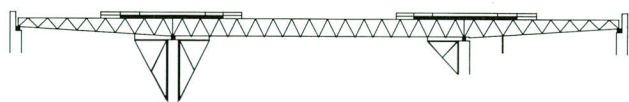


図-4 張り出し架設のイメージ

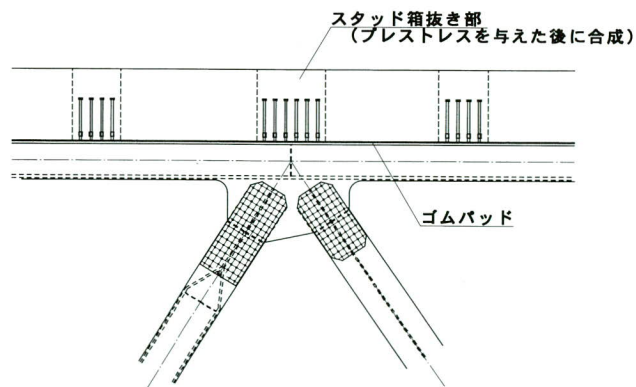


図-5 鋼トラス上弦材とPC床版の格点部の構造

なお今回採用した施工方法および鋼トラス上弦材とPC床版格点部の接合構造に関しては、後述するFEM解析や別途報告する載荷実験⁹⁾により、設計の妥当性と疲労や終局荷重に対する安全性を確認した。

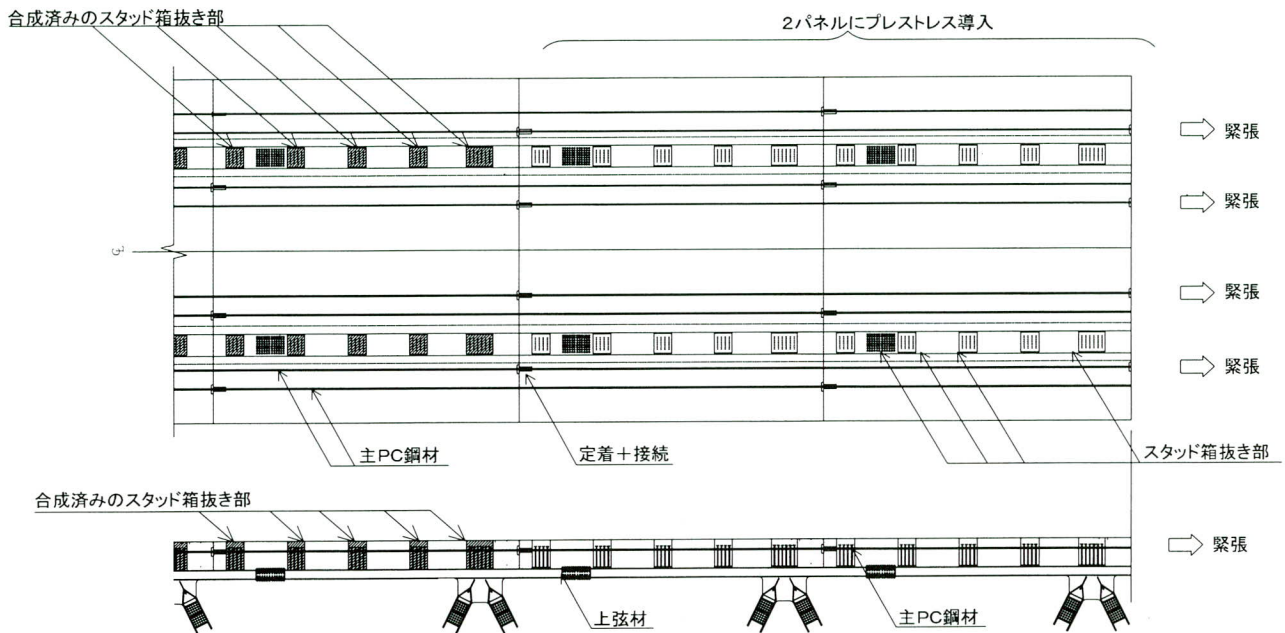


図-6 主PC鋼材緊張概念図

3. 構造解析

(1) 解析方針

本橋で実施した主な構造解析は以下の3種類とした。

①全体構造系設計用：弾性微小変位解析

②耐震設計用：動的解析（非線形時刻歴応答解析）

③詳細構造検討用：弾性FEM解析

本章では①項および②項について述べることにし、③項は後述の「5. FEM解析」の章で述べる。構造解析のフローチャートを図-7に示す。

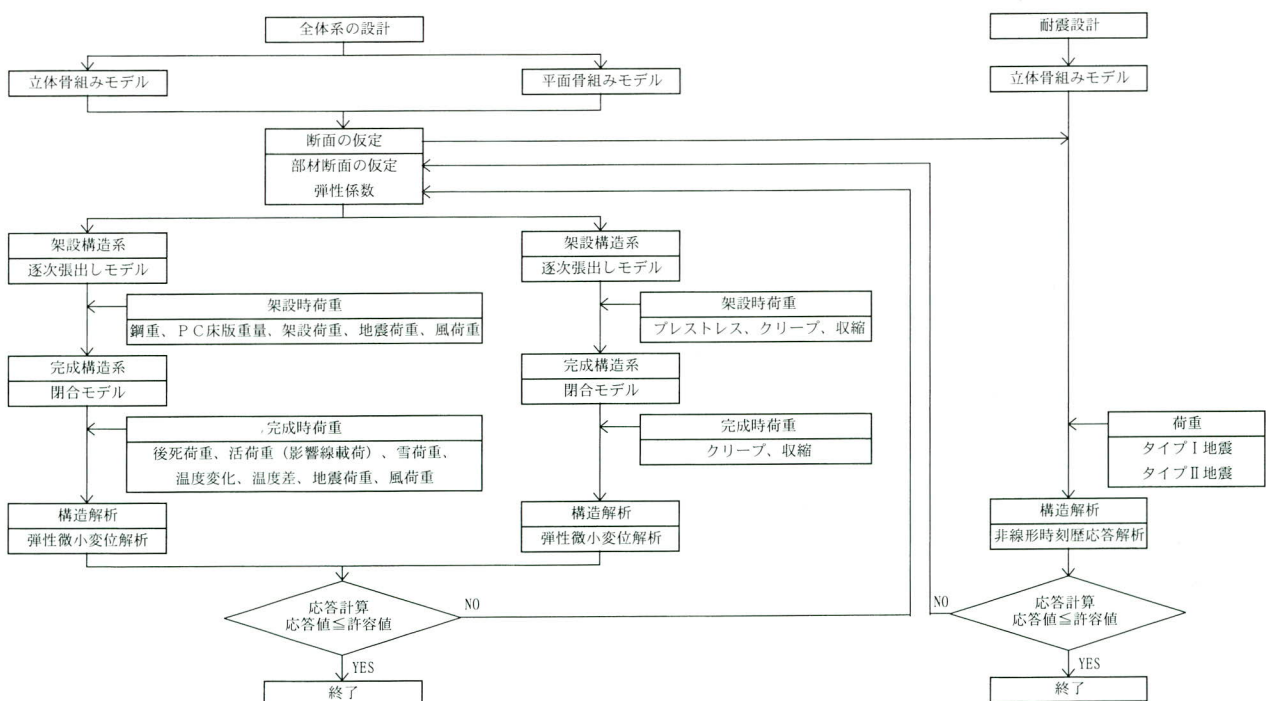


図-7 解析フローチャート

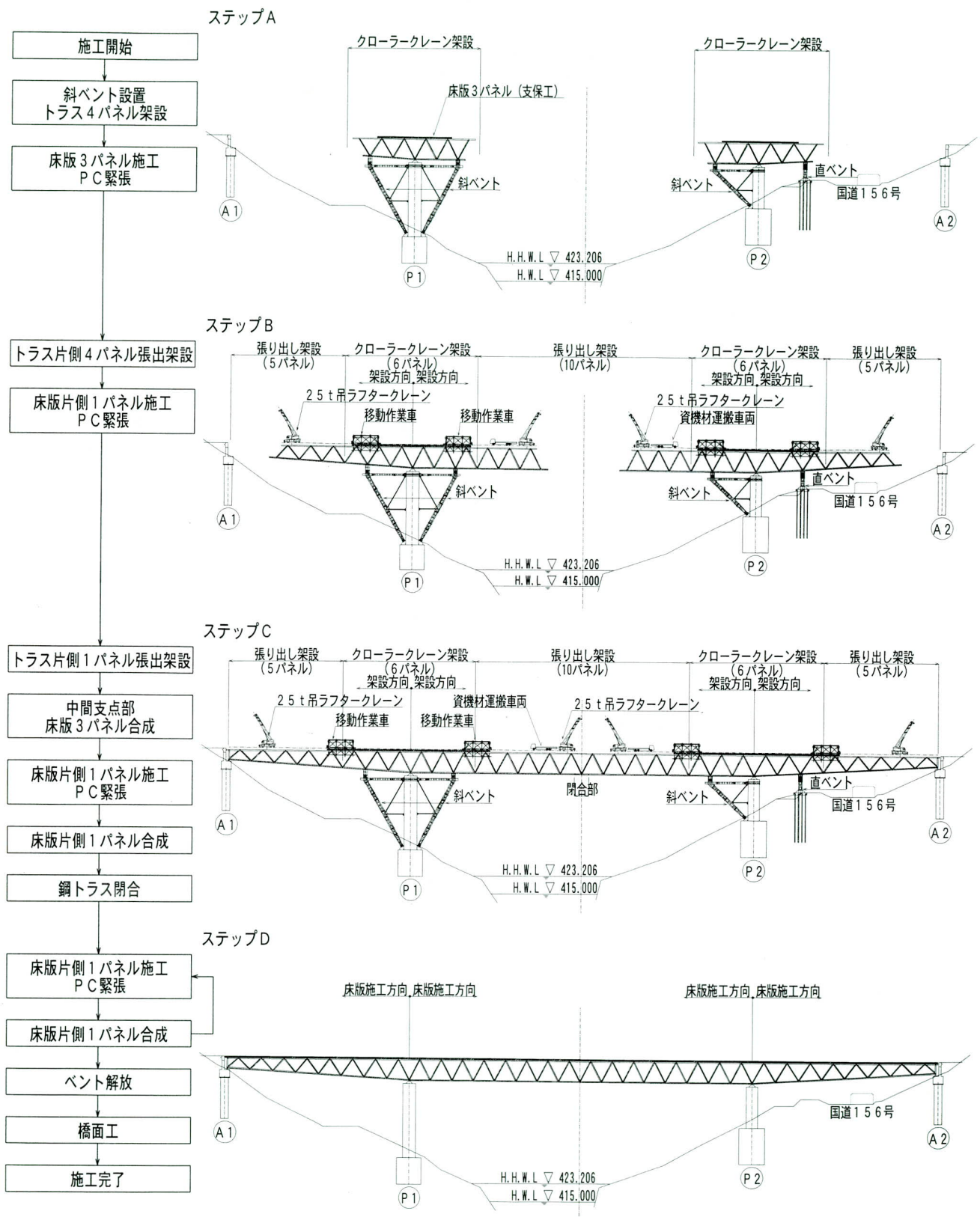


図-8 概略架設ステップ図

1) 全体構造系設計用の解析

本橋は道路中心線上で曲率半径 $R=1300\text{m}$ を有する曲線トラス橋であるため、主構は中間支点を含む7格点で平面的に折った骨組み構造とした。解析にはこれらの条件を反映できる立体骨組み解析プログラム(SPACER)を使用したほか、**図-8**に示すような架設ステップを考慮したクリープ、収縮の影響を反映できる平面骨組み解析プログラム(CONBRID)も併用した (**表-1**)。

表-1 全体構造系設計用の解析

解析	モデル	取り扱う荷重
弾性微小変位理論	立体骨組みモデル (SPACER)	死荷重、活荷重、地震荷重、温度荷重、風荷重、雪荷重
	平面骨組みモデル (CONBRID)	プレストレス、クリープ、収縮

モデル化は下記の要領で行い、架設ステップおよび合成時期を考慮した逐次張出しモデルに荷重を載荷した。使用した立体骨組みモデルを**図-9**に示す。

- ① 鋼トラスは部材毎に棒部材とし、床版は2主構分を1本の梁部材とした。
- ② 床版と上弦材のつなぎ材は剛性の高い梁部材とした。
- ③ 斜材上側の骨組み結び点は上弦材の図心とした。(後述する「5. FEM解析(1)」を参照)
- ④ ゴム支承は弾性バネ支点とし、中間橋脚およびベントもモデル化した。

今回採用した解析モデルの特徴は、合成断面となるPC床版と鋼上弦材を各々モデル化し、それぞれを剛な部材で結合している点である。これによりPC床版と鋼上弦材に生じる断面力およびスタッドに作用する水平せん断力を

を直接得ることができる。なお今回採用したモデルについては、解析結果をFEM解析結果と比較することにより妥当性の確認を行っている (5. FEM解析(1)参照)。

2) 耐震設計用の解析

大規模地震時の照査用として、非線形時刻歴応答解析を行った。この解析に先立ち、振動性状の把握および非線形時刻歴応答解析に必要なReyleigh減衰定数の算出のため、固有値解析を実施した。また解析モデルは、全体構造設計用と同じ立体骨組みモデルを使用した。解析の結果、本橋の固有周期は橋軸方向 $2.4(\text{sec})$ 、橋軸直角方向 $2.7(\text{sec})$ となった。

(2) 解析結果

全体構造系設計用の解析および耐震設計用の解析から抽出された各部材の設計断面力を**図-10**に示す。

4. 設計概要

(1) 鋼部材の設計

1) 設計法

鋼部材の設計は、コンクリート部材の設計と整合させるために限界状態設計法の考え方を取り入れ、各限界状態に相当する以下の項目について照査を行うこととした。

- ① 設計荷重作用時 (使用限界状態に相当)
材料や座屈に対して安全係数 $\gamma=1.7$ を考慮した許容応力度を用いて、安全性を照査した。
- ② 疲労荷重作用時 (疲労限界状態に相当)

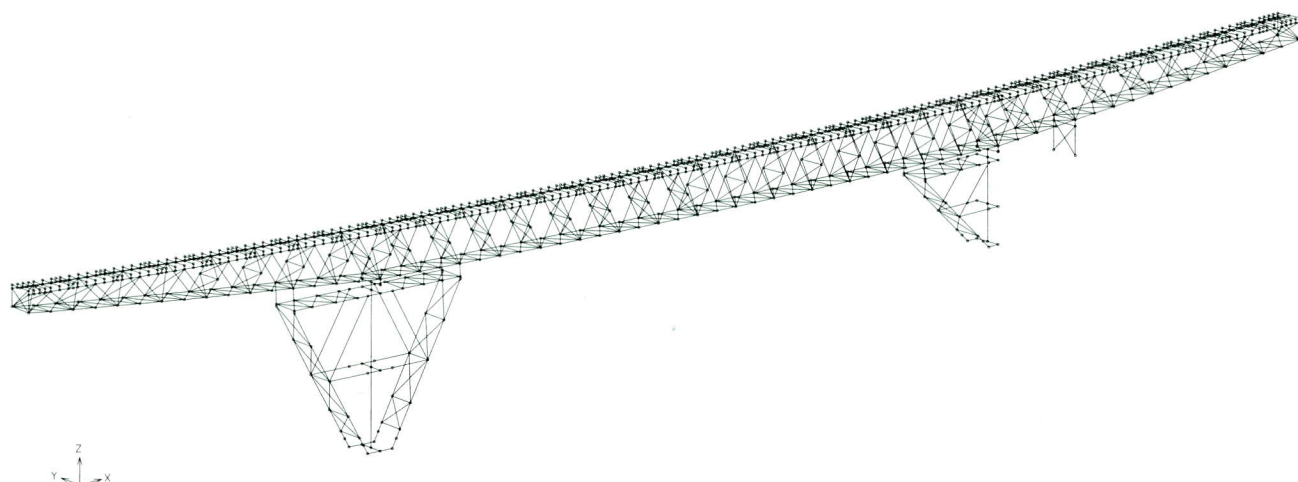


図-9 立体骨組みモデル図

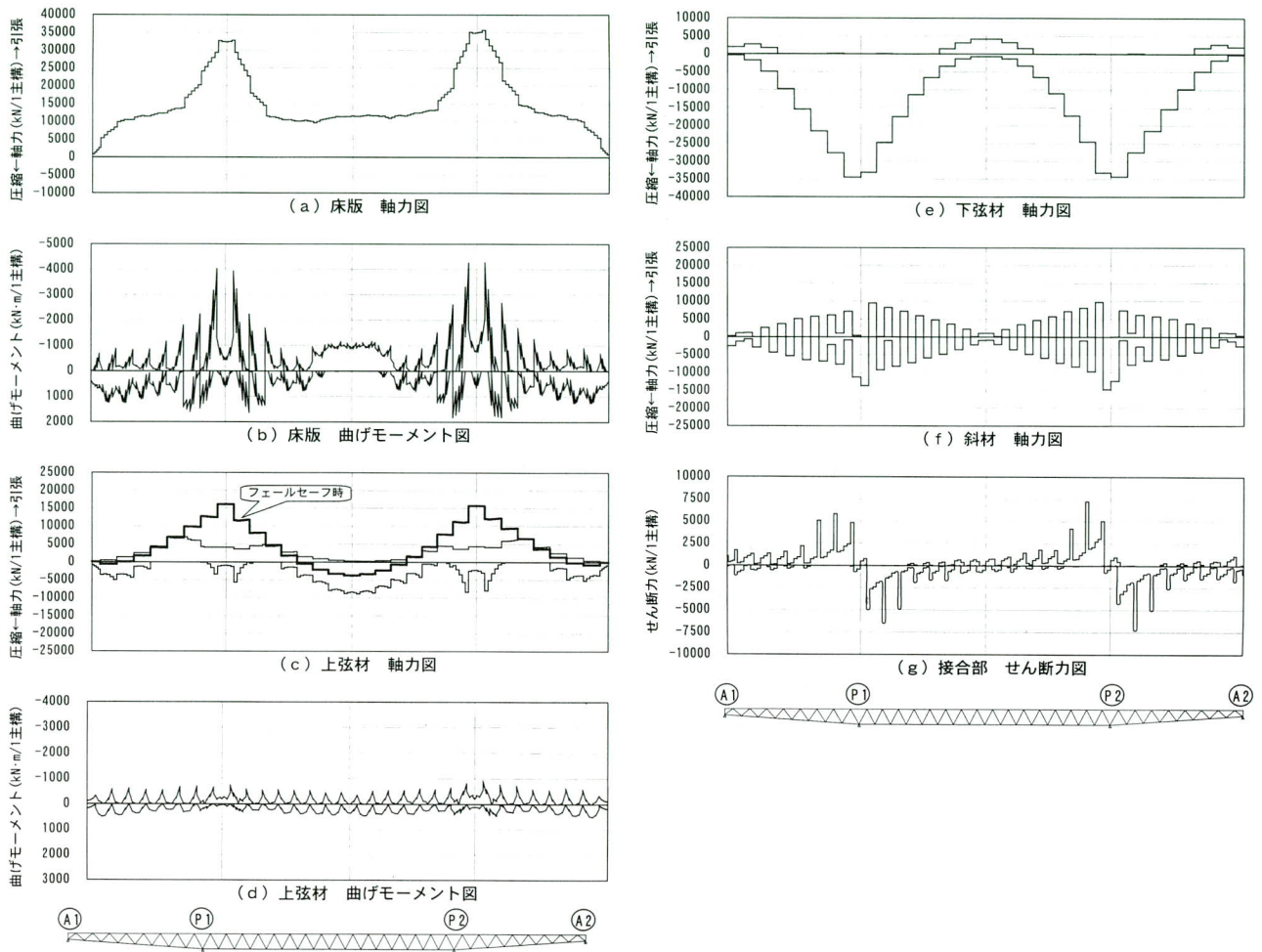


図-10 設計断面力図

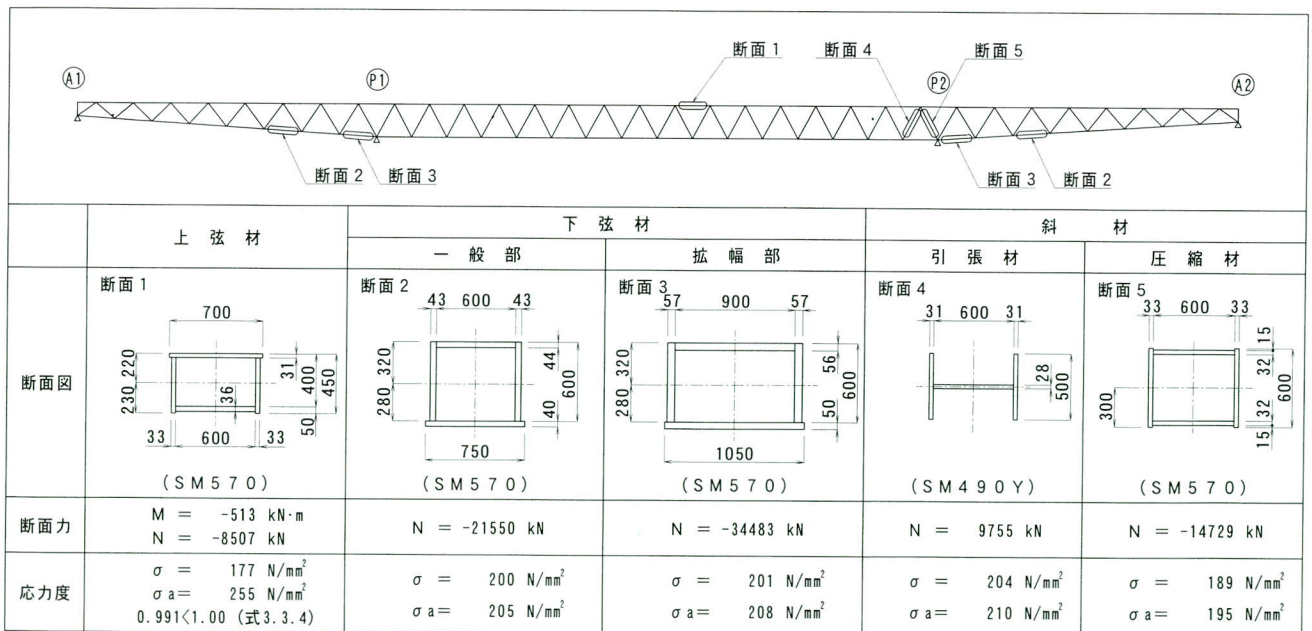


図-11 鋼部材の最大断面

照査が必要な部位に対して、鋼構造物の疲労設計指針・同解説（日本鋼構造協会・1993年4月）に準拠して照査を行った。

③終局荷重作用時（終局限界状態に相当）

道路橋示方書コンクリート橋編に示されている終局荷重作用時の荷重組合せに従って、降伏に対する安全性について照査を行った。

設計の結果、主構についてはほぼ全ての部材が設計荷重作用時で断面が決定されたが、上弦材の中間支点付近についてはフェールセーフ時の照査により断面が決定された。各部材の最大断面を図-11に示す。

2) 上弦材の設計

上弦材は、床版との合成断面として設計する他に、想定外の作用によりコンクリート床版に過大なひび割れが生じた場合などにおいても、全体系として耐荷力を有するようにフェールセーフ機能を持たせた。

3) 下弦材、斜材等の設計

下弦材、斜材等の部材は、通常の鋼トラス部材として設計した。また下弦材中間支点部は、支承との取合いや現場継手部の必要ボルト列数の関係から一般部より断面の幅を300mm拡幅し900mmとした。

(2) コンクリート床版の設計

1) 設計法

コンクリート部材の設計は、限界状態設計法を取り入れ、各限界状態に相当する以下の項目について照査を行うが、詳細は現行の道路橋示方書コンクリート橋編に準拠することとした。

①設計荷重作用時（使用限界状態に相当）

ひび割れや変位が、橋の機能、耐久性、美観などを損なわないことを照査する。

②疲労荷重作用時（疲労限界状態に相当）

照査が必要な部位を選定して、必要に応じて行う。

③終局荷重作用時（終局限界状態に相当）

終局荷重時の荷重組み合わせに従って、断面破壊に対する安全性について照査を行う。

2) 橋軸方向の設計

(a) 設計方針

本橋の全体系としての床版は、まずPC部材としての設計を行い、全幅有効断面としてPC鋼材の本数を設定した。

次に床版の有効幅を考慮し、PRC部材として鉄筋の配置を決定した。なお主方向PC鋼材には、プレグラウトPC鋼材(1S28.6)を使用した。

(b) 制限値および許容値

PC部材およびPRC部材として床版の設計に使用したコンクリート、PC鋼材の制限値・許容値を表-2、表-3に示す。

表-2a PC部材としての制限値：コンクリートの曲げ圧縮応力度

	曲げ引張応力度の制限値	曲げ圧縮応力度の制限値
架設時	下縁：引張応力度1.0 (N/mm ²) 下縁：コンクリートの設計引張強度	コンクリートの圧縮強度の 1/1.7
死荷重作用時	下縁：引張応力度を発生させない 下縁：コンクリートの設計引張強度	コンクリートの圧縮強度の0.4倍
活荷重作用時	コンクリートの設計引張強度	

表-2b PC部材としての制限値：PC鋼材許容引張応力度 (N/mm²)

		1S28.6 (SWPR19L)
引張応力度		σ_{pu} 1782
降伏応力度		σ_{py} 1516
許容引張応力度	プレストレッチング中	σ_{pia} 1364
	プレストレス導入直後	σ_{pta} 1248
	設計荷重時	σ_{pa} 1069

表-3a PRC部材としての制限値：コンクリートの曲げひび割れの制御方法

	制御方法
架設時	コンクリートの設計引張強度
設計荷重作用時	許容曲げひび割れ幅

表-3b PRC部材としての制限値：コンクリートのせん断ひび割れの制御方法

	制御方法
設計荷重作用時	斜め引張鉄筋の引張応力度 コンクリートの仮想斜引張応力度

(c) 主PC鋼材の配置

架設時、設計荷重作用時および終局荷重作用時に対する断面照査の結果、主PC鋼材の断面方向配置および橋軸方向に対する配置本数はそれぞれ図-12、図-13に示すとおりとなった。

なおPC鋼材は、緊張時にそりが生じないように平均の

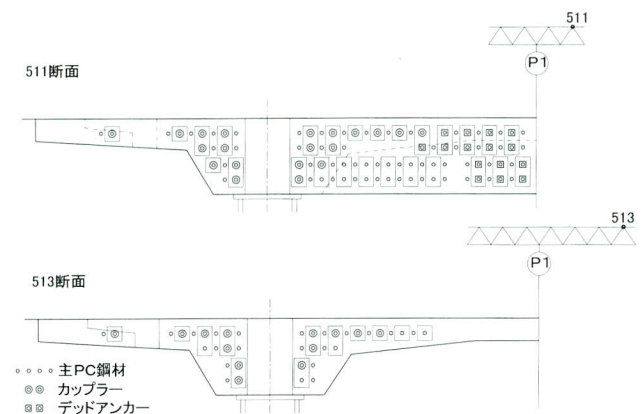


図-12 主PC鋼材の断面方向配置

(1主構あたり)

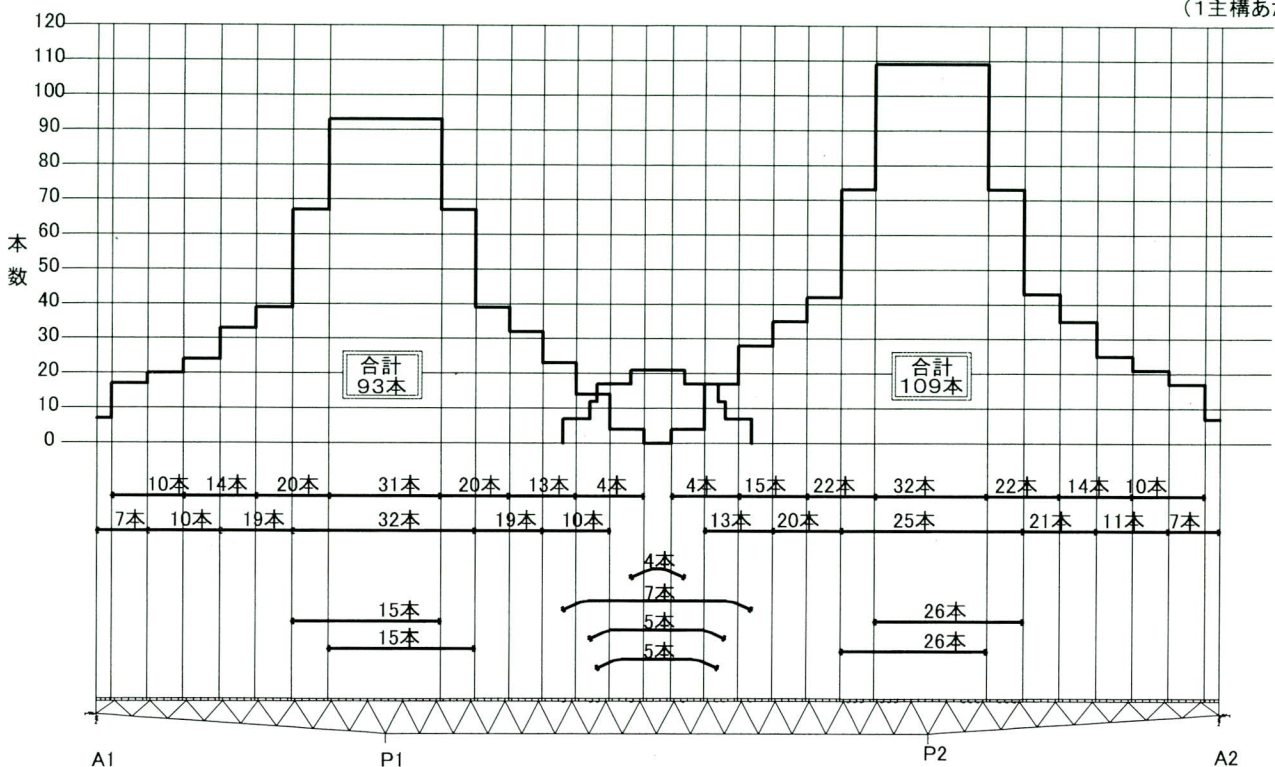


図-13 主PC鋼材の配置本数

鋼材図心が床版断面図心に近くなるように配慮しているほか、同様の理由により直線配置としている。

3) 橋軸直角方向の設計

橋軸直角方向については、FEM解析により検証した結果、道路橋示方書の設計曲げモーメント式を用いること

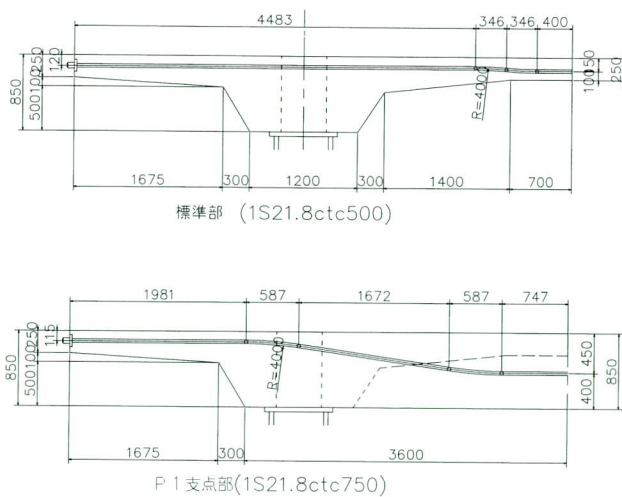


図-14 横締めPC鋼材の配置

とし、PRC部材として設計を行った。標準断面におけるPC鋼材の配置を図-14に示す。なお横締めPC鋼材には、プレグラウトPC鋼材 (1S21.8) を使用した。

4) スタッド箱抜き部に対する検討

スタッド箱抜き部は、PC緊張後にコンクリートを打ち込むためRC構造として設計を行った。すなわち、スタッド箱抜き部を合成した後に、箱抜き部打ち継ぎ目に生じる橋軸方向の引張力に対し、全て鉄筋で抵抗するとして鉄筋量を算出した。なお、箱抜き部の鉄筋の接続には施工性の良いFDグリップを使用した (図-15)。

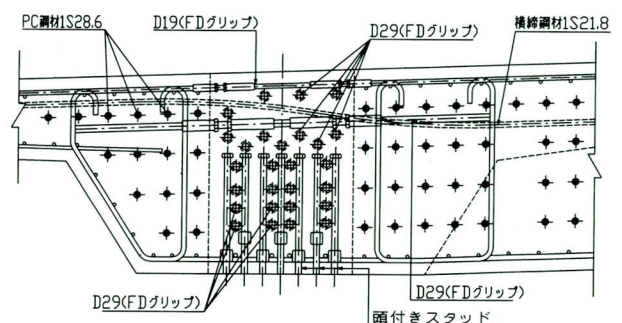


図-15 スタッド箱抜き部の補強鉄筋配置

(3) 接合部の設計

1) 設計法

鋼コンクリート接合部の設計は、限界状態設計法の考え方を取り入れ、各限界状態に相当する以下の項目について照査を行った。

- ① 設計荷重作用時（使用限界状態に相当）
床版・上弦材接合部について、ひび割れが機能性および耐久性などを損なわないことを照査した。
- ② 疲労荷重作用時（疲労限界状態に相当）
床版・上弦材接合部について、模型を使用した疲労試験²⁾により安全性を確認した。
- ③ 終局荷重作用時（終局限界状態に相当）
床版・上弦材接合部について、模型を使用した載荷実験²⁾により安全性を確認した。

2) 接合部の構造

接合部材としてスタッドやアングルジベルなどが考えられたが、検討の結果本橋の構造に対してより効率的に

配置できるスタッドを採用した。但し、一般的に使用されているスタッドの場合、必要本数が非常に多くなり配置が困難であったため、中部支社管内で実績のある高強度スタッドφ25（SM570相当）を使用した。

またスタッドは、現場の架設および床版の施工性を考慮して高ナットを用いたジョイントタイプとした。本体に溶植するスタッドの長さは、高ナットが千鳥配置になるように75mm、150mmの2種類とした。スタッド全高Hは、 $H/d > 6$ を満足し、さらに軸力の伝達および床版内部の応力状態を考慮して、床版の中立軸近傍までスタッドを埋め込むものとし $H=500\text{mm}$ とした。また、スタッド高が高くなるとスタッドヘッド部の加工が困難なため、スタッド頭部にもねじ切りしてナットを取付ける構造とした（図-16）。

合成トラスの床版と上弦材の間に生じる水平せん断力は、トラスという構造特性から格点部に集中することが既往の研究²⁾から知られている。本橋の場合もFEM解析や載荷実験から同様な結果が得られたため、格点部と格間部に対してそれぞれに必要なスタッド本数を算出し配置した。格間部のスタッドは、格間にほぼ均等になるように4箇所にグループ配置した。

格点部は、スタッド箱抜き幅ができるだけ小さくなるように、橋軸方向のスタッド間隔は道示Ⅱ9.5.5のずれ止めの最小間隔である $5d=125\text{mm}$ を基本とした。また、橋軸直角方向のスタッド配置は、 $3@150=450\text{mm}$ を基本としたが、橋軸方向の箱抜き幅が長くなる場合は、 $6@75=450\text{mm}$ とした。格間にグループ配置したスタッドも、スタッド箱抜き幅をできるだけ小さくするため125mmピッチを基本とした。スタッド配置を図-17に示す。

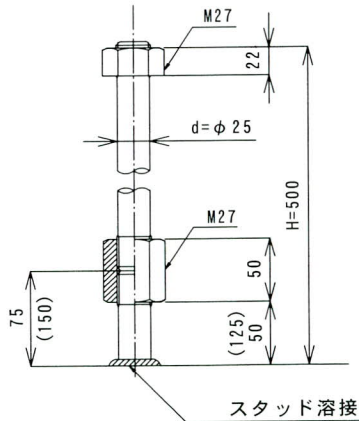


図-16 スタッド形状

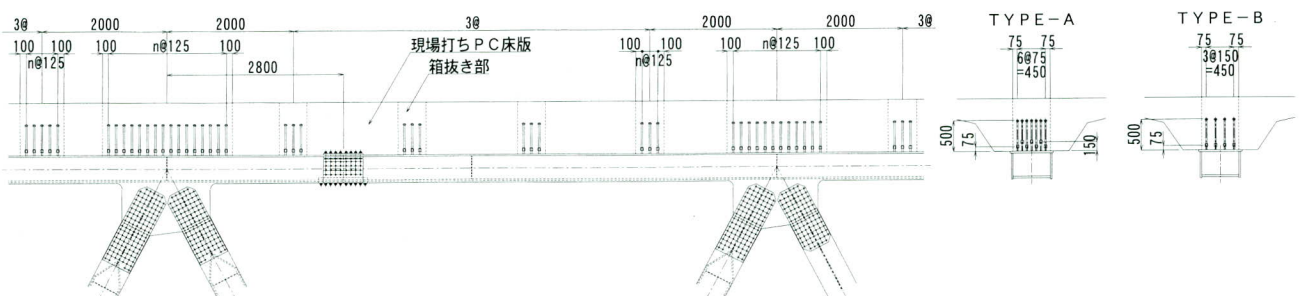


図-17 スタッド配置

3) スタッドの設計

スタッドの設計は、立体骨組み解析においてスタッドをモデル化したつなぎ材のせん断力 F_X, F_Y に、後述する FEM 解析および荷重実験⁹⁾結果を反映して以下の要領とした。スタッド設計のフローチャートを図-18に示す。

- ① 格点部のスタッド設計せん断力 q_X, q_Y は、立体および平面骨組み解析により得られた橋軸、橋軸直角方向せん断力 F_X, F_Y に対して、各荷重状態に応じてグループ配置による作用せん断力の不均等を考慮して、表-4に示すせん断分担係数 k_S を乗じて算出した (式-1)。

$$q_X = k_S \cdot F_X, \quad q_Y = k_S \cdot F_Y \quad (\text{式-1})$$

表-4 せん断力分担係数 k_S

荷重	適用格点	せん断力分担係数 k_S	
		橋軸方向	橋軸直角方向
地震時横荷重	中間支点直上の2格点	1.20	1.46
その他 (死荷重・活荷重等)	中間支点近傍の6格点	1.20	1.00

- ② ベント撤去時および橋軸直角方向地震時は、特定の格点でスタッドの耐力照査に影響を考慮すべき引張軸力が発生するため、この格点の設計引張軸力 p を設計せん断力 q_X, q_Y に表-5に示す係数 k_N を乗じて算出した (式-2)。また、他の荷重状態および一般格点においては、スタッド引張軸力の耐力照査に与える影響は1%以下と非常に小さいため、引張軸力の影響は考慮しなかった。

$$p = k_N \cdot q_X, \quad p = k_N \cdot q_Y \quad (\text{式-2})$$

表-5 設計引張軸力算出時の係数 k_N

荷重	適用格点	係数 k_N	備考
ベント撤去時	ベント直上の2格点	0.52	$k_N \cdot q_X$
橋軸直角方向地震時	中間支点直上の2格点	1.92	$k_N \cdot q_Y$

なお格点部のスタッド設計には、依田³⁾、大谷⁴⁾等の既往の研究成果より引張軸力およびせん断力が同時に作用する場合の耐力式を用いた。また、スタッドの許容せん断耐力 q_a は、員弁川橋のスタッドせん断耐力試験結果^{5)~7)}で提案された算出式より $q_a=76874(\text{N/本})$ とした。

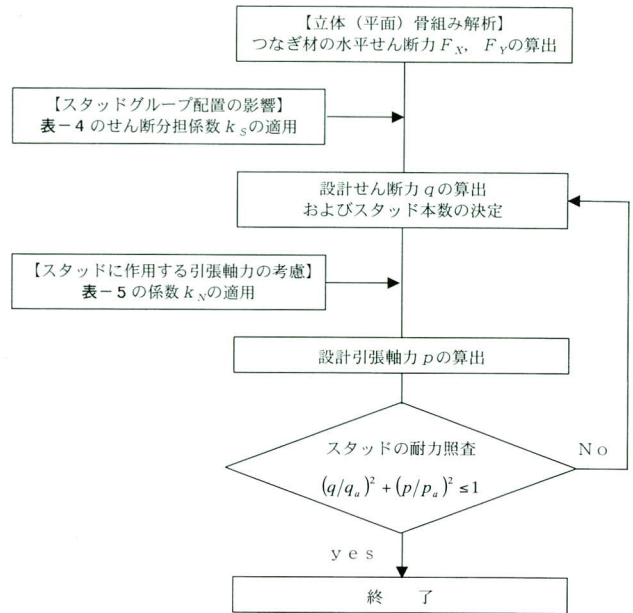


図-18 スタッド設計フローチャート

5. FEM解析

本橋では、(1) 平面モデルおよび (2) 立体モデル (全体モデル、部分着目モデル) を用いた FEM 解析により、構造検討およびスタッド・床版・上弦材に対する応力検討を行い設計への反映を行っている。各モデルによる FEM 解析の検討結果を以下に示す。

(1) 平面モデルによる斜材骨組み中心の結び点の検討

1) 目的

本橋のような床版と上弦材を合成断面としたトラスにおける斜材骨組み中心の結び点は、通常のトラスと同様に上弦材断面の図心とする場合と床版と上弦材の合成断面の図心する場合の2通りが考えられるが、図-19に示すように結び点の違いによりガセット形状は大きく異なる。また、軸心のずれによって二次応力が発生し、上弦材、床版のガセット近傍での応力状態は異なると考えられる。

したがって、FEM 解析を用いて着目部の応力性状について検討を行い、斜材骨組み中心の結び点位置の決定を行った。また、同時に設計で用いた骨組み解析の妥当性の検証も行った。

2) 解析対象および解析モデル

解析対象は、実橋の発生断面力と同様の傾向を示すと考

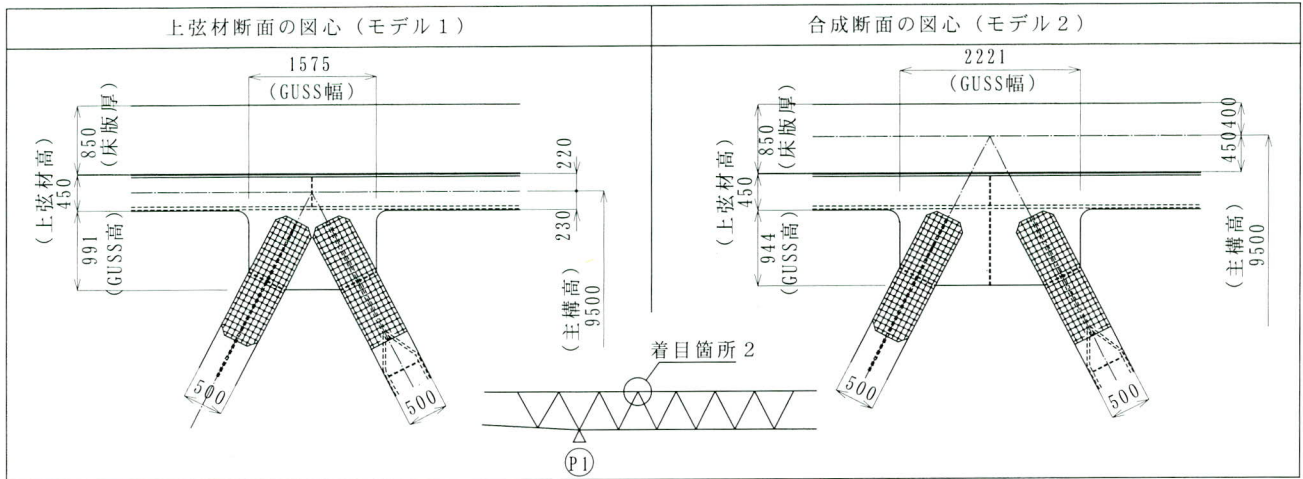


図-19 斜材骨組み中心結び点の違いによるガセット形状

えられる図-20に示す2種類の解析モデルにおける各載荷状態とする。この解析対象に対して斜材骨組み中心の結び点が異なる次の2モデルの解析を行った(図-19参照)。

- モデル1: 斜材骨組み中心の結び点を上弦材断面図心
- モデル2: 斜材骨組み中心の結び点を床版と上弦材の合成断面の図心

FEM解析モデルは、着目対象が主構面内の応力状態であるため、1主構の平面モデルとした。モデル化は、床版をシェル要素、上弦材・斜材はシェル要素と梁要素、下弦材は梁要素にてモデル化を行った。ここで、床版は面内曲げ剛度が等価となるようシェル要素の板厚に換算板厚を用いた。さらに、上弦材の上下フランジは剛度が等価な梁要素によりモデル化した。スタッドについては上弦材と床版が完全に剛結されているものとし、スタッド以外の床版と上弦材の接触面は鉛直方向の圧縮力のみを伝達可能なギャップ要素にて結合した。FEM離散化モデルを図-21に示す。

なお、載荷荷重は、図-20に示す3種類の荷重ケース

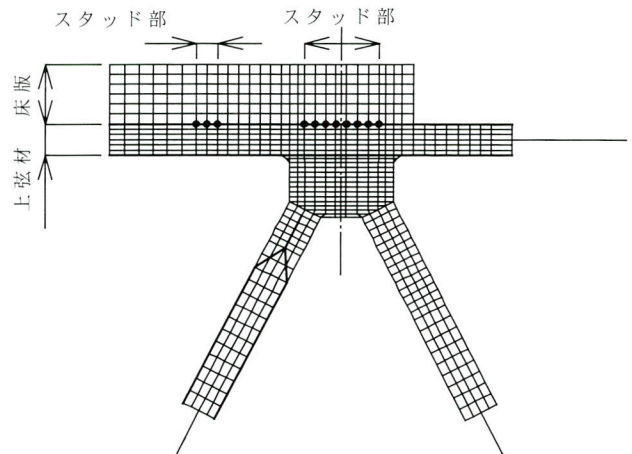


図-21 FEM解析離散化モデル図(格点部近傍)

とした。

3) 解析結果

①発生断面力

荷重ケース3(ベント撤去荷重)における床版および上弦材に関して、FEM解析結果における応力分布より算出した断面力と別途実施した骨組み解析による断面力を図-22に示す。

この結果より、斜材骨組み中心の結び点を上弦材断面図心とした場合(モデル1)の方が床版および上弦材の曲げモーメントは若干大きくなる傾向がある。また、骨組み解析結果とFEM解析結果はよく一致しており、骨組み解析の妥当性が検証された。

なお、荷重ケース1, 2についても同様の結果が得られている。

解析モデル	着目載荷状態	解析対象概要図	着目位置
5ハネルモデル	荷重ケース1 床版直上荷重	荷重ケース1, 2: $q = 5.0 \text{ tf/m}$ 床版+上弦材合成	ガセット1~2
	荷重ケース2 張出し荷重	荷重ケース1, 2	
中間支点モデル	荷重ケース3 ベント撤去荷重	荷重ケース3: $P = 100.0 \text{ tf}$ 床版+上弦材合成	ガセット1~3

図-20 解析対象の概要図

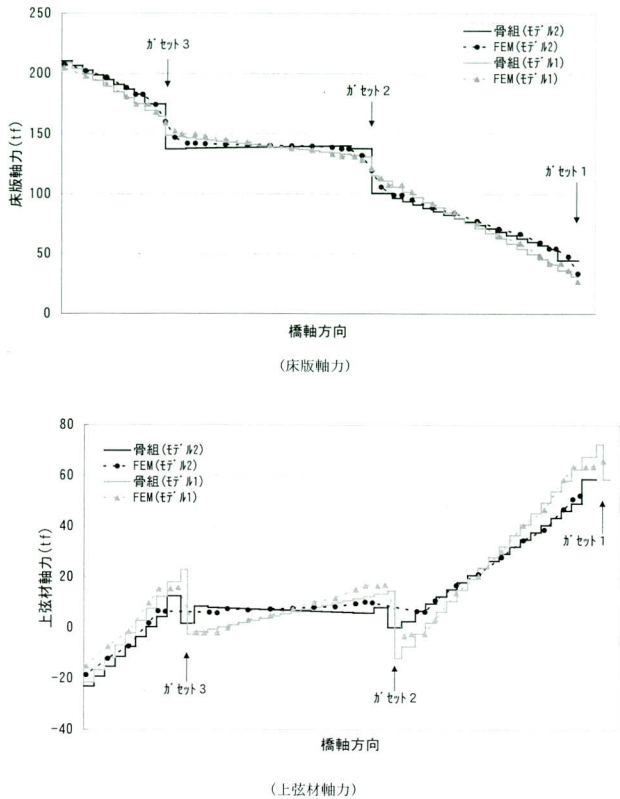


図-22 床版および上弦材の断面力

②スタッド作用力

解析結果より、スタッドに対して斜材骨組み中心の結び点を合成断面の図心とした場合（モデル2）は、上弦材断面の図心とした場合（モデル1）と比較して非常に大きな引張力が作用しており、せん断力も若干高めめの値を示している。

図-23に、代表的な荷重ケース3におけるスタッドに作用する軸力分布を示す。この結果より、モデル2はモデル1と比較して最大約8倍もの引張力がスタッドに作用しており、これは自身に作用するせん断力の1.7倍以上

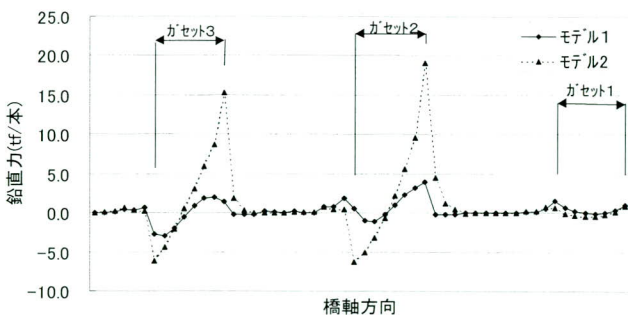


図-23 スタッドに作用する軸力

の値となっている。

③発生応力度

図-24にガセット2（図-20参照）近傍におけるモデル1とモデル2の荷重ケース3における主応力図を示す。この結果より、斜材骨組み中心の結び点を合成断面の図心としたモデル2での斜材軸力は床版内部で伝達されている。したがって、ガセット直上の床版下端において鉛直方向に大きな引張応力が発生しており、この傾向は他の荷重ケースにおいても同様にみられた。

なお、ガセット部鋼材のミーゼスの相当応力についても両モデルの比較検証を行い、モデル2で若干高い値を示したが両者に顕著な差異はみられなかった。

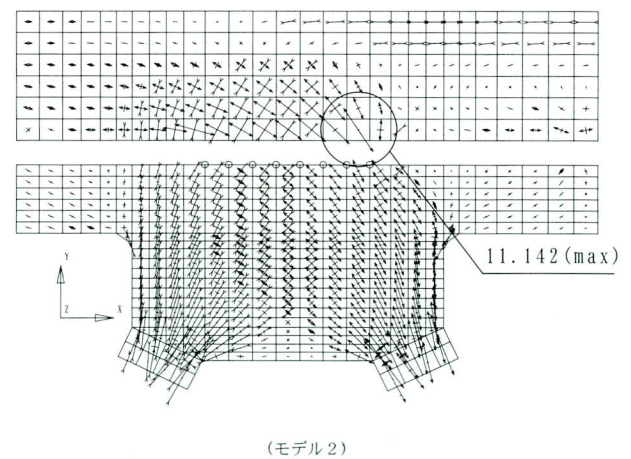
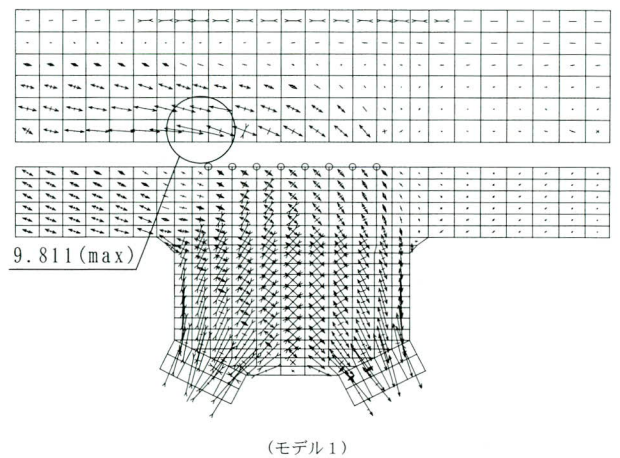


図-24 床版および上弦材の主応力図 (kgf/cm²)

4) まとめ

以上の解析結果より、以下に示す結論が得られた。

- ・各部材に発生する断面力は結び点を合成断面図心とした方が若干小さくなるが、この場合発生する引張応力度は局部的に大きくなる。

・骨組み解析による断面力は、FEM解析結果とよく一致しており、設計上十分な精度を有している。

・斜材骨組み中心結び点を合成断面の図心とした場合には、スタッドに大きな引張力が作用する。

スタッドは主としてせん断力に抵抗するものであり引張力が作用する状態での耐力低下が確認されていること、本橋では発生応力度に大きな差が認められないこと、スタッドの引張力が小さく格点部斜材軸力を床版にスタッドのせん断力として伝達可能なことなどから、斜材骨組み中心の結び点を上弦材図心とした。

(2) 立体モデルによるスタッドおよび床版の応力検討

1) 目的

本橋ではスタッドをグループ配置しておりかつ格点部のスタッドは使用本数が多いことから、作用せん断力の不均等が危惧された。また、上弦材と床版の軸心差による曲げモーメントによりスタッドに生ずる引張力についても検討が必要であると考えられたため、上弦材と床版の接合部載荷実験を実施し確認を行っている。しかし、実橋における様々な載荷状態や床版形状およびスタッド配置に対して実験を繰り返すことは困難なことから、実験結果の補間を目的に立体FEM解析によるさらなる検討を行い、実橋におけるスタッド設計に反映させるものとした。

また、PC床版に対して、剛性の低い上弦材により線支持されることによる橋軸直角方向の設計曲げモーメントおよび主構機能としての有効幅についても検証を行っ

た。

2) 着目対象および解析モデル

解析着目対象格点は、スタッド使用本数、床版形状、載荷状態を考慮して選定を行った。

解析モデル図-25に示すように、地震荷重等の横荷重の影響についても検討可能なように全橋を1/2の対象とした全体解析モデルと、着目格点近傍のみを詳細にモデル化した部分着目モデルとした。以下にモデル化の詳細を示す。

①全体解析モデル

着目格点とその近傍において、床版、上弦材、斜材をシェル要素により詳細にモデル化を行い、その他においては梁要素とした。なお、床版の中立軸と上弦材上フランジとの差を考慮して、剛梁要素を用いて両者を結合した。また、スタッドは剛梁要素下端においてバネ要素にてモデル化を行い、スタッド以外はギャップ要素にて結合した。

②部分着目モデル

着目格点部近傍のみを、接合部載荷実験により妥当性が検証された解析モデルと同様にモデル化し、①の全体モデルにより算出された境界荷重を載荷した。ここで、床版はソリッド要素、上弦材・斜材はシェル要素、スタッドは梁要素、床版上弦材上フランジの境界はギャップ要素にて詳細にモデル化を行った。

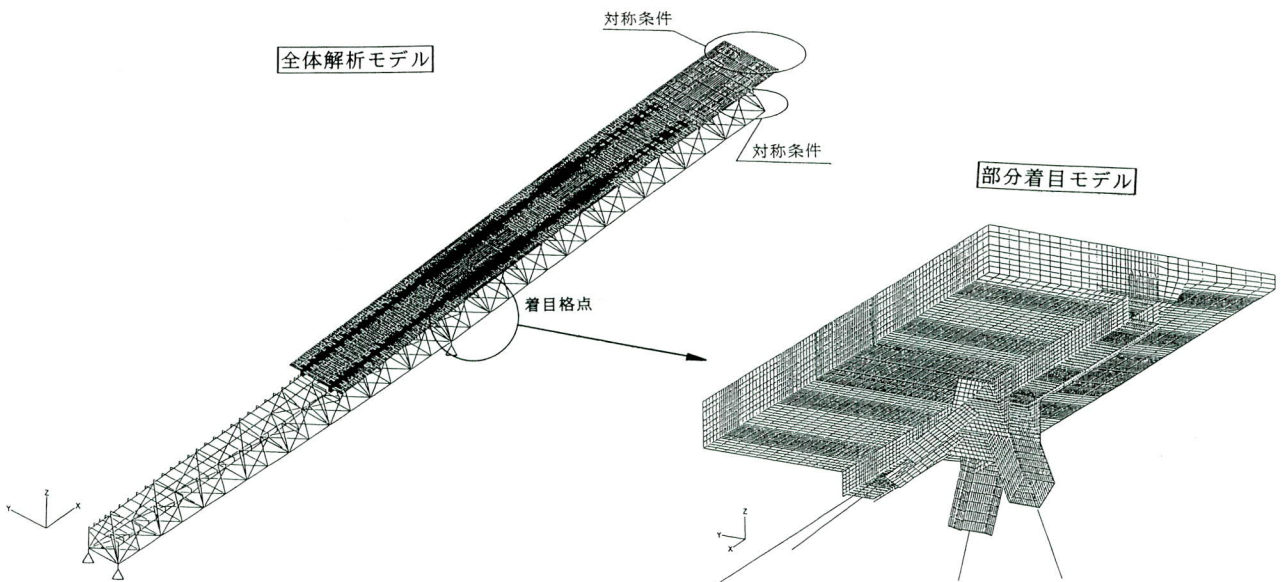


図-25 FEM解析離散化モデル図

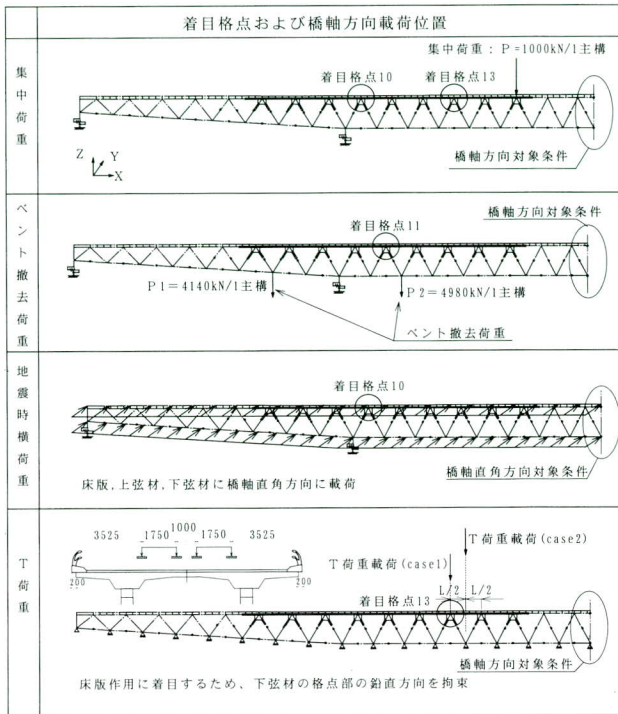


図-26 荷重荷重と着目格点

3) 荷重

荷重荷重状態と着目格点を図-26に示す。

4) 解析結果

解析結果より、PC床版の橋軸直角方向の設計曲げモーメントは道示Ⅱより算出される値以下となることが確認された。以下では、スタッドを対象に詳述するものとする。

①スタッドせん断力分布

部分着目モデルでのベント撤去荷重荷重状態における着目格点部のスタッドに作用する橋軸方向のせん断力分

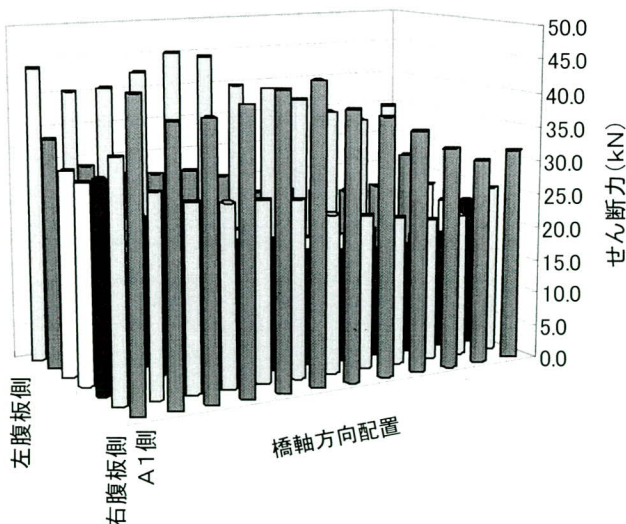


図-27 着目格点におけるスタッドせん断力分布

布を図-27に示す。さらに、各荷重状態における着目格点のスタッドに作用する橋軸方向せん断力（地震時横荷重のみ橋軸直角方向のせん断力）のFEM解析による最大値と平均値の比較を表-6に示す。また、同表に骨組み解析により算出された設計せん断力を示す。

この表より、ベント撤去荷重荷重時の着目格点11と地震時横荷重荷重時の着目格点10では、せん断力の（FEM最大値）／（骨組み解析設計値）の比が実験結果の1.2を越える値となっており、詳細設計に反映することにした。

表-6 スタッドせん断力のFEM解析結果 (N)

荷重ケース	着目格点	FEM解析結果			骨組み解析 ③設計値	比較 ①/③
		①最大値	②平均値	①/②		
集中荷重	格点10	9492	5396	1.76	7712	1.23
	格点13	21235	16463	1.29	24315	0.87
ベント撤去	格点11	45152	27055	1.67	34239	1.32
地震時横荷重	格点10	24766	15024	1.65	16971	1.46

②スタッドの引張力

部分着目モデルでの各荷重状態における着目格点部のスタッドに作用する軸力のFEM解析結果を表-7に示す。この表より、ベント撤去荷重荷重時の着目格点11および地震時横荷重荷重時の着目格点10において、最大せん断力に対して10%を越える引張力が生じていることが判る。よって設計ではこの引張力の影響を考慮するものとした。なお、T荷重荷重により生じるスタッド引張力は許容引張力の0.3%以下と非常に小さいため無視した。

表-7 スタッド軸力のFEM解析結果

荷重ケース	着目格点	軸力(N)				比率 ④/①
		①最大せん断力(N)	②最大値	③最小値	④絶対最大値	
集中荷重	格点10	9492	1114	-944	1114	0.12
	格点13	21235	3121	-40	3121	0.15
ベント撤去	格点11	45152	23432	-1106	23432	0.52
地震時横荷重	格点10	24766	47596	-4258	47596	1.92

③スタッド高の床版内部応力に対する影響

図-28にスタッド引張力が大きいベント撤去荷重荷重時におけるスタッド最大引張力発生位置での主応力図を示す。この図より今回適用したスタッド高500mmでは、スタッドの引張力による影響はせん断力により応力が卓

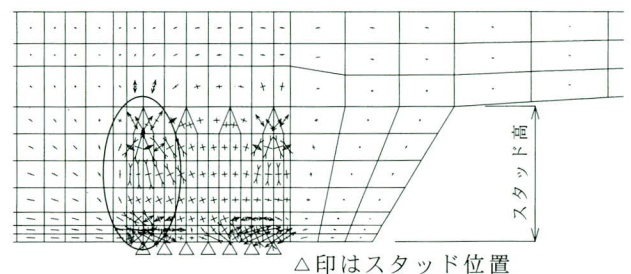


図-28 スタッド最大引張力発生位置での主応力図

越する領域には達しておらず、適切な高さであったと考えられる。

5) まとめ

以上の解析結果より、以下に示す結論が得られた。

- ・ PC床版の橋軸直角方向の設計曲げモーメントは、道示Ⅱによる値が適用可能である。
- ・ 格点部の各スタッドの分担せん断力は均等ではないが、(FEM解析の最大値) / (骨組み解析による設計値) の比は、ベント撤去荷重載荷時および地震時横荷重載荷時を除き、別途実施した格点部載荷実験による比率である1.2以下であった。
- ・ ベント撤去荷重載荷時における着目格点11および地震時横荷重載荷時における着目格点10においては、各スタッドせん断力の不均等および引張力の影響が大きいため、本解析結果を設計に反映するものとした。
- ・ スタッド高を500mm確保することは、スタッド軸力の影響が床版内部のスタッドせん断力による応力の卓越した領域に及ばないため有効であった。

6. あとがき

現在、椿原橋は平成14年7月の竣工に向けて張出し架設の進行中である。本橋は世界遺産に登録された「白川村、荻町伝統的建造物群保存地区」合掌集落の近傍に位置するため、完成後は多くの人々にその姿を見せてくれるはずである。

最後に、本橋の設計・施工にあたりご指導を賜りました日本道路公団中部支社および清見工事事務所の方々をはじめ、JV構成会社の住友建設の方々に対し深く感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 永谷, 坂根, 能登, 太田: 複合トラス橋のトラス上弦材と場所打ちPC床版の接合部に関する載荷実験, 宮地技報, No.17(2001)
 - 2) 阿部英彦, 中島章典: 合成トラスおよびアーチ橋の実験的研究, 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集1989.9
 - 3) 三輪寛, 長澤徹, 依田照彦, 鈴木俊光, 熊谷洋司: ガセットプレートとスタッドを用いた複合トラス橋の格点構造に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1475~1484, 1998.3
 - 4) 大谷恭弘: アンカー材としてスタッドを用いた場合の強度・変形評価, 頭付きスタッドの押し抜き試験方法の標準化(案) 研究報告会講習会資料, 1996.11
 - 5) 水口和之, 小松秀樹, 松野進, 小野辺良一, 倉田幸宏: プレキャストPC床版用スタッドの強度特性に関する解析的検討—員弁川橋—, 土木学会第54回年次学術講演会, I-A155, pp.310~311, 1999.3
 - 6) 水口和之, 小松秀樹, 小野辺良一, 宮地崇, 松野進: プレキャストPC床版用スタッドの強度特性に関する実験的検討—員弁川橋—, 土木学会第54回年次学術講演会, I-A156, pp.312~313, 1999.3
 - 7) 石川島播磨重工(株), 日立造船(株)員弁川橋(鋼上部工) 工事共同企業体: 第二名神高速道路 員弁川橋(鋼上部工) 工事 スタッドせん断耐力試験報告書, 日本道路公団 名古屋建設局 四日市工事事務所, 1999.11
- 2001.11.27 受付

グラビア写真説明

椿原橋(鋼上部工)工事

椿原橋は、トラス上弦材とPC床版とを合成しPC床版に主構としての機能を持たせた複合トラス橋で、床版2方向にPC鋼材を配置することにより床版の剛性・耐力を高め、従来のトラス橋にある上横構や床組構造を省略した合理化トラス橋です。

現場は岐阜県と富山県の県境で、世界文化遺産の「白川村、荻町伝統的建造物群保存地区」合掌集落の近傍に位置しています。(合掌造りの建物は必見です。)深い山あいの豪雪地帯ですから、現場工事は冬季休止期間(12月1日~4月15日まで)が設けられておりますが、実質的な現場作業期間が短くなってしまふことから、工期に間に合うよう急ピッチで作業を進めています。

(菊地)