

プレストレッシングを用いた構造設計2題

川口 衛*

序

プレストレッシングの技法は、現在、プレストレストコンクリートの形で最も広く用いられているが、コンクリート以外にも、多様な適用が可能であり、プレストレッシングのもつ利点を上手に引き出すことによって、いろいろと興味ある設計を試みることができる。たとえば、建築の大スパン屋根構造によく用いられるケーブルネット構造では、一般に屋根面を形成する吊りケーブルと、これと逆の曲率をもつ押さえケーブルとを相互に緊張させることによって、両者にプレストレスを導入し、外力による圧縮応力にも抵抗させるとともに、ケーブルの曲率変化を減少させるという効果を狙った設計が行われる。

また、ケーブルドームと呼ばれる屋根構造では、部材の抵抗機能を引張りと圧縮にはっきりと分離（アーティキュレイション）する、いわゆるテンセグリティ構造が用いられ、各部材にプレストレスを導入することにより、屋根の軽量化と軽快な造形演出がはかれる。1996年に米国アトランタで開催されるオリンピックの屋内主競技場「ジョージアドーム」は、このような原理に基づいて設計されている。

筆者もプレストレッシングをいろいろな形態で用いた設計を行ってきたが、ここでは最近竣工した構造の中から、コンクリート以外のプレストレッシングを用いた作品例2題をとりあげてその概要を示し、読者の参考

にしたいと思う。

1. アーティキュレーションによる部材の馴化 —栃木県グリーンスタジアムの例—

1.1 建築的背景

栃木県グリーンスタジアムの敷地は工業団地地域内に位置し、三方は小高い雑木林に囲まれ、東から西に緩やかに下がっている。西側の低部には水田が広がり、視覚的に開かれている。現況地形や恵まれた自然をテーマとして、周辺風景と建築の関わり方をいかに計画すべきかという観点から全体計画が進められた。

設計プロセスの中で、大きな面積を占めるグラウンドコートは、でき得る限り、西側の低部に配し、緑に囲まれたコートとして、そしてメインスタンド席や施設部門は、周辺風景との調和の中に、たたずむかたちをデザインすることが、全体構成のコンセプトであった。

表-1 栃木県グリーンスタジアム諸元

名称	栃木県グリーンスタジアム
所在地	栃木県宇都宮市清原工業団地 32 番
建築主	宇都宮市地域開発組合
用途	サッカー専用スタジアム
設計監理	
構造	川口衛構造設計事務所 担当/山崎亨, 伊原雅之, 永田秀正
建築	神谷五男+都市環境設計
施工	
建築	佐藤・渡辺・柴田 JV プレキャストコンクリート部; 梁, 段床/オリエンタル建設(株) PC 段床/(株)ピー・エス
規模	
敷地面積	93 820.45 m ²
建築面積	4 693.84 m ²
延床面積	6 466.38 m ²
階数	地下1階, 地上3階
最高高さ	18.1 m
期間	
設計期間	1990. 6-1991. 3
施工期間	1991. 7-1993. 3
構造	
基礎	杭基礎-PHC 杭 500, 600 φ
主体構造	鉄筋コンクリート造
一部構造	プレキャストコンクリート造 (スタンド), 鉄骨造 (屋根)
工事費	
建築	21.03 億円



* Mamoru KAWAGUCHI
法政大学 工学部 教授

4カ所に分岐したアプローチデッキは、隣接の自然公園中の遊歩道の一環として考えた。メインスタンドを覆う屋根は、具体的なかたちを避け、透明で、軽快、浮遊感のある抽象的なモチーフとして、またそれらを支える柱はハイテクなかたちでありながらも、残された雑木林の連続をリズムカルに表現している。波状型の屋根材には、透明度の高いポリカーボネート材、目透かし状に集成材小幅板が使われている。

1.2 構造設計

このスタジアムの構造設計上のテーマとして、

- ① 構造部材のアーティキュレーション
- ② スタンド部材のプレファブ化

を追求することとした。

第1のテーマはアーキテクトの「ふわっとした感じの、浮雲のような屋根」という願望を実現するために、追求する価値があると考えた。具体的には、屋根を支持する構造システムを純粋な圧縮・引張を負担する部材で構成し、部材相互の接合をヒンジにすることにより、これらの構造機能の分化がより一層明確になるとともに、構造部材の断面が小さくなり、視覚的に自己主張の少ない支持構造が可能になる。

引張部材としては、スチールロッド（材質 SS 400、



写真-1 「浮かぶ」屋根



写真-2 前方より屋根を見上げる

直径 32～52 mm) を用いた。引張材にワイヤロープ（ケーブル）を使用することも併せて検討したが、主として経済的見地から採用しないことにした。ワイヤロープ自体は決して高価な材料ではないが、端部の接合金具に予想外の費用がかかる。したがって、長いケーブルを設計する場合にはワイヤロープのメリットがあるが、本設計のように短いテンション材を数多く使用する場合はロッドを用いるほうが合理的であり、経済的でもある。

接合部の設計では、できるだけ力の流れに忠実で無駄のないディテールになるように努めた。

柱には、プレストレストコンクリート既成杭を用いた。建築の柱に杭を用いたのは、おそらく世界ではじめての試みであろうと思うが、杭は元来、圧縮力に抵抗することを第一義につくられているので、今回のように柱の構造機能を圧縮力のみで明確に規定している場合には、まさにうってつけの材料である。さらに PC 杭は良好な品質管理の下で大量に生産されているプレファブ部材で、遠心力工法により製造されるコンクリートの表面は微細で、表面処理なしに十分鑑賞に耐える肌面をもっている。筆者は、このようにきれいな肌をもつ既成杭が、地中の部材としてしか使われていないのを、以前から惜しいことだと思い、陽の当たる場所での使用の機会を待っていたわけである。

上部スタンドのほかの部材も、すべてプレファブ部材としたが、これによってスタンド上げ裏を含むすべての部材を、裏面としての陰鬱な印象を伴わずに表現できたのではないかと考えている。

柱と上部スタンドとを有機的に構成することで、全体として安定な構造システムがつくられているが、この際、前記既成杭による部材は、スタンド梁材と一見接合されているように見えるが、実は全く接触していない（図-3 参照）。これは杭のもつ特性をできるだけ素直な形で使いたかったからであるが、形の上では、日本の伝統的木塔における心柱と側構造の関係（『建築士』9306 拙稿「建築構造空間と構造フォルム」（6）参照）に近いものとなっている。

1.3 構造概要

上部スタンドは、25本の PHC 杭の柱とプレキャストコンクリート（PC）の大梁より成り立ち、それぞれをタイロッドにより接合している。PC 大梁には、PC 床版が渡され、これを客席としている。

柱と柱の間は、鉛直ブレースが配置され、H 形鋼の曲げ剛性を利用して偏心ブレースとし、それぞれ柱のユニットが手を繋いだような架構を構成している。

客席の荷重は、前方の現場打ちコンクリートの柱と、後方の PHC 柱で支持する。客席を直接支える PC 大梁は、タイロッドにより吊り上げられ、PHC 杭柱を押さ

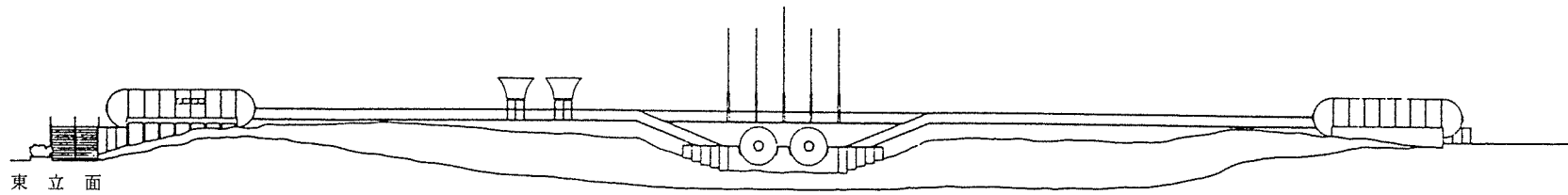
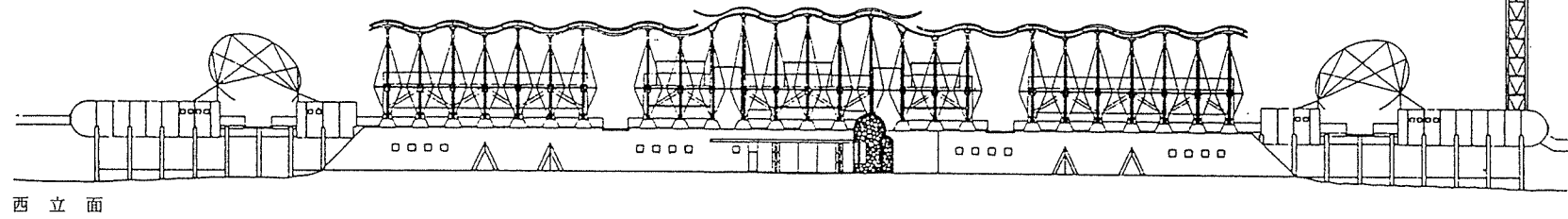
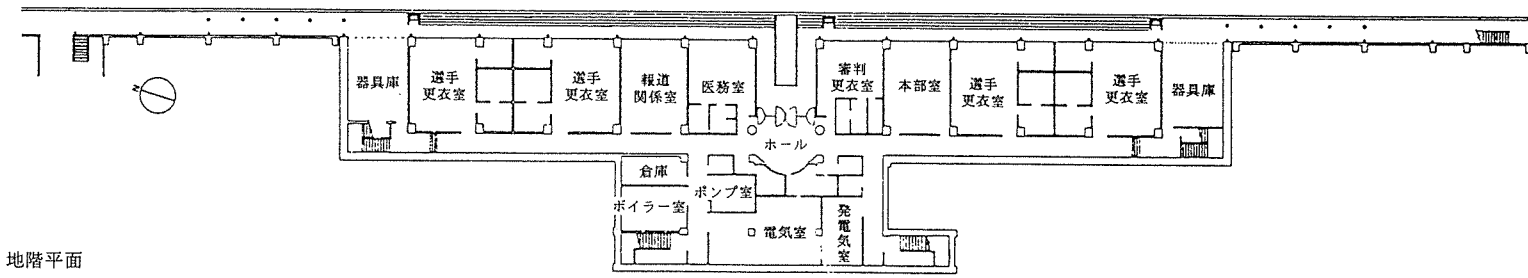
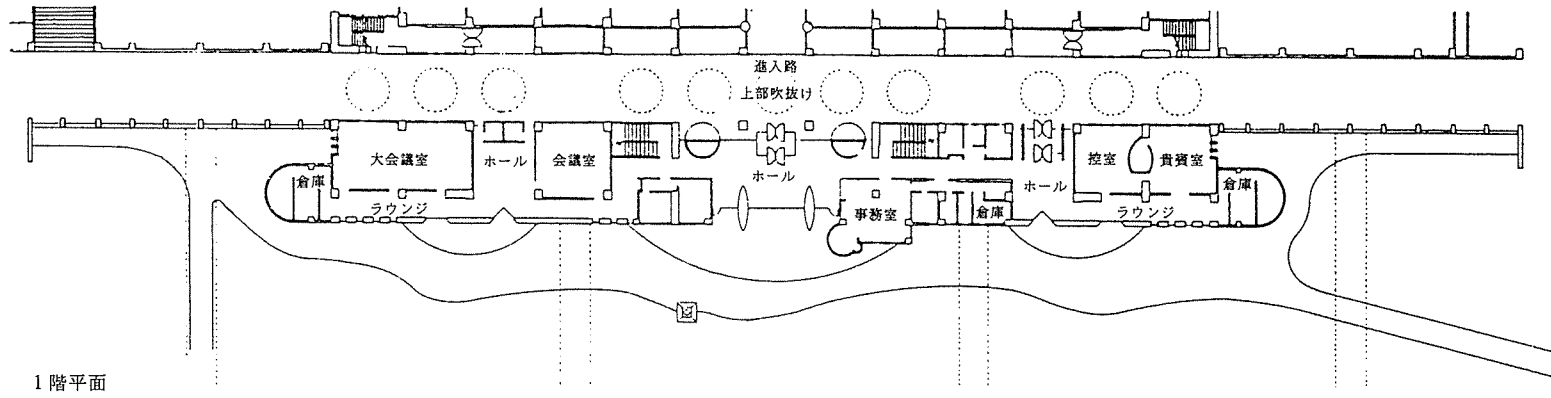


図-1 平面図および立面図

え付けるように荷重を柱に伝える。さらにタイロッドに生じる引張力は、スタンドレベルで、柱をつつみ込むように伸びる PC 大梁の先端のエンドキャップを押さえ付け、PC 大梁を通してスタンドレベルから下部に力を伝達し釣合いがとれる。

このような力の流れ（図-2）は、軸力を主体としており、各部材はそれぞれの断面性能を最大限発揮できる。さらに、PHC 柱と PC 大梁は、それぞれの役割を果たしながらも接合する必要がなく、柱に曲げモーメントが全く生じない架構を形成し、柱の断面をさらに小さくすることを可能にした。

また、PHC 杭柱とタイロッドの接合は、ガセットプレートと溶接した鋼管を柱脚と柱頭に据え付け、タイロッドに張力を働かせることによりメタルタッチの接合とした。このため、杭材そのものは特殊な加工を必要と

せず、標準仕様品の使用を可能にしている。

スタンド面は、PC 床版だけでは面内剛性が不足しているため、PC ブレースを配置した。PC ブレースは、デザイン上の要求により変断面をしており大梁の横腹にくいこむように取り付けている。接合方法は、建方時の精度調整がしやすいように PC 鋼棒による摩擦接合としている。PC 鋼棒は、軸力導入後グラウトされ、ナット部分は防錆キャップにより保護される。タイロッドやその他の取付け金物は、溶融亜鉛メッキにより防錆処理をしている。

屋根の大梁は、耐候性鋼板の組立て変断面 H 形鋼とし、風圧によるあおりをタイロッドにより押さええている。

屋根はこの大梁から伸びる V 字形の束により支持され、屋根の軽さを強調している。

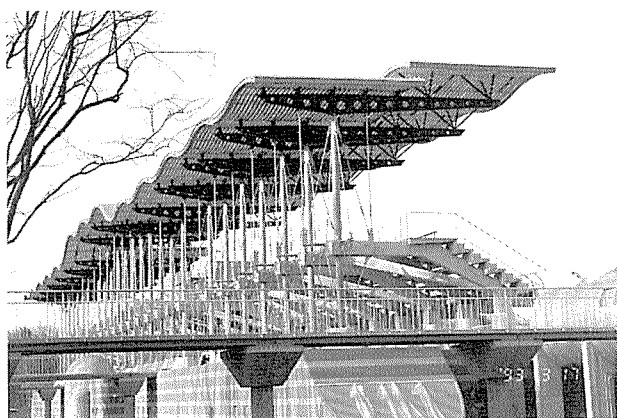


写真-3 架構全景

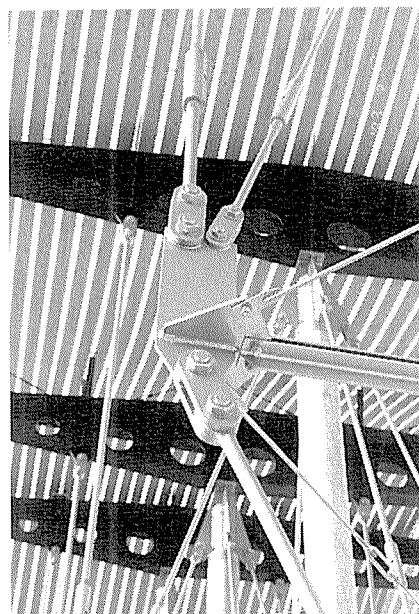


写真-5 ジョイントの詳細

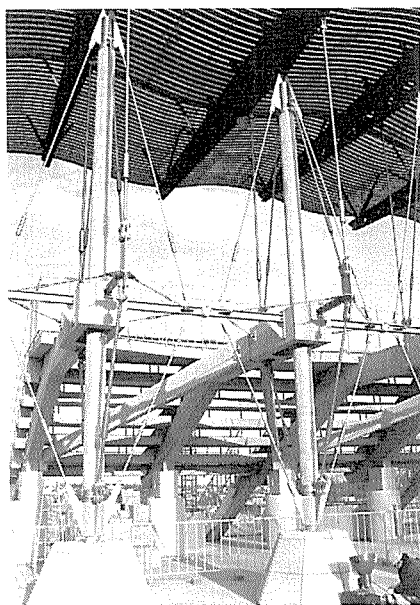


写真-4 架構のしくみ

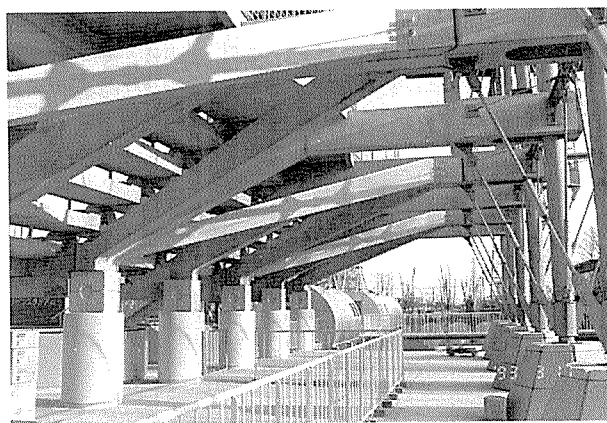


写真-6 スタンド骨組

2. 「一枚岩」の橋

—別府イナコスの橋の例—

2.1 設計の背景

別府市の西部に南立石公園という美しい公園がある。公園の北側を西から東に流れる境川をはさんで12 m 道路が走っている。この道路から境川をまたいで南立石公園に入る、スパン約35 mの歩道橋を設計するよう別府市から依頼があったのは、2年前のことである。境川は、別府の他の川と同様、急勾配の川底を段状に整形し、遊歩道風に整備されつつある。

架橋地点は、西に鶴見岳、東に別府湾を望むことのできる、美しい場所である。

筆者は、この場所の雰囲気、にふさわしい、美しい橋をつくりたいと考えた。近年、土木の分野でも、橋の景観を重要視する傾向がみられるが、高欄のデザインや、仕上げ材、装飾の付加などによって造型美を求めようとする風潮が強いように見受けられる。筆者はできればこのようなアプローチではなく、橋そのものの形となりたちが、その地域の必然性や周囲の景観にマッチするよう

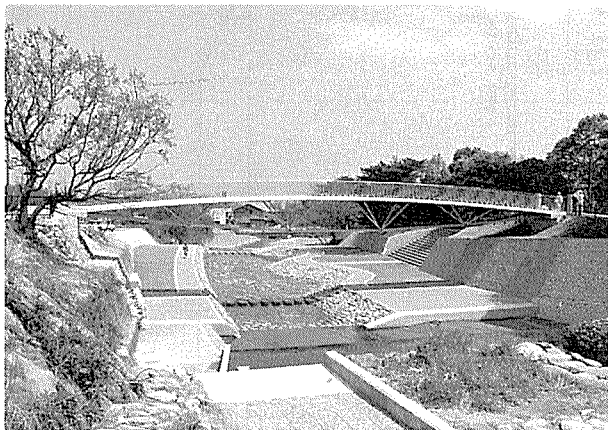


写真-7 全 景

表-2 イナコスの橋諸元

名 称	イナコスの橋
所 在 地	大分県別府市大字鶴見字鶴見原
建 築 主	別府市
用 途	歩道橋
設計監理	
設 計	川口衛構造設計事務所 担当/伊原雅之
設計協力	永瀬克己 新構造技術株式会社
施 工	前田建設工業株式会社
規 模	
橋 長	35.74 m
幅 員	2.0~2.9 m
期 間	
設計期間	1992. 12-1993. 5
施工期間	1993. 11-1994. 3
構 造	サスペンダー式不完全トラス構造
工 事 費	7 590 万円

な、そんな橋をつくってみたいと思った。

別府市の中村太郎市長や建設部の人たちと話を進めていく過程で、筆者は別府市が中国の山東半島の烟台市と姉妹都市の関係にあること、烟台では良質の花崗岩（みかげ石）が産出し、別府市ではこの石材を輸入して歩道の敷石などに使用していることを知った。

2.2 設計理念

早速、施工中、および竣工後の烟台産花崗岩の敷石の現場を見せてもらい、石のサンプルを実験室に持ち帰って、試験機にかけてみた。その結果、この石の比重は2.6、強さはコンクリートの約4倍(1 300 kgf/cm²)、ヤング係数はコンクリートの約1.5倍(3.0×10⁵ kgf/cm²)と、非常にすぐれた材料であることがわかった。

筆者は、この良質の石を用いて、橋をつくってみたい願望に駆られた。それも、仕上げ材としての石ではなく、本物の花崗岩の橋、つまり、構造体としての石をじかに踏んで歩くような、そんな橋をである。しかし、いくら石の圧縮強度が大きいからといっても、引張強度の方はその1/10程度しかなく、しかも不安定であるから、そのまま桁（建築用語では梁）の形で用いるわけにはいかない。石は圧縮応力が卓越するような状態で用いたい。そこで、近年、筆者が好んで用いている不完全トラスの上弦材に、この石材を使用することにした。

橋のプロフィールはレンズ形とし、下弦材にはフラットバー、ラチス材には鋼管を用いる。上弦材で、同時に床板の機能をも果たす石材の平面は、造型上の判断から、バチ形とした。

石は厚さ25 cm、幅40 cmの枕木状のものを敷き並べ、石材を貫通して橋軸方向に走る5本のPCケーブルを緊張することによって、「一枚岩」になるようにし

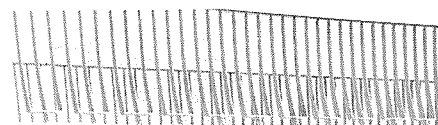


写真-8

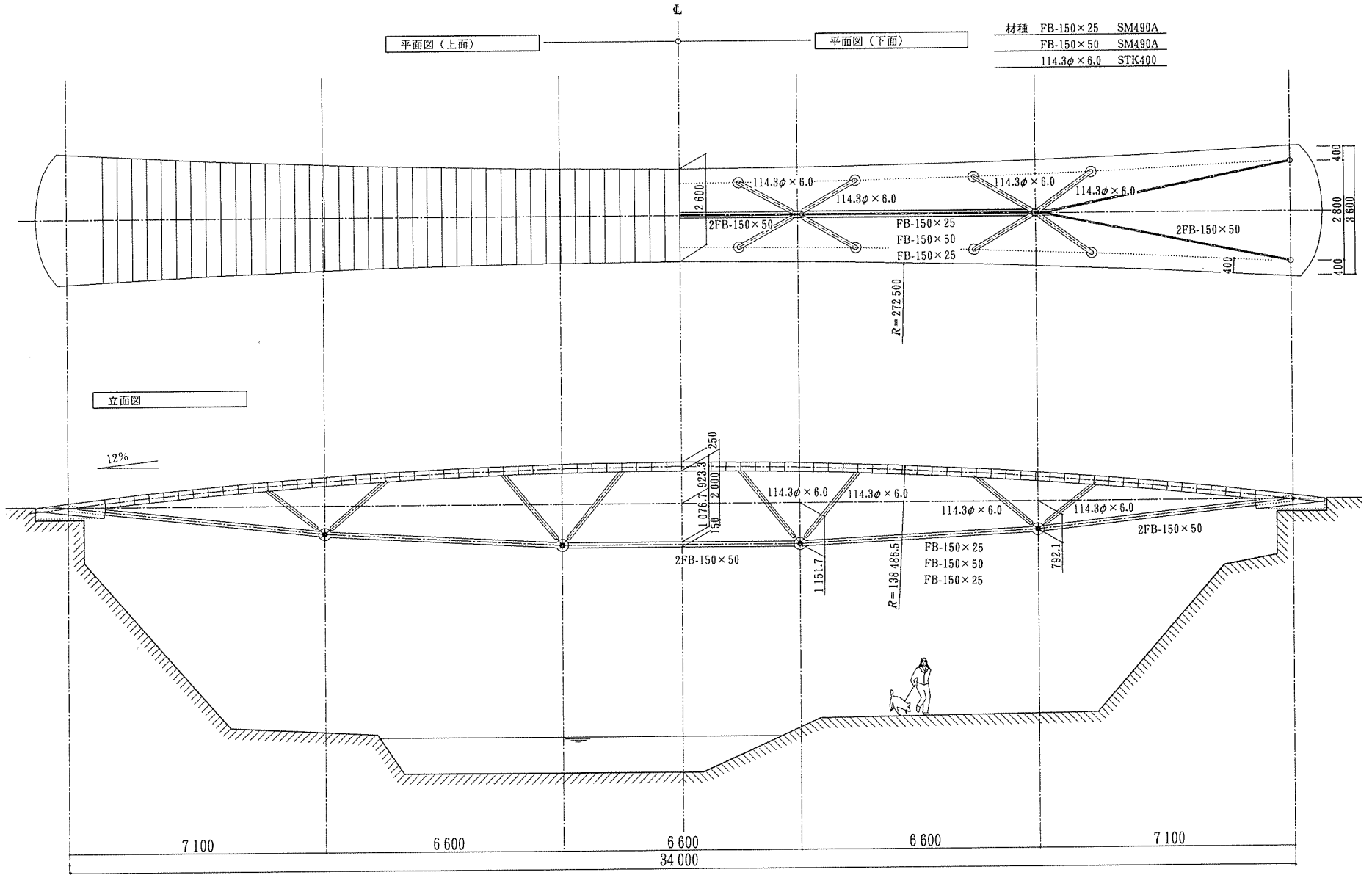


図-4 平面図および立面図

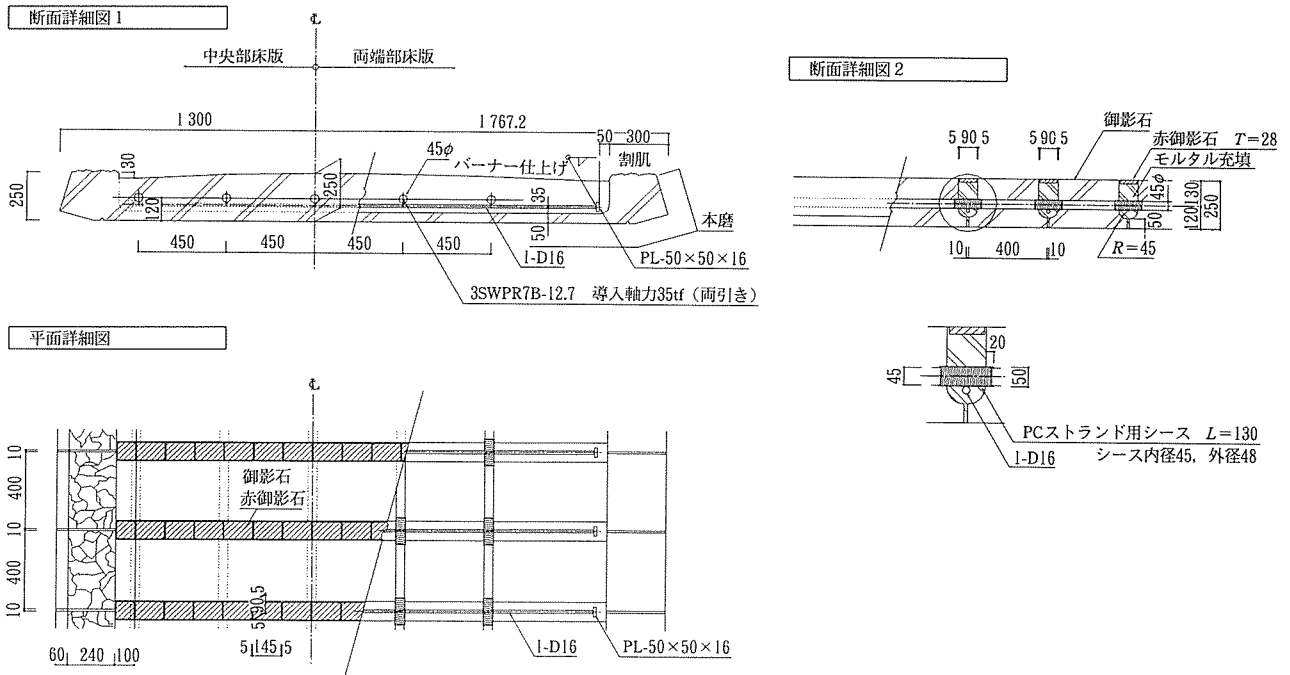


図-5 床版詳細図

た。石には、上弦材としての圧縮力と、プレストレッシングによる圧縮力が加わって、あらゆる荷重条件下で引張応力が生じないようになる。石は橋幅方向には通常状態では無応力であるが、自然材料であることを考慮して、目地位置に鉄筋を配置する。このような橋の構成を、できるだけ素直に表現するために、高欄はシンプルで、自己主張の少ないデザインにする。

フラットバーによる下弦材には、4個所のヒンジが設けられている。この位置に陶板の「釘かくし」をつけた。これが、この橋に付加した唯一の装飾であるが、陶芸作家 桜井基就氏の手になるもので、朝陽、夕陽を受けて、この釘かくしが深い色合いの光を放ってくれることを期待している。なお、この橋は、別府市民からの愛称募集の結果、イナコス (INACHUS—ギリシャ神話の中の川の神) の橋と命名された。

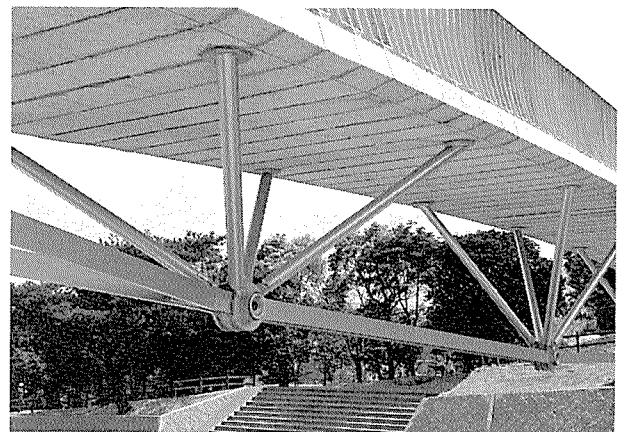


写真-10

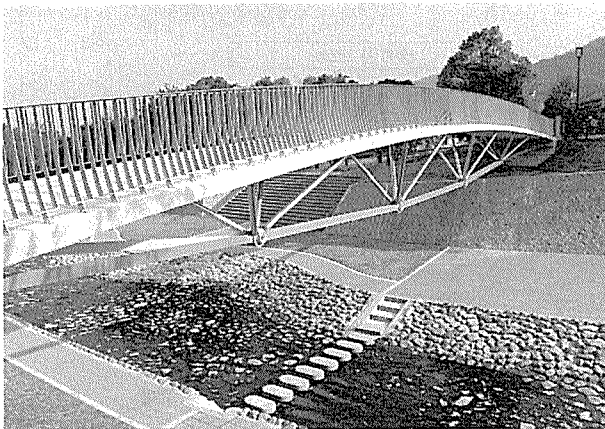


写真-9

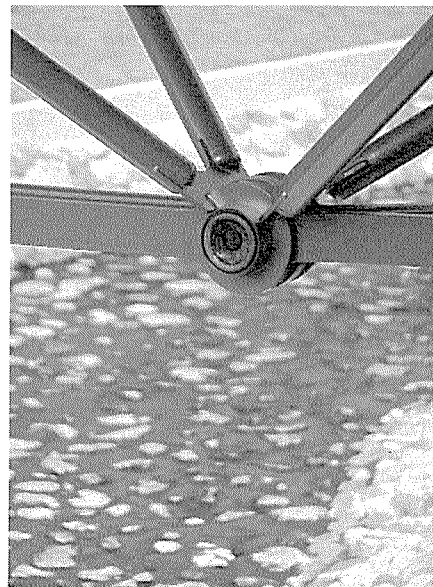


写真-11 「釘かくし」をつけたヒンジ部

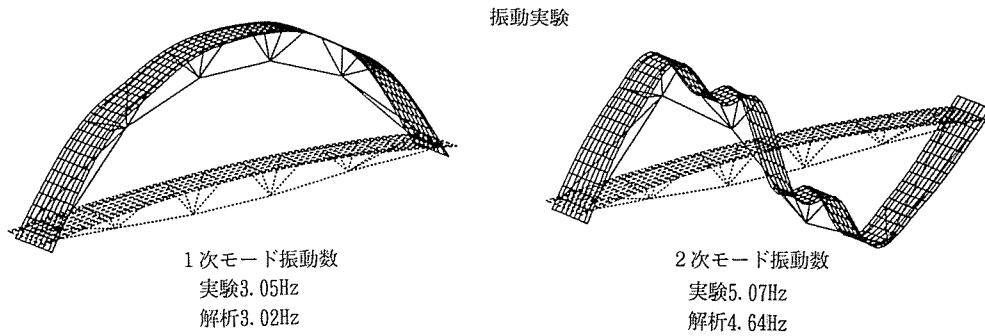


図-8 実 験

2.3 構造概要

この歩道橋を特徴づける構造形式のうち、ラチス材を1つおきに間引いてできる不完全トラスは通常のトラス構造に比べて上弦材にやや大きな曲げモーメントが生じるが、前に述べたように石材にプレストレスをかけることにより石の断面内に引張力を生じないようにすることができる。

もう一つは、鉛直荷重作用下において上弦材（石材）両端部に生じるスラストを下弦材の引張力でキャンセルさせる自己釣合い系の構造形式で、このサスペンアーチ構造 (suspension+arch) により下部構造への負担を軽減することができる。

プレストレスの導入軸力量は、自重 625 kgf/cm^2 、

積載荷重 500 kgf/cm^2 の等分布、偏在荷重の組み合わせにおいて常に石版の縁応力が圧縮となるように一本当り 35 ton 、全体で 175 ton とした。なお石版の最大縁応力は圧縮 100 kgf/cm^2 程度である（図-7）。

2.4 実 験

構造体の完成後、載荷試験および固有周期の測定を行った。

載荷試験は1体 20 kg のセメント袋を荷重として用意し、最大 12.3 ton の載荷を行った。

また振動実験は石版上4箇所に取り付けられた加速度計により1次および2次のモードの振動数を測定した。

実験結果より、この歩道橋が解析値の挙動とほぼ一致することが確認できた（図-8）。