

北陸新幹線屋代橋梁の設計と施工

梅原 俊夫*1・剣持 三平*2・湯山 和利*3・田島 和之*4

はじめに

北陸新幹線（高崎～長野）は、1997年秋の完成に向けて建設も終盤を迎えている。北陸新幹線屋代橋梁は、長野駅から約10km高崎よりに位置し、国道18号、長野自動車道更埴インターチェンジをまたぐ4径間連続PC斜張橋の屋代南橋梁、長野自動車道本線をまたぐ3径間連続PC斜張橋の屋代北橋梁で構成されている（図-1）。

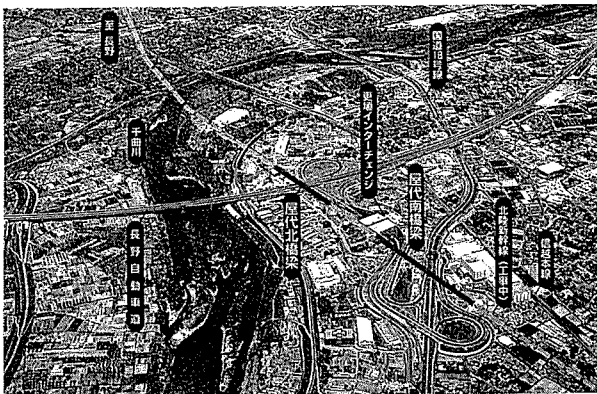


図-1 工事位置図

屋代南北橋梁は平成5年11月着手し、平成8年2月主桁が閉合し土木工事は完了している。現在は、軌道、電気工事が最終段階を迎えている。

両橋梁の特徴は、

- ① 斜材は主として橋軸方向にプレストレスを導入するための鋼材である
- ② このため、従来の斜張橋に比べ主塔が低くできるので斜材、主塔の保守管理が容易である
- ③ 斜材が主塔部を貫通して固定する貫通固定システムを採用
- ④ 斜材の主塔への定着部は万一の取替えに備えた2重管構造を採用

また施工面では、

- ⑤ 主塔の貫通固定部を施工性、安全性向上のためプレキャスト化
- ⑥ 桁の張出し施工が道路のため、架設に使用した作業車が閉合後に橋脚部に後退して解体できる後退装置の開発などがある。

1. 工事概要

本橋の工事概要・主要材料を表-1, 2に示す。

表-1 工事概要

	屋代南橋梁	屋代北橋梁
工事名	北幹、屋代BL他3	
工事場所	長野県更埴市屋代地内	
構造形式	4径間連続PC斜張橋	3径間連続PC斜張橋
橋長(m)	340	200
支間割	65+105+105+65	55+90+55
軌道線形	直線	緩和曲線 R=20470 m
縦断勾配	+3‰~+5‰	+5‰~+11‰
主塔	H型, h=12.0 m	H型, h=10.0 m
斜材	ファン型, 2面吊り, 7段	ファン型, 2面吊り, 6段

表-2 工事主要数量

種別	仕様	単位	南橋梁	北橋梁	
主桁	コンクリート	$\sigma_{ck}=400 \text{ kgf/cm}^2$	m ³	4 190	2 502
	PC鋼材	12 T 15.2 SWPR 7 B	tf	220	113
	鉄筋	SD-345	tf	1 030	560
主塔	コンクリート	$\sigma_{ck}=400 \text{ kgf/cm}^2$	m ³	190	105
	鉄筋継手	SD-345 (スリーブ)	箇所	240	160
斜材	19 T 15.2 SBPR 7 B	tf	59.6	31.6	

2. 設計概要

2.1 形式の選定

支間割りの制約は、南橋梁では更埴インターチェンジ・国道18号との交差に伴い、インターチェンジ内に橋脚を設置することとし2×105mの-span割とした。北

*1 Toshio UMEHARA : 日本鉄道建設公団 設計技術室 調査役

*2 Sanpei KENMOCHI : 日本鉄道建設公団 北陸新幹線建設局 次長

*3 Kazutoshi YUYAMA : 日本鉄道建設公団 北陸新幹線建設局戸倉鉄道建設所 所長

*4 Kazuyuki TAJIMA : (前) 銭高・大豊・守谷共同企業体 北陸新幹線屋代作業所 所長

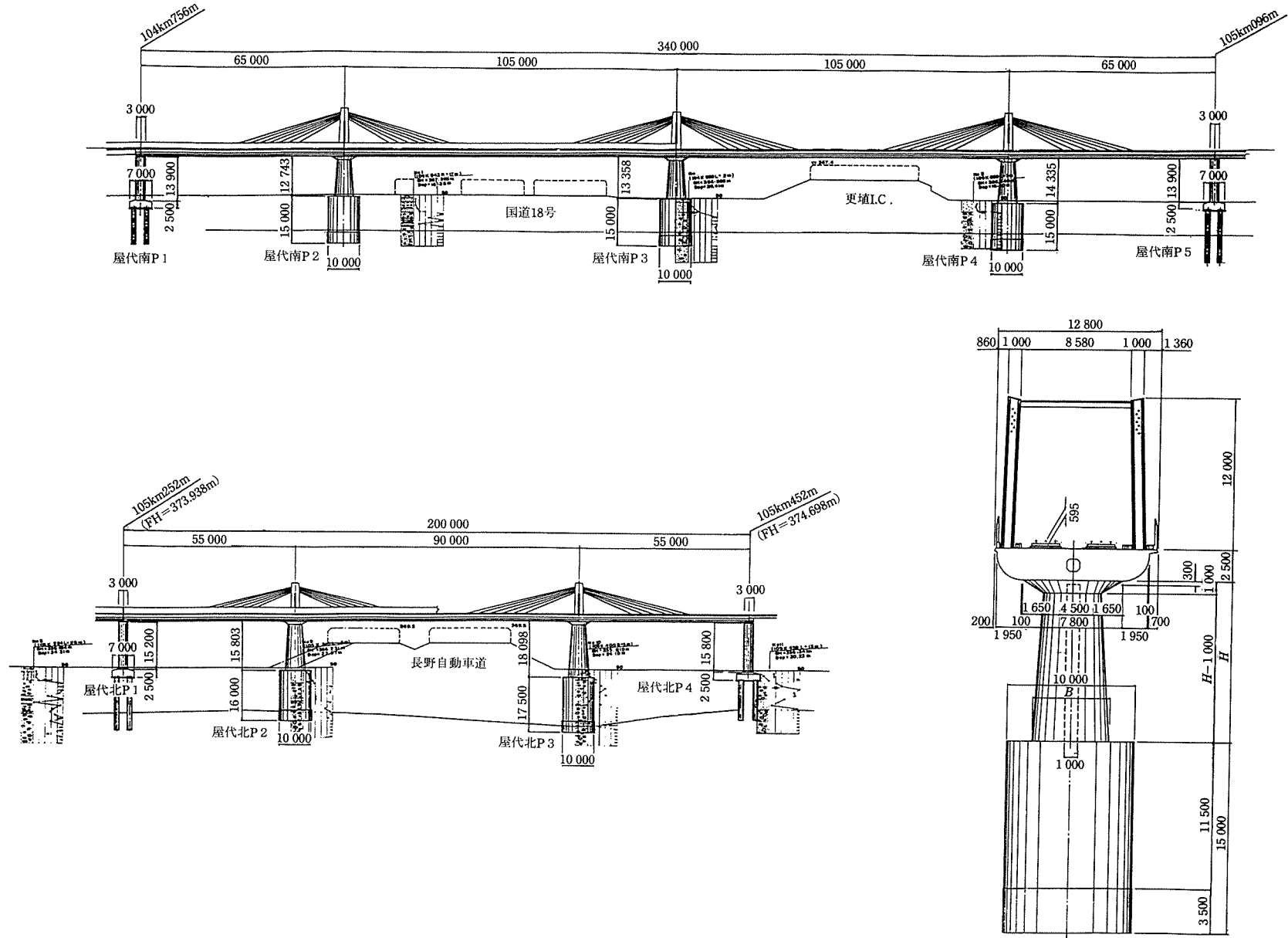


图-2 屋代桥梁构造一般图

◇工事報告◇

橋梁は長野自動車道本線・Aランプを同時にまたぐ必要があり90mとした。また、当橋梁の前後は数キロメートルにわたり高架区間となっており、長野自動車道が縦断決定上のコントロールポイントとなっているため、本橋の桁高が前後の高架区間の高さを決めることになる。

このため、形式選定にあたっては施工性、桁高を低く抑えて前後の高架区間の高さをできるだけ低くするなど前後の高架区間の建設費を含めた経済性、高速道路や国道をまたぐ市街地の構造物であるため景観への配慮などの観点から、最終的に次の3案（カッコ内は北橋梁）を対象に検討した。

- 案-1 連続ラーメン箱桁橋 PC 4 径間 (PC 3 径間)
 - 案-2 連続斜版桁橋 PC 4 径間 (PC 3 径間)
 - 案-3 エクストラドーズド橋 PC 4 径間 (PC 3 径間)
- この結果、案-3 が選定された (図-2)。

2.2 地 質

架橋地点の地形は千曲川によって形成された自然堤防地帯にあたり、比較的良好な地盤となっている。橋梁の支持層としては反力が大きなことから地表より10m以下の砂礫層 (N 値 50 以上) とした。

表-3 材料の設計値

・コンクリートの設計強度

(単位: kgf/cm²)

	設計基準強度 $f_{ck}=400 \text{ kgf/cm}^2$	
	$\gamma_c=1.3$	$\gamma_c=1.0$
設計圧縮強度	308	400
設計曲げ強度	38	49
設計引張強度	21	27
設計付着強度	25	33

・鉄筋の設計強度 SD-345

設計引張強度: $f_{sud}=5000 \text{ kgf/cm}^2$
設計引張降伏強度: $f_{syd}=3500 \text{ kgf/cm}^2$
設計圧縮降伏強度: $f_{syd}=3500 \text{ kgf/cm}^2$

・PC鋼材の設計強度 SWPR 7 B

設計引張強度: $f_{pud}=190 \text{ kgf/mm}^2$
設計引張降伏強度: $f_{pyd}=160 \text{ kgf/mm}^2$

2.3 設計条件

1) 基本条件

- 設計列車荷重 P-16
- 設計速度 $V=260 \text{ km/h}$
- 最大車両数 12 両
- 列車本数 片側 60 本/日

2) 材料の設計値

各種材料の設計値を表-3 に示す。

3) 各限界状態に対する安全係数および制限値

表-4 に安全係数、表-5 に制限値を示す。

表-5 制限値

コンクリート		制限値
終局限界状態	設計曲げ耐力と設計曲げモーメントの比* 設計せん断耐力と設計せん断力の比* 設計斜圧縮耐力とせん断力の比*	1.0 以内
使用限界状態	縁圧縮応力度	160 kgf/cm ²
	縁引張応力度	0 kgf/cm ²
	変動荷重作用時 縁引張応力度	12 kgf/cm ²
施工時	斜引張応力度	19 kgf/cm ²
	縁圧縮応力度 縁引張応力度 斜引張応力度	235 kgf/cm ² 21.6 kgf/cm ² 19 kgf/cm ²
斜材交換	縁引張応力度	21.6 kgf/cm ²
耐震	耐震設計曲げ降伏耐力と設計曲げモーメントの比	1.0 以内

* $\gamma_i \cdot S_d / R_d \leq 1.0$

ここに、 S_d : 設計断面力

R_d : 設計断面耐力

γ_i : 構造物係数=1.2

PC鋼材

桁内ケーブル 12 T 15.2 mm (SWPR 7 B)

		引張応力度	備考
プレストressing中		144 kgf/mm ²	0.9 f_{pyd}
	プレストressing直後	133 kgf/mm ²	0.7 f_{pud}
使用限界状態	変動荷重作用時	133 kgf/mm ²	0.7 f_{pud}

斜材ケーブル 19 T 15.2 mm (SWPR 7 B)

		引張応力度	備考
使用状態		76 kgf/mm ²	0.4 f_{pud}
架設時		114 kgf/mm ²	0.6 f_{pud}
地震時		133 kgf/mm ²	0.7 f_{pud}
斜材取替え時		133 kgf/mm ²	0.7 f_{pud}

表-4 安全係数

		終局限界	使用限界	疲労限界	耐震
構造解析係数	γ_a	1.0	1.0	1.0	1.0
材料係数	コンクリート γ_c	1.3	1.0	1.3	1.3
	鋼材 γ_s	1.0	1.0	1.05	1.0
部材係数	γ_b	曲げ	1.15	1.0	1.0
		せん断	コンクリート	1.3	1.0
	鋼材		1.15	1.0	1.0
	ねじり	1.3	1.0	1.0	1.0
構造物係数	γ_i	1.2	1.0	1.0	1.0

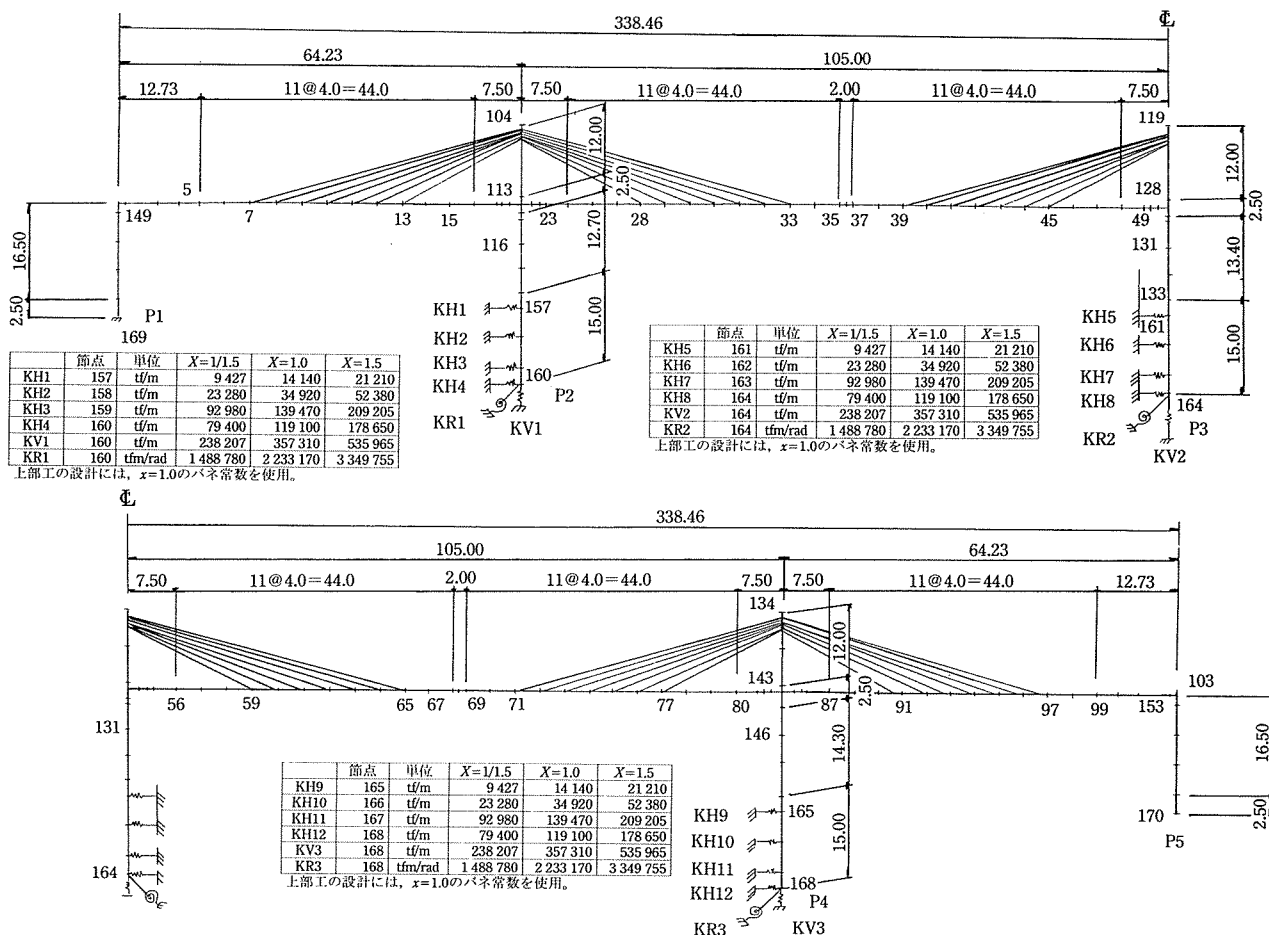


図-3 屋代南橋梁構造解析モデル図

2.4 構造解析モデル

断面力算定に用いた屋代南橋梁の構造解析モデルを図-3に示す。橋軸方向の解析においては、かけ違い部(P1, P5)上端を水平方向自由とし、ケーソン部は地盤に応じて地盤バネ定数を設定した。橋脚(P2, P3, P4)設計は、耐震検討時がクリティカルとなるため、通常のバネ定数(X=1.0)に対して弱いバネ(X=1/1.5)および強いバネ(X=1.5)を設定し、この範囲で制限値を満たすように行った。これに対し、主桁は地震時でクリティカルにならず、バネ定数の影響をあまり受けないため、通常のバネ定数(X=1.0)に対してのみ検討した。

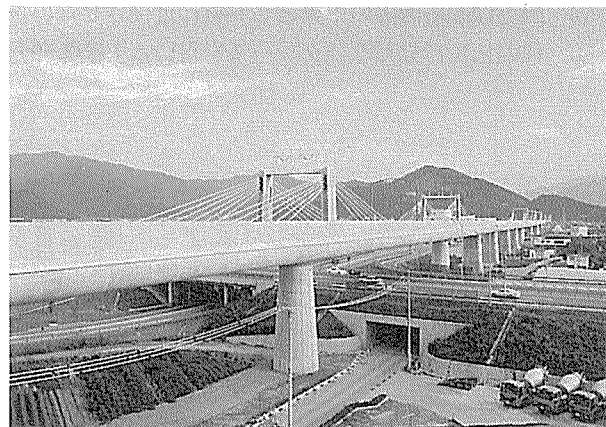


写真-1 屋代北橋梁全景

3. 景観設計

市街地に架設される橋梁であるため、設計においては「外部景観」も重要な要素であった。桁高を低く抑え、主塔高さも低くしたことで、高速道路や国道を通過するドライバーに威圧感を与えず、周囲の景観をさえぎることも少なくできた(写真-1)と考えている。基本方針を下記に示す。

- ① 周辺環境と調和し、地域からも親しまれる形態とする。

- ② 善光寺平のランドマークとして、象徴性のある形態とする。
- ③ 長野市へアプローチするゲート性を大切にする。
- ④ 連続する一つの構造物の明快さを探りつつ、細部の美しさも大切にする。

3.1 橋脚の検討

- ① 斜張橋の主塔と一体感のある構造形態に適したシンプルな形状とする。

◇工事報告◇

- ② 形状は多様な視点から検討することとし、あわせて周辺の地形とも調和する形状とする。
- ③ 桁と橋脚との取合い部分（逆円錐台形）をすっきりと見せる形とする。
- ④ テクスチャーを付けることで近景からの重量感を和らげる。
- ⑤ 排水管は橋脚内に設け、外に露出させない。

3.2 主塔の検討

- ① 主塔形状は橋脚形状と一体のイメージとする。
- ② 主塔への斜材のおさまりも良いシンプルな形状とする。

3.3 防音壁の検討

- ① 防音壁の高さ ($H=2.16$ m) が桁高 ($H=2.5$ m) とほぼ同一であるために、遠景からは桁が厚いように見えるので、防音壁の質感を桁と変える。
- ② 外面に丸みを与えることによりボリューム感を低減させる。

3.4 斜材色の検討

斜材が入る保護管 (FRP 管使用) の色は、コンピュータグラフィックを活用して比較検討を行い候補を数案に絞り、候補案に着色した保護管を現地につり上げ、周辺の背景色や構造物の色との調和を考慮してアクセントカラーとしての黄色を採用した。

3.5 架線柱の検討

- ① 景観や土木構造物と調和したデザイン。
- ② 架線柱の数は、主塔を活用することで減らす。
- ③ 配置は主塔間隔の中央とし斜材に近接させない。
- ④ 柱の色は目立たないグレー系を用いる (写真-2)。



写真-2 橋梁橋面全景

4. 貫通固定方式

PC 斜張橋の斜材は、主塔側と主桁側に定着具を用いて定着されるのが一般的である。本橋梁においては主塔側に通常の定着具を設けず、斜材を貫通させ、斜材を主塔内部中央で固定する新たな固定方式 (図-4) を開発、使用した。

この貫通固定方式の採用により、斜材を主塔頂部に集中 (鉛直方向に 30 cm 間隔で配置) させることができ、塔高が低くても大きな偏心量を確保できるので効果的なプレストレス導入が可能になった。また、主塔内に固定する方式のため防錆効果も向上してきた。

なお、貫通固定方式の機能および施工性の確認のために実物大の試験体を製作し検証を行った (写真-3)。試験概要は下記のとおりである。

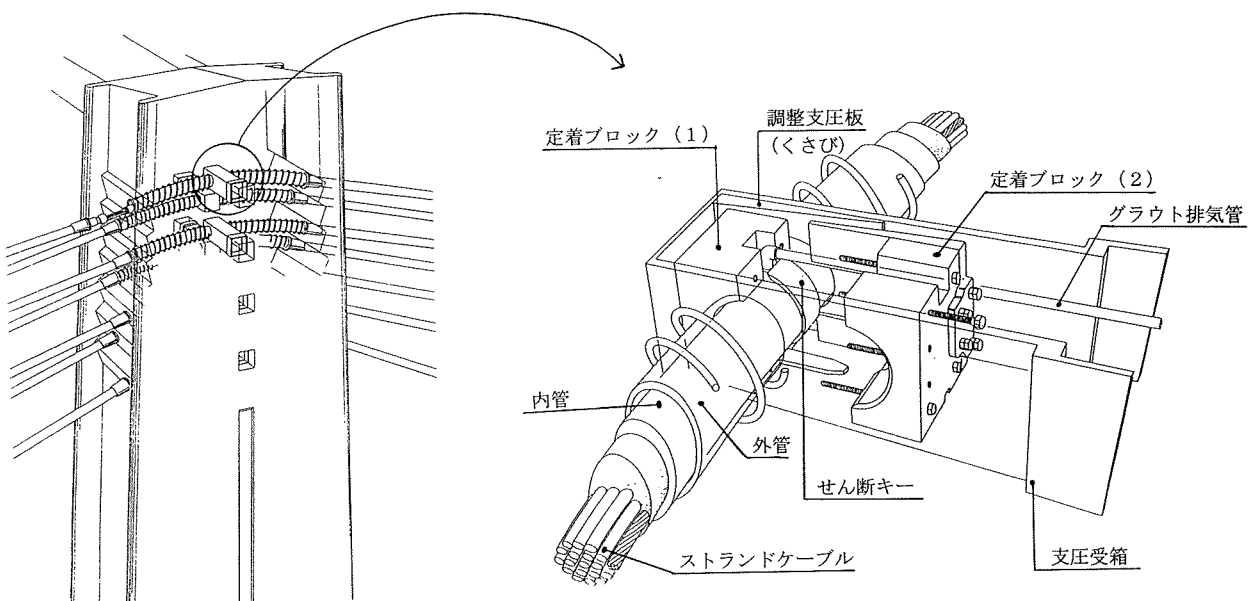


図-4 貫通固定システム図

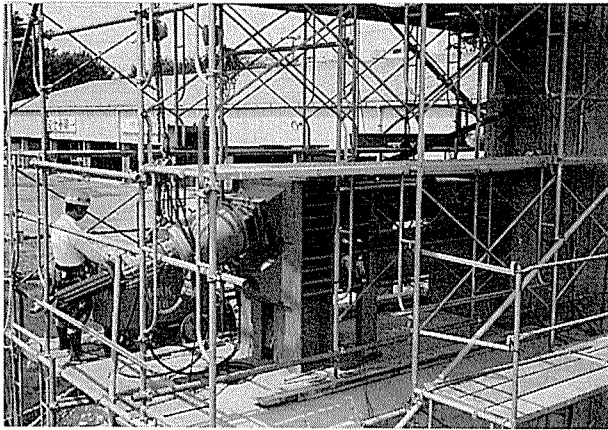


写真-3 実物大試験

4.1 摩擦力・張力差試験

内管の内外面と外管の内面はサンドブラスト処理とした。張力差は、グラウトを介して鋼より線から内管に伝達し、さらに摩擦あるいは突起構造を介して主塔に伝達される。

そこで鋼より線と内管、内管と外管との摩擦係数を測定し、摩擦力のみで張力差（常時 25 tf、地震時 50 tf）を確保できるかどうかの確認を実施した。

試験結果は表-6 に示すように、内管と外管との摩擦力のみでは常時の張力差に耐えられるが、地震時の張力差に耐えられないことがわかった。これ以上の張力差は、内管に取り付けた突起構造を介して主塔に伝達されることになるが、目標値とした地震時の 1.5 倍にあたる張力差 75 tf に耐えられることが確認できた。

表-6 摩擦係数、張力差試験結果

角 度		大 (27.40°)	小 (16.05°)
摩 擦 係 数	鋼より線～内管	0.14～0.19	0.12
	内管～外管	0.38～0.42	0.42～0.62
限 界 張力差	鋼より線～内管 (グラウト施工前)	20～31 tf	10 tf
	内管～外管	54～70 tf	41～52 tf

4.2 耐荷力試験

貫通固定構造が設置される主塔部は、部材張力の鉛直成分を受けるため、十分な耐力を有する必要がある。

ここでは使用限界状態における張力制限値 ($0.4 P_u = 200$ tf) および斜材が降伏点に達する直前の応力 ($0.75 P_u = 380$ tf) を載荷し、貫通固定構造周辺の主塔コンクリートの耐荷性能を確認した。

ほかにも確認・検証を行ったが、詳細については本誌第 36 巻第 5 号 (1994 年 9 月) を参照されたい。

5. 斜 材

5.1 斜材の制限値

本橋のような構造の橋梁では、斜材角度が小さいた

め、活荷重による斜材応力変動は従来の PC 斜張橋の 1/3 程度と小さいものになっている。このため斜材応力の制限値は、桁内に配置したケーブルと同等（使用限界状態において引張強度の 60%～70%： $0.6 f_{pud} \sim 0.7 f_{pud}$ ）程度と考えられるが、鉄道橋として初めて採用する構造形式であること、風などによる定着具付近の局部曲げの影響が把握できないことなどから、本橋梁では使用限界状態の斜材応力の制限値を、従来の斜張橋と同様に引張強度の 40% ($0.4 f_{pud}$) に抑えることとした。

今後、定着具付近の局部的な曲げ引張応力度の把握ができれば、将来的に制限値の緩和の可能性は十分あるものと思われる。

5.2 斜材の制振

斜材のレインバイブレーション対策は、3 Hz 以下のケーブルに対して粘性型ダンパーを設置した（写真-4）。設置前・後のケーブルの構造対数減衰率、実測値と理論値を示す（表-7）。

理論値と実測値の差の要因としてはケーブルのサグの影響、防食ゴムおよびシールドゴムによるケーブル固定点の移動等が考えられる。

表-7 対数減衰率・付加減衰率

ケーブル番号	測定温度	構造対数減衰率 δ		付加減衰率
		ダンパーなし	ダンパーあり	
南 S 1	22°C	0.022	0.070	0.048
付加減衰率の比較				
ケーブル番号	測定温度	付 加 減 衰 率		δ_R / δ_S
		実測値 δ_R	設計値 δ_S	
南 S 1	22°C	0.048	0.066	0.73

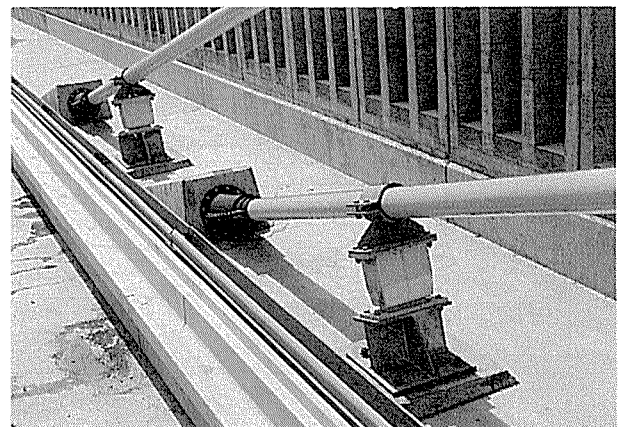


写真-4 粘性ダンパー全景

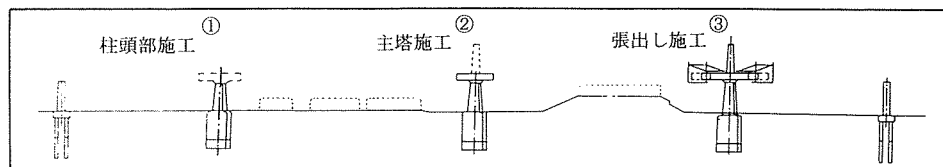
6. 施 工

6.1 上部工工程

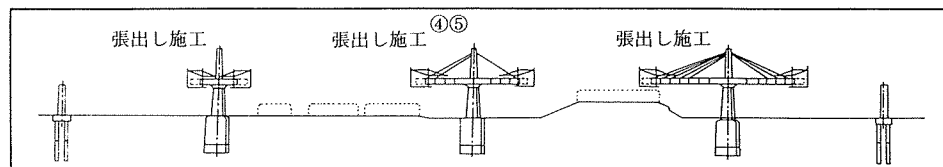
上部工工程を表-8 に、屋代南橋梁の施工手順を図-5 に示す。

◇工事報告◇

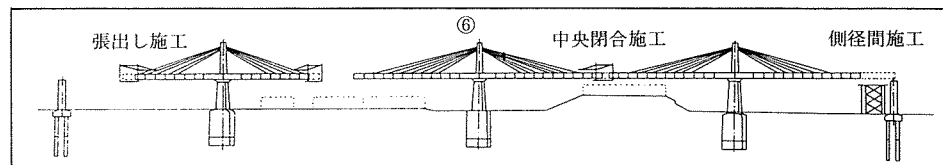
- ①柱頭部の施工
- ②主塔部の施工
(プレキャスト・ブロック)
- ③改良型移動作業車組立



- ④移動作業車による張出し施工
- ⑤斜材ケーブル引込みと緊張



- ⑥スパン中央ブロック連結



- ⑦移動作業車撤去

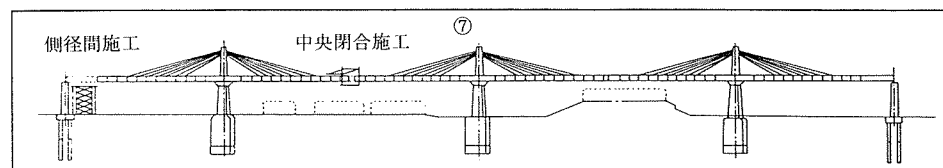


図-5 屋代南橋梁施工手順図

表-8 上部工工程表

	平成5年		平成6年												平成7年												平成8年									
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5					
南1P																																				
南2P																																				
南3P																																				
南4P																																				
北1P																																				
北2P																																				
北3P																																				
北4P																																				

6.2 桁の施工

(1) 柱頭部・主塔部の施工

柱頭部の施工はパイプ式支保工で施工した。標準施工長は15.0mである。

柱頭部施工後、総足場により主塔の施工を行った。主塔高さは、南橋梁、12m、北橋梁、10mであり、場所打ち部とプレキャスト部に分けて施工した。

プレキャスト部分は、主塔頭部の貫通固定システムを配置する部分と、主塔横梁の一部である(写真-5)。主塔はRC構造でプレキャストと場所打ち部鉄筋の継手にはモルタル充填継手(スリーブ継手)を使用した。

(2) 張出し施工

主桁は移動作業車を用いた張出し架設工法により施工した(写真-6)。主桁は桁高2.5mの一定桁高、形状は

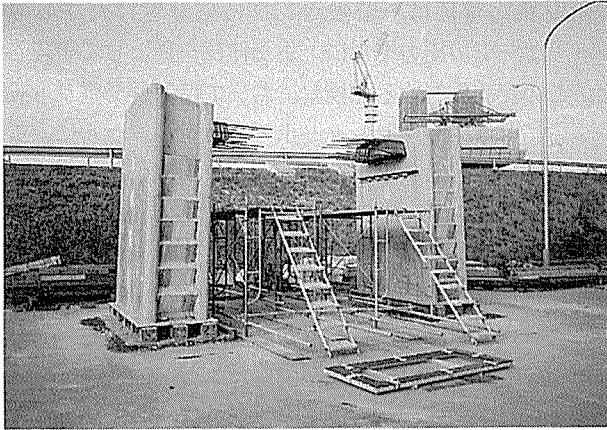


写真-5 プレキャスト部材（主塔頂部）

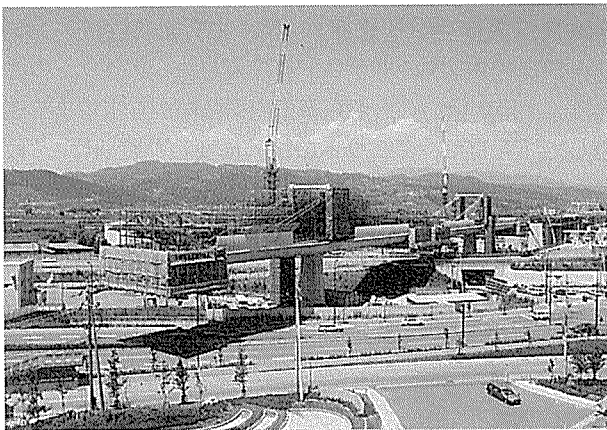


写真-6 屋代南橋梁張出し架設状況

3室箱桁断面である。作業車は容量 320 tf・m に改造した 2 種類の特種作業車を使用した。

桁下空間に規制のある長野自動車道本線部・長野自動車道料金所流入線部での施工には低床型特種作業車を使用し、他の部分には一般型特種作業車を使用した。

張出し施工部は、ブロック長 4.0 m を主塔をはさんで左右各々 11 ブロック（南橋梁）からなり、斜材を定着するブロックは、このうちの連続した 7 ブロック（南橋梁）である。

斜材定着ブロックの施工サイクルは、およそ 21 日で一般ブロックに比べ 6 日程度長くなっている。主桁コンクリート打込みはすべてポンプ車を使用し、左右のブロックは同日打設とした。

外型枠は転用回数が多いことや桁側面が曲線であることからステンレスフォームとし、外ウェブ内枠には空気あばたや水あばた防止のため透水性の繊維型枠を使用した。

また、高速道路・国道上を横断して張出し施工を行うため作業車の床には三重の防護設備を施した。さらに作業車後方の橋面からの飛散物落下防止のため、プレキャスト軽量防音壁 (H=2.16 m) を張出し施工に併行して設置した。

(3) 作業車の解体

屋代南橋梁、北橋梁の中央径間部分の直下は、すべて供用されている高速道路、国道である。

したがって、移動作業車の解体は、中央部の閉合後にその場所で解体することは不可能なため、各橋脚に引き戻して解体した。このため作業車を後退させる際に斜材が障害となるので、作業車にトラス部と下部作業床に分離し、今回新たに開発した後退装置を用いて後退して解体した（図-6、写真-7）。

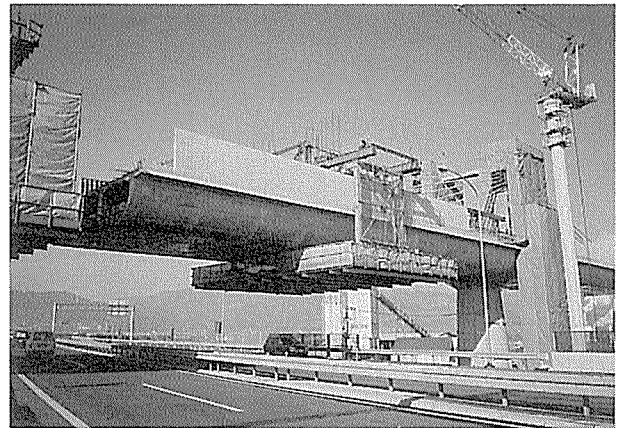
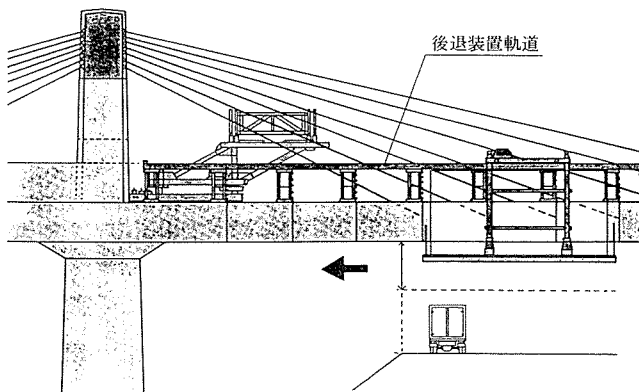


写真-7 後退装置を使用した作業車解体

移動作業車側面図（施工終了後の後退状況）



移動作業車正面図（施工終了後の後退状況）

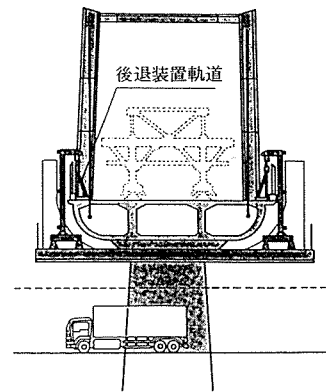


図-6 後退装置

◇工事報告◇

6.3 斜材の施工

本橋梁は2面吊りで、斜材ケーブルは1段に19 T 15.2 mm (SWPR 7 B) 1本の構成である。斜材定着位置は箱桁内部である。斜材定着具には桁完成後の張力調整が不要であることから外ケーブル工法用の定着具（フレシネー E システム）を使用した。

6.4 貫通固定システムの組立

主塔足場から外管と同じ曲率に加工した内管を外管に挿入する。次に定着ブロックを主塔側面に設けた横孔（支圧受箱）から挿入し、内管の中央にあるせん断キー（突起構造）をはさみ込むように取り付けた。斜材交換時の作業を容易にするため、この定着ブロックと支圧受箱との間隙にくさびをはさむ構造とした（図-4）。

6.5 斜材保護管の架設

斜材保護管には黄色に着色した FRP 管を使用した。FRP 管の接続部は、作業の容易さと強度および水密性を確保できる外ソケット方式のテーパー継手を採用し、接着剤を併用する構造とした。継手部の耐圧性能はグラウト注入時に発生する圧力の3倍を想定し 30 kgf/cm² 以上を目安とし、試験により確認した。またストランドと FRP 管とのかぶりを確保する目的で FRP 管内にスパイラル鋼線（φ5 mm）を配置した。

FRP 管は橋面上に足場を設けて架設した。ストランド挿入時には継手部は仮接合とし、挿入完了後に接着剤を使用した本接合とした。冬季における接着作業は接着剤の硬化促進のためバンドヒーターによる保温養生を実施した。

6.6 斜材緊張

斜材の緊張は両引きで2面のケーブルを4台の緊張ジャッキ（容量 500 tf）を使用して同時に行った。緊張時の加圧ステップを 5 tf とし緊張中の斜材張力差を生じさせないようにした。緊張作業はすべて箱桁内のため、重量物となるジャッキの移動、据付けにはジャッキ架台を用いた（写真-8）。

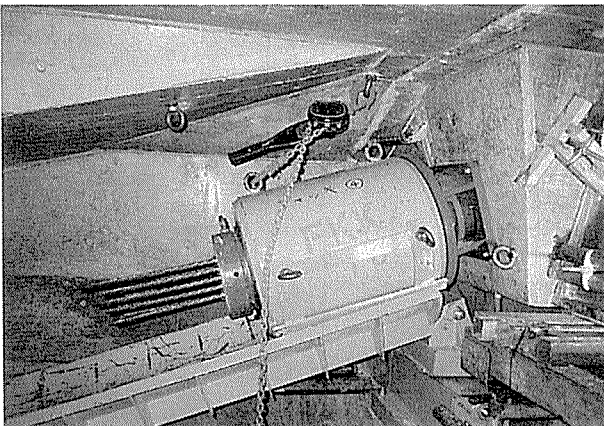


写真-8 斜材ジャッキセット状況

斜材張力管理は、緊張ポンプに取り付けたプレッシャーゲージの圧力を主に、また伸びを従として管理した。このため先行する北橋梁においては斜材緊張ジャッキ後方にセットしたセンターホール型ロードセルによる荷重計測を実施し、プレッシャーゲージの表示値との相関を確認した。また、北橋梁 3 P 橋脚斜材に関しては、ストランドのひずみ計測により、導入後の張力変化量を追跡した。

定着後の斜材張力は、設計値に対して ±5% の管理目標値内にあり、今回採用した緊張管理手法の妥当性を検証できた。その後の張力推移も設計値に対して問題ない管理幅内に収まっていることを確認した。

6.7 斜材グラウトの施工

斜材一般部（FRP 管部）には、主桁完成時にノンブリージングタイプのグラウトを注入した。グラウトの注入は、主塔が低いことから箱桁内緊張端から主塔まで連続して注入した。グラウトの注入に要した時間は、7 段目の斜材で 25 分程度であった。

主塔と桁の斜材固定部にはゴム製保護カバーを取り付け、ポリブタジエン樹脂注入による防錆工を施した（写真-9）。

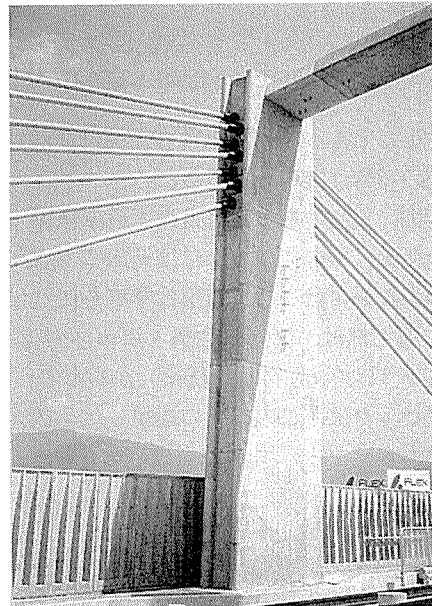


写真-9 斜材固定部防錆工

おわりに

桁高を抑え、主塔高さを低くした本橋は JR 信越線、長野自動車道から全容を望むことができる。

本橋梁の持つ構造的合理性が認識されれば、今後の同規模の橋梁に採用されるものと考えられる。

本橋の設計・施工にあたっては、鉄道橋として世界で初めて採用される構造形式であることから、北陸新幹線

(軽井沢・長野間) 橋梁委員会(委員長; 松本嘉司東京大学名誉教授)をはじめ多くの方にご指導, ご協力を頂いた。関係各位に感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物, 丸善, 平成4年10月
- 2) 北陸新幹線(軽井沢・長野間) 橋梁委員会(長大橋りょう構造に関する調査・研究), (社) 日本鉄道技術協会, 平成5年3月
- 3) 宮崎修輔・森藤眞治・野永健二: 桁剛性を高めた新しいタイプのPC斜張橋における斜材主塔部貫通固定システム, 土木学会第49回年次学術講演会, 平成6年9月
- 4) 宮崎修輔・古賀 学・佐原圭介・前田晴人・渡辺淳: 桁剛性を高めた新しいタイプのPC斜張橋における貫通固定構造の実物大試験, 土木学会第49回年次学術講演会, 平成6年9月
- 5) 宮崎修輔・森藤眞治・湯山和利・古賀学・小宮正久: 北陸新幹線 屋代南・北橋梁の計画と設計, PC技術協会第4回シンポジウム, 1994. 10
- 6) 宮崎修輔・森藤眞治・萩原秀樹・前田晴人・野永健二: 北陸新幹線 屋代南・北橋梁における斜材の主塔部貫通固定システムの開発と試験, PC技術協会第4回シンポジウム, 1994. 10
- 7) 平出廣和・萩原秀樹・渡辺淳: 屋代南・北, 土木技術, Vol. 49, No. 12, 1994. 12
- 8) 森藤眞治: 新しいPC連続斜張橋の設計・施工(北陸新幹線 屋代南・北橋梁), セメント・コンクリート, No. 578, 1995. 4
- 9) 渡辺 淳・萩原秀樹・志水敏之・伊地伸平: 新しいタイプの斜張橋(北陸新幹線 屋代北橋梁)の施工, PC技術協会第5回シンポジウム, 1995. 9

【1996年10月2日受付】