

第2 新神戸トンネル内 PC 舗装の設計と施工

岡 本 利 彦*
中 野 章**
鈴 木 義 晃***

1. はじめに

神戸市は、南側は海に面し、北側は丘陵、田園地帯（西北神地区）を抱え、中央部を東西に走る六甲連山で明確に区切られている。いわゆる「みなと神戸」（市街地）は南側地域を指し、全面積のわずか 10% の地域で人口が全市の約 80% に達している。この人口過密を解消するために、六甲連山の裏側の地域は開発地域として注目され、西北神地区ではニュータウン造成が最近加速的に進められている。

これらの見通しに立って、北神地区と市街地を結ぶ一般国道 428 号のバイパス道路として昭和 46 年度から建設に着手し、昭和 51 年度に供用開始した新神戸トンネル有料道路の通行台数は、供用開始以来順調に伸び続け昭和 57 年度で 1 日平均 10 545 台と設計交通容量の 11 100（台/日）に迫っており、昭和 64 年度には設計交通容量を超えることが予想される。さらに昭和 64 年度には都市高速北神戸線の接続が予定され、現在の新神戸トンネルでは増加の一途をたどる交通量に対処できない状況にある。

この交通需要に対処するため、神戸市道路公社は現在の新神戸トンネルの東側に並行して、第 2 新神戸トンネルを建設し、合わせて 4 車線道路として供用しようとする事業を昭和 58 年度より着手した。

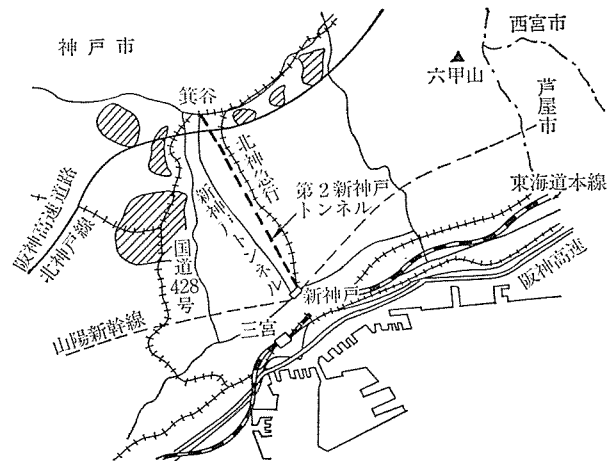


図-1 位置図

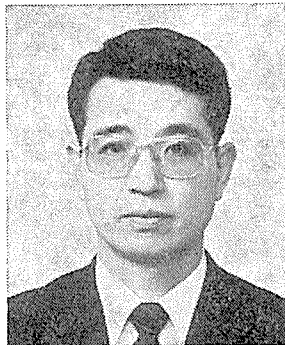
工事着手以来現在（昭和 62 年 3 月）までに、トンネル掘削は 97%、覆工は 91% 完了している。ここで述べる舗装工事は第 4 工区で PC 舗装を施工完了し、第 5 工区で SFRC 舗装を施工中であり、他の工区も順次施工準備中である。昭和 64 年 4 月 1 日の供用開始に向けて鋭意努力中である。

2. 第 2 新神戸トンネルの概要

第 2 新神戸トンネルは、図-2 のように南より開削工法によるボックスカルバート築造の第 1 工区、新幹線新神戸駅直下の国鉄委託工区、排気用に使用する斜坑より施工した第 2 工区、北神急行トンネルで使用した奥笹各斜坑より施工した第 3 工区、同じく北神急行トンネルで使用した二軒茶屋斜坑より施工した第 4 工区、および避難用に使用する下各上斜坑より施工した第 5 工区に分けて発注した。本トンネルの施工法は、計測結果をもとに幅広い地質



* Toshihiko OKAMOTO
神戸市道路公社建設部建設
第一課課長



** Akira NAKANO
神戸市道路公社建設部建設
第一課副参事



*** Yoshiaki SUZUKI
ピー・エス・コンクリー
ト（株）大阪支店開発課

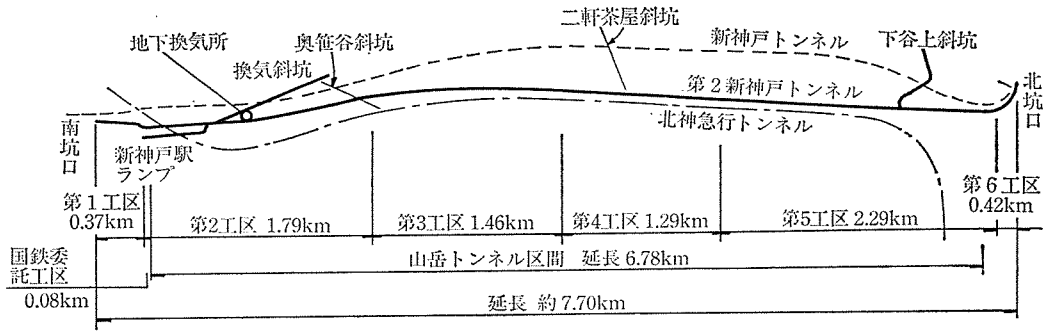


図-2 平面図

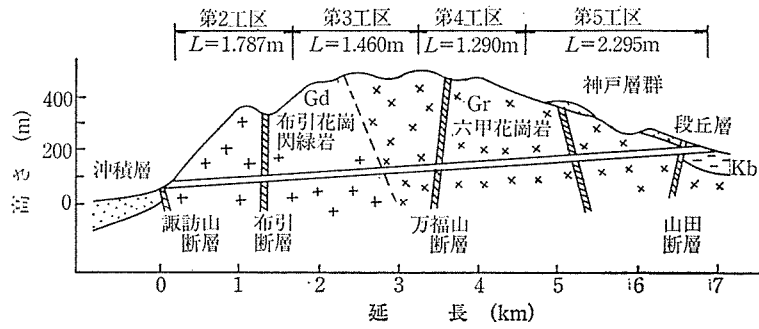


図-3 縦断面図

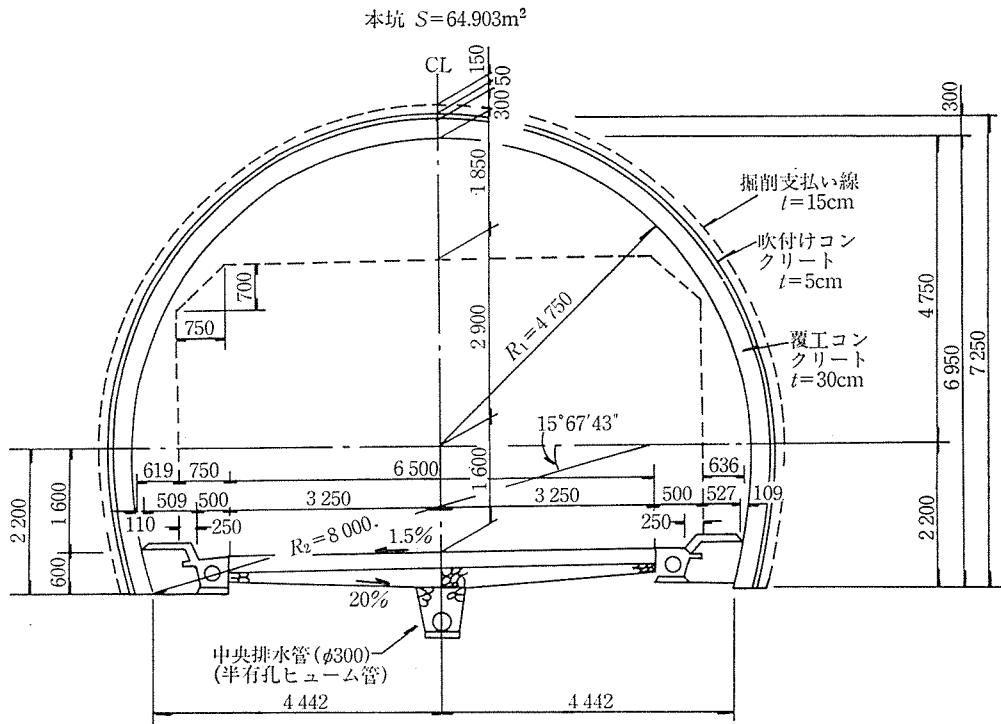


図-4 標準断面図

の変化に対応でき、かつ維持管理の面においても有利な NATM 工法で施工した。なお防災上の問題から新神戸トンネルと同様に、本トンネルにも 1 km 間隔で非常駐車帯を設置し、それぞれを結ぶ上下線連絡坑（人道）を施工した。

3. 舗装方針について

本トンネルのような長大トンネルの舗装においては、度々の維持補修が非常に困難なことと照明効果の面からも耐久性に優れている種々のセメントコンクリート舗装

について、次の項目を重点的に検討した。

- 1) 一般コンクリート舗装に比べて耐久性があること。
- 2) 目地をできる限り少なくできる舗装であること。
- 3) 施工性のよい舗装であること。
- 4) 維持管理費の少ない舗装であること。

以上の条件を満足する舗装構造として、前回新神戸トンネルで施工した PC 舗装と SFRC 舗装を選択した。

PC 舗装と SFRC 舗装の特色を表—1 に示す。

表—1 PC 舗装と SFRC 舗装の特色

	PC 舗装	SFRC 舗装
舗装厚	プレストレスを導入し、曲げ抵抗が大きいため、15 cm にできる。	曲げ強度 (70 kg/cm ²) が大きいので 15 cm にできる。
スパン長	プレストレスを導入し、施工例より 100 m にできる。	内部応力が分散され、施工例より 80 m にできる。
耐久性	プレストレスを導入しているため版の耐久性が増す。	ひびわれ抵抗に優れているので耐久性がある。
補修性	版の補修はかなり難しい。	薄層 (t=5 cm) オーバレイができる。

この表からも分かるように、両舗装ともに同じような特色を有する耐久性に優れた舗装である。

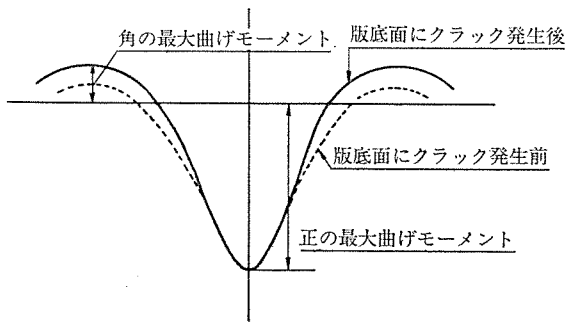
SF コンクリートは、品質の均一性と多量供給を確保するため、SF を生コンプラントで混入することとした。生コンクリートの搬入を投入孔 (φ 200 mm, H=200 m) より行っている第 3・4 工区については、SF コンクリートが投入孔で閉塞する恐れがあるので、PC 舗装と決定した。他の工区では、アジテターカーが直接打設場所まで搬入できるので SFRC 舗装と決定した。

また、今回は両舗装ともに、走行性と維持補修を少なくする目的から、縦目地をなくした全幅舗装とした。さらに乾燥収縮によるクラック防止と施工性をよくする目的から、高性能減水剤を使用することとした。

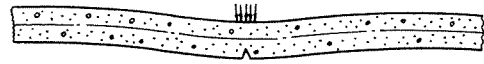
4. PC 舗装の構造と設計

4.1 PC 舗装の構造

舗装版にプレストレスを導入することにより舗装版の曲げ特性は著しく向上する。すなわち、図—5 の破線に



図—5 PC 版の曲げモーメント



(1) 版底面にクラック発生



(2) 版表面にクラック発生

図—6 PC 舗装の曲げ挙動

示すように、荷重の増加に伴い荷重点直下の正の曲げモーメントは増加するが、版底面にクラックが発生すると (図—6 (1))、この部分が塑性ヒンジとなり、曲げモーメントの再分配が行われる (図—5 の実線)。このため荷重直下の正の曲げモーメントはクラック発生直前より大きくなることはなく、逆に、荷重荷重点周辺の負の曲げモーメントが増大し、ついには、版表面にもクラックが発生するようになる (図—6 (2))。

しかしながら、これらのクラックは中立軸以上に進展することはない。荷重を除去すれば閉合するため、このクラックが使用期間において特に問題となることはない。

一方、NC 舗装では、コンクリートの曲げ引張強度によって荷重を支持するが、一度発生したクラックは閉合することはない。クラック面で分離された小さな版になる。このため、将来、重車両の走行が予想される場合、維持・補修の問題を残すことが多い。

また、コンクリート版厚の面から見ると、NC 舗装では、25cm~30 cm が必要となるが、PC 舗装では 15 cm が標準となっている。この版厚の差はトンネル内の舗装の場合、掘削断面を縮小させる利点を有する。

4.2 PC 舗装の設計

(1) 設計概要および設計条件

本舗装は、トンネル長 6.78 km のうち 2.69 km を PC および RC 舗装により施工するものであり、上下層路盤を施工後、PC 版を舗装する。

PC 版の形式は、トンネル内の一定空間で施工するため、可動式ポストテンション方式とした。

版厚は、経済性および PC 鋼材の配置スペースを考慮して、版中央部では 15 cm を標準としたが、版端部では大きな地盤反力を受けるため 25 cm とした。

版長は、長くなるほど走行性が向上する一方、プレストレス量が増加するため、一般に、50 m~100 m であるが、本舗装では、施工実績 (新神戸トンネル)、経済性および走行性を検討した結果、100 m とした。一方、RC 版は PC 版の緊張作業のスペースや施工性より 8 m

とした。

本舗装の設計条件および使用材料の特性を以下に示す。

舗装の構造形式：可動式ポストテンションPC版

PC版 長：100.000 m

PC版 幅：6.500 m

PC版 厚：0.150 m

設計輪荷重： $P=8.0$ t

温度差： $\Delta T=0.7^\circ\text{C}/\text{cm}$

路盤支持力係数： $K_{75}=7.6$ kg/cm³

路盤摩擦係数： $f=1.0$

(コンクリート)

設計基準強度： $\sigma_{ck}=350$ kg/cm² ($\sigma_{bk}=45$ kg/cm²)

弾性係数： $E_c=325\,000$ kg/cm²

クリープ係数： $\phi=2.6$

乾燥収縮度： $\epsilon_s=0.00015$

ポアソン比： $\nu=1/6$

(PC鋼より線)

種別：SWPR 7 B T 12.7

引張強度： $\sigma_{pu}=190$ kg/mm²

降伏点強度： $\sigma_{py}=160$ kg/mm²

弾性係数： $E_p=2\,000\,000$ kg/cm²

リラクセーション率： $r=5\%$

シースの摩擦係数： $\lambda=0.004$

(PC鋼棒)

種別：SBPR 130/145 ϕ 13

引張強度： $\sigma_{pu}=145$ kg/mm²

降伏点強度： $\sigma_{py}=130$ kg/mm²

弾性係数： $E_p=2\,000\,000$ kg/cm²

リラクセーション率： $r=3\%$

シースの摩擦係数： $\lambda=0.003$

(2) 設計荷重応力

PC版の設計には、

① 輪荷重

② 版の表面と底面との温度差

③ 版と路盤との拘束力

の荷重を考慮し、荷重の組合せは以下の3通りとした。

CASE-1：①

CASE-2：①+②

CASE-3：①+③

輪荷重による応力①は Westergaard 公式の修正式により算出した^{1),2)}。

版縁部

$$\sigma = (1 + 0.54\nu) \cdot C(P/h^2) (\log_{10} l - 0.75 \log_{10} a - 0.18)$$

版中央部

$$\sigma = 0.0547(P/h^2) \{ (b/l^2) - 10.186 \log_e (b/l) + 3.714 \}$$

ここに、

C：縦自由縁部に対して 2.12、適当量のタイバーを用いた縦目地縁部に対して 1.59

P：輪荷重 (kg)

a：タイヤの接地半径 = $12 + P/1000$ (cm)

h：版の厚さ (cm)

ν ：コンクリートのポアソン比

l：版の剛比半径 = $\sqrt[3]{\frac{E_c \cdot h^3}{12(1-\nu^2) \cdot K_{75}}}$ (cm)

E_c ：コンクリートの弾性係数 (kg/cm²)

K_{75} ：路盤支持力係数 (kg/cm³)

b： $a < 1.724h$ のとき $b = \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h$

$a \geq 1.724h$ のとき $b = a$

温度差による応力②は次式で算出した^{1),2)}。

版縁部

$$\sigma = 0.35 C_w \alpha E_c \theta$$

版中央部

$$\sigma = 0.7 \alpha E_c \theta / (2(1-\nu))$$

ここに、

C_w ：そり拘束係数

α ：コンクリートの線膨張係数

θ ：温度差

版と路盤との摩擦による拘束応力③は次式で算出した²⁾。

$$\sigma = f w L / 2$$

ここに、

f：版と路盤との摩擦係数

w：版の単位重量

L：版の長さ

以上の算出式より、各荷重による版中央部下面の引張応力度は、

版長方向	版幅方向
①：-29.7 kg/cm ²	-29.7 kg/cm ²
②：-14.3 kg/cm ²	-13.2 kg/cm ²
③：-12.5 kg/cm ²	-0.8 kg/cm ²

となる。よって、荷重の組合せは、

版長方向	版幅方向
CASE-1：-29.7 kg/cm ²	-29.7 kg/cm ²
CASE-2：-44.0 kg/cm ²	-42.9 kg/cm ²
CASE-3：-42.2 kg/cm ²	-30.5 kg/cm ²

となる。

(3) プレストレス

設計荷重による引張応力に対して、パーシャルプレス

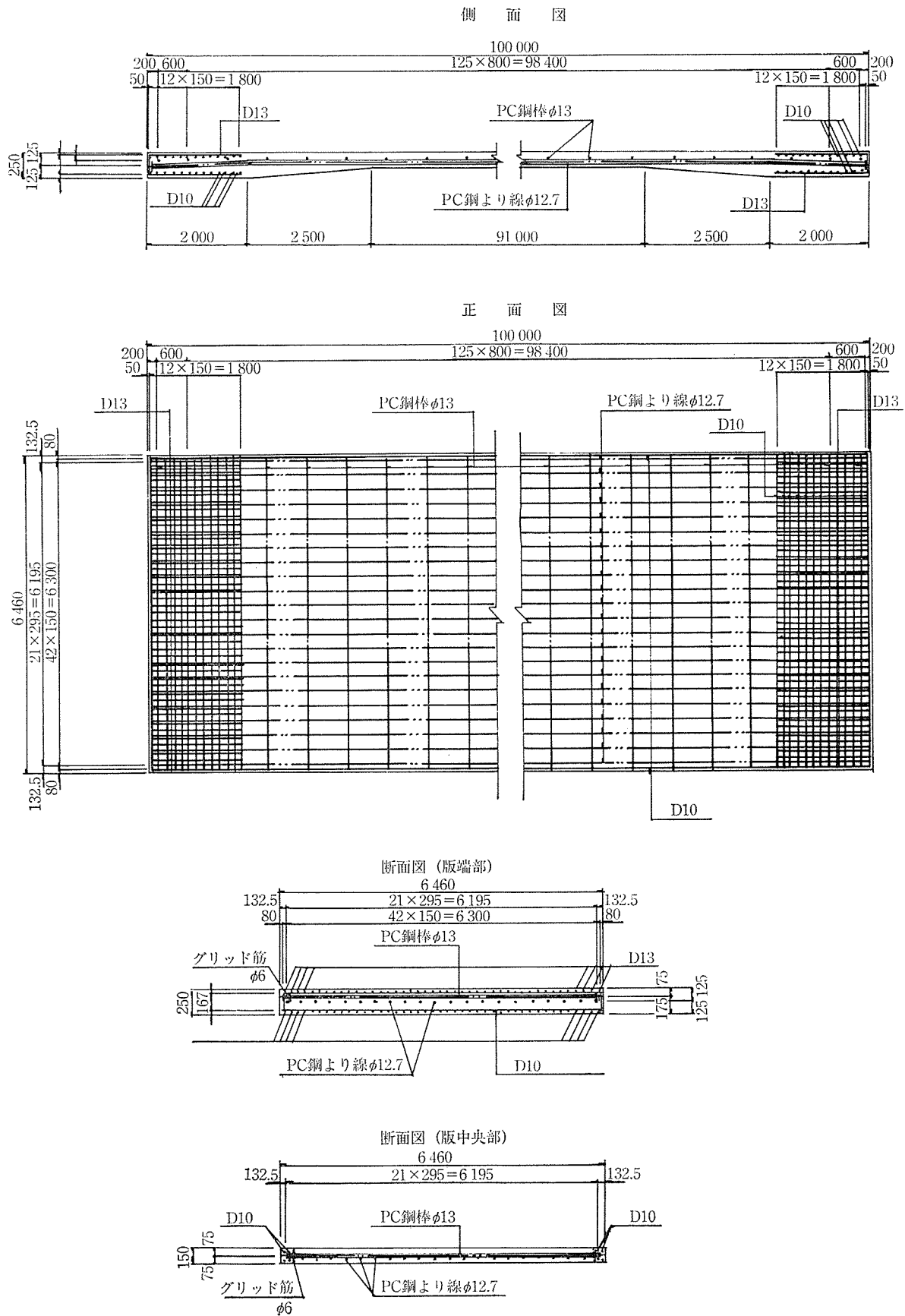


図-7 PC版の配筋・配線図

トレス（Ⅱ種構造）となるようにプレストレス量を決定した。その結果、版長方向には SWPR 7B T12.7 を 22 本、版幅方向には SBPR 130/145 φ13 を 80 cm ピッチで配置した。

緊張時に与えたプレストレスは、時間の経過とともに種々の要因により減少するが、これらの要因として、

- ㊶ 路盤と版との摩擦
- ㊷ シースと PC 鋼材との摩擦
- ㊸ コンクリートの弾性短縮
- ㊹ コンクリートのクリープ、乾燥収縮
- ㊺ PC 鋼材のリラクセーション

を考慮した。

その結果、緊張時版 1 m 当りのプレストレスは、

版長方向：48.5 t

版幅方向：16.2 t

であったが、クリープ、乾燥収縮終了時（有効プレストレス）には

版長方向：26.7 t

版幅方向：16.2 t

となった。版長方向のプレストレスは緊張時に対して、45% 減少しているが、これは版と路盤との摩擦による減少（20%）および、シースと PC 鋼材との摩擦による減少（17%）が支配的である。

上記の有効プレストレスをコンクリート応力度で表わすと、版長方向 17.8 kg/cm²、版幅方向 10.8 kg/cm² となる。

（4）合成応力度

合成応力度＝荷重による応力＋有効プレストレスによって応力度の検討を行うが、その際、許容引張応力度は

$$\text{CASE-1} : -45 \text{ kg/cm}^2 \times 1/2.0 = -22.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{CASE-2,3} : -45 \text{ kg/cm}^2 \times 1/1.25 = -36.0 \text{ kg/cm}^2$$

とした。よって、合成応力度は、

	版長方向	版幅方向
CASE-1	-11.9 kg/cm ²	-18.9 kg/cm ²
CASE-2	-26.2 kg/cm ²	-32.1 kg/cm ²
CASE-3	-24.2 kg/cm ²	-19.7 kg/cm ²

となる。

本舗装に用いた PC 版の配筋、配線図を 図-7 に示す。

5. PC 舗装の施工

5.1 施工概要

本舗装はトンネル内での作業であり、作業空間および照明設備などに制約があり、各々の作業がほとんど同じ時間帯で繰り返されるため、各作業別の人員配置および機械の作業状態などを十分に検討し、施工工程を決定した。PC 版舗装の施工順序を 図-8 に、また、本舗装における主要材料を 表-2 に示す。

新神戸トンネルにおいては資材搬入などの条件より、片車線に分割して施工したが、この方法では、版幅方向のプレストレスを導入する前に工事車両の通行を開放するため、PC 版にクラックが発生する恐れがあること、また、縦目地を設けることは、走行性、経済性の低下を来すだけでなく、将来の維持、補修に問題を残すことが多い。そこで、本舗装では両車線を一度に施工するこ

表-2 主要材料表

項目	仕様	単位	第3工区	第4工区	摘要
PC 版	100.0×6.460×0.150	枚	13	12	
コンクリート	$\sigma_{bk}=45\text{g/cm}^2$	m ³	1 314	1 213	$\sigma_{ck}=350$ kg/cm ²
PC 鋼より線	SWPR 7B T12.7	t	22.2	20.5	版長方向
PC 鋼棒	SBPR 130/145 φ13	t	10.9	10.1	版幅方向
鉄筋	SD 30	t	13.0	12.0	

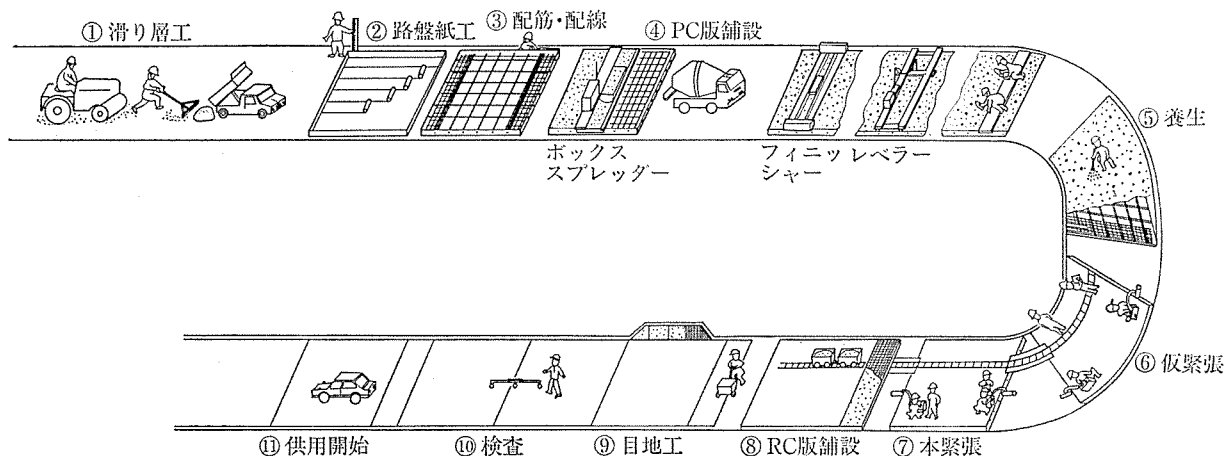


図-8 PC 舗装施工順序

とし、版長、および、版幅方向のプレストレスを導入した後車両の開放を行った。

5.2 路盤工

下層路盤材としてクラッシャーラン (0~50 mm, $t=109$ mm) を、上層路盤材として粒調碎石 (0~25 mm, $t=100$ mm) を使用し、モータグレーダー、および、ブルドーザーにて所定の高さに整正した後、マカダム、タイヤローラーにて十分な転圧を行い、路盤支持力係数 $K_{30}=16.7$ kg/cm³ 以上の路盤が得られるように施工した。また、PC 版両端部 2 m 間は、大きな反力を受けるため、特に注意を払って施工した (図-9)。

5.3 型枠工

路盤工の完了後に型枠の組立てを行う。施工工程の関係上、連続的に PC 版の舗設を行うため、型枠を 3 セット準備した。型枠の組立てに先立ち、舗設機械の移動のため、側溝内に軌条を設置する。軌条の延長は、舗装全長に機械待避所 (20 m) を両端に付加した長さとした。すなわち、第 3 工区で 1 436 m, 第 4 工区で 1 336 m の軌条を設置した。型枠、軌条の設置方法を 図-10 に示す。

5.4 PC 鋼材、鉄筋の組立て

型枠を設置した後、厚さ 5 mm 程度の砂層を敷く。この砂層は路盤と PC 版との摩擦抵抗を減少させるものであり、シルト分を含まない、できるだけ粒径の揃った砂で平滑に仕上げた。

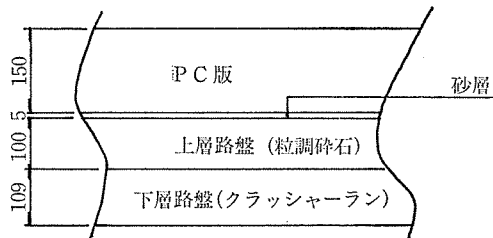


図-9 路盤構造

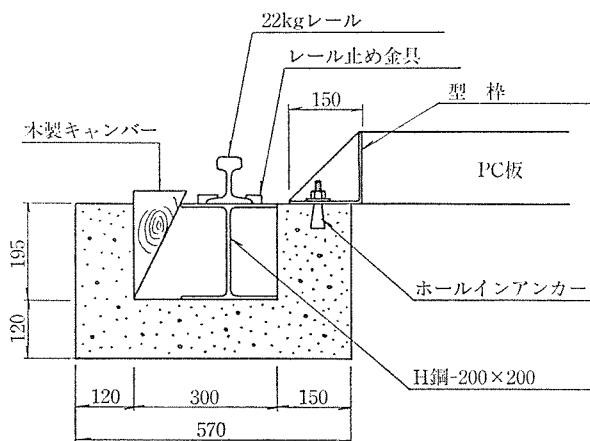


図-10 軌条設置図

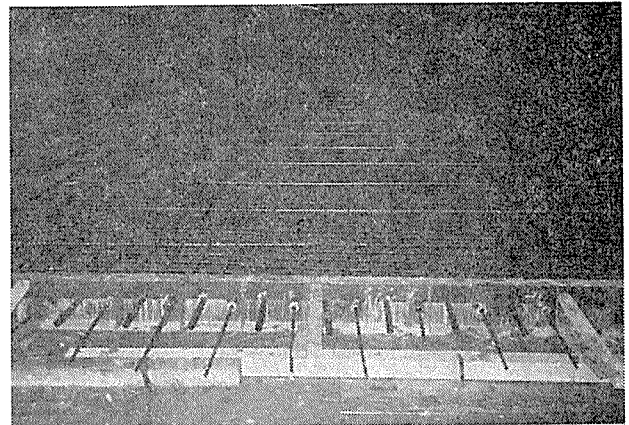


写真-1 配筋・配線状況

砂層の上に路盤紙 (ポリエチレンシート) を敷き、版端部補強筋、版長方向 PC 鋼材、版幅方向 PC 鋼材の順に組み立てる。これら、鋼材の組立て状況を 写真-1 に示す。

5.5 コンクリート版の舗設

コンクリートの打設にあたって、前もって型枠、PC 鋼材、鉄筋に異常のないことを確認した後、打設を行った。コンクリート舗設機械は両側溝の軌条上に設置し、全幅員を一度に打設した。コンクリートの搬入は、運搬効率の向上を図るためコンクリート投入孔より行い、坑内をトラックミキサ車により運搬した。

コンクリートの舗設は、以下の手順で行った (写真-2)。

(ボックスプレッダーによる打設)→(フィニッシャーによる締固め)→(レベラーによる仕上げ)→(粗面仕上げ)

表-3 コンクリートの配合表

σ_{bk} (kg/cm ²)	スラブ (cm)	W/C (%)					AE 剤	流動化剤
			W	C	S	G		
45	6	41	157	383	643	1 153	0.958	1.88

C: 早強セメント

流動化剤: 小野田 O-P-8NPC

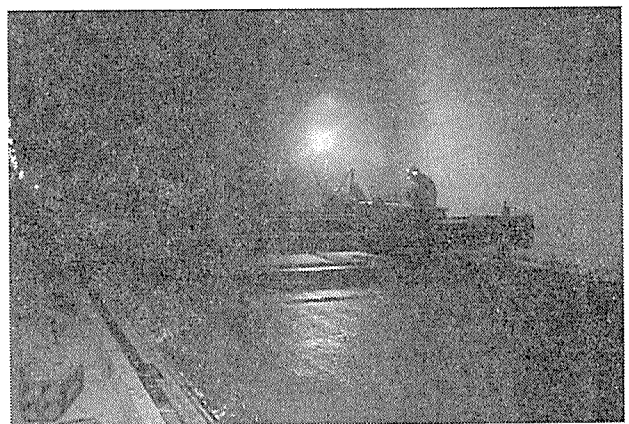


写真-2 PC 版の舗設

コンクリートの配合は、コンクリート投入孔を使用する関係上、流動化コンクリートとした。その配合を表—3に示す。

5.6 養生および緊張

舗装版の表面仕上げ完了後、初期養生を行うが、トンネル内であることから、直射日光および風雨の影響がなく、一日の気温差も少なく、湿度も70%~80%程度と好条件であるが、コンクリート表面に被膜養生剤を散布し、さらに、養生マットを敷き散水養生を行った。

(1) 版長方向 PC 鋼材の緊張

PC 鋼材の緊張は、コンクリートの初期クラックの発生を抑制するため、以下の3段階に分割して施工した。

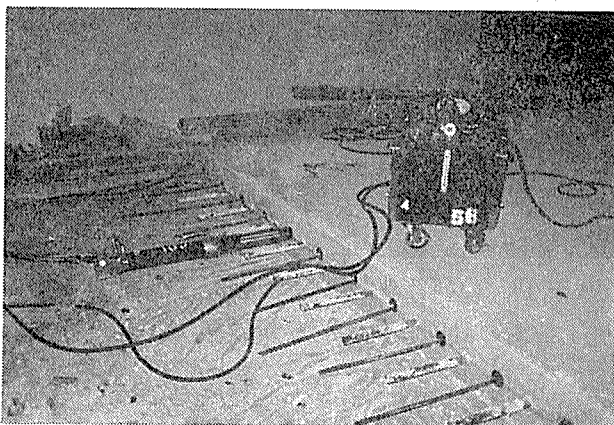
㊤ 仮1次緊張

初期の収縮クラックの防止、および、コンクリートの加圧養生を目的として仮緊張を行った。収縮クラックの要因として、乾燥収縮、温度差によるそり拘束、路盤拘束などが考えられるが、この中で路盤拘束を主要因と考えて、この拘束力による引張応力を打ち消すこと、および定着部の支圧力に対する安全性を考慮して、緊張力を決定した。その結果、コンクリートの圧縮強度が100 kg/cm²以上であることを確認したうえで、鋼線1本当たり5tのプレストレスを与えた。

㊦ 仮2次緊張

収縮クラックを防止するためのプレストレスは、できる限り若材令にて与えるのが望ましいが、若材令では、コンクリート強度が低いため、多量のプレストレスを与えることはできない。しかも、PC版長が100mと長い本舗装の場合、版中央部では、シースとPC鋼材との摩擦により、プレストレスは減少しており、クラック防止に必要なプレストレスが導入されていない可能性がある。そこで、コンクリート強度が150 kg/cm²以上になると、仮2次緊張として、鋼線1本当たり8tのプレストレスを再度導入した。

㊧ 本緊張



写真—3 PC 鋼材の緊張

本緊張では、設計書に示されたプレストレスを導入するが、これは、コンクリート強度が設計基準強度の85%以上(350 kg/cm²×0.85=300 kg/cm²)であることを確認した後にを行った。鋼線1本当たりの緊張力は、14.3tである(写真—3)。

(2) 版幅方向 PC 鋼材の緊張

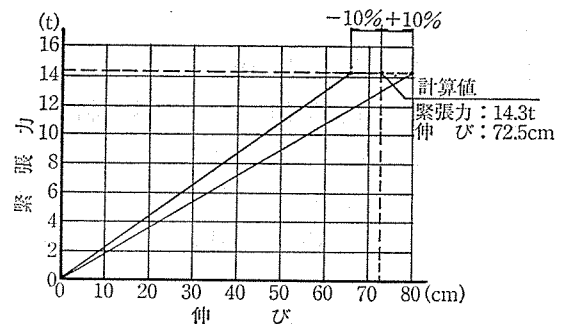
版幅方向は6.5mであり、乾燥収縮や路盤拘束による引張力も小さいと考えられるので、所定の強度(300 kg/cm²)を確認した後、設計書に示されたプレストレスを一度に導入した。鋼棒1本当たりの緊張力は、14.6tである。

(3) 緊張管理

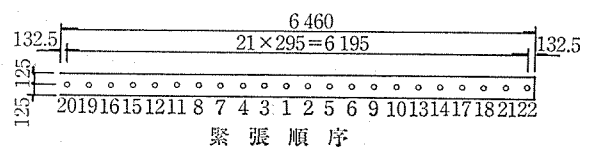
PC 鋼材の緊張管理は、荷重計示度と伸びを測定することにより行った(図—11)。ただし、版長方向のPC鋼材長は100mであり、計算伸びは72.5cmとなるため、ジャッキの性能上、緊張作業を数回に分ける必要があること、および仮緊張を行っているため、最終緊張力に対する総伸びを把握しにくいことなどより、荷重計示度による管理を行った後、ジャッキを取り除き、総伸びを確認した。なお、版長方向の緊張順序は、図—12に示すように、版中央部より、できる限り版幅方向の偏心力が、生じないように決定した。

5.7 グラウト工

版長方向、および版幅方向の緊張が完了した後、グラウトを行った。グラウトの配合は、表—4に示すようにW/C=40%であり、コンシステンシーが低いこと、さらに版長方向は100mと非常に長いため、グラウトの注入作業が困難となることが予想される。そこで、本舗装では流動化剤(NP-20)を使用し、Jロート方法によるコンシステンシー試験で6秒程度になるように調整し



図—11 緊張管理図



図—12 版長方向緊張順序

表—4 グラウト配合表

W/C	C	W	膨張剤	流動化剤
40%	40 kg	16 kg	0.4 kg	30 cc

C：普通セメント

膨張剤：ポゾリス GF 630

流動化剤：ポゾリス NP-20



写真—4 グラウト工

た。版長方向のグラウトは、PC 鋼材 1 本毎行ったが、版幅方向は数本を連結し、作業の能率化を図った（写真—4）。

6. おわりに

以上、第 2 新神戸トンネルの舗装について概略を述べた。今後、交通量の増大、重車両の増加およびスパイクタイヤ等の影響を受け、近年道路舗装の摩耗がはやく進む傾向にある。しかしながら、本トンネルのような長大トンネルにおいては、他に迂回路を設けられないので、修繕工事を施工することは不可能に近いと思われる。

この問題を解決する一方法として、神戸市道路公社では新神戸トンネル以来メンテナンスフリーの舗装を目指してきた。今後もこれらの舗装の追跡調査を行うとともに、より耐久性の高い舗装を追求していく必要がある。

最後に、本工事にあたって検討段階から施工に至るまで、御指導をいただいた京都大学藤井学教授をはじめ、関係各位に紙面をお借りして、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) セメントコンクリート舗装要綱，日本道路協会，昭和 59 年 2 月
- 2) 空港コンクリート舗装構造設計要領，(財) 航空振興財団，1977 年

【昭和 62 年 5 月 15 日受付】

◀刊行物案内▶

21 世紀に向けての PC 技術

(第 15 回 PC 技術講習会テキスト)

体 裁：A 4 判 197 頁

定 価：4 000 円 送 料：450 円

内 容：(A) 斜張橋概論；一般，ステー配置，橋軸方向ステー配置，各種断面に対する橋軸方向ステー配置法の影響，ステー配置間隔，桁，タワー。(B) 新しい時代の建築物への PC の応用；PC と建築，場所打ち一体式 PC 構造，プレキャスト PC 構造。(C) コンピュータを用いた PC 橋の施工管理；概要，土木各分野でのコンピュータ利用概況，PC 橋施工でのコンピュータ利用の実例，今後の展望。(D) 港湾構造物への PC の応用；まえがき，港湾施設の概要，港湾施設への PC 導入の歴史，海洋環境下での PC の有利性および PC との関連課題，最近の代表的な工事例，新しい港湾構造物への PC の応用，港湾技研で行われている PC の研究。(E) 新幹線における PC 橋の動向；まえがき，設計技術の動向，施工技術の動向，代表的な新幹線 PC 橋，今後の展望。(F) 施工例を主体とした最近の PC 技術の紹介；まえがき，橋梁，貯蔵容器，建築構造物，その他構造物。