

レオバ工法およびその定着具の実験

只 野 直 典*

1. まえがき

レオバ工法はバウル・レオンハルト工法と同じく、西ドイツのフリッツ・レオンハルト博士の発明によるポストテンション方式のPC工法である。昨年2月大成建設KKが技術導入を行ない、首都高速道路公団114工区高架橋の床版横締め用として使用された。さらに現在、日本道路公団名神高速道路豊中工区において、主桁縦締め用に用いられることになっている。

本工法の定着法の特徴は、緊張後に行なう注入セメントペーストの硬化を待って緊張時に用いた引張棒を除去する点、固定定着端では鋼線に波づけてコンクリートの付着力で定着する方法をとっている点、等にある。

すでにドイツにおいては多くの実施例はあるが、本工法をわが国で実施するにあたり、その使用鋼線、緊張金物の耐力性、定着部の定着性、等について行なった実験結果および、それらの資料の一部を報告する。

2. レオバ工法の概要

本工法には S 24, S 33, S 66, K 66 の 4 種のタイプが

ある。元来バウル・レオンハルト工法と併用することを目的として考案された工法でS型はいずれも固定定着端で波付定着を行ない、緊張端は鋼線を小さい半径で折り曲げ、それに緊張用の金物(定着鋼片)をひっかけて緊張するループエンド方式をとっている。したがって一方端からしか緊張できない、いわゆる片びき工法である。K 66はコーン定着を行なって、両びき用として考案された工法である。最近ドイツでは両びき用として、さらに2倍の緊張能力のあるAK-120が開発されている。鋼線は径5mmおよび8mmを表-1のように組合わせ使用する。もちろん径7mm鋼線の使用も可能である(図-1)。

表-1 レオバ工法の鋼線使用本数

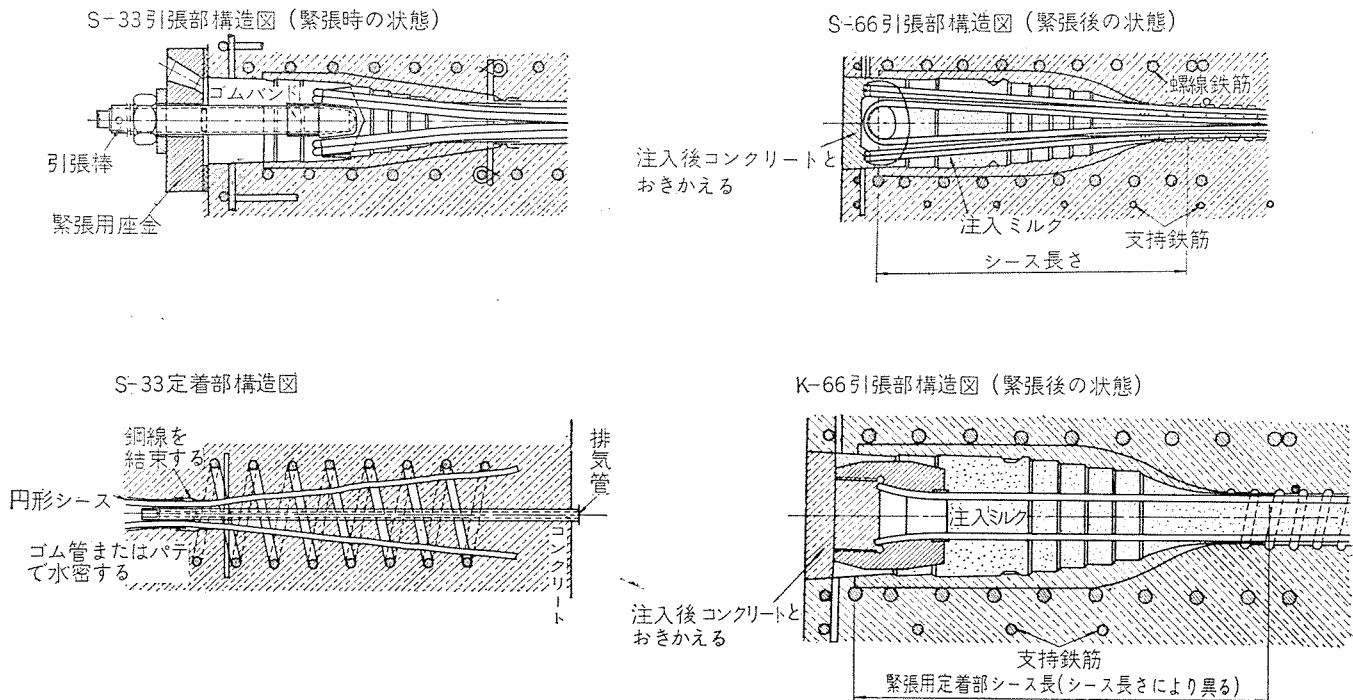
タイプ	S24	S33	S66	K66
使用鋼線径	φ5mm	φ8mm	φ8mm	φ8mm
本数	12本	8本	16本	16本

3. 鋼線に関する資料

(1) 径8mm鋼線の品質

レオバ工法を実施するにあたって当時8mm径鋼線は

図-1 レオバ工法構造図



* 大成建設株式会社 技術研究部

一般に使用されていなかったため、8 mm 鋼線の試作および使用にともなう諸実験を、神鋼鋼線鋼索 KK に依頼して行なった。

その結果から従来生産されている 7 mm 鋼線と、ほとんど同程度の品質のものができることがわかった。

従来から生産されている 5 mm, 7 mm 鋼線と機械的性質を比較すると表-2 のとおりである。レラクセーション試験結果は表-3 に示す。強度に関するヒストグラムは図-2 に示す。

(2) ループエンドによる引張破断力の減少

S タイプはいずれも半径 22.5 mm の屈曲半径で鋼線を折り曲げて使用する。したがって、その曲げ応力によって鋼線の破断力は低下する。ドイツの場合、この減少

表-2 鋼線の物理的性質

	鋼線 径			
	5 mm	7 mm	8 mm	
引張破断荷重 kg	3 460	6 310	8 290	
引張強度 kg/mm ²	176	164	163	
降伏点荷重 kg	3 160	5 720	7 260	0.2% 伸び
降伏点荷重/引張破断荷重 %	91.3	91.0	87.6	
伸び 測長 100 mm %	6.5	8.0	9.5	破断時伸び
伸び 測長 200 mm %	5.5	6.0	7.5	"
弾性係数 kg/mm ²	20 600	20 450	20 300	
くり返し曲げ	半径 mm	22.5	22.5	22.5
	回数 回	53.5	16.5	16

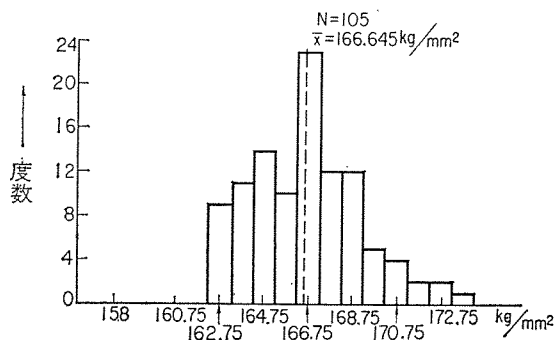
表-3 φ 8 mm 鋼線のレラクセーション試験結果 (1~100 h)

使用鋼線の強度

直径 8 mm 破断荷重 8 290 kg 破断強度 164.9 kg/mm² (T.S)
 降伏荷重 7 260 " 降伏点強度 144.5 " (87.6%)
 規格荷重 7 810 " 規格強度 155.0 " (σ_u)

初期荷重 σ_i (kg)	σ_i/σ_u (%)	$\sigma_i/T.S$	レラクセーション損失 (%)			
			1 時間	10 時間	24 時間	100 時間
4 300	55	51.8	1.02	1.30	1.40	1.57
4 680	60	56.4	1.01	1.40	1.53	1.75
5 060	65	61.0	0.75	1.27	1.35	1.58
5 460	70	65.8	1.30	1.88	2.10	2.55
5 460	70	65.8	1.45	2.42	2.70	3.21
5 860	75	70.7	2.92	4.23	4.80	5.65
6 250	80	75.5	4.90	7.75	8.95	10.85

図-2 φ 8 mm 鋼線破断強度ヒストグラム



率は冷間引抜き鋼線で径 5 mm 鋼線では 2~4 %, 8 mm 鋼線では 6~8 % と報告されている。この減少率は導入時に問題になるもので、径 5 mm 鋼線には 0 %, 径 8 mm 鋼線には 6 % の値をとっている。

国産鋼線について図-3 のようにして実際に使用する定着鋼片に 4 本の鋼線をひっかけて試験した結果は表-4 のとおりである。径 5 mm 鋼線について定着鋼片の変り丸棒 (径 45 mm) を使用して、破断強度 178 kg/mm² の鋼線について行なった結果では、減少率 2 % となり、減少率は鋼線の強度によっても異なる値である。

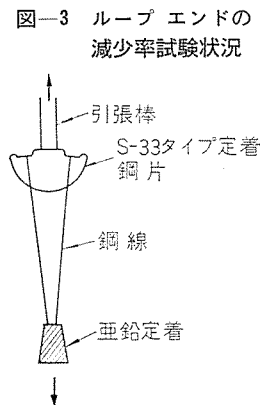


表-4 ループエンドによる減少率 (試料 10 本の平均値)

線 径	5 mm	7 mm	8 mm
破断強度の規格値 (kg/mm ²)	165	155	(158)
規格値に対する減少率 (%)	6	4	8
実破断強度 (kg/mm ²)	165	166	165

(3) 疲労試験に関する資料

ループエンドに対する疲労試験結果の一部は Leonhardt "Spanbeton" p. 38 および猪股 "プレストレストコンクリートの設計および施工" p. 27 にあげてある。それによると S 24 について行なった結果では下限引張応力度 90 kg/mm² に対して上限引張応力度は 108 kg/mm² となっている。レオンハルトの報告によれば『下限引張応力度として DIN に示す 0.55×破断応力度を採用して疲労試験を行なった結果、径 5 mm 鋼線の場合の変化限界は 17 kg/mm², 径 8 mm の場合 13 kg/mm² である。K 66 については 12 kg/mm² であった。この値に対しドイツでの許容値は 11 kg/mm² である。セメントペーストの注入によって変化限界を 20 kg/mm² にあげても、なお鋼線は破断することはなかった。コンクリートに埋込まれて定着される波付定着部は、変化限界 20 kg/mm² に達して初めて鋼線の疲労破断が見られた』となっている。国産鋼線を用いての疲労試験はまだ行っていない。

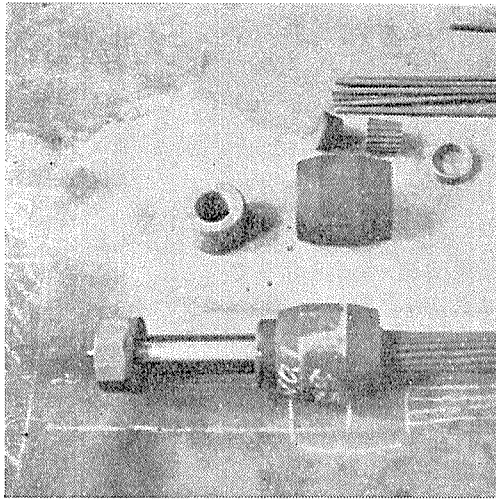
(4) 緊張時の鋼線の摩擦係数

使用鋼線、シースにおいてこの種の他工法と本質的に変わっていないところがないので同じ値を使用している。レオンハルトの指示によれば μ 値はいずれのタイプも引抜き鋼線の場合 0.22 を用い、 β 値に対しては S 24, S 33 用として 0.7°/m, S 66, K 66 用として 0.5°/m となっている。

4. 緊張金物の耐力試験

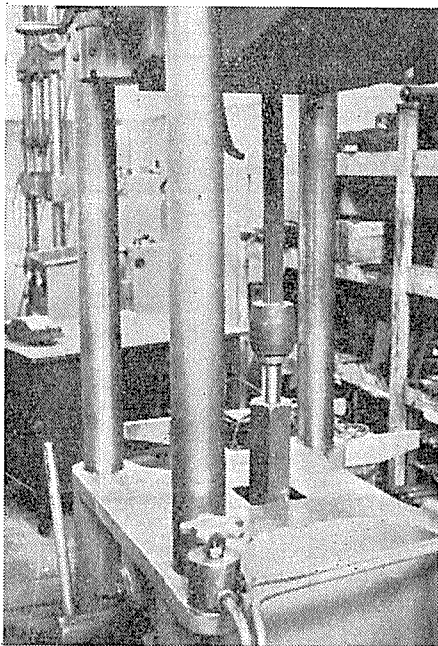
レオバ工法の緊張金物としては、図-1 に見られるよ

写真—1 K 66 定着金物



うに、定着鋼片、引張棒、ナット、座金、等がある。これら部品の耐久性を試験する装置を製作し 200 t 万能試験機にセットして、S 24, S 33 部品には 50 t, S 66, K 66 部品については、100 t までの耐力試験を国産部品について行ない、いずれも満足される結果を得た。K 66 は 図—1 に見られるようにカップラー状の定着鋼片に 2 つの材質の異なるコーンを用いて鋼線を定着する。コーンは圧入機を用い 100 t の圧入力で圧入する。そのさいコーンのセットの巧拙、定着鋼片のコーンそう入部分の寸法の製作上の誤差、等が、コーンの圧入量に影響することがわかったのでコーンのセットの手順、部品の寸法の異なる物、等について比較試験した。コーンの焼入れ硬さによって鋼線のかみ具合が異なるので、数種の焼入れ硬さのコーンについても比較試験した。K 66 の耐力試験では緊張力 70~80 t から、コーンがなじむためのコーンのすべり込みが起ることが認められた。その量は最初のコーンの圧入量によって異なり、荷重 100 t で 2~4 mm である。これは、緊張時に起こる現象なので問題はない(写真—1~2)。

写真—2 K 66 シース耐力試験



5. 波付定着部の定着性

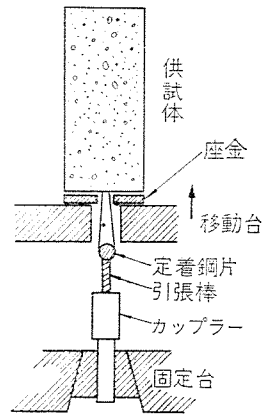
(1) コンクリートの材令別による引抜き試験結果

アサノ早強セメント 380 kg/m³, 最大骨材粒径 25 mm の生コンクリートを使用し図—5 に示すような波付定着部の供試体を製作し、コンクリート材令 3 日, 5 日, 7 日, で引抜き試験を行なった。

試験の方法は図—4 に示すように供試体を 200 t 万能試験機にのせて行なった。S 24 については鋼線破断までの荷重, S 33 には最大 50 t, S 66 には最大 100 t までの荷重を行なった。

試験結果を表—5 に示す。表中に見られるように供試体表面に縦きれつが入ったものが多いが、これは供試体に鉄筋を入れなかったからである。

図—4 試験方法



(2) 波付定着部の応力状態

S 33, S 66 について、それぞれ 3 個ずつの供試体を引抜き試験と同じ配合のコンクリートで製作し、モールドゲージおよびワイヤーゲージによって緊張時のひずみ度の変化を測定した。試験時のコンクリートの材令は試験機のつごうで S 33 は 30 日, S 66 は 60 日であり、載荷方法は前記(1)と同じである。

試験結果を図—6~7 に示す。図中 No. 1, 2, 3 は、それぞれ供試体番号で、第 1 回~第 6 回などはくり返し荷重の回数を示す。モールドゲージは、らせん筋にそれぞれ供試体中に埋込み、ワイヤーゲージは供試体表面に貼りつけた。

(3) 波付定着部の定着性について

図—5 供試体の構造

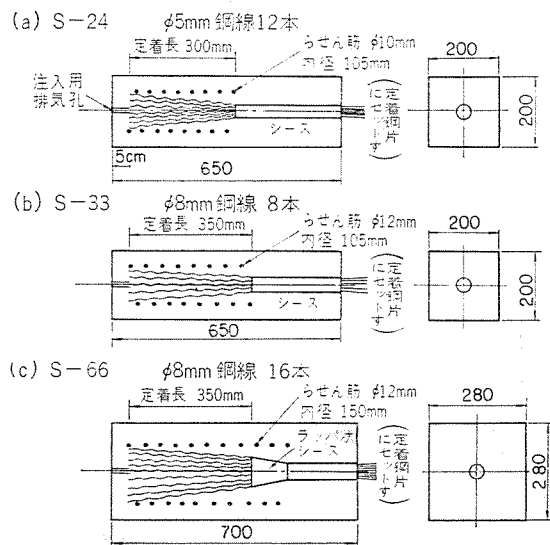


表-5 レオバ工法波付定着部引抜き試験結果

タイプ	使用鋼線		鋼線全断面積 A_p (mm ²)	鋼線許容強度		破断荷重 $A_p \sigma_{pu}$ (t)	ループ エンド 損失 (%)	導入時最大 緊張力 P_0 (t)	設計時最大 緊張力 P_a (t)	波付定着部引抜き試験結果		
	径 (mm)	本数 (本)		引張り σ_{pu} (kg/mm ²)	降伏点 σ_{py} (kg/mm ²)					材令3日 $\sigma_c=206$ (t)	材令5日 $\sigma_c=263$ (t)	材令7日 $\sigma_c=281$ (t)
S 24	5	12	235.5	165	145	38.9	0	27.2	23.3	5~30 t くり返し 7回後 鋼線破断 38.4 " 38.0 " 37.7	鋼線破断 37.3 " 37.8 " 37.6	30 t くり返し 4回 鋼線破断 37.7 " 37.2 " 37.4
S 33	8	8	401.9	158	138	63.5	8	40.9	38.1	0~40 t くり返し 4回 46.0 t できれつ 49.5 10~40 t くり返し 5 回 40 t できれつ 49.5 最大 42.8 t で破壊 くり返し荷重なし 最大 49 t で破壊	41 t できれつ 最大 49.5 36.4 t できれつ 最大 49.5 41.4 t できれつ 最大 47.2	38.5 t できれつ 最大 48.7 39 t できれつ 後 42 t くり返し 4回 最大 50 t 以上 42 t できれつ
S 66	8	16	803.8	158	138	127.0	8	81.8	76.2	80 t できれつ 最大 91 t 90 t できれつ 30~ 80 t くり返し 5回 最大 89 t	90 t できれつ 最大 100 t 以上 50~85 t くり返し 2 回 98.8 t できれつ 最大 100 t 以上 80 t できれつ 最大 100 t 以上	96.6 t できれつ 最大 100 t 以上 85 t くり返し 5回 90 t できれつ 最大 100 t 以上 96 t できれつ 最大 100 t 以上
K 66	8	16	803.8	158	138	127.0	—	88.9	76.2	—	—	—

注：設計上の緊張力の決め方 $P_0=0.70 \times \sigma_{pu} \times A_p \times L_b$ $P_a=0.60 \times \sigma_{pu}$

L_b ：ループ エンド損失を考慮した係数 $\phi 5$ mm 鋼線 100%， $\phi 7$ mm 鋼線 96%， $\phi 8$ mm 鋼線 92%

写真-3 引抜き試験状況
(S 66 材令 3 日)

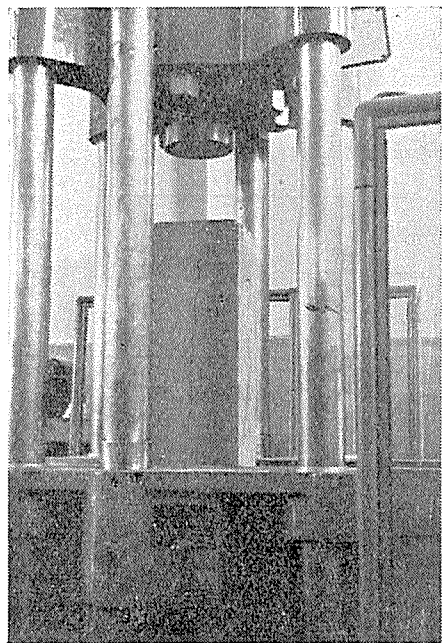


写真-5 S 24 材令 3 日鋼線破断の状況

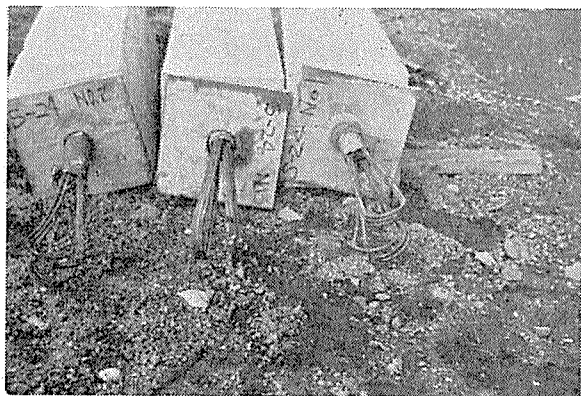


写真-4 S 66 材令 3 日の破壊状況

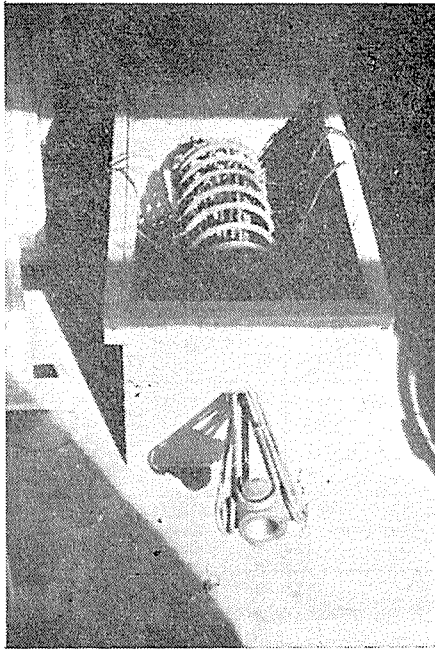


波付定着部の定着性に関する要素としては、(a) コンクリートの十分な填充、(b) 緊張時のコンクリート材令、(c) コンクリートのかぶり、等があげられる。

コンクリートの付着力に期待する定着法であるから波付定着部のコンクリートの十分な締固めが必要で、実際に施工した例では、十分な注意を払えば問題は起こらない。鋼線の間隔が割合せまく拡散されているので、当然コンクリートの最大骨材粒径に制限があり、現在 25mm 以下と制限している。したがって構造物本体に、それ以上の粒径の骨材を使用する場合には、定着部のコンクリートの使用骨材を変えねばならない。

若い材令での引抜き試験結果では表-5 に見られるよ

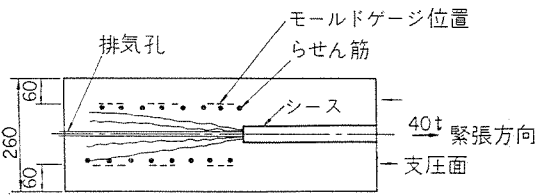
写真-6 供試体の構造 (S 66)



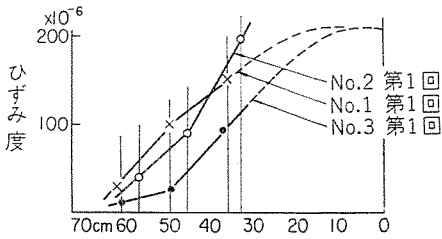
うに S24 では、材令 3 日 コンクリート圧縮強度 206 kg/cm² でも十分定着力はあるが S33 では無理である。もちろんコンクリートのかぶりの影響が多分にあり、また材令によって決められるべきものでもない。このよう

図-6 定着部コンクリートのひずみ度の変化

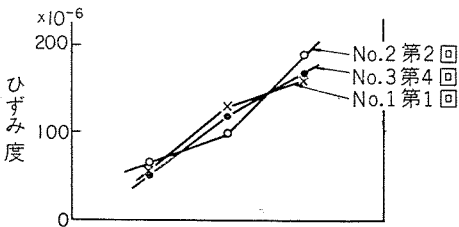
(a) S-33 荷重40tの場合



らせん筋付近のひずみ度 (荷重40t)



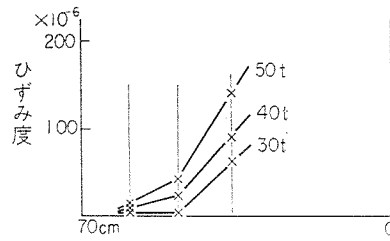
供試体表面のひずみ度 (荷重40t)



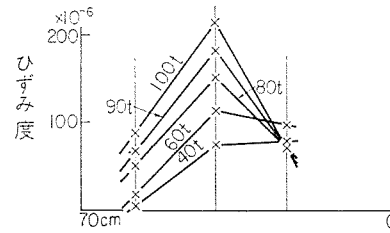
$E_c=300,000\text{kg/cm}^2$ として支圧面における平均圧縮強度をひずみ度に換算すると荷重40tの時 $\epsilon=210 \times 10^{-6}$ となる。

図-7 荷重とひずみ度の分布

(a) S-33 No.3 らせん筋付近 (50t第1回)

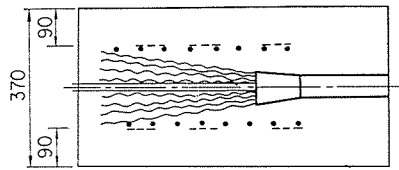


(b) S-66 No.3 らせん筋付近 (100t第1回)

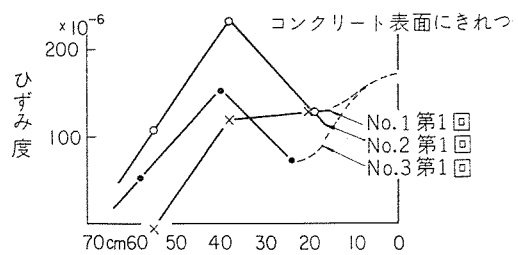


な定着法の場合、緊張の時期については土木学会指針にしたがえばプレテンション方式の規定でコンクリート強度 300 kg/cm² 以上のときとするのが妥当であろう。

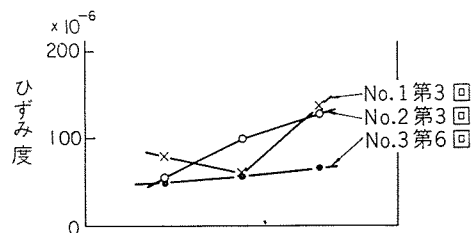
(b) S-66 荷重80tの場合



らせん筋付近のひずみ度 (荷重80t)



供試体表面のひずみ度 (荷重80t)



$E_c=350,000\text{kg/cm}^2$ として、支圧面における平均圧縮強度をひずみ度に換算すると荷重80tに対し $\epsilon=170 \times 10^{-6}$ となる。

引抜け時は、写真-4に見られるように、らせん筋と一体となったものとしての破壊状況を呈した。(2)の実験結果に見られる緊張方向のらせん筋にそってのひずみ度の分布の形状は、そのまま定着力の分布状態を示すもので、波付定着部始点上で最大となり、緊張方向圧縮力は導入時緊張力のときで $35\sim 50 \text{ kg/cm}^2$ となる。引抜き試験供試体にはらせん筋以外に鉄筋を入れなかったため、多くの供試体に緊張方向にかぶりの薄い部分に縦きれつが生じた。このことより定着部のコンクリートのかぶり配筋上、特に床版横締め用として用いるときに注意する必要がある。一般に床版鉄筋がこの縦きれつを生じさせる割裂力に対して、ある程度有効に働くわけであるが、一応設計時に考慮すべき問題である。

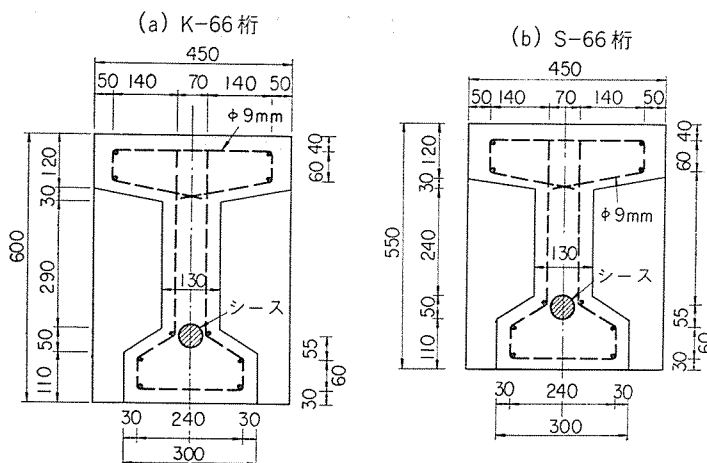
定着部がらせん筋と一体となったものとして抵抗するとすれば、その外周面でのせん断抵抗では十分に緊張力に耐えうる大きさになっているので、かぶりがうすいとき定着始点の円すい形状のコーンによる割裂力がコンクリートにきれつを入れると考えられる。実験の結果ではコーン部の破断面角度は約 20° であった。そのことより割裂力として緊張力 $\times (1/4) \times \tan 20^\circ$ とし、それに抵抗する断面の有効長を 50 cm とすると、実験結果がほぼ一致する。上記の関係式より緊張時のコンクリート圧縮強度を 300 kg/cm^2 とし、その引張強度を 25 kg/cm^2 とすると、無筋でコンクリートにきれつが入らないためのかぶりの限界は S 24 で 2.5 cm 、S 33 で 3.6 cm 、S 66 で 7.2 cm 以上となる。また上記の割裂力を鉄筋で持たせるとすると S 24 で $\phi 9 \text{ mm}$ 鉄筋 6 本、S 33 で $\phi 12 \text{ mm}$ 鉄筋 5 本、S 66 で $\phi 12 \text{ mm}$ 鉄筋 10 本となる。

6. S 66, K 66 シースの桁による実験

(1) 実験内容

レオバ工法では緊張端の定着力は引張棒をとりはずすことによって、硬化ペーストを介してコンクリートに伝達される。したがって引張棒をとりはずし時期や、セメントペーストの品質が多分に緊張端の定着性に影響を与えると考えられるので、引張棒をとりはずすことによって緊張端にどのような応力変化が起り、またそれが桁の性能にどのような影響を与えるかをしらべ

図-8 実験桁断面



る目的で行なった。桁は図-8のような断面をなし、長さ 9 m で支間長 8.5 m とした。コンクリートはアサノ早強セメント 380 kg/m^3 を使用した最大骨材寸法 25 mm の生コンクリートである。導入緊張力は S 66 桁は 84 t 、K 66 桁は 89 t である。緊張後に注入したセメントペーストは、普通ポルトランドセメント、ポリリス No. 8、アルミ粉末 0.003% を用い S 66 桁の方は w/c 38% 、沈入値 46 秒 、押ボタン方法による材令 28 日 圧

写真-7 実験桁載荷状況

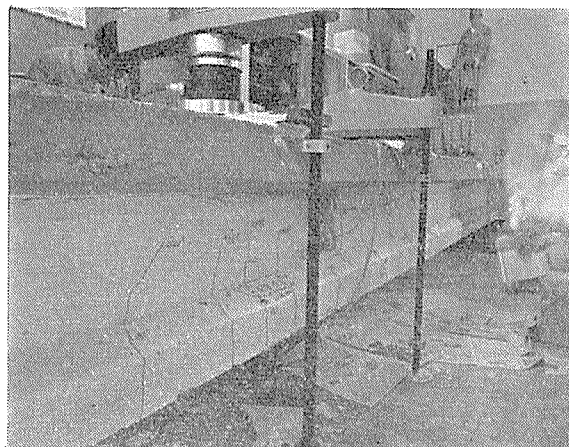
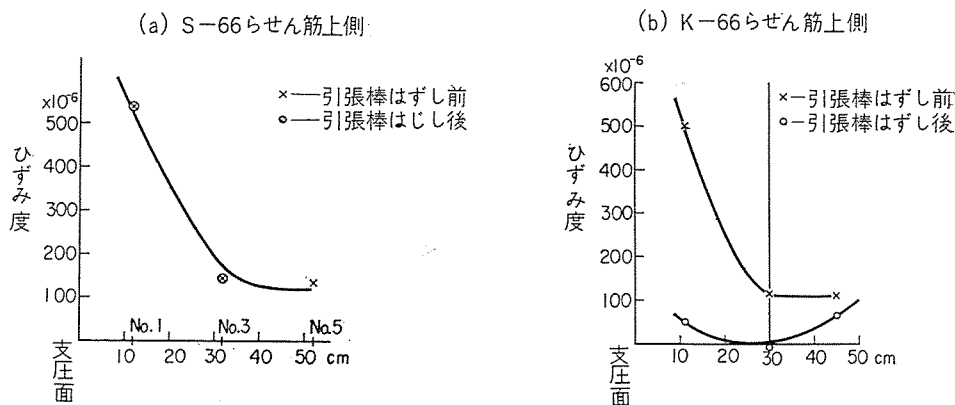


図-9 引張棒をとりはずし前後のらせん筋位置のひずみ度変化



縮強度 446 kg/cm^2 , K 66 桁の方は混合機操作の手違いから沈入値 12 秒, 圧縮強度 279 kg/cm^2 と品質の悪いものであった。注入後 5 日目に引張棒をはずして載荷した。載荷方法は実物大実験装置を用いて間隔 90 cm の 2 点載荷法によった。S 66 桁はコンクリート材令 33~35 日に設計荷重 8.2 t を 7 回くり返し載荷してから破壊した。ひびわれ荷重は 15.5 t, 極限破壊荷重は 24.2 t であった。K 66 桁は材令 46 日に設計荷重 10 t を 5 回くり返し載荷後破壊した。ひびわれ荷重 16 t, 極限破壊荷重は 27 t であった。

(2) 実験結果

a) 引張棒とりはずし前後のひずみ度の変化 図-9 は定着部コンクリート内部らせん筋にそって入れたモールドゲージによる緊張方向のひずみの変化を示す。良質のセメントペーストを注入した S 66 桁の方はほとんど変化がないが, 水の多いペーストを用いた S 66 桁の方は大きい変化が認められる。引張棒とりはずしは注入後 5 日目で, このときのペーストの圧縮強度は S 66 桁の方は 200 kg/cm^2 , K 66 桁の方は 120 kg/cm^2 と推定される。

図-10~11 は定着部コンクリート表面のひずみ度の変化をコンタクト ストレイン メーターで測定した結果

写真-8 S 66 桁ひびわれ状況

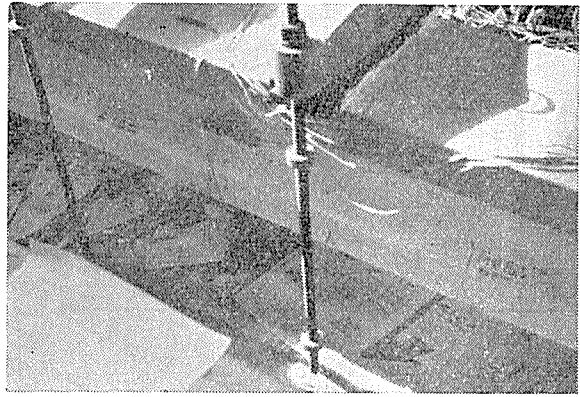


写真-9 K 66 桁ひびわれ状況

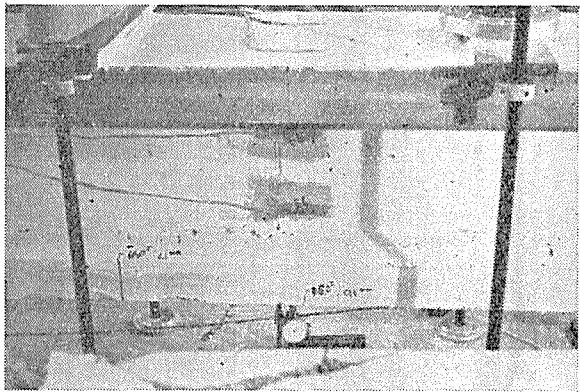


図-10 引張棒とりはずし前後の S 66 桁端 (緊張端) コンクリート表面のひずみ度変化

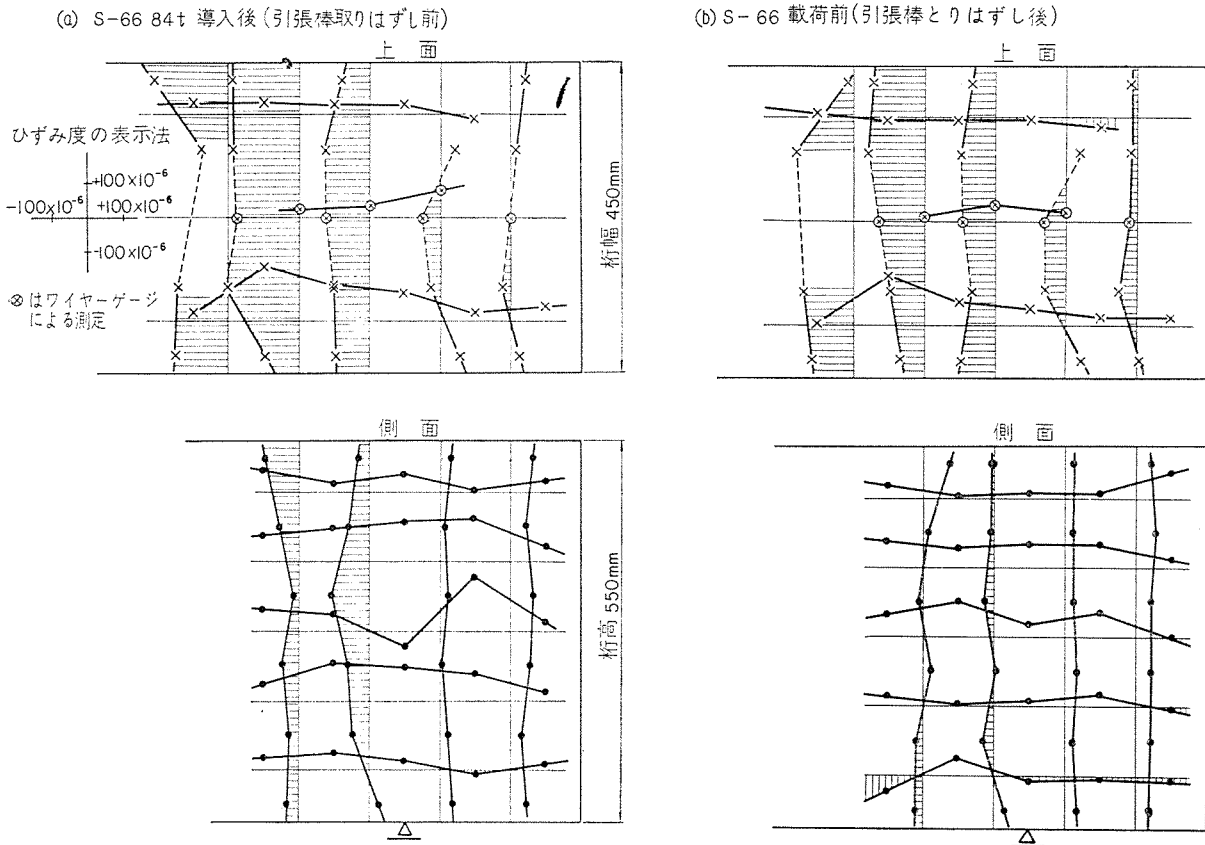


図-11 引張棒とりはずし前後の K 66 桁端 (緊張端) コンクリート表面のひずみ度変化

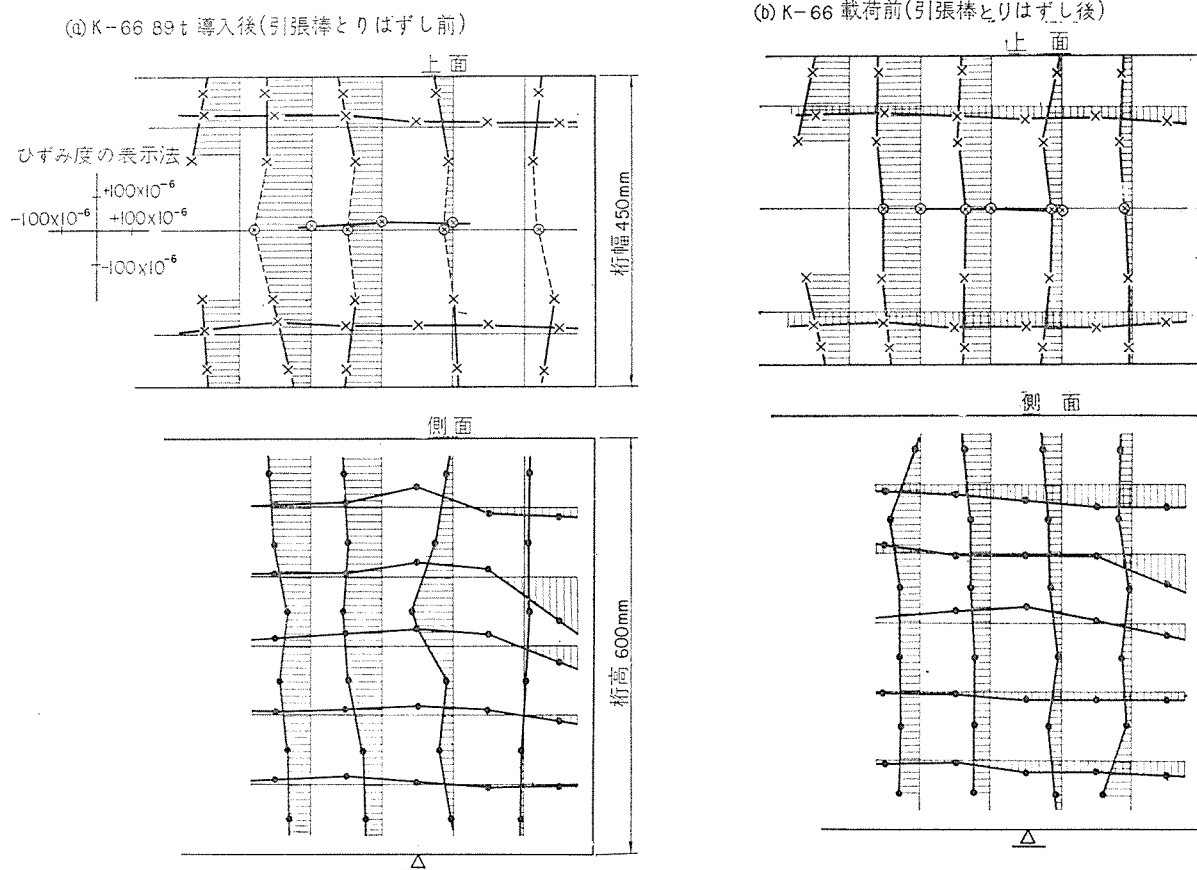


写真-10 S 66 桁の破壊状況

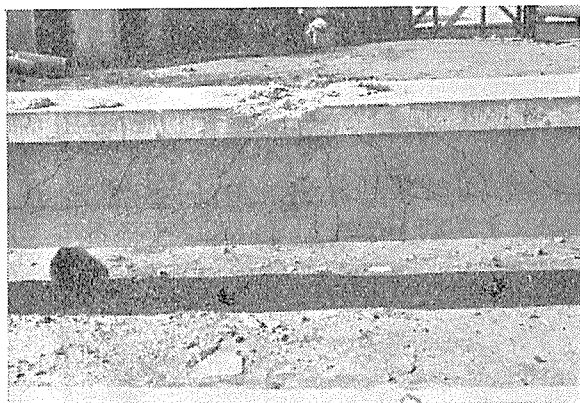


写真-11 K 66 桁の破壊状況



である。桁上面では桁軸方向で桁端から 30 cm 以上のうちでひずみ度 $30 \sim 50 \times 10^{-6}$ 、圧縮強度にして $10 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$ の変化が認められる。桁断面方向では引張応力が圧縮応力に変化している。桁側面もほぼ同じ傾向を示している。これらの現象は引張棒をはずす前は定着力は緊張座金を介して桁端から伝えられていたものが、引張棒をはずすことによって桁端面近くの定着力が消えるために起るものである。この点レオバ工法の場合、桁端の鉄筋量、断面構造、等に考慮を払わねばならない。桁径間部のひずみ度の変化は、ほとんどないといってよい結果であった。

b) 桁としての性能 図-12,13 はプレストレス導入時および設計荷重時の桁中央のひずみ度分布の計算値と測定値を示す。図-14 はびびわれ荷重時の計算上の中立軸線と実測のひずみ度曲線を示す。

写真-10,11 は破壊状況を示す。破壊荷重としての理論値は次のとおりである。

	K 66 桁	S 66 桁
設計破壊荷重	20.8 t	25.0 t
極限破壊荷重	23.0 t	26.0 t

以上の理論値に対し実験桁の最大破壊荷重は S 66 桁は 24.2 t, K 66 桁は 27.0 t であった。

図-12 プレストレス導入時桁中央のひずみ度
(破線は計算値, 実線は測定値)

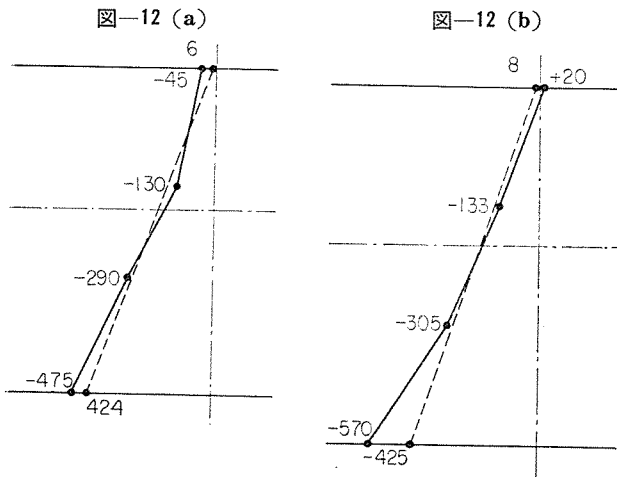
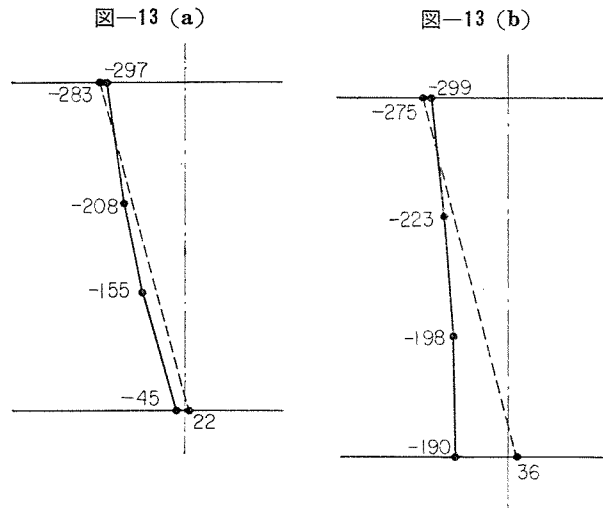
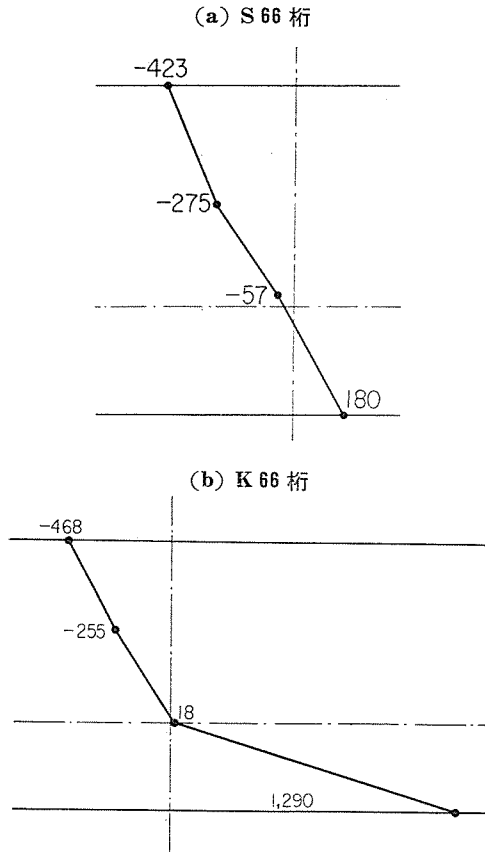


図-13 設計荷重時桁中央のひずみ度



以上のように比較的低強度のペーストの場合でも定着端で応力変化はあるにせよ、桁としての性能は失なわ

図-14 ひびわれ荷重時のひずみ度分布と中立軸線



れない。引張棒とりはずしの時期についてレオンハルトは完全に注入されていれば硬化ペーストの強度は 100 kg/cm² 以上あればよいと指示しているが、シースの中の鋼線は、ちょうどプレテンション方式に近い状態なので硬化ペーストの圧縮強度が 300 kg/cm² 以上くらいの時期に引張棒をはずせば、さらに安全であろう。ペーストの圧縮強度が 300 kg/cm² 以上になるためには気温 20°C で約 7 日、気温 5°C で約 14 日である。

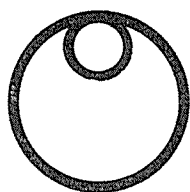
完全注入の点からはセメントペーストの分離水、沈殿、等を考慮し w/c 40% 以下のものを使用するようにしている。さらに強度にあまり影響のない程度の膨張剤の使用、ラップ状シースの排気管のとりつけ、等も考慮している。

7. あとがき

以上、レオバ工法導入以来とりまとめた資料、実験結果、等を紙面の許す範囲で紹介した。導入以来日も浅く国内での実績も少ないので本報告を機会に読者諸賢の御意見をたまわり、今後の本工法の改善に、また PC 技術向上に資することができれば幸いである。

末筆ながら本工法の実施および実験に御助力、御指導をいただいた首都高速道路公団、日本道路公団の関係各位に対して紙上を借りて厚くお礼を申し上げたい。

1962.6.11・受付



株式会社 十二製作所

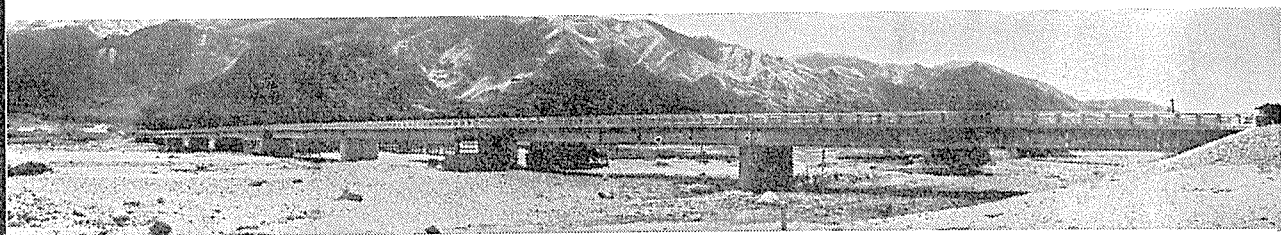
取締役社長 南出他十郎

本社 東京都千代田区丸ノ内1丁目1番地
 (国際観光会館4階432号室)
 電話 丸ノ内(231)7812・5081番

工場 東京都江東区南砂町1丁目1016番地
 電話 深川(644)0141・0142番



武田橋(山梨県)



ピーエスコンクリート設計施工並に製作

日本ピー・エス・コンクリート株式会社

顧問 加賀山之雄 顧問 稲浦鹿蔵 取締役社長 有馬義夫

本社 福井県敦賀市泉125号2番地 電話(敦賀)代表 1400番
 東京営業所 東京都千代田区大手町1丁目4番地 (大手町ビル3階327号室)
 電話 和田倉(201)4530番
 大阪営業所 大阪市北区堂島上2丁目39番地 (毎日産業ビル3階)
 電話 大阪(36)7797番
 名古屋営業所 名古屋市中区南呉服町2丁目18番地 (呉服町ビル3階4号室)
 電話 名古屋(24)7516番
 福岡営業所 福岡市上辻の堂町26番地 (ナショナルビル5階)
 電話 東⑧代表 4134番