

## 鉄道における PC 構造物 設計の動向

野 口 功



Isao NOGUCHI

前・日本国有鉄道構造物設計事務所所長

### 1. ま え が き

我が国においては、昭和 30 年代からのプレストレストコンクリートが実用に供されるようになり、急激な勢いで普及していった。

鉄道において、まくらぎは木まくらぎから、現在は PC まくらぎが一般的なまくらぎとなっており、また橋梁においても、山陽新幹線以後は、鋼桁の騒音問題より、中規模以上のスパンの橋梁のほとんどがプレストレストコンクリート橋となっている。東北・上越新幹線には 100m 以上のスパンをもつ橋梁も出現している。東北新幹線における第 2 阿武隈川橋梁のスパンは 105.0m、上越新幹線における吾妻川橋梁の T 形ラーメンのスパン 109.2m、大田川橋梁のスパン 110m となっている。

施工法としては、移動支保工や押出し工法が非常に多く用いられてきている。図-1 は東北新幹線(大宮以北)の PC 橋梁の架設工法別の径間数の累計である。

このように大量の PC 橋梁が施工されるようになった背景には、環境問題のほか、電算による構造解析の容易さおよびスピード化、施工機械の進歩等によるものである。

忙しかった高度成長時代も一段落し、安定成長の時代となってきており、より少ないコストで構造物の建設を

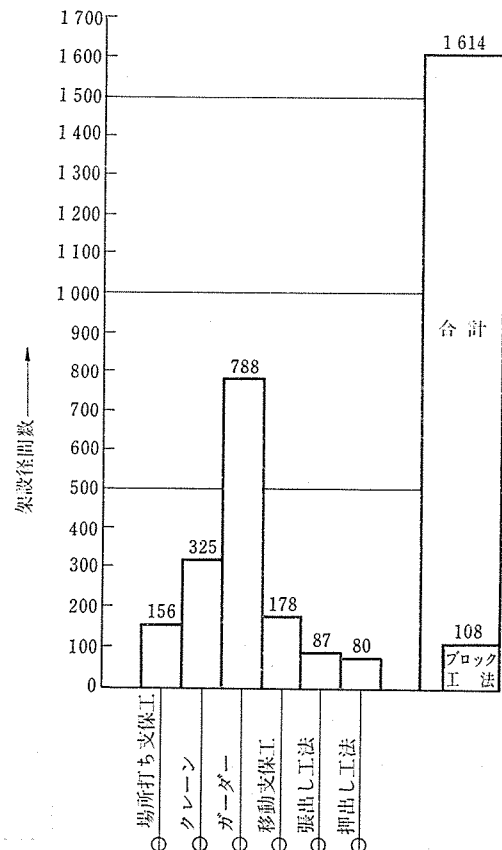


図-1 架設工法別の径間数

## 論 説

可能とすべく、一層の技術開発が必要な時代となってきた。

鉄道におけるPC技術の現状と、将来のPC新技術開発のためのプロセスとして現在検討を進めている分野について、以下に紹介する。

### 2. 設計技術

最近のコンピューターの進歩は目覚ましい勢いである。数年前まで大型計算機でないとできなかった計算が現在はマイコンで可能となってきており、小型計算機で行っていたような計算が、電卓で可能となってきた。

このようなコンピューターの進歩に伴い、設計のやり方も変化してきている。今まで人間の行っていた計算業務は、現在ほとんどがコンピューターにより行われている。コンピューターは、人間が行う場合に非常に多くの時間を要する計算を短時間に正確にやってくれる。このため、過去においては構造解析の困難さのため利用されなかった構造形式も自由に選定できるようになってきた。PC連続桁のカンチレバー工法、押し出し工法等が大量に施工されているが、これらの設計や施工管理には現在コンピューターは、必要不可欠となってきている。また新しい構造形式として検討されているPC斜張橋においても、その設計と施工管理にはコンピューターが必要不可欠である。

鉄道橋の設計におけるコンピューターの利用の現状は、PC橋の自動設計までが一般化されており、一時期において自動製図を開発したが、当時の社会情勢からまだ実用化されるにいたっていない実情である。鉄道橋として多く用いられるI形桁と箱形桁については自動設計プログラムを用意し、設計の際に貸与するシステムをとっている。またこれら以外の特殊橋梁についても、その構造解析プログラムや、PC用のプログラムが、各々のコンサルタントや、電算会社にて整備されてきている。

設計におけるコンピューター化は必然的に進むと思われるが、それに対応して設計示方書の整備、設計のシステムの対応が必要である。設計の示方書は、設計計算の精度がコンピューターの利用により非常に高くなったにもかかわらず、相変わらず手計算時代の精度で作られている。示方書の精度をより上げるためには、基本的な技

術の進歩が必要であり、例えば、せん断に対する設計法、ひびわれに対する設計法、ねじりに対する設計法、等の研究が必要である。もう一つの設計システムとしての対応とは、今まで多くの労力をふり向けていた設計計算が不要となったことにより、計算に入る前の構造計画時の判断がより重要となってきたことである。

今までの、設計計算に多くの時間を要していた時代は、技術者は構造計画に時間をかける余裕がなかったが、コンピューターを有効利用することにより、現在は構造計画や、スケルトンの十分な検討のための時間的余裕が生じてきたといえる。構造計画、スケルトンの検討が今後技術者の行う重要な分野であり、そのためには、この構造計画を担当する分野に総合的技術力のある人材を養成してゆくことが大切である。

### 3. 設計法

プレストレストコンクリートの設計は、鉄道橋においては表-1に示すように設計荷重時にコンクリートに生

表-1 許容曲げ引張応力度  
(改訂案)

適用範囲	$\sigma_{ck}$ (kg/cm <sup>2</sup> )				
	300	400	500	600	800
プレストレス直後	12	15	18	21	24
全死荷重作用時	0	0	0	0	0
設計荷重作用時	8	10	12	12	12

適用範囲		$\sigma_{ck}$ (kg/cm <sup>2</sup> )		
		300	400	500
全静荷重が作用する前	部材圧縮部	12	15	18
" してから	"	0	0	0
設計荷重が作用して	部材引張部	3	5	7

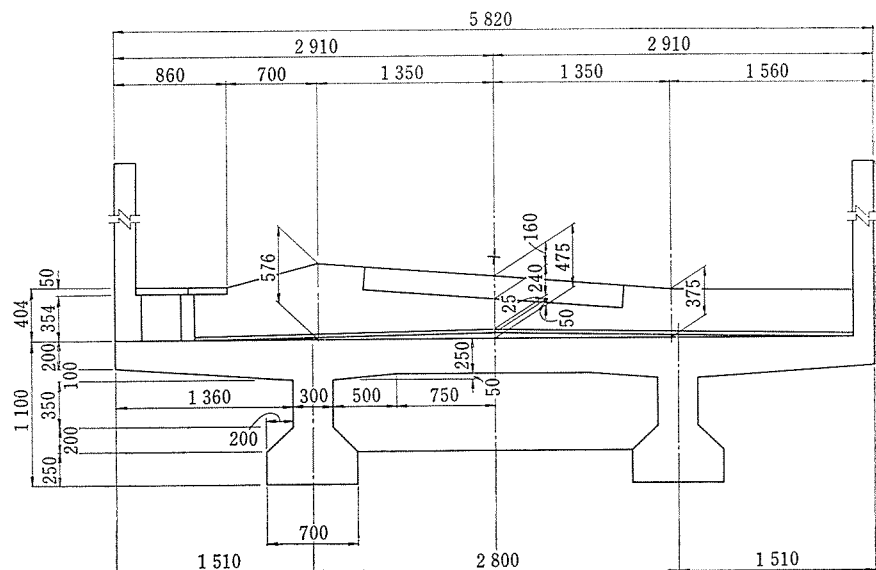


図-2 ボケラ B

じる引張応力度を従来 5 kg/cm<sup>2</sup> 程度許容したパーシャルプレストレスとなっていたが、この許容する引張応力度をさらに大きくしてゆく方向で、現在設計標準の改訂作業を行っている。この場合は通常の状態では、コンクリートにひびわれの生じないことを前提としているが、さらに進んで、設計荷重時にひびわれを許容する設計法の検討も行っている。

ひびわれを許容する設計を行うには、ひびわれと鋼材の腐食について、環境条件やかぶり等との関係をさらに明らかにしてゆくことが重要である。現在、このひびわれの発生を許容した P C 構造として、桜井線ボケラ B、スパン 16.2 m (図-2) を施工しており、安全性を確認しながら順次適用を増やしてゆくことを考えている。

また一方、P C 橋にひびわれを許すという考え方よりも、R C のひびわれを制御するという考え方での PRC

構造の検討も進めており、現在実橋への適用を検討中である。

このような P C と R C の中間的な PRC 構造の設計手法が確立すれば、今後の構造としては、小スパンの橋梁が R C 構造、中スパンが PRC 構造、大スパンが P C 構造と、経済性より使用区分されてゆくのではないかと考えている。このように、新しい設計法の積極的な開発が今後さらに進められていくことが技術の進歩、発展に貢献するところ大であると思われる。

### 3. 材 料

#### 3.1 P C 鋼 材

P C 鋼線については、今まで鉄道橋においては JIS 規格 A 種の品質のものを用いることを基本としてきたが、最近 JIS 規格 B 種の P C 鋼線の使用を基本とすることに

表-2 P C 鋼より線の機械的性質、単位重量、公称断面積

記 号	呼 び 名	引 張 試 験			レラクセーション値 (%)	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	単 位 重 量 (kg/m)
		引張荷重 (kgf)	降伏荷重 (kgf)	伸 び (%)			
SWPR 7 A	7本より 9.3 mm	9 050 以上 ( 175 以上)	7 700 以上 ( 150 以上)	3.5 以上	3.0 以下	51.61	0.405
	7本より 10.8 mm	12 200 以上 ( 175 以上)	10 400 以上 ( 150 以上)	〃	〃	69.68	0.546
	7本より 12.4 mm	16 300 以上 ( 175 以上)	13 900 以上 ( 150 以上)	〃	〃	92.90	0.729
	7本より 15.2 mm	23 100 以上 ( 165 以上)	19 700 以上 ( 140 以上)	〃	〃	138.7	1.101
SWPR 7 B	7本より 9.5 mm	10 400 以上 ( 190 以上)	8 850 以上 ( 160 以上)	〃	〃	54.84	0.432
	7本より 11.1 mm	14 100 以上 ( 190 以上)	120 000 以上 ( 160 以上)	〃	〃	74.19	0.580
	7本より 12.7 mm	18 700 以上 ( 190 以上)	15 900 以上 ( 160 以上)	〃	〃	98.71	0.774
SWPR 19	19本より 17.8 mm	39 500 以上 ( 190 以上)	33 600 以上 ( 160 以上)	〃	〃	208.4	1.652
	19本より 19.3 mm	46 000 以上 ( 190 以上)	39 500 以上 ( 160 以上)	〃	〃	243.7	1.931
	19本より 20.3 mm	50 500 以上 ( 185 以上)	43 000 以上 ( 160 以上)	〃	〃	270.9	2.149
	19本より 21.8 mm	58 400 以上 ( 185 以上)	50 500 以上 ( 160 以上)	〃	〃	312.9	2.482

注：( ) 内の値は規格値を公称断面積で除した値 (単位：kgf/mm<sup>2</sup>)

表-3 P C まくらぎに用いている P C 鋼棒

P C 鋼棒 の 種 類	呼 び 名	基 本 径 (mm)	径 の 許 容 差 (mm)	公 称 断 面 積 (mm <sup>2</sup> )	機 械 的 性 質				
					引 張 試 験				レラクセーション試験
					引張荷重 (以上) (kg)	0.2% 永久伸び に対する荷重 (以上) (kg)	ねじ部およびヘッド の破壊荷重 (以上) (kg)	伸 び (以上) 注 (1) (%)	
A	10	10.026	-0.2	78.9	10 500	9 600	10 000	5	1.5
B	11	11	+側は規定 しない	95.0	12 600	11 700	12 100	5	1.5
C	13	13		132.7	18 500	16 500	17 000	5	1.5

注 (1)：標点間距離を基本径の 8 倍とした破断後の突合せ伸びとする。

注 (2)：レラクセーション試験の載荷荷重は、この表の 0.2% 永久伸びに対する荷重の 80% に相当する荷重とする。

論 説

変更した(表-2)。これは、PC鋼線の製造技術の進歩に伴い、高強度鋼材の信頼性が高まってきたことによるものである。腐食および応力腐食、疲労強度等についても問題ないものと判断している。

PC鋼棒については、橋梁では現在ほとんどB種が用いられ、一部に仮設用としてC種まで使用されている。

PCまくらぎに用いているPC鋼棒は表-3に示すように、C種よりいくぶん高強度のものである。また一部の軌道スラブにはJIS G 3109(D種1号)( $\sigma_{pu}=145 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_{py}=130 \text{ kg/mm}^2$ )を用いている。

高強度のPC鋼材を使用することは、資源の有効利用の面からも、また建設コストの低減の面からも有利な面が多いので、安全性への信頼が高まれば、より高強度のものを用いることになると思われる。

また現在、原子力発電の分野や、蒸気養生する部材で用いられてきている低レラクセーション鋼材についても、経済的なメリットが生ずる分野に積極的に利用してゆきたいと考えている。

3.2 シース

シースはPC鋼材の位置を確保すると同時に、プレストレッシングにおいて、緊張力のロスを少なくする働きをしている。設計上はこのシースと鋼材との摩擦係数がプレストレス力の計算に影響し、長いケーブルを用いる場合は、緊張力のロスが大きくなる。このロスを少なくするための方法として低摩擦のシースがいくつか考えられている。図-3は4径間連続(35.2+40.0×2+29.2)の下路橋であり、押し出し工法により施工した橋梁である。橋梁の中間に切欠きを作り定着することは好ましくないため、橋長にわたるケーブルを使用した。この場合橋梁の中央付近では緊張力のロスが大きくなるため、低摩擦シースを使用した。

摩擦係数の測定例を表-4に示す。

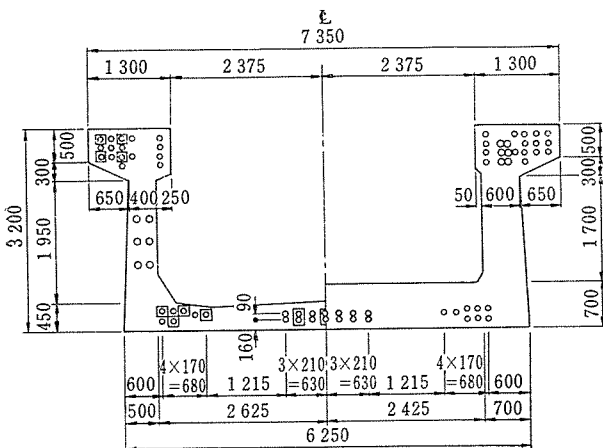


図-3 PC下路桁の断面

表-4 各試験ケースの摩擦係数

Case	摩擦係数 ( $\mu$ )					
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
1		1 1→2	2			
2		1 1→2	2			
3		1 1→2	2			
4		1 1→2	2			
5		1 1→2	2			
6			1 2→1			
7					2 2→1	1 1→2
8				2 2→1	1 1→2	
9				1 2→1	2 2→1	
10		1 1→2	2			
11		1 1→2	2			

R=5m 1  
R=9m 1  
数字は試験回数である。

(試験の組合せ)

Case	シース	シースの錆の有無	減摩処理	ケーブルの挿入方法
1	スパイラルシース 内径 $\phi 80$ 肉厚 0.4 mm	無	—	ケーブルグリップによる方法
2	〃	無	—	1本ずつ手送り
3	〃	無	鋼より線に石ケン水を塗布	〃
4	〃	無	鋼より線に減摩剤を塗布	〃
5	〃	—	シース内面をコーティング	〃
6	〃	有	—	ケーブルグリップによる方法
7	〃	有	—	1本ずつ手送り
8	〃	有	鋼より線に石ケン水を塗布	〃
9	〃	有	鋼より線に減摩剤を塗布	〃
10	内径 $\phi 65^*$ 肉厚 0.6 mm	—	シース内面をテフロン加工	〃
11	内径 $\phi 80$ 肉厚 0.4 mm	—	シース内面をコーティング	〃

\* テフロン加工した帯鉄をスパイラル状に製作。

(使用材料)

PC鋼材	12T 15.2 (SWPR 7 A)
PC鋼材の錆	食塩水 (NaCl 3%) を2日間1回/日塗布, その後2日間屋外放置。
シース	スパイラルシース 内径 80 mm 外径 87 mm 肉厚 0.4 mm
シースの錆	酢酸希釈溶液でシースを洗浄し, 食塩水 (NaCl 3%) を1回/日注水する(6日間)。屋外放置(3日間) 室内保管(11日間)
シース内面のコーティング	固体潤滑剤を有機バインダーで付着させたもの。
石ケン水	市販の洗たく用石ケン (水 1ℓ に 50g)
減摩剤	CRC-5-56

表-5 高強度コンクリート ( $\sigma_{ck}=600 \text{ kg/cm}^2$  以上) を用いた PC 橋

橋名	第2級羅木川橋	岐 関 大 橋	茂 市 川 橋	岩鼻PCトラス橋	安家川PCトラス橋	
主 国	日 本	日 本	日 本	日 本	日 本	
主 鉄	日 本	日 本	日 本	日 本	日 本	
工 年	昭和 49 年	昭和 54 年	昭和 50 年	昭和 48 年	昭和 49 年	
造 橋	ポストテンション単純T桁橋	ポストテンション単純T桁橋	ポストテンション単純T桁橋	ポストテンション単純下路トラス橋	ポストテンション単純上路トラス橋	
長 (m)	49.95	342.4	16.58	46.3	305.1	
支 間 (m)	49.0	48.0 (7連)	15.8	45.0	{ 45.0 (6連) 27.0 (1連)	
幅 員 (m)	複 線+単 線	14.15	3.80	単 線	単 線	
荷 重	NP-19	TL-20	KS-16	NP-19	KS-16	
設 計 基 準 強 度	普 通	普 通	オートクレーブ	普 通	{ オートクレーブ* 普 通**	
	600	600	800	800	800*, 600**	
許 容 曲 げ 圧 縮 応 力 度	プレストレス導入時	220	220	400	270	350*, 260**
	設計荷重時	160	180	260	205	270*, 200**
許 容 曲 げ 引 張 応 力 度	プレストレス導入時	21	21	20	20	27*, 21**
	設計荷重時	0	21	0	0	0*, 0**

注 \* トラス主構部 \*\* トラス格点部

今後、上記のようなシースの開発に伴い、設計もそれにより変わり、また新しい構造も生まれると思われる。

### 3.3 コンクリート

コンクリート用混和剤の進歩は著しく、特にPC構造物に大きな影響を与えたのが高性能減水剤である。これは従来の減水剤と異なり、減水作用が大きく、凝結遅延や空気連行などの二次的作用が極めて小さいため、高い混入率で使用でき大きな減水効果が得られる特徴をもっている。

この高性能減水剤の一つの利用法として生まれたのが高強度コンクリートであり、高強度コンクリートの現場打設が可能となった。この高強度コンクリートを用いた構造物として表-5に示すものが我が国において造られている。

もう一つの使い方として、施工性改善のための流動化コンクリートがある。現在、低スランプのコンクリートを苦勞して打設しているPC構造物のコンクリート工事が、これにより大幅に楽になることが考えられる。またこの流動化コンクリートを積極的に用いることにより、構造物の部材寸法の縮小化や、鉄筋やシースの間隔や配置に自由度が増すことが考えられ、設計面にそのメリットを生かす工夫が今後必要である。

### 4. 構造形式の動向

PCの発展のためには、すでに実績のある分野での技術開発による一層のコスト低減の努力のほかに、新たな分野への積極的な進出が必要である。

中小橋梁において最も多用されているPCI形桁においても、施工面では、工場においてブロック製作して現場で接合し架設する方法や、現場での場所打ち部をほとんどなくした工法も採用されてきており、また、設計面では、架設機械の能力の向上に応じて主桁本数を減らし

た構造を選定するようになってきている。

大スパンの橋梁を対象とした分野では、新しい構造形式としての斜張橋や、PCトラスの設計・施工の研究が必要である。新幹線の複線橋梁として検討したPC斜張橋とPCトラスの一例を図-4と図-5で紹介する。

橋梁以外の分野としては、すでに実績もあり、今後増すと思われるものに線路下横断構造物としてのPC構造の利用がある。これは今まで鋼製のパイプを用いたパイプルーフの代わりに、中空PC桁を用いるものである。実際に施工したこの中空PC桁と、完成構造を図-6に示す。これは中空PC桁を土中に挿入し、このPC桁を線路の両側に設けられる受け桁(PC造)により受け、PC鋼棒により緊張締結し下路桁をつくり、この下を掘削して通路とするものである。

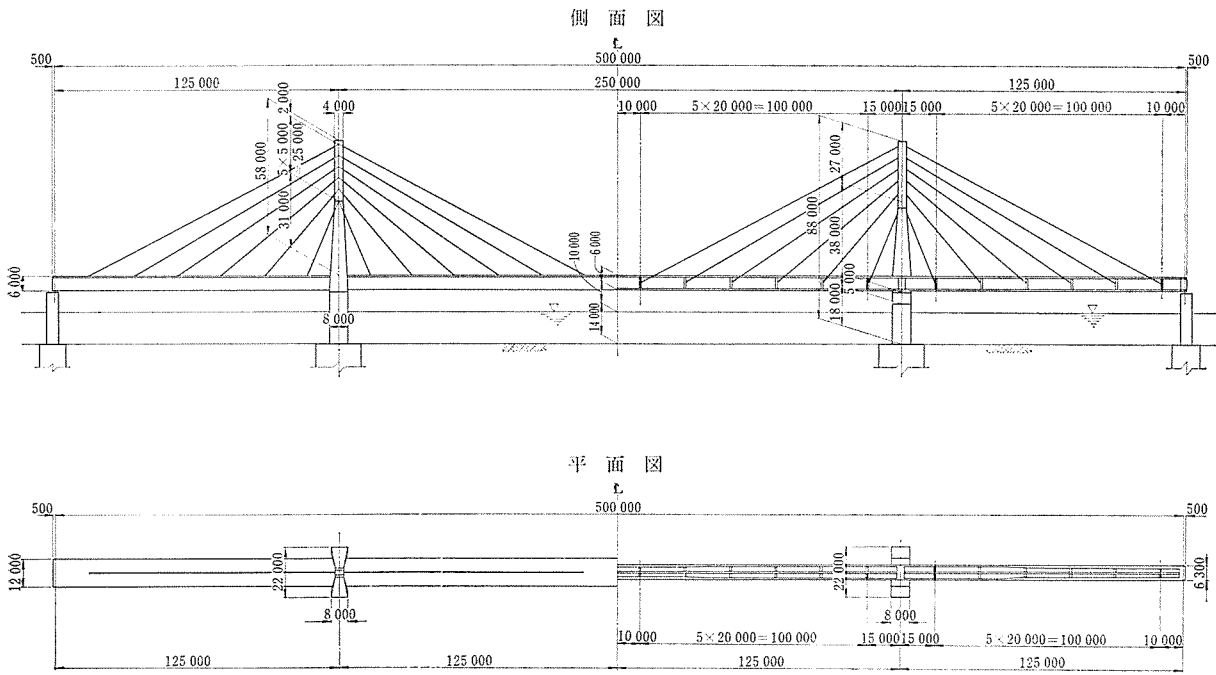
そのほかの分野としては、PCによる水圧管、浮上式鉄道構造物等の研究を現在行っている。

また高度成長期に造った多くの構造物の保守が今後重要なテーマとなってくるとされる。この既設構造物の補修、補強にPC構造を積極的に利用してゆく検討も今後必要と思われる。

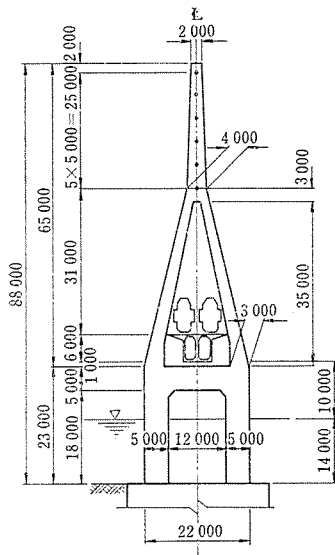
### 5. 建設コスト低減に結びついた最近の技術開発

建設コストの低減のためには一つ一つの技術の積重ねが大切である。設計面では最適断面となるまで十分検討すると同時に、部材断面がどの設計条件で定まっているかを十分認識し、その条件は緩和できない条件なのかを検討することが大切である。研究テーマとしてこの部材断面を決定している設計条件を緩和するという観点で選定することが大切である。以下に、このような観点で解決した二、三の例を紹介する。

#### 5.1 アンカープレートの配置間隔の検討



タワー構造図  
正面



設計条件

スパン			125m + 250m + 125m	
軌道	構造	造	直結式	
列車	荷重		N-18, P-19	
衝撃係数			0.150	
コンクリート	強度および許容応力度	主桁	設計基準強度	400kg/cm <sup>2</sup>
			設計荷重作用時(圧縮)	140 "
			" (最小圧縮)	0 "
			" (斜め引張)	-9(-13) "
P C 鋼棒 (SBPR 95/120)	φ32mm	タワー	設計基準強度	400 "
			圧縮応力度	130 "
斜張ケーブル (PWS)			引張強度	120 "
			降伏点応力度	95 "
			設計荷重時許容応力度	72 "
鉄筋(SD35)			引張強度	165 "
			安全度	2.5
			許容引張応力度(タワー)	2 000kg/cm <sup>2</sup>

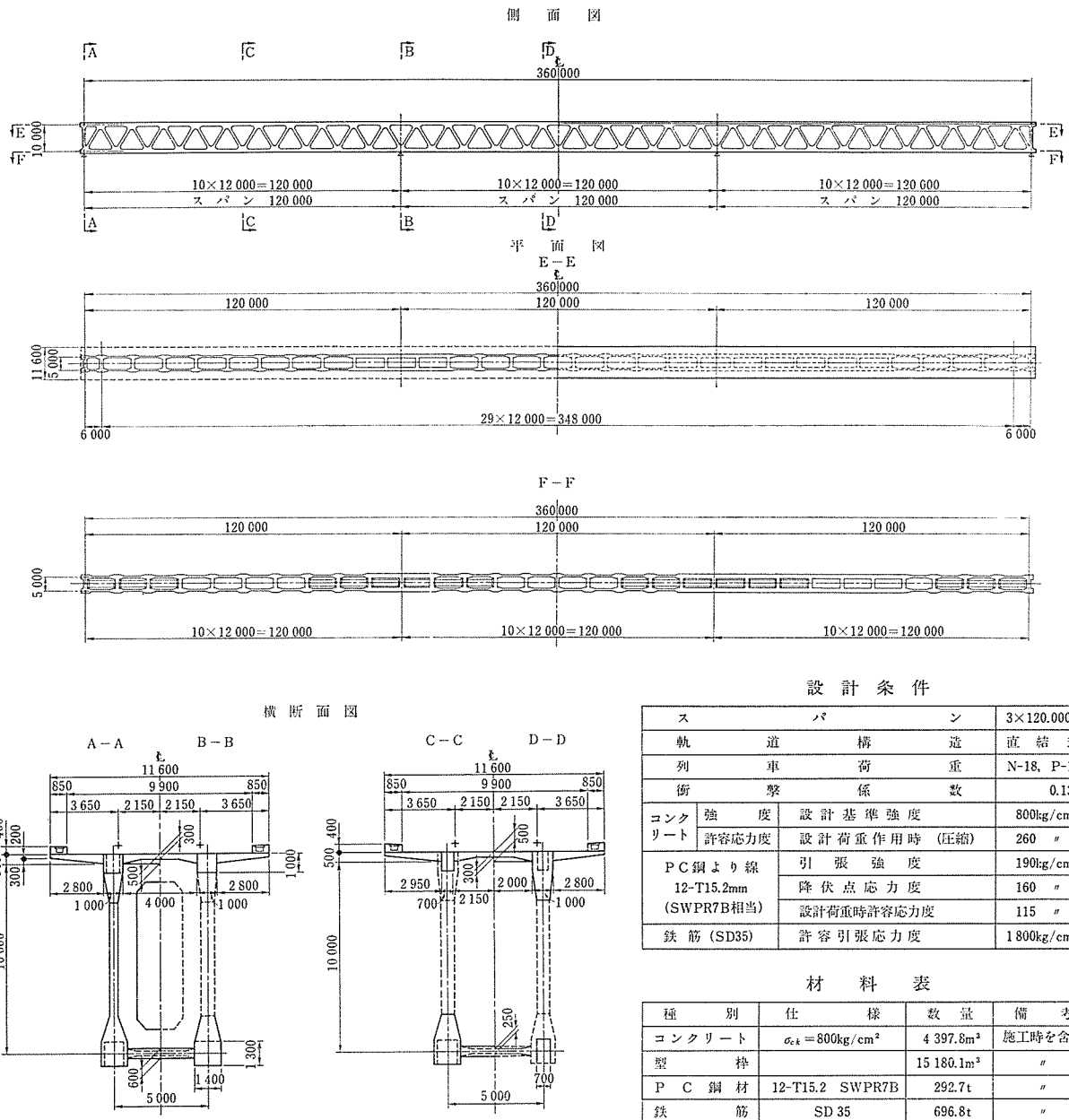
図-4 PC 斜張橋一般図

押し出し工法でのPC橋の設計は、施工時（押し出し架設時）の応力をPC鋼棒で受けもたせ、これを設計荷重時にも利用することが一般である。このPC鋼棒の配置はディバーク工法のアンカークロックの配置間隔に関する規定を準用したアンカープレートの配置の制限から決まることが多く、施工時に必要なPC鋼棒の本数から桁断面の大きさが決まることが多かった。このアンカープレートの大きさの縮小化、および配置間隔の隔小の可能性について実験を行い、コンクリート強度とアンカープ

レートの大きさと、支圧破壊荷重との関係を明らかにし、設計に取り入れた。その結果の一例を図-7に示すが、この例では桁断面を約20%、PC鋼棒を約10%減ずることができた。

### 5.2 ゴム沓の適用の拡大

鉄道橋におけるゴム沓は、今までスパン25m、支承圧力で150t以下に主として使われてきた。宮城県沖地震で鋼製シューの水平力をうける爪の部分の破損が多かったことより、支承部の設計の考え方を、支圧力はシュ



図—5 PC トラス橋一般図

ーにより、水平力はねばりのある鋼材を用いたストッパーで負担するようにした。支圧力のみを負担し常時の桁の温度変化等による伸縮に追従できるシューとしてゴム沓の使用が経済的に優れている。このゴムシューの使用に制限を与えているのは、ゴムの耐久性の問題、疲労強度の問題等があったので、これらに関する調査、実験を行い、安全性を確認し適用範囲を拡大するとともに、許容支圧応力度、許容せん断ひずみ率をゴム沓の構造を規定し大きくした。

## 6. おわりに

PC構造物の設計は、その使用材料と、施工法とのかかわりが非常に大きい。材料や施工機器等を十分に利用した構造物を設計してゆくことが、建設費の低減につながると思われる。特にPC構造物の信頼性は、その施工に負うところが大きく、プレストレスングやグラウトに対する十分な注意を払うことが必要である。

構造物の信頼性を高めかつ建設コストの低廉化を目指すためには、設計と施工とのバランスのとれた進歩が必要である。

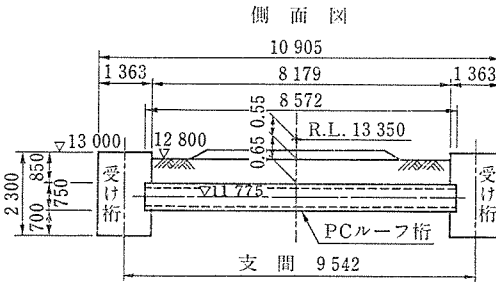
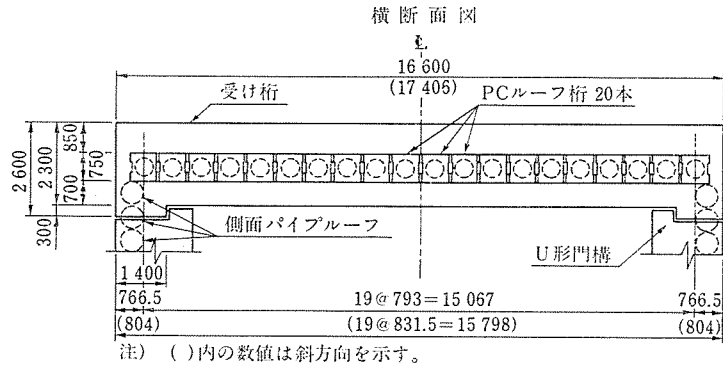
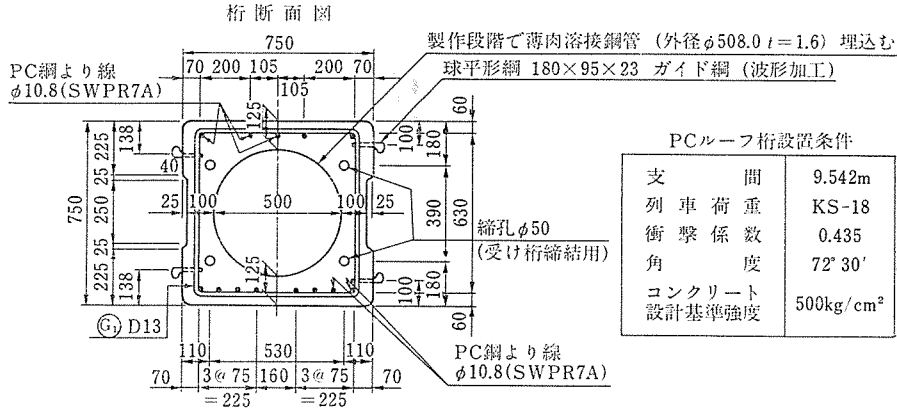


図-6 PC ルーフ桁設計図

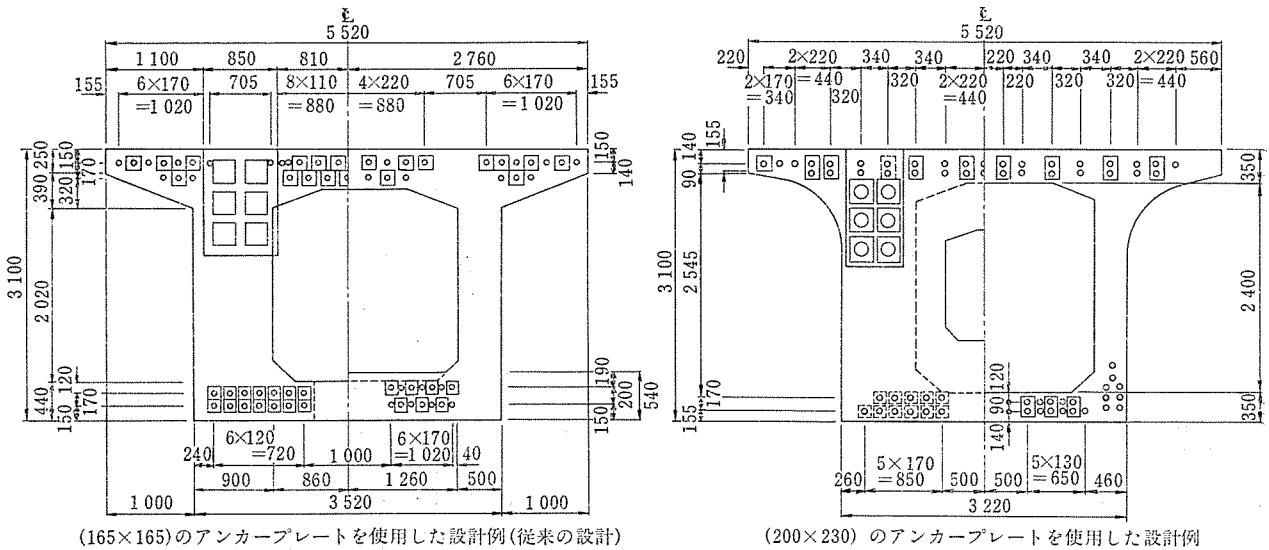


図-7