

## 高強度 PC 鋼より線の諸特性について

坪 野 秀 良\*  
 倉 内 実\*  
 小 林 剛\*  
 山 岡 幸 男\*

### 1. はじめに

PC 鋼より線 (PC スtrand) は現在、引張強さグレードとして、世界的に 270 K グレード (190 kg/mm<sup>2</sup> 級-JIS B種) と 250 K グレード (175 kg/mm<sup>2</sup> 級-JIS A種) とが一般的に使用されており、より強度の高い 270 K グレードが各国とも主流となる傾向である<sup>1)~2)</sup>。

270 K の開発は今から約 20 年前 1962 年にアメリカの CF & I 社の J.A. Roebling 部門がそれまでの PC 鋼より線と比較して引張荷重が 15% 高い PC 鋼より線 (引張強さを 250 Kpsi より 270 Kpsi とし 8.6% アップ、断面積を 6.3% アップし合計約 15% 増) を開発し「270 K スtrand」として売り出した時に遡る<sup>3)</sup>。それ以来、1968 年に ASTM A 416 に規格化されたのを手始めとして、日本でも 1971 年に JIS G 3536 SW-PR 7B として規定され、広く使用されるようになった。

PC 鋼より線の高強度化のメリットは、下記の点にある。

- 1) 省資源化が一段とすすめられる。
- 2) PC 工事の省力化が図れる。
- 3) プレストレスのかけ方の自由度が増す。
- 4) コストダウンが図れる。

これらのメリットは CF & I 社の開発した 270 K スtrand が広く普及したことにより実証されている。

今回、270 K スtrand より更に引張強さが約 10% 高い「300 K スtrand」を開発したので、その特性を中心として紹介する。

### 2. 300 K スtrand の製造法

300 K スtrand の製造方法は基本的には従来の 270 K や 250 K スtrand の製造方法と同様であり、高炭素鋼線材を使用し、パテンティング→洗線およびコーティング→伸線→より線→ブルーイングまたはスタビラ

表-1 PC 鋼より線の仕様

記 号	呼 び 名	標 準 径 (mm)	許 容 差	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	単位重量 (kg/km)	引 張 試 験			リラクセーション試験 リラクセーション値 (%)
						0.2% 永久伸び に対する荷重 (kgf (kN))	引 張 荷 重 (kgf (kN))	伸 び (%)	
SWPR 7 A (250 K)	7本より 9.3 mm	9.3	+0.4 -0.2	51.61	405	7 700 以上 (75.511) 以上	9 050 以上 (88.750) 以上	3.5 以上	3.0 以下
	7本より 10.8 mm	10.8	+0.4 -0.2	69.68	546	10 400 以上 (101.989) 以上	12 200 以上 (119.64) 以上	3.5 以上	3.0 以下
	7本より 12.4 mm	12.4	+0.4 -0.2	92.90	729	13 900 以上 (136.312) 以上	16 300 以上 (159.848) 以上	3.5 以上	3.0 以下
	7本より 15.2 mm	15.2	+0.4 -0.2	138.7	1 101	19 700 以上 (193.191) 以上	23 100 以上 (226.534) 以上	3.5 以上	3.0 以下
SWPR 7 B (270 K)	7本より 9.5 mm	9.5	+0.4 -0.2	54.84	432	8 850 以上 (86.789) 以上	10 400 以上 (101.989) 以上	3.5 以上	3.0 以下
	7本より 11.1 mm	11.1	+0.4 -0.2	74.19	580	12 000 以上 (117.680) 以上	14 100 以上 (138.274) 以上	3.5 以上	3.0 以下
	7本より 12.7 mm	12.7	+0.4 -0.2	98.71	774	15 900 以上 (155.926) 以上	18 700 以上 (183.384) 以上	3.5 以上	3.0 以下
(300 K)	7本より 9.5 mm	9.5	+0.4 -0.2	54.84	432	10 370 以上 (101.676) 以上	11 520 以上 (112.973) 以上	3.5 以上	3.0 以下
	7本より 11.1 mm	11.1	+0.4 -0.2	74.19	580	14 020 以上 (137.509) 以上	15 580 以上 (152.788) 以上	3.5 以上	3.0 以下
	7本より 12.7 mm	12.7	+0.4 -0.2	98.71	774	18 660 以上 (182.963) 以上	20 730 以上 (203.292) 以上	3.5 以上	3.0 以下

\* 神鋼鋼線工業 (株) 研究開発部

# 報 告

イズィンガー巻取りの工程により製造される<sup>4)</sup>。ただし、従来法と異なり、更に太径の線材のパテンティング法の開発および高減面率伸線法の開発等によって、高強度で太径の 300 K ストランドの製造が可能となってきたのである。

## 3. 300 K ストランドの仕様

300 K ストランドの仕様を各サイズの JIS 規格値<sup>5)</sup>と比較して表-1 に示す。また、図-1 に各グレードの引張荷重と断面積の関係を示す。これらの値は各サイズとも、270 K の断面積と同一として計算した値であるが、CF & I 社が 270 K を開発した時の考え方のように、300 K の断面積を 270 K の断面積より更に若干増加させれば引張荷重の増加が一段と大きくなることは言をまたない。

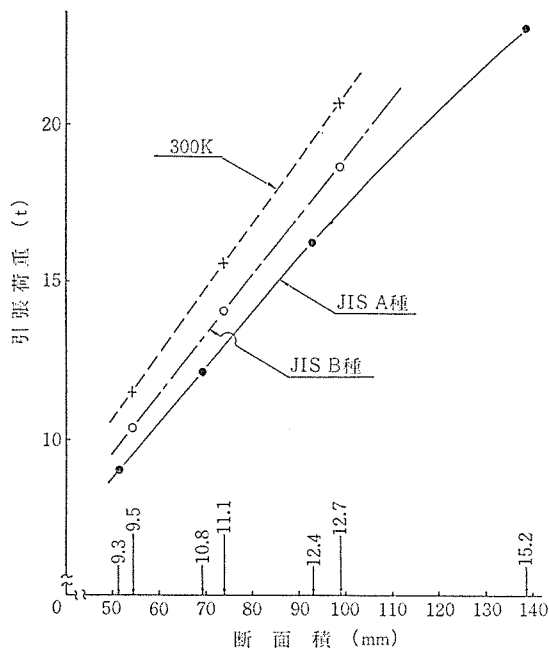


図-1 PC 鋼より線の断面積と引張荷重の関係

## 4. 機械的特性試験結果

試作した 300 K ストランド 12.7 mm 普通ブルーイング品の引張試験結果とリラクセーション試験結果を図-2 および 図-3、表-2 に各々示す。

これらの結果をみると、従来の 270 K 材と比較して、引張荷重および降伏荷重の高く、直線部分の大変長い PC 鋼材として非常に優れた荷重-伸び曲線をしていることがわかる。リラクセーション等のその他の機械的特性は従来材と何ら変わっていないことを示している。

## 5. 定着効率試験結果

PC 鋼より線を高強度化してゆくと、PC 定着具によ

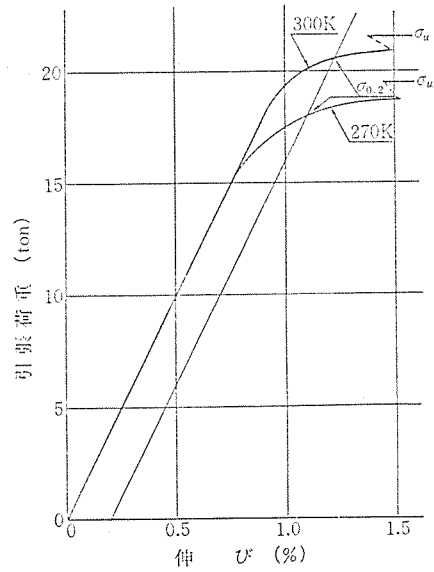


図-2 300 K (試作品) と 270 K ストランドの荷重-伸び曲線図

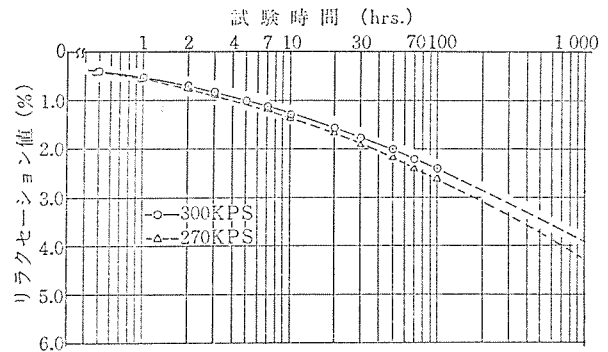


図-3 300 K ストランドのリラクセーションカーブ

表-2 300 K (試作品) と 270 K ストランドの引張試験結果

	300 K	270 K
ストランド径	12.8 mm	12.7 mm
引張荷重 ( $\sigma_u$ )	21 580 kg	19 500 kg
0.2% 永久伸び時の荷重	20 650 kg	17 940 kg
降伏比 (YR)	95.7%	92.0%
伸び (G.L.=600 mm)	8.0%	7.6%
弾性係数	19 600 kg/mm	19 700 kg/mm

る定着効率 (定着具を用いて緊張破断した時の荷重の PC 鋼より線母材の引張荷重に対する比) が低下することが懸念される。ここでは、実際に従来材で用いられている定着具を使用して 300 K ストランド 12.7 mm の定着効率を調べた。

定着具としては、ウェッジタイプ定着具として CCL アンカーライトグリップ AG-1 をコンプレッショングリップとして TS アンカーの 2 種類を用い、繰返し数 3 で実験した。

実験結果を表-3 および 表-4 に示す。これより、従来材の定着具をそのまま 300 K ストランドに用いて

表-3 ウェッジタイプグリップの定着効率試験結果

No.	定着荷重 (kg)	定着効率		備 考 (破断状況)
		Act. (%)	Spec. (%)	
1	21 000	97.3	101.3	アンカー部測線1本切断
2	21 000	97.3	101.3	"
3	21 200	98.2	102.3	"
$\bar{x}$	21 070	97.6	101.6	"
270 K	18 800	97.2	100.5	

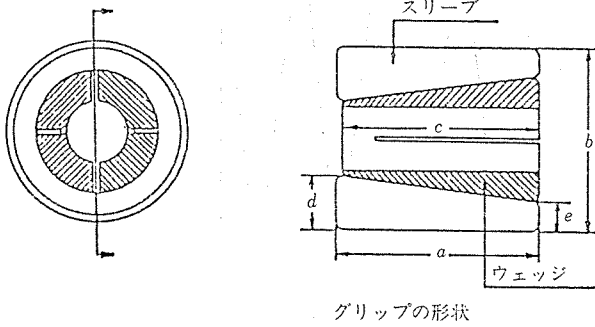
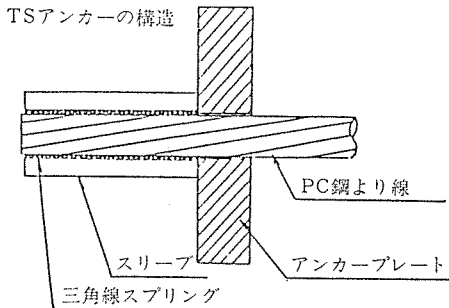


表-4 コンプレッショングリップの定着試験結果

No.	定着荷重 (kg)	定着効率		備 考 (破断状況)
		Act. (%)	Spec. (%)	
1	21 450	99.4	103.4	アンカー部測線6本切断
2	21 450	99.4	103.4	"
3	21 550	99.9	104.0	"
$\bar{x}$	21 480	99.5	103.6	"
270 K	19 100	99.2	102.1	



も、定着荷重は規格破断荷重を上まわっており、何ら問題無いことがわかる。

### 6. 曲げ引張試験結果

PC 鋼材は強度が高いばかりでなく、靱性があることが必要である。これは、定着部等で PC 鋼材に横圧がかかったり、また PC 構造物の破壊靱性を保証するために PC テンドンとしての靱性を必要とするためである。

図-4 に示す曲げ引張試験は PC 鋼材の靱性を調べる試験法のひとつで、曲げ引張による破断荷重の低下率は靱性の指標としている。

表-5 にその結果を示しているが、低下率は従来材の 270 K 同サイズ品とほぼ同じ値を示しており、300

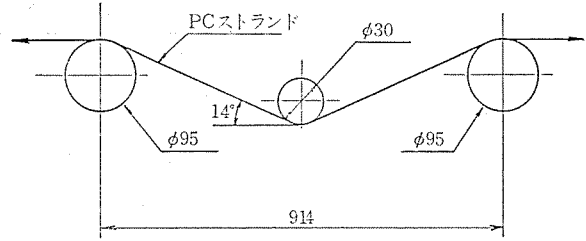


図-4 曲げ引張試験法

表-5 曲げ引張試験結果

No.	曲げ引張破断荷重 (kg)	低下率 (%)	備 考 (素線破断状況)
1	19 400	10.1	せん断切れ3本、しぼり切れ1本
2	19 200	11.0	" 2 " 2
3	19 000	12.0	" 3 " 1
4	19 000	12.0	" 4 " 0
5	19 350	10.3	" 3 " 1
6	18 600	13.8	" 4 " 0
$\bar{x}$	19 100	11.5	
270 K	16 780	11.8	

K ストランドも従来材と同程度の靱性を有していることがわかる。これは、先の定着効率試験結果でも言えることであるが、高強度化しても鋼材の靱性がそれほど失われていないことを示しているのであり、前述の 300 K ストランドの製造法の開発に負うところ大の結果である。

### 7. 疲労強度について

鋼材の疲労強度は、一般にその材料の強度に比例して増加すると言われている<sup>6)</sup>。したがって 300 K と引張強度を高めることにより、引張疲労強度が高くなることが予想される。疲労試験には両振疲労試験と部分片振疲労試験があるが、両振試験のひとつであるヘイ・ロバートソン式疲労試験機を用いて各強度グレードの PC 鋼より線の構成素線を供試材とした回転曲げ疲労試験結果を表-6 に、また下限応力を引張強さの 60% とし、ウェッジタイプグリップのひとつである CCL グリップを定着具に用いた PC 鋼より線の部分片振引張疲労試験結果を図-5 に示す。

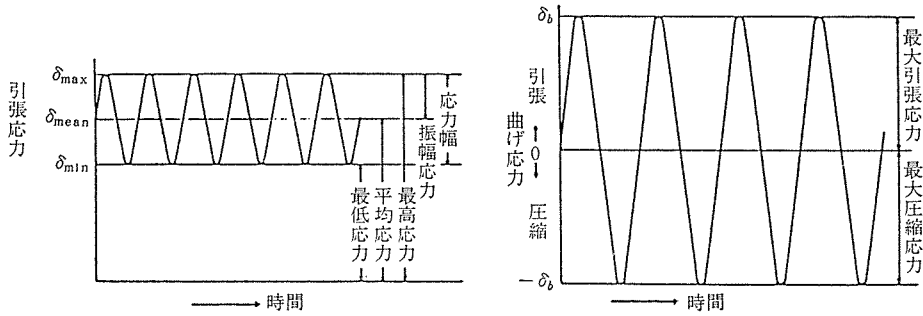
これらの結果をみると、強度増加とともに疲れ限度は上昇する傾向を示し、疲れ限度力比は減少傾向を示している。また、ウェッジタイプグリップを用いた部分片振試験結果は、300 K ストランドの場合も従来材とほぼ同様な値を示していることがわかる。

### 8. 応力腐食について

PC 鋼材の重要な必要特性のひとつに耐応力腐食特性がある。一般に鋼材の応力腐食特性は、疲労特性とは逆に引張強さが増すほど悪くなると言われている<sup>7)</sup>。

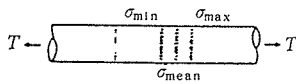
表—6 回転曲げ疲労試験結果

強度グレード ( $\sigma_B$ ) kg/mm <sup>2</sup>	回転曲げ疲れ限度 ( $\sigma_{wb}$ ) kg/mm <sup>2</sup>	疲れ限応力比 ( $\sigma_{wb}/\sigma_B$ )
175 (250 K)	46	0.263
190 (270 K)	48	0.253
210 (300 K)	50	0.238

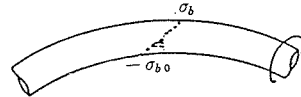


引張疲労試験における鋼線の応力と時間の関係

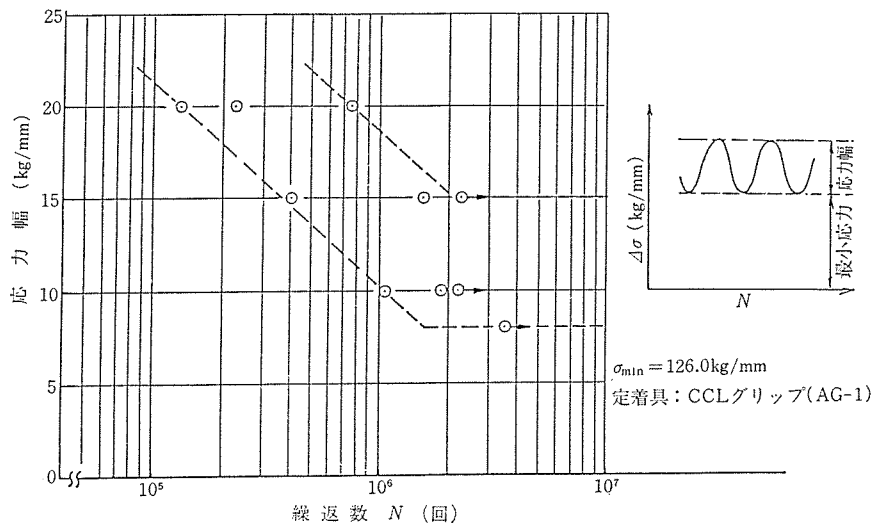
回転曲げ疲労試験における鋼線の応力と時間の関係



引張疲労試験における鋼線の応力状態



回転曲げ疲労試験における鋼線の応力状態



図—5 300 K ストランドの疲労試験結果

材料強度と応力腐食破断時間の関係を示す実験例を図—6 に示す。

図—6 より、大きな傾向としては、PC 鋼より線のような伸線材も引張強さが高くなるほど、応力腐食破断時間は短くなっていることがわかる。しかし、熱処理鋼材等と異なり、伸線材である PC 鋼より線の場合、その低下の度合は急激でなく 190 kg/mm<sup>2</sup> 級のもの と 210 kg/mm<sup>2</sup> 級のものとはたいした差はない。

したがって、210 kg/mm<sup>2</sup> 級のものでも充分実用に供

せられると考えられるが、グラウト等の PC 鋼材の防食処置には充分な配慮が必要なのは言うまでもないことである。

### 9. 試算例

300 K ストランドを実際に使用した場合どうなるか試算した。試算例はプレストレストコンクリート道路橋で図—7 に示す支間 18 m のプレテンション単純 T 桁 (BS 桁) の場合につき、原設計である JIS A 種 (250 K) の

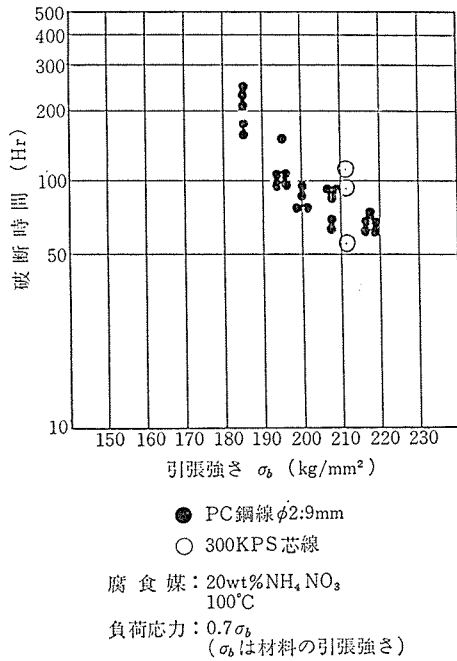


図-6 引張強さと応力腐食の関係

場合と JIS B 種 (270 K) および 300 K ストランドを使用した場合と比較した。

計算は日本電信電話公社の科学技術計算システム (DEMOS-E) のライブラリプログラムのうち「プレストレストコンクリートけた橋の設計計算」(SAB-PC) を用いて行った<sup>8)</sup>。

計算結果について、主として、主桁の PC 鋼材関係を以下に示す。

(1) 設計条件

- 1) 種 別：プレストレストコンクリート道路橋
- 2) 形 式：プレテンション単純T桁 (BS 桁)
- 3) 橋 長：18.660 m
- 4) 桁 長：18.600 m
- 5) 支 間：18.000 m
- 6) 総幅員：8.650 m
- 7) 斜 角：90°0'00"
- 8) 活荷重：TL-20

(2) 使用材料および許容応力度 (PC 鋼材：単位 kg/mm<sup>2</sup>)

1) 種 類	250 K	270 K	300 K
	12.4 mm	12.7 mm	12.7 mm
2) 引 張 強 度	175.0	190.0	210.0
3) 降伏点応力度	150.0	160.0	189.0
4) 許容引張応力度			
設計荷重時	105.0	114.0	126.0
導入直後	122.5	133.0	147.0
緊張作業時	135.0	144.0	168.0
5) ヤング係数	2×10 <sup>4</sup>	2×10 <sup>4</sup>	2×10 <sup>4</sup>
6) リラクゼーション率	5.00%	5.00%	5.00%

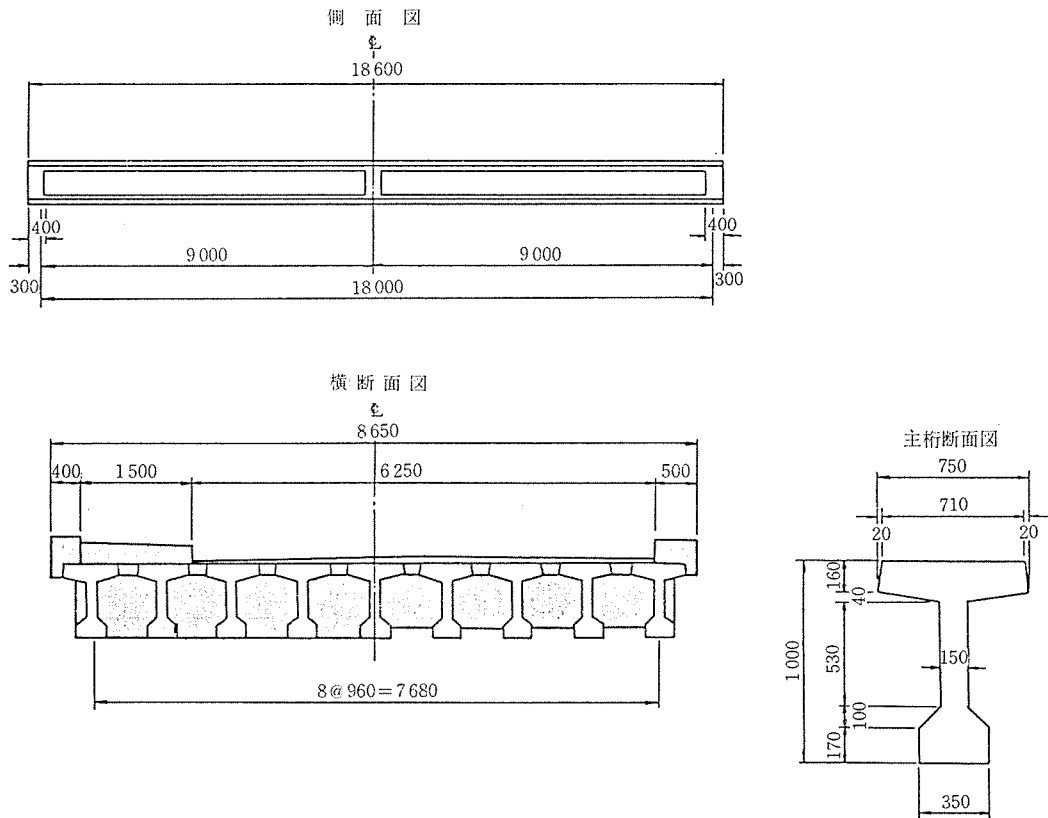


図-7 試算桁の形状

## 報 告

### (3) プレストレスの計算 (単位: kg/cm<sup>2</sup>)

1) 使用材料:	SWPR 7 A	SWPR 7 B	300 K
	12.4 mm	12.7 mm	12.7 mm
断 面 積:	92.90 mm <sup>2</sup>	98.71 mm <sup>2</sup>	98.71 mm <sup>2</sup>
本 数:	22 本	18 本	16 本

### 2) 導入直後のプレストレス:

上 縁	-1.0	-0.9	2.0
下 縁	169.8	161.0	155.0

### 3) コンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるプレストレスの減少量:

	14.07	13.57	13.26
--	-------	-------	-------

### 4) PC 鋼材のリラクセーションによるプレストレスの減少量:

	5.33	5.78	6.39
--	------	------	------

### 5) 有効係数: 0.818      0.838      0.846

### 6) 有効プレストレス:

上 縁	-0.8	-0.8	1.7
下 縁	138.9	134.0	131.1

### (4) 曲げ破壊に対する安全度の検討 (単位: t-m)

#### 1) 破壊抵抗曲げモーメント:

	211.65	186.18	201.27
--	--------	--------	--------

#### 2) 終局荷重時曲げモーメント:

1.3 MD+2.5 ML

	166.78	168.79	168.79
--	--------	--------	--------

1.7×(MD+ML)

	155.37	155.59	155.59
--	--------	--------	--------

### (5) たわみの計算 (単位: cm)

1) 導入直後: -1.03      -0.93      -0.84

2) 常 時: -1.61      -1.44      -1.14

3) 設計荷重時: -0.90      -0.70      -0.40

以上の計算例より、PC 鋼材を高強度化することにより、使用鋼材料の減少 (22 本→18 本→16 本) ができ、かつ鋼材断面積の減少によりプレストレス有効率の高く、また、キャンパーも少ない PC 桁ができる計算結果となっている。

なお、低リラクセーション鋼材を使用した場合とか、ポストテンション工法の場合等、今後検討してゆきたい。

## 10. ま と め

300 K ストランドの諸特性を調査し、機械的特性はじめ、定着効率、靱性、疲労強度および応力腐食特性等、すべて PC 鋼材として必要な特性を満足していることがわかった。

300 K ストランドを使用するメリットは先に列挙したが、具体的にのべると次のとおりになる。

### (1) 省資源材料である

PC 鋼材はもともと鋼材を高強度化しコンクリートと組み合わせて上手に使用した省資源材料であるが、高強度化を進めることにより、強度に反比例して使用材料が少なくすむのみでなく、プレストレス力の有効利用、すなわち、同一プレストレス力を導入するのに必要な鋼材断面積が減少するため、コンクリートのクリープや乾燥収縮による鋼材応力減少量が小さくなったり、また鋼材配置により偏心距離を大きくとれること等によりトータルの鋼材使用量が更に減少することが可能となる。

### (2) PC 工事の省力化が可能である

PC 鋼より線本数の減少により、配線、緊張、グラウト作業等が減少し省力化が図れる。

### (3) プレストレスのかけ方の自由度が増える

例えば、コンクリート断面が小さな所へも大きなプレストレス力が導入できるし、逆に大断面へのプレストレス力の導入に容易になる。

### (4) 防食性の向上

基本的には、同一断面ではコンクリート断面部分が増加し、結果的にかぶり厚さ等がとり易くなり、防食上、良い方向に近づく。

### (5) コストダウンが図れる

以上の諸メリットを合わせて、また、その他に材料使用料が減ることによる、材料の運送費の低減や保管スペースの減少により、トータルとして大きなコストダウンを図れる可能性が存在している。

本報告は新たに開発した 300 K ストランドの諸特性が、高強度材であるが充分実用に供せられることを示した。今後、300 K ストランドの実用化を期待して報告を終える。

## 参 考 文 献

- 1) ASTM A 416-80 "Standard Specification for Uncoated Seven-Wire Stress-Relieved Strand for Prestressed Concrete"
- 2) Euronorm 138-78 "Prestressing Steels"
- 3) H. Kent Preston: "Characteristics of 15% Stronger 7-Wire Strand" Journal of P.C.I., Feb. 1963, Vol. 8, No. 1, pp. 39~45
- 4) 土井 明: 「コンクリートと施工法——その移り変り——(その7) 材料における移り変り——PC 鋼材——」コンクリート工学, Vol. 18, No. 12, Dec., 1980, pp. 52~59
- 5) JIS G 3536-1981 「PC 鋼線及び PC 鋼より線」
- 6) 例えば、日本機械学会編 「金属材料の疲れ強さ設計資料 I」 p. 2, p. 53
- 7) 例えば、Akira Doi et al.: "Japanese Report on Cases of Spontaneous Rupture and Laboratory Research" FIP Symposium "Stress Corrosion" Delft, Sep. 8~9, 1971
- 8) 日本電信電話公社刊 「DEMOS-E SAB-PC 説明書」

【昭和 58 年 12 月 22 日受付】