

PC ストランドの機械的性質について

宮 川 一 郎

1. PC ストランド発展の経緯

プレストレスト コンクリートの発達段階において、これに使用する PC 鋼材の撰定には幾多の変遷が行われている。すなわち当初ドイツでプレストレスト コンクリートの実験が行われた場合の材料は、鋼棒によるものであるが、材料の強度が低すぎたために不成功に終り、プレストレスト コンクリートの実用化は高張力鋼線を使用したフランスの Freyssinet によってなされたとされたのである。しかしドイツもその後高張力鋼棒を用いる Dywidag 方式を開発し、また高張力鋼線の 7 本より線を用いる Leonhardt 工法を考案している。この後者の 7 本より線は一応 PC ストランド (strand: 1 本の心線の外層に素線を一層ないし数層より合わせた構造、その最も簡単な形状が一層よりの 7 本より線 (図-1) ということができるが、同工法は最近では凸条のある円状異形鋼線に転換している) であるので、現在における米国系の PC ストランドの急速なる発展に寄与するところは僅少である。

欧州においては、その他 Magnel, B.B.R.V 等プレストレスト コンクリートの各工法がそれぞれの特徴を生かしてプレストレスト コンクリートの現在の隆盛をきたしたのである。

しかるに米国では欧州に遅れて鋼線あるいは鋼棒を用いる各工法をとり入れてきたものの、欧州に比して高賃金という制限のためにプレストレスト コンクリートの発達は容易でないものを思わせた。この鋼材の緊張に要する労力を減少する方法としてとられたのが PC ストランドの使用であり、当初はポストテンション用としての多層より線の試用が報じられていたのであるが、結局もっとも簡単な 7 本より線による多量生産方式のプレテンション材がその主流となったのである。昨年度における米国の PC 鋼材の使用量は 7 万 t 程度といわれるが、その 70% 近くは PC ストランドであり、それもプレテンション用の 3/8", および 7/16" の PC ストランドで折半されるという。この一兩年來の米国における PC 鋼材需要量の急増に対しドイツおよびわが国が輸出に努力をしているが、昨年度の日本の輸出量は約 10 000 t の活況であった。この量は国内における PC 鋼材使用量の 2 倍をこえ、しかも国内のストランドの需要は皆無という状態

であったので、せつかく大量に生産され、しかもその特徴が世界的に注目されている材料を早急に使用すべきであるとする気運が醸成されたのは当然である。幸いにして 1957 年夏サンフランシスコで開催されたプレストレスト コンクリート会議および、その後の各報告を通じて、ストランド使用の実態が逐次明らかになり、国内でも各種の実験が行われ、すでに本特集号に示すごとく double T beam として数件の建築が実現している。これらに使用した PC ストランドの総量もまだ 10 t 台にすぎないが、その後も諸設計が引続き行われているので、国内における PC 鋼材中ストランドの占める割合は漸次上昇するものと思われる。

なお欧州においても Freyssinet 工法がすでに 1/2 PC ストランド 12 本を用いるケーブルを完成し、本年末から本格的使用に入るといわれており、PC ストランドはプレテンション用のみならず、このようなポストテンション方式にも進展をみせる気配が濃厚である。

2. PC ストランドの構造

(1) より構成

PC ストランドは前述のごとく心線の周囲に幾層かの側線 (がわせん) をラセン状によって構成されるが、プレテンション用としては A.S.T.M に規定されるように 7 本よりに限られている。これは心線 1 本側線 6 本であるが、さらにその外層を同一線径でかこむには 12 本を必要とし、19 本より線の構造となる。このようにして 37 本より線、61 本より線がそれぞれ成立するが、これらはいずれもポストテンション用として各社が必要に応じて少量生産しているにすぎない。従って以下 7 本より線について構造の説明を行いたい。

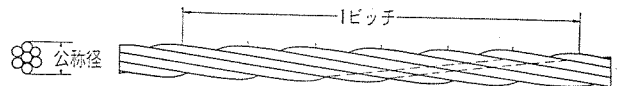


図-1 7 本より PC ストランドの構造

ストランドではピッチという言葉を使うが、これは 1 本の側線が完全なラセンを作ってストランドの周囲を一回転する長さを、ストランドの軸に平行に測ったものであって、長手方向に数えて 6 本目の側線までの長さである。普通用途のストランドまたはこれを子繩とした鋼索の場合は、ストランド外径の 10 倍程度にとられるが PC

報 告

ストランドでは、いくぶん長目で 12~16 倍となっている。よりの方向は当然右よりと左よりとが考えられるが PC ストランドは慣習的に右より (S より) に統一されている。

(2) 心線の増径

ストランドは、よりの影響で直角断面をとってみれば、側線はいずれもヒズミだ円であって、横方向に断面が長く隣接する側線が押し合っているので、押し出されによるストランドの型崩れが生ずる。これを防ぐためには心線径をわずかに増大すればよく、その関係は容易に計算することができる。7 本より線でピッチをストランド径の 14 倍とすれば、心線は側線の 1.017 倍とすればよい。例えば、われわれは 9.3 mm の PC ストランド (側線径 3.05 mm) では心線径の増径を 0.05 mm 以上としている。もちろん以上とはいってもストランド外径の公差も

あり、またストランドの締りの関係もあるので自然にある程度の制限がある。

(3) より込みによる長さの減少

ストランドは心線は真直であるが、側線はよりがかかっているため心線および側線の合計断面積に長さをかけて計算しても実際とは異ってくる。よる前の側線の長さをでき上ったストランドの長さで割った値から引いた百分率がこのより込率であって、より角度を β とすれば

$$\text{より込率} = \left(\frac{1}{\sin \beta} - 1 \right) \times 100$$

で表わされる。

ピッチ 14 倍の 7 本より線では β は $81^\circ 30'$ $\sin \beta$ は 0.989 となる。従ってより込率は 1.1%、より込みは側線のみを生ずるから重量の増加は 1% 弱となる。表-1、2 に、それぞれインチ建および mm 建の PC ストランドの標準を示しておく。

公称径 (9n)	公称径許容差 (in)	心線、側線寸法差 (in)	よりピッチ	標準断面積 (in ²)	標準重量 (lbs/1 000 ft)	標準単長 (ft)
1/4	± 1/64	0.001 以上	12~16 D	0.036	122	25 000
5/16	± 1/64	0.0015 以上	12~16 D	0.058	198	15 000
3/8	± 1/64	0.002 以上	12~16 D	0.080	274	10 000, 15 000
7/16	± 1/64	0.0025 以上	12~16 D	0.109	373	8 000, 10 000, 12 000
1/2	± 1/64	0.003 以上	12~16 D	0.144	494	6 000, 9 000

註: PCI 規格では 1/2 in を抜き 3/16 in を加えている。

表-1 7 本より PC ストランド構造仕様 (A.S.T.M. A416-50T)

公称径 (mm)	側線寸法許容差 (mm)	心線、側線直径差 (mm)	よりピッチ	標準断面積 (mm ²)	標準重量 (kg/km)
9.3	3.05 ± 0.03	0.05 以上	12~16 D	51.6	407.8
10.8	3.56 ± 0.03	0.07 以上	12~16 D	70.3	555.1
12.4	4.09 ± 0.03	0.08 以上	12~16 D	92.9	735.2

表-2 7 本より PC ストランド構造仕様 (mm 建)

(4) よりによる強度および弾性率の変化

よってある側線の強度軸方向に対しては分力となるから $\sin \beta$ をかけなければならない。従って前項同様にストランドとしては各点線の強度合計より約 1% の減少となるが、実際の PC ストランドは、より合わせ後、連続低温焼を行い、この結果、降伏点および破断強度の上昇をきたすので一般のストランドの概念は、この場合適用されない。

ストランドの弾性率についても実験をもとにした一応の理論式が知られていて、より構成が複雑となるほど E が低下してゆく。7 本より線では素線の弾性率の 80% 程度になる。ただしこの場合も連続低温焼鈍によって回復するので、普通 19 000 kg/mm² の値をとる。もっとも米国では各製造会社で、いくぶんその値を異にするといわれるが、実際にはあまり相違は出てこない (規定は 18 300 ~ 20 000 kg/mm² 間)。

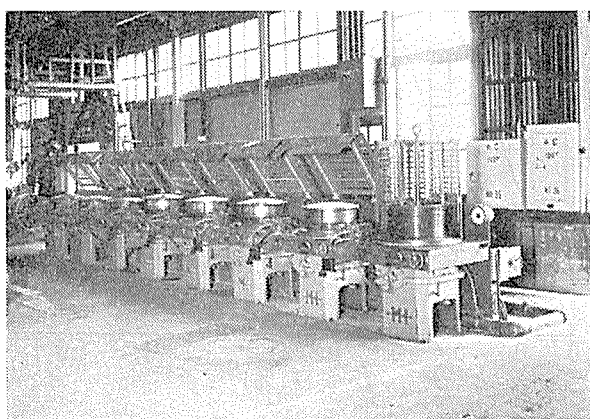
(5) ストランドの曲りやすさ

ストランドの曲げに対する抵抗力を同一径の丸棒と比較した値を可撓度といい、より構成の複雑なほど、またピッチの小さいほど大なる数値となる。従って 7 本より PC ストランドは曲りにくい構造であるが、それでも同一径の丸棒のたわみに比して約 10 倍のたわみを示す。従って PC ストランドの曲げ上げ等には、全くさしつかえがない。

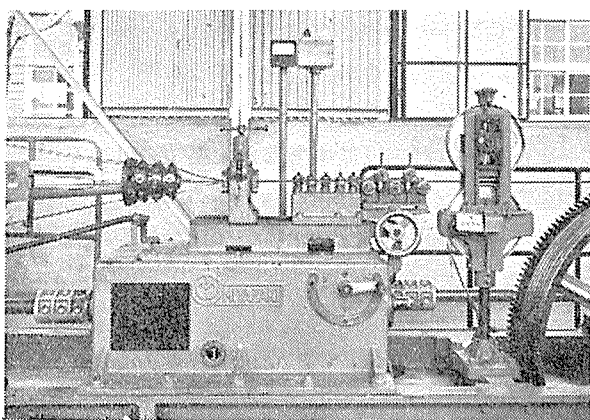
3. PC ストランドの製造

PC ストランドの規格強度を各素線に直してみると同一径の PC 鋼線に比較して強度が低い。このために規格強度ぎりぎりをおねらって、60 C の硬鋼線材を材料としたこともあるようであるが、現在では、より高炭素のピアノ線材を用いて余裕をもち、かつ品質の万全を期している。線材を引いて所定直径でパテンチング処理を行い、

その後数回の冷間引抜で素線を仕上げる工程は特に一般のPC鋼線の製造とそれほどの相異はない。いずれにしても量産に適当な方式を各社とも採用し生産原価の低減をはかっている。傾向としてはパテンチング炉は直火式で焼入速度をあげ、線引は高速連伸機を用いる。高速引伸のため線引下地としてはパテンチング後軽く酸洗水洗して磷酸塩被膜を施す処置がとられる。磷酸塩被膜は硬度が純鉄なみで、しかも数%の空げきがあるので、以降の連続伸線に際して粉末金属石鹸けんを供給すると非常によい潤滑効果を示す。高速連伸機としてPCストランド素線の製造に用いられている morgortshammer 非蓄積



写真—1 ストランド素線用連続伸線機



写真—2 より線機のより合わせ部

型連伸機を写真—1に紹介するが、線は直線的に流れ、しかも常に一定の逆張力を作用させることができるので高速伸線が可能である。本機は各頭ごとに直流電動機で速度の自動調整を行うのであるが、別に国内独自の速度調整方式による模型の直線式連続伸線機も同目的に使用されている。引伸ばされた素線は巻取機により巻頭の口絵写真のより線機の前景に示すようなボビンに巻返えられて、より線機の胴中に保持される。より線機は一般に遊星型と筒型とあるが、後者の方が高速度が出しうるのでPCストランドのより線機は筒型によっている。上述の写真について説明すれば心線ボビンは機械の後方に直列

に配置されるが側線をまいたホビンは胴中に保持されて、ただ長手方向にのみ回転して線が引き出される。より合わせは外胴が回転することによって行われ、各側線は、案内板に集められてくる。写真—2により合わせ部の拡大写真を示しておくがPCストランドでは、よりがばらけないように各側線に十分なる型付けが行われる。写真の3組の小さな溝付ローラーが、このプレフォーム作業をなすものであって、側線はよりぐせがついた状態でより合わせされる。このようにしてストランドを一定の形状に締めつけるボイスを通り伸直ローラーを経て調尺後引出しドラムに巻きつけてから、トラバーサーの作用で整然とドラムに巻きとられる。一般のより線ではこの状態で出荷されるがPCストランドは、さらにヒズミ取りの連続低温焼鈍を施さなければならない。この方法はPC鋼線のブルーイング処理と全く同様で、連続的に溶融鉛中を短時間通過させ、こんどは出荷ドラムに巻きとられるのである。溶融鉛を通過させる方式は、ヒズミ取り作業として簡易ではあるが、多少の鉛がより線内に侵入する欠点があるので、最近米国では加熱空気中を通過させる方法が採用し始められている。なおドラム取りされるストランドの重量は2t程度であるので、小口用には別途に束取りが行われることがある。

4. PC ストランドの機械的性質

プレテンション用PCストランドの一般的に認められた強度規格は、A.S.T.M 規格として1/4~1/2 in にわたって規定されている(表—3)。ただしこの表中1/4 in および 5/16 in の両ストランドは實際上引張荷重が少ない

(A.S.T.M. A416-57T)

公称径 (in)	引張荷重 (lbs)	1%伸び荷重 (lbs)	破断時伸び (% GL 24 in)
1/4	9 000	7 650	3.5
5/16	14 500	12 300	3.5
3/8	20 000	17 000	3.5
7/16	27 000	23 000	3.5
1/2	36 000	30 600	3.5

表—3 PC ストランドの強度規格

ため、プレテンション用としては配置本数が多くなるので単一鋼線に比して、それほど優位があらわれない。従って最もよく使用されているのが3/8 および 7/16 in のストランドである。1/2 in は次第に引張荷重単位が大になる傾向からいって、そのうちには実用に供されるものと思われるし、また実験上からは米国の何州かでポンド力の不足で使用を禁止していることが危惧にすぎないことが示されているものの、現在では7/16 in ストランドの比率が高まりつつある程度なので、国内でもようやく

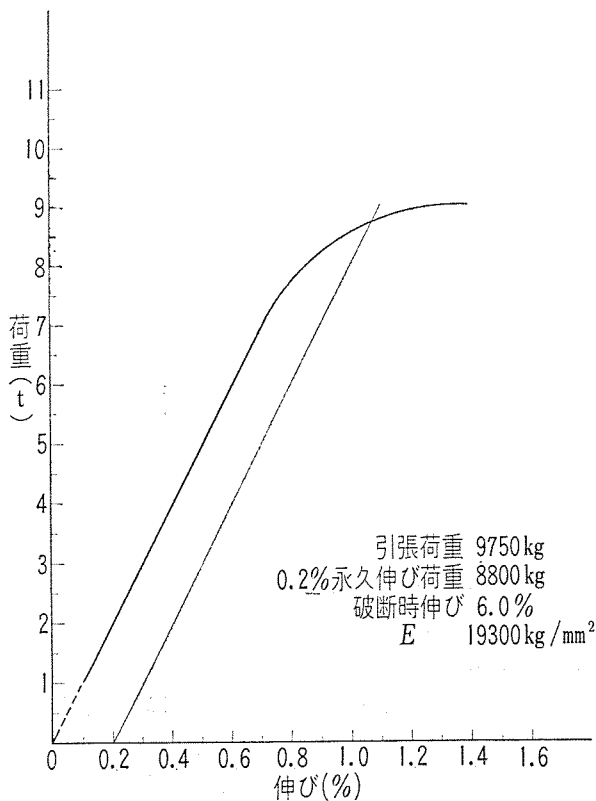
公称径 (mm)	引張荷重 (kg)	0.2%永久伸び荷重 ((kg)	破断時伸び (% G.L 600 mm)
9.3	9 100	7 750	3.5
10.8	12 400	10 600	3.5
12.4	16 400	14 000	3.5

表—4 PC ストランドの強度規格

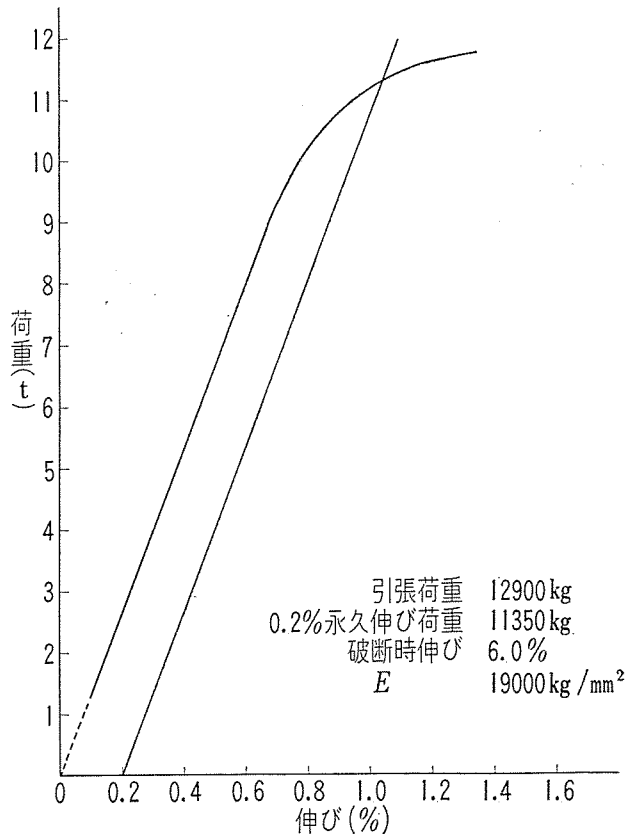
公称径 (mm)	引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	耐力/引張強さ (%)
9.3	176.4	150.2	85.2
10.8	176.4	150.8	85.5
12.4	176.5	150.7	85.4

表—5 PC ストランドの強度 (単位面積換算)

試作を行うという段階にすぎない。表—4 に国内用として規定する mm 建の強度規格を示しておく。また表—5 にこれらの値を単位面積当りに換算し、耐力の比率を計算しておくが、いわば 150/176 鋼ということになる。ドイツで Leonhardt 工法に使用した PC ストランドの標準仕様は 160/180 強度鋼であるから、これよりわずかに下まわる。もっとも米国の PC ストランドも実際の数値は規格より高目に出ており Roebling 社の例をあげれば引張強さ 278 000 psi, 耐力 250 000 psi 等の試験成績をカタログにのせている。国内で製造している PC ストランドの応力—ヒズミ曲線を参考までに 図—2, 3 に示す。



図—2 9.3 mm 7本より PC ストランド 荷重—伸び曲線



図—3 10.8 mm 7本より PC ストランド 荷重—伸び曲線

なお PC ストランドの実際の製造にあたっては、単長 10 000 ft, 15 000 ft 等の長尺物がドラム巻されるのでストランドの接続の問題が生じてくる。でき上がったストランドを接続すれば強度はもちろん規格値よりはるかに下まわるから、これは禁止されている。しかし、より線中に側線の 1 本を溶接つぎしたとすると、かりに溶接部の強度が 80% に落ちたとしたら $0.8 \times 1 + 6/7 = 97.1\%$ となる。しかし素線強度は常に規格をある程度こえているし、また突合わせ溶接技術も安定した操作で行われるので、ほとんど問題とするにたりない。ただ溶接本数が増加すると、その影響は無視し得ないので米国では 150 ft, われわれは 45 m の範囲内に 1 カ所をこえてはならないと溶接制限を行っている。また素線の製造中の溶接は、線引間で行えば強度の低下がいくぶんでも多くなり、上記の溶接の影響に加算されても困るので、これも禁止しており、ただ仕上線の強度に微弱な影響しかもたらない、パテンチング径以前の突合わせ溶接のみが認められている。

伸びの測定にあたってはストランド、ロープ類に特有な、しまりしろの影響が荷重初期にあらわれるので、一応規定荷重の 10% の初荷重をかけ、そのときの全伸びを 0.1% ときめて以後の測定を行う。測定長 24 in または 600 mm は 1/2 in 級のストランドにしても、3 ピッチ

分以上の長さがあるので十分である。各素線の破断状況は、それぞれ相当な断面収縮を示しているのがよい。

PC ストランドのクリープ、あるいはリラクゼーションについては、米国ではある程度の実験が行われたものの、単線同様規格としては、規定していない。国内ではPC 鋼線および2本よりPC 鋼より線が、従来からリラクゼーション試験が行われているので、これと同様な試験すなわち0.2% 永久伸びに対する荷重の80% の荷重をかけて、10 時間後の荷重の減少をみる方法が提案されている。この場合の減少量は単線同様3.5% 以内におさまる。

5. PC ストランド用チャック

引張試験に用いるストランド用チャックはストランド外径よりわずかに小さなV溝のチャックを用い、やや長目にかませれば、ストランド本来の強度で切断する。一方実際にプレテンション用にストランドを用いる場合は、口絵写真に示すような内面テーパづきのコーンをはめ三つ割または四つ割のキーでとめる。キー内面には歯がたててあってストランドの側線にかみ込んでとまる。この型式は英国から米国に輸入されて一般に使われているものであるが、一時米国自体で考案されたキーをバネでおさえるチャックも使用されていた。チャックを完全にかますのにネジを利用するものもある。いずれにしてもキー自身は消耗品となるので、くり返し使用し続けるためには材質、強度、歯の形状に種々工夫がこらされる。

6. PC ストランドの将来性

プレストレスト コンクリート工事が次第に広くかつ大規模に行われてゆくにつれて、これに使用するPC 鋼材も大なる応力を導入することのできる材料に移ってゆく。PC 鋼線はすでにポストテンション用として5.0 mm から7.0 mm へと進んでいる。この状態ではプレテンション用の2.9 mm 線は小型部材に限られPC ストランド使用の分野がますます拡がるものと思われる。国内でも間もなく7/16 in 級が使用されるであろうし、現在のPC ストランドをポストテンションに用いる試みも実用化されるものと思われる。ただポストテンション用が、今後さらに多層よりストランドに進むか、あるいはFreyssinet が開発中といわれる1/2 in 12 本ケーブルに移るか興味のある問題といえよう。いずれにしても米国に対するPC ストランドの輸出は、今後とも順調であろうし、また米国以外の各国も次第にストランドの使用にふみきる傾向にあるので、これら各国に対する輸出もある程度の量に達しよう。このようにして国内におけるPC 材料の生産増大は、同時に国内のPC 事業をより発展させるに違いないはずである。

註：7本よりPC ストランド mm 建の各数値は現在進行中の JIS 規格原案として各ストランド製造会社協議の上、工業技術院に提出したものである。

(正会員 住友電工東京支社)

JIS 制定のお知らせ

◎ JIS A 5313 【発売中】スラブ橋用プレストレスト コンクリート橋ケタ

定 価：185 円 (〒 10 円) 申込先：日本規格協会 (中央区銀座東 6-1・木挽館別館 (54) 5282・5285

註：現在原案作成中のものに“ケタ橋用プレストレスト コンクリート橋ケタ”があり、35 年3月発売予定とのことです。

谷川橋完成

施 主：群馬県土木部
 施工業者：北海道ピーエスコンクリートKK
 工事場所：群馬県水上町
 工 期：昭和33年11月～昭和34年3月
 橋 長：52 m (スパン割 34.0+18.0=52.0 m)
 巾 員：5.5 m
 荷 重：T-14, L-14
 型 式：B.B.R.V.式 T型単純桁
 架設方法：エレクションタワーによる釣込み

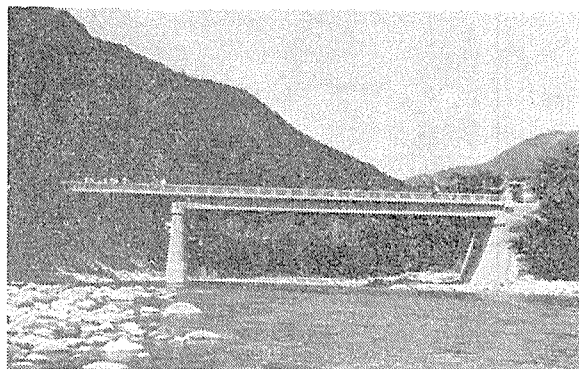


写真-1 谷川橋