

PC 鋼線によるトラス橋の補強効果

信州大学工学部 正会員 吉澤孝和

1. ま え が き

構造物の力学特性を改善して耐荷能力を増大し、かつ経済性をたかめる目的で高張力鋼材の特性を利用する考え方は、すでに弾性設計の領域においては広く実用化されており、コンクリート構造物または鋼構造物に PC 鋼材を介してプレストレスを導入することによってその目的が達せられている。

筆者は、土木構造物の公共性から考えて、その設計にあたっては、経済性の追求のみにとらわれずに、構造物の長期間にわたる安定性を考慮することと同時に不測の外力を万一受けた場合においてもその被害を最小限にいとめるような配慮がこれからの技術分野において必要ではないかと考える。

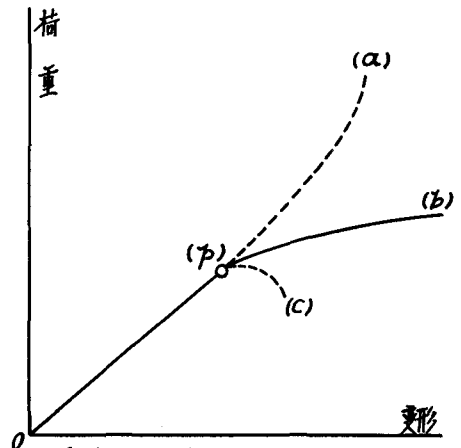
外力による構造物の変形を各種の計測手段でいち早く感知して、その外的な境界条件にすみやかに対応できるように構造形状または構造物自体の剛度を調節していくという考え方は、William Zug の論文 *Kinetic Structures (Civil Engineering, ASCE, 1968)* にも見ることができる。この場合には高張力鋼線で作られた *Tendon* がその主役をなしている。

2. 変形に対する剛度の調節

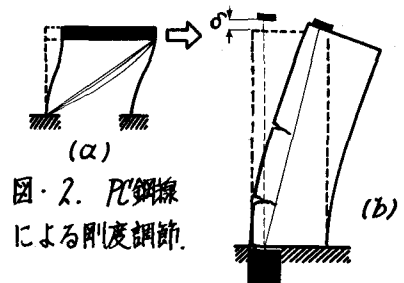
図・1 は構造物に作用する漸増荷重とそれに対する構造物の変形の関係を示す。一般に弾性設計の範囲内においては、荷重と変形とは線形関係で結ばれる。図において (p) 点をおる構成部材の破壊点または降伏点と考える。

静定構造物においてはその構成部材が 1 本でも降伏点に達すると、それ以降は曲線 (c) のような経路をたどって崩壊する。不静定構造物の場合には、数本の部材の降伏または破壊の運行にともなって外力に対する抵抗メカニズムが変化しながら、系の剛度が低下して最終破壊に至るため、曲線 (b) のような傾向を示す。

構造物の変形量の増大にともなって、その剛度も増加していくような系を想定すると曲線 (a) のようになるが、これは技術的にはむずかしい。仮りに出来るとすれば、Timoshenko の *Vibration Problems in Engineering (1955)* における多段式バネを用いた振動制御のようなものであり、その場合各部材は弾性領域内で作用することを要する。



図・1. 構造物の荷重・変形特性。



図・2. PC 鋼線による剛度調節。

本研究では、構造部材が降伏点をこえるような外力を受けて、構造物全体の剛度が低下して変形しやすい状態になったとき、PC鋼線を作用させて系の安定性を確保することを目的としている。一般に構造物は不静定次数の高いほど安定度が高いと言えるが、部材数を多く要して不経済である。これに対して、静定構造物は、外力を支持するための必要最低限の部材を用いて構成された系と考えることができるが、1部材の破壊が系全体の破壊につながるという欠点を有している。本文では、静定トラス構造物に対してPC鋼線を網目状に配置することにより、不静定トラスが有するような安定性を確保することについて述べる。PC鋼線は、トラスの主構材が弾性領域内にある間はほとんど外力を負担しないため、トラスを静定構造物として解いた結果と大差ない解が得られる。ある主構材の応力度が降伏点に達するとPC鋼線の張力が急上昇し、系は不静定トラスに類似した挙動を示す。このように、静定と不静定の中間的な挙動を示すトラスをPC鋼線によってつくり出すことができるわけで、筆者はこれを準静定トラスと呼ぶことを提案したい。このような呼び方をすることの是非について、御批判や御意見をいただければ幸せである。

3. PC鋼線によるワーレントラスの補強

鋼構造物にアレストレスを導入する構想は東欧諸国で実用化されている例が多く、図3はP. Ferjenčik の *Czechoslovak Contribution in the Field of Prestressed Steel Structures (I.C.E., 1971)* に見られる一形式である。



図3. アレストレストワーレントラス。

本文では、アレストレスの導入は考えないで、図4のようにPC鋼線を配置した場合の計算例について報告する。

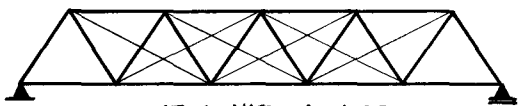


図4. 補強ワーレントラス

解析上の仮定を下記のよう設定する：

- (1) 平面トラスとして扱う。
- (2) 主構材は軸方向力のみには抵抗する。
- (3) 主構材の応力・ひずみ関係は構造用鋼材(S.S.41)のそれを初線要素で代表させる。
- (4) 主構材の応力・ひずみ特性は引張側も圧縮側も同一とし、圧縮材の座屈は考えない。
- (5) 補強材(PC鋼線)は引張力のみには抵抗する。
- (6) 補強材の降伏点は $14,500 \text{ kg/cm}^2$ とし、それ以上の応力領域での抵抗は考えない。
- (7) 軸方向の伸縮にともなう部材断面積の変化は考えない。
- (8) 荷重は節点のみに作用する。
- (9) 荷重は漸増荷重とする。

主構材の降伏点以上の抵抗力を考慮する場合は、長大トラスでなくても系の形状変化の影響を考慮しなければならない。計算の手法は平衡法^{*}を用いて与えられた荷重に対する変位を補正し、変位の補正量 δ を0に収束させる。反復計算(n)回目における変位修正量は次式で与えられる：

$$\delta_n = [P_n^T S_n^* P_n]^{-1} \left[\sum_{j=1}^N dL_j - P_n^T (S_n^* [dL]_{n-1} + C_n) \right] \quad (1)$$

* 吉澤：ピラ線によるトラス構造物の補強について 第20回橋梁・構造研究発表会 (1973)

ここに、 R_x は系の方向余弦を、 E_s は部材の剛度変化を考慮した系全体の剛度を、 αL_j はスラッパ荷重を、 $[dL]_{\sim}$ は部材の伸びを、 C_{\sim} は部材の剛度変化にともなう補正量をあらわすマトリクスである。式の誘導および数値計算の手法については省略する。

4. 漸増荷重にともなう補強ワーレントラスの挙動

図5は3パネルワーレントラスを P^2 鋼線で補強し、下弦材の節点に鉛直方向に漸増荷重を作用させた場合の部材応力と節点変位の変化の状況を、 P^2 鋼線の断面積を種々変化させた場合について示したものである。横軸に漸増荷重を、縦軸上方向に部材力、下方向に節点変位を示す。

この系では、図示の如く上弦材の断面積を斜材および下弦材の2倍にとった。主構材の部材長は200 cm である。補強材の断面積は0~2 cm²まで変化させ、上弦材断面積との比を R であらわす。

図のような載荷条件では、部材(6)が最大の応力状態となり、主構材の中で最初に降伏点に達する。上側の図において、漸増荷重が10,000 kg をこえた辺りから部材(6)の応力度が下降傾向を示しているのは、それが降伏状態となったことを示す。これに対して補強材の応力度が急上昇を示し、それ以降の荷重の増分に対しては、部材(6)が負担できなくなった分を他の部材に伝達して抵抗メカニズムを確立するように作用する。図において、節点荷重 $Q = 10,000 \sim 20,000$ kg の範囲において、グラフが増幅をくりかえしているのは、荷重の漸増にともなう主構材がつつぎに降伏領域またはひすみ硬化領域に達することにより、荷重条件に対する系の抵抗メカニズムが種々変化していくことによるものである。

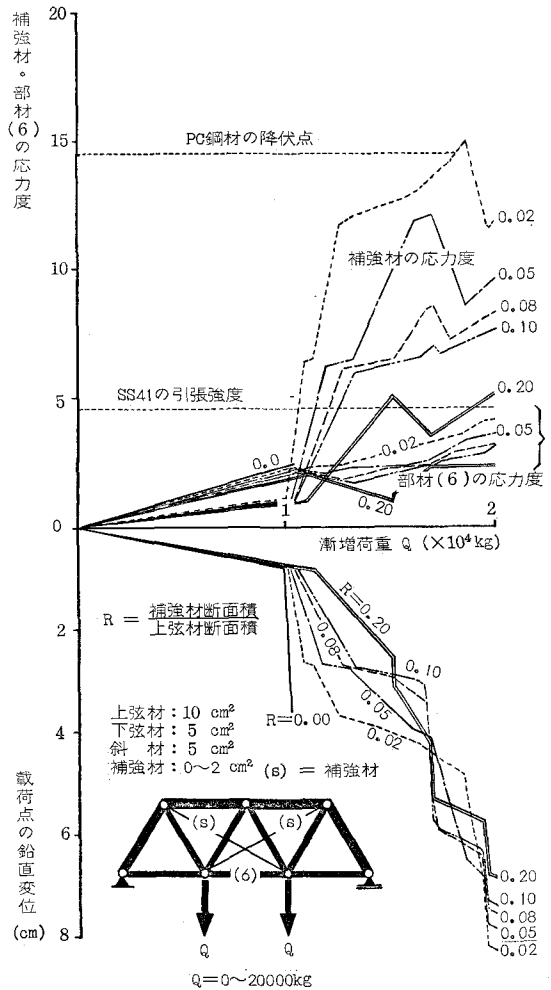


図5. 3パネルワーレントラスの挙動

節点変位のグラフについてみると、部材(b)の降伏点までは補強材を用いた影響はほとんどあらわれず、荷重-変形関係は線形である。降伏点以降は補強材の断面積率 R の影響が大きくあらわれてくる。ここでは、PC鋼線を用いて、トラスの主構材が降伏領域に達したのちにその系に生ずる変形を制御するという立場から、3の考察を述べる。

5. PC鋼線によるトラス構造物の変形制御

$R=0$ の場合 —— 図5において節点変位のグラフは、補強材を用いていない場合は、部材(b)が降伏した時点で計算不能となった。これは、部材の降伏領域における弾性係数を弾性領域のそれの $1/200$ にとつたため、系の剛度が非率に低下したことと有限変形解析の反復計算の制限を100回としたことによる。

$R=0.02$ の場合 —— 補強材断面積を上弦材断面積の2%とした場合であるが、計算は最終荷重まで続行した。途中で補強材応力度が降伏点をこえたので、それ以上の計算値は本研究の仮定からは無意味なものである。変位のグラフで時々急激な落ちこみが見られるが、これは主構材の降伏を意味する。

$R=0.2$ の場合 —— 系は不静定トラス的な挙動を示す。主構材の降伏による変位のグラフの落ちこみは、その量は少いけれども急激である。これは不静定トラスでは各部材の剛度が一様に大きすぎることによる。

以上の例から明らかのように、静定系も不静定系もある部材の降伏に起因して急激な変形を生ずる特性を有している。このような急激な変形はその系に衝撃的な影響を与えて好ましくない。PC鋼材を使用して準静定とすると、主構材が降伏した場合にもその変形を徐々に生じさせて最終変形に到達させる効果を有している。この計算例では $R=0.05$ とした場合その効果が大きい。

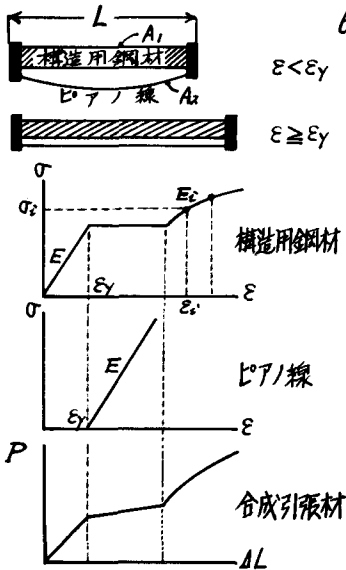


図6. 合成引張材

6. 合成引張材

$$\epsilon < \epsilon_y$$

本文で示したような補強形式の欠点は、特定の圧縮部材の応力度をPC鋼線によって増大させてしまうことである。これの対策としては圧縮部材の剛性の増加を考えることであろう。ある程度の圧縮部材の剛性を確保したのちには、引張材の作用により準静定トラスをつくり出すことも考えられる。図6がその例である。構造用鋼材の降伏点における急激なひずみの発生をピアノ線により制御しようとしたものであり、この合成部材が伸び ΔL を生じたとき支持しうる軸力 P は次式で与えられる：

$$P = (A_1 \epsilon_c + A_2 E) \Delta L / L + (\sigma_c - E \epsilon_c) A_1 - E \epsilon_y A_2 \quad (2)$$

記 本研究は昭和48年度文部省科学研究費、数値計算は名古屋大学大型電算機によるものである。