

# PEP 工法 (ポスト・エクセントリック・プレテンション工法) 矢板に関する基礎的研究<sup>1)</sup>

STUDIES ON THE POST ECCENTRIC PRETENSIONED  
PRESTRESSED CONCRETE SHEET PILE

渡辺 明\*・加藤啓文\*\*・前原昭一郎\*\*\*

By Akira Watanabe, Hirofumi Katō and Shōichirō Maehara

## 1. 緒 言

現在, 土木工事に使用されている材料および採用されている工法は多種多様をきわめ, 年々新材料, 新工法が開発されつつある。矢板基礎工法に関しても従来いろいろな方法が行なわれてきたが, 筆者らは従来のPC矢板の圧縮部のプレストレスを, 打ち込み後除去するという新しい着想に基づいて, ポスト・エクセントリック・プレテンション工法を開発し, これに関する基礎的な諸研究を行なった。本論文はその報告である。

PEP 工法とはいかなるものか, それを開発した経緯やその原理を第2章に述べ, 第3章にはその施工法, 従来工法との比較およびその問題点にふれた。第4章では従来, くい計算などに用いられている Chang の式に筆者らの考えを適用して, 矢板に生ずる断面力の計算を行なった。そして第5章では模型矢板実験, PEP 矢板の現場実験と, 筆者らの考え方による計算結果との比較検討について示した。

本論文にあたり新しい用語を定義したが, それはつぎのとおりである。

PEP 工法; Post Eccentric Pretensioning Method  
の略称

PEP 化; 従来のプレテンション部材を PEP 工法部材に変えること

カッティング; 圧縮部のプレストレスを除去するために, PC鋼線を切断すること

ライブ・ワイヤー (live wire); プレストレスの入っているPC鋼線

ボンドレス長; プレストレスを除去した部分の長さ

PEP 化準備; 従来のプレテンション部材を PEP 化する場合, カッティング以前の状態にするために必要な諸準備

\* 正会員 工博 九州工業大学助教授 開発土木工学科

\*\* 学生会員 九州工業大学大学院 開発土木工学科

\*\*\* 新日本コンクリートKK 取締役

注): 土木学会西部支部研究発表会 (昭和43年2月) にて一部発表

プレストレス再分布; カッティング後の新たなプレストレス分布

## 2. PEP 工法開発の経緯と原理

曲げモーメントを受ける部材には, 中立軸の両側でそれぞれ引張応力と圧縮応力が働く。一般に, コンクリート部材の引張側にあらかじめ圧縮応力を与えて, コンクリートの見かけ上の引張強度を増大させたものがプレストレス コンクリートである。この場合, プレストレスは, 将来, 荷重によって引張応力を生ずる部分に対して十分大きく, 反対に圧縮応力を生ずる部分にはできるだけ少ないように, 効果的に導入されることが肝要である。ところが, 一般のプレテンション方式PC矢板のような薄肉構造物では, 鋼線の偏心が十分にとれないことと, 施工上の理由などから鋼線を対称配置とし, 断面にプレストレスを等分布させる方法が採られ, 導入しうるプレストレスは部材引張側に必要な値というよりは, むしろ, 圧縮側の許容圧縮応力度から制限され, 限られた断面での自由な強度設計が行なわれがたい現状にある。

また, プレテンション方式PC桁, PCまくらぎなどのように, 断面のプレストレスを偏分布させうる場合でも, 鋼線が直線配置であるためにプレストレス量は桁全長にわたって一定となり, 不経済な設計とならざるを得ない。さて, プレテンション方式の構造物ではポストテンション方式における曲線配置に匹敵するプレストレス分布を生ぜしめることは不可能だろうか。

筆者らは鋼線を部分的にカッティングを行なえば, 圧縮側に不必要なプレストレスが導入されているという弊害が除け, かつ, ポストテンション方式における曲線配置に匹敵するプレストレス分布が得られるのではないかと考えた。この場合, カッティング後のボンド定着は十分で, その付着長は一定とする。そして, この矢板ではカッティングの時期は地中への打ち込み後とする。なんとすれば, このような薄肉構造のコンクリート部材では, カッティングの再分布に基づく変形のため, 打ち込み時に座屈を生じ施工が困難となるからである。本工法

を、筆者らは Post Eccentric Pretensioning Method (PEP 工法) と名付ける。

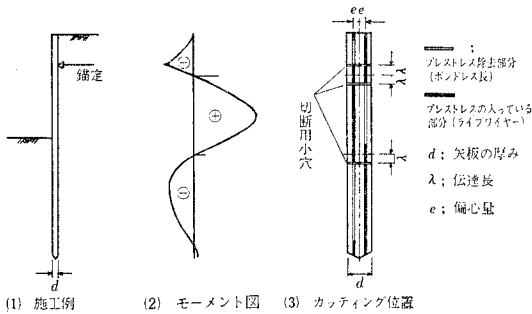
PEP 矢板の設計にあたっては、a) 外力モーメントの分布を的確に知ること、b) 矢板内部の外力モーメントに対応する抵抗モーメント分布を生ぜしめること（プレストレス再分布）、すなわち、適切なるカッティング位置を決定すること、などの2項目について十分検討されなければならない。

### 3. PEP 工法の適用

#### (1) カッティング方法

外力によって圧縮を生ずる側の区間、つまりプレストレスを除去したい区間から、2倍の伝達長を差し引いた部分のP C鋼線にあらかじめ発ぼう（泡）スチロールパイプなどを取り付けておき、コンクリートがP C鋼線に附着しないようにする。また、カッティング箇所には鋼線に垂直にあらかじめビニールパイプなどを取り付けておき、コンクリートの硬化後、このP C鋼線が外部から見えるようなガス切断用の小穴を設ける。一般に、緊張された鋼線はせん断強度が低下するため、タガネを用いても容易に切断し得る。矢板の地中深く埋め込まれた部分に対しては、ガス切断が困難となるので高圧電流による切断を行なう。

図-1 カッティング例



#### (2) PEP 工法適用の効果

鋼線を中立軸に対して対称配置した従来のP C矢板にくらべて、本工法を採用した場合の効果を知るために、SPS 150×400 矢板について抵抗モーメントの計算を行なってみる。

##### a) 記号の説明

$b$ : 部材の幅,  $h$ : 部材の厚さ,  $d$ : 有効高さ

$A$ : 部材の断面積

$I$ : 部材の断面二次モーメント

$y_0, y_u$ : 部材断面の図心から、部材断面の圧縮縁および引張縁までのそれぞれの距離

$e_{p1}, e_{p2}$ : 部材断面の図心から、両側の鋼線のそれぞれの図心までの距離

$A_{p1}, A_{p2}$ : 部材断面の図心両側のそれぞれの鋼材の断面

積

$P$ : P C鋼材に与える引張力

$K$ : P C鋼材に与える引張力の損失

$E_p, E_c$ : P C鋼材およびコンクリートのそれぞれのヤング係数

$n$ :  $E_p/E_c$

$\sigma_{py}, \sigma_{pu}$ : P C鋼材の降伏点応力度および引張強度

$\sigma_{pi,a}$ : 初期プレストレスに対するP C鋼材の許容引張強度

$\sigma_{pa}$ : P C鋼材の許容引張強度

$k$ : コンクリートのクリープ係数の割り増し係数

$\varphi, \epsilon_s$ : コンクリートのクリープ係数および乾燥収縮度

$A_{e1}, A_{e2}$ : 従来工法矢板および PEP 工法矢板のそれぞれの換算断面積

$I_{e1}, I_{e2}$ : 従来工法矢板および PEP 工法矢板のそれぞれの断面二次モーメント

$g_e$ : 部材中立軸の偏心量

$P_i$ : P C鋼材に与える初期引張力

$\sigma_{pi}, \sigma_{ci}$ : 初期緊張時のP C鋼材およびコンクリートのそれぞれの応力度

$\sigma_{pt}, \sigma_{ct}$ : プレストレスを与えた直後のP C鋼材およびコンクリートのそれぞれの応力度

$\sigma_{cp,t}$ : 考えているP C鋼材の位置における、プレストレスを与えた直後のコンクリートの応力度

$\sigma_{pp}, \sigma_{cp}$ : コンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるP C鋼材およびコンクリートのそれぞれの応力度の減少量

$\sigma_{cp,0}, \sigma_{cp,u}$ : コンクリートのクリープおよび乾燥収縮による部材の圧縮縁および引張縁に生ずるそれぞれの応力度の減少量

$\sigma_{ce}$ : 部材の有効プレストレス

$\sigma_{ce,0}, \sigma_{ce,u}$ : 部材の圧縮縁および引張縁におけるそれぞれの有効プレストレス

$\sigma_{pe}$ : P C鋼材の有効プレストレス

$e_{p3}$ : PEP 工法矢板の場合の部材断面図心から引張部のP C鋼材の断面図心までの距離

$y_{e,0}, y_{e,u}$ : PEP 工法矢板の場合の部材断面図心から部材圧縮縁および引張縁までのそれぞれの距離

$r$ : PEP 工法矢板の場合の二次半径

$\sigma'_{c0,a}, \sigma_{c0,a}$ : 部材圧縮部におけるそれぞれの許容曲げ引張応力度および許容曲げ圧縮応力度

$\sigma'_{cu,a}, \sigma_{cu,a}$ : 部材引張部におけるそれぞれの許容曲げ引張応力度および許容曲げ圧縮応力度

$\sigma'_K, \sigma_K$ : FIP 基準に定められた特性圧縮強度および特性引張強度

$\sigma$ : プレストレス導入時のコンクリートの圧縮強度

b) 許容応力度<sup>2)</sup>

① コンクリートに関するもの:

設計荷重作用時

部材圧縮部  $\sigma'_{co,a} \leq 0.085 \sigma'_K$   $\sigma_{co,a} \leq 0.29 \sigma'_K$

部材引張部  $\sigma'_{cu,a} \leq 0.085 \sigma'_K$   $\sigma_{cu,a} \leq 0.38 \sigma'_K$

施工完了までの間に一時的に作用する荷重に対して

部材圧縮部  $\sigma_{co,a} \leq 0.50 \sigma'_K$

部材引張部  $\sigma_{cu,a} \leq 0.10 \sigma'_K$   $\sigma_{cu,a} \leq 0.38 \sigma'_K$

② PC鋼材に関するもの:

設計荷重作用時  $\sigma_{pa} \leq 0.60 \sigma_{pu}$

プレストレス導入時  $\sigma_{pi,a} \leq 0.70 \sigma_{pu}$

c) 設計諸元

設計諸元を次表のように定める。

表-1 諸元

記号	諸元	記号	諸元
<i>b</i>	40 cm	$\sigma_{py}$	19 500 kg/cm <sup>2</sup>
<i>h</i>	15 cm	$\sigma_{pu}$	20 000 kg/cm <sup>2</sup>
<i>d</i>	12.5 cm	$\sigma_{pi,a}$	14 000 kg/cm <sup>2</sup>
<i>A</i>	600 cm <sup>2</sup>	$\sigma_{pa}$	12 000 kg/cm <sup>2</sup>
<i>I</i>	11 250 cm <sup>4</sup>	$\sigma_K'$	600 kg/cm <sup>2</sup>
<i>y<sub>0</sub></i>	7.5 cm	$\sigma_K$	70 kg/cm <sup>2</sup>
<i>y<sub>u</sub></i>	7.5 cm	$\sigma'_{co,a}$	51 kg/cm <sup>2</sup> 設計荷重時
<i>e<sub>p1</sub></i>	5 cm	$\sigma_{co,a}$	174 kg/cm <sup>2</sup> "
<i>e<sub>p2</sub></i>	-5 cm	$\sigma'_{cu,a}$	51 kg/cm <sup>2</sup> "
<i>A<sub>p1</sub></i>	0.132 × 12 = 1.584 cm <sup>2</sup>	$\sigma_{cu,a}$	228 kg/cm <sup>2</sup> "
<i>A<sub>p2</sub></i>	0.132 × 12 = 1.584 cm <sup>2</sup>	$\sigma_{co,a}$	300 kg/cm <sup>2</sup> 一時荷重時
<i>P</i>	1 800 × 24 = 43 200 kg	$\sigma'_{cu,a}$	60 kg/cm <sup>2</sup> "
<i>K</i>	0.05	$\sigma_{cu,a}$	228 kg/cm <sup>2</sup> "
<i>E<sub>p</sub></i>	2.0 × 10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup>	<i>k</i>	1.7
<i>E<sub>c</sub></i>	4.5 × 10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup>	$\varphi$	3.4
<i>n</i>	4.4	$\epsilon_s$	20 × 10 <sup>-5</sup>

d) 抵抗モーメントの計算

① 従来工法による矢板の抵抗モーメント:

$A_{e1} = A + (n-1) \sum A_{pn} = 610.8 \text{ (cm}^2\text{)}$

$I_{e1} = I + A g_e^2 + (n-1) \sum A_{pn} (e_n - g_e)^2 = 11 519 \text{ (cm}^4\text{)}$

$P_i = P(1-K) = 41 040 \text{ (kg)}$

$\sigma_{pi} = P_i / \sum A_{pn} = 12 955 \text{ (kg/cm}^2\text{)} < \sigma_{pi,a} = 14 000 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

$\sigma_{ci} = P_i / A_{e1} = 67.2 \text{ (kg/cm}^2\text{)} < \frac{1}{2} \sigma$

$\sigma_{pt} = \sigma_{pi} - n \sigma_{ci} = 12 659 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

プレストレスは全断面に均等なので

$\sigma_{ct} = \sigma_{pt} \cdot \sum A_{pn} / A_{e1} = 65.7 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

$\frac{\sigma_{p\varphi}}{\sigma_{pt}} = \frac{n \varphi \cdot \sum \sigma_{cp,t} + E_p \cdot \epsilon_s}{\sigma_{pt} + n \sigma_{cp,t} \left(1 + \frac{\varphi}{2}\right)} = 0.103$

$\sigma_{p\varphi} = \sigma_{p\varphi} / \sigma_{pt} = \sigma_{pt} = 1 304 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

$\sigma_{c\varphi}$  は全断面に均等なので

$\sigma_{c\varphi} = \sigma_{p\varphi} \cdot \sum A_{pn} / A_{e1} = 6.8 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

$\sigma_{ce} = \sigma_{ct} - \sigma_{c\varphi} = \frac{\sigma_{pt} \cdot \sum A_{pn}}{A_{e1}} - \frac{\sigma_{p\varphi} \cdot \sum A_{pn}}{A_{e1}} = \frac{(\sigma_{pt} - \sigma_{p\varphi}) \cdot \sum A_{pn}}{A_{e1}} = \sigma_{pe} \cdot \sum A_{pn} / A_{e1} = 58.9 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

$\sigma_{pe} = \left(1 - \frac{\sigma_{p\varphi}}{\sigma_{pt}}\right) \sigma_{pt} = \sigma_{pt} - \sigma_{p\varphi}$

$= 11 355 \text{ (kg/cm}^2\text{)} < \sigma_{pa} = 12 000 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

したがって、従来工法のPC矢板の設計荷重時に対する抵抗モーメント部材は引張部において、

$M = -\frac{I_{e1}}{y_{eu}} (\sigma_{ce} + \sigma'_{cu,a}) = 1.68 \text{ (t}\cdot\text{m)} \dots\dots (1)$

② PEP 工法による矢板の抵抗モーメント:

$A_{e2} = A + (n-1) \sum A_{pn} = 605.4 \text{ (cm}^2\text{)}$

$g_e = (n-1) \sum A_{pn} \cdot e_n / A_{e2} = -0.044 \text{ (cm)}$

$e_{p3} = e_n - g_e = -4.956 \text{ (cm)}$

$I_{e2} = I + A \cdot g_e^2 + (n-1) \sum A_{pn} (e_{p3})^2 = 11 383 \text{ (cm}^4\text{)}$

$y_{e0} = y_0 - g_e = 7.544 \text{ (cm)}$

$y_{eu} = y_u - g_e = -7.456 \text{ (cm)}$

$P_t = \sigma_{pt} \cdot A_{p2} = 20 052 \text{ (kg)}$

$\sigma_{cp,t} = \frac{P_t}{A_{e2}} \cdot \left(1 + \frac{e_{p3}^2}{r^2}\right)$  ここに、 $r = \sqrt{I_{e2} / A_{e2}}$

$\therefore \sigma_{cp,t} = \frac{P_t}{A_{e2}} + \frac{P_t}{A_{e2}} \cdot \frac{e_{p3}^2}{I_{e2} / A_{e2}}$   
 $= \frac{P_t}{A_{e2}} + \frac{P_t \cdot e_{p3}}{I_{e2}} \cdot e_{p3} = 76.4 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

$\frac{\sigma_{p\varphi}}{\sigma_{pt}} = \frac{n \varphi \sum \sigma_{cp,t} + E_p \cdot \epsilon_s}{\sigma_{pt} + n \sigma_{cp,t} \left(1 + \frac{\varphi}{2}\right)} = 0.114$

$\sigma_{p\varphi} = \sigma_{p\varphi} / \sigma_{pt} \cdot \sigma_{pt} = 1 443 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

$\sigma_{pe} = (1 - \sigma_{p\varphi} / \sigma_{pt}) \sigma_{pt} = \sigma_{pt} - \sigma_{p\varphi} = 11 216 \text{ (kg/cm}^2\text{)} < \sigma_{pa} = 12 000 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

$P_e = \sigma_{pe} \cdot A_{p2} = 17 766 \text{ (kg)}$

$\sigma_{c\varphi}$  は全断面に均等ではなく、偏心のある負のプレストレスとして計算する。

$\sigma_{c\varphi,u} = \frac{A_{p2} \cdot \sigma_{p\varphi}}{A_{e2}} + \frac{A_{p2} \cdot \sigma_{p\varphi} \cdot e_{p3}}{I_{e2}} \cdot y_{eu}$

$\sigma_{c\varphi,0} = \frac{A_{p2} \cdot \sigma_{p\varphi}}{A_{e2}} + \frac{A_{p2} \cdot \sigma_{p\varphi} \cdot e_{p3}}{I_{e2}} \cdot y_{e0}$

したがって、

$\sigma_{ce,u} = \sigma_{ct,u} - \sigma_{c\varphi,u} = \frac{\sigma_{pt} \cdot A_{p2}}{A_{e2}} + \frac{\sigma_{pt} \cdot A_{p2} \cdot e_{p3}}{I_{e2}} \cdot y_{eu} - \sigma_{c\varphi,u}$

$= \frac{P_e}{A_{e2}} + \frac{P_e \cdot e_{p3}}{I_{e2}} \cdot y_{eu} = 87.0 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

$\sigma_{ce,0} = \frac{P_e}{A_{e2}} + \frac{P_e \cdot e_{p3}}{I_{e2}} \cdot y_{e0} = -29.1 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

したがって、PEP 工法によるPC矢板の設計荷重時に対する抵抗モーメントは部材引張部において、

$M = -\frac{I_{e2}}{y_{eu}} (\sigma_{ce,u} + \sigma'_{cu,a}) = 2.10 \text{ (t}\cdot\text{m)} \dots\dots (2)$

③ FFP 工法適用の効果: PEP 工法による矢板の抵抗モーメントは、従来工法による矢板のそれに対してつぎのように増加している。

$\frac{2.10 - 1.68}{1.68} \times 100 = 28.6\% \text{ (増)}$

また、矢板を施工現場に打ち込むまでに矢板にかかる

いろいろな荷重は一時荷重として取り扱われるので、PEP 工法による矢板の一時荷重に対する抵抗モーメントは式(1)の  $0.085 \sigma'_{K}$  (設計荷重) を  $0.10 \sigma'_{K}$  (一時荷重) と置換えたのに等しい。したがって、カッティング前でも

$$M = -\frac{I_{e1}}{y_{eu}}(\sigma_{ce} + \sigma'_{cu,a}) = 1.83 \text{ (t}\cdot\text{m)}$$

(4) PEP 工法の問題点

この PEP の考え方は他の構造物にも大いに利用範囲が広いと思われるが、PEP 工法は外荷重によって圧縮の生ずる側のプレストレスを除去することであり、この場合、最も重要なことは外荷重を的確に把握しなければならないということである。したがって、まずこのことを第一に考えなければならない。しかしながら、いかなるモーメント図に対してもそれに相応するようにプレストレスを再分布させようとは限らない。なんとすれば、カッティング部分はボンド定着が要求され、かつ定着長さが伝達長  $(\lambda)$  以上なければならないことから、ライブワイヤーの最小長は  $2\lambda$  以上必要だからである。なお、本工法適用にあたってはあらかじめボンドレス部分設けるのと、カッティングのために従来工法より余分の手間と経費を要することはいうまでもない。

本工法矢板はボンドレス部分が存在するため、それが打ち込み時の障害にならぬかどうか、カッティング後にボンド定着箇所がふえることから、とくに動的な荷重を受けるような場合にはボンド疲労の懸念はないか、カッティング後の伝達長が若干伸びるのではなからうか、などの点に関する研究が今後望まれる。

4. 矢板の計算法 (筆者らの考え方)

矢板の計算にあたって、主働土圧はどのように働くか、その区間をどう取り扱うか、また根入部の抵抗力をどう取り扱うかで従来いろんな計算法が提案されている。筆者らは主働側を  $P_1 = C_a \cdot r \cdot x + C_a \cdot q$ , 受働側を Chang の式  $P_2 = E_s \cdot y_2$  を用いることにし、矢板変形後も土圧分布は変わらないものとする。したがって、

$$EI \cdot \frac{d^4 y_1}{dx^4} = -P_1 = -(K_1 x + K_2) \dots\dots\dots (3)$$

$$EI \cdot \frac{d^4 y_2}{dx^4} = -P_2 = -E_s y_2 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$P_1, P_2$ ; 主働側および受働側の矢板に働くそれぞれの水平分布荷重

$y_1, y_2$ ; 主働側および受働側のそれぞれの矢板のたわみ

$x$ ; 矢板の深さ  $C_a$ ; 主働土圧係数

$r$ ; 土の単位体積重量  $q$ ; 載荷重

$EI$ ; 部材の曲げ剛さ  $E_s$ ; 土の弾性係数

$K_1 = C_a \cdot r, K_2 = C_a \cdot q$

また、土の弾性係数  $E_s$  は

$$E_s = k_h \cdot B, \quad k_h = 0.691 N^{0.405} \text{ }^{3)}$$

を用いる。

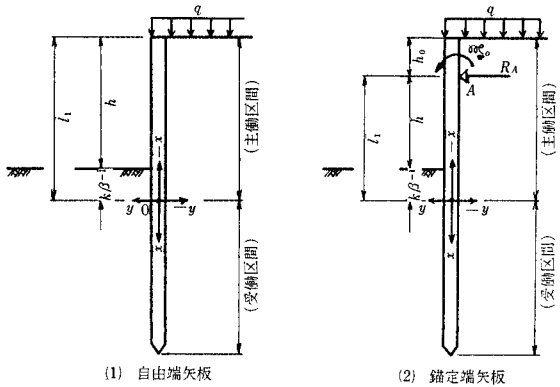
ここに、 $B$ ; 部材幅、 $N$ ;  $N$  値、 $k_h$ ; 地盤反力係数

Chang の式によると、埋め込み始端ではたわみが最大で反力が最大となる。ところが、砂地盤のごとく粘着力  $C=0$  となるような場合、 $P_2=0$  となって不合理が生ずる。この解決法として、たとえば、埋め込み始端付近で塑性領域を考慮して解く長<sup>4)</sup>、竹下<sup>5)</sup>らの方法が提案されているが、筆者らは主働土圧が働く区間を決める意味からも、埋め込み始端下  $k\beta^{-1}$  ( $k:1$  より小さい定数、 $\beta^{-1} = \sqrt[4]{EI/E_s}$ ; 特性長) の点に原点を定め、それより上側に主働土圧が働くとし、それより下側には Chang の式が適用できるとして、それぞれ主働区間、受働区間と名付けた。そして、実験によって各土質に必ずる  $k$  の値を導くことにした。

(1) 主働土圧が作用する場合

a) 座標系

図-2 座標系



b) 一般解

① 主働側:

$$y_1 = \alpha_1 x^5 + \alpha_2 x^4 + c_1 x^3 + c_2 x^2 + c_3 x + c_4 \dots\dots\dots (5)$$

$$\alpha_1 = K_1/120 EI, \quad \alpha_2 = K_2/24 EI$$

$c_1, c_2, c_3, c_4$ ; 積分定数

② 受働側:

$$y_2 = e^{-\beta x} (c_5 \cdot \cos \beta x + c_6 \sin \beta x) + e^{\beta x} (c_7 \cos \beta x + c_8 \sin \beta x)$$

根入長が  $\pi\beta^{-1}$  以上あれば根入長を無限としても誤差が少ないことが確かめられているので、根入長は無限と仮定する。上式より  $x = \infty$  のとき  $y_2$  は有限ということから、 $c_7 = c_8 = 0$ 。したがって、

$$y_2 = e^{-\beta x} (c_5 \cos \beta x + c_6 \sin \beta x) \dots\dots\dots (6)$$

$c_5, c_6, c_7, c_8$ ; 積分定数

c) 境界条件

$x=0$  のとき、自由端矢板、固定端矢板とも

$$y_1 = y_2, \quad y_1' = y_2', \quad y_1'' = y_2'', \quad y_1''' = y_2'''$$

$x = -(h + k\beta^{-1}) = l_1$  のとき、自由端矢板は

$$y_1'' = 0, \quad y_1''' = 0$$

錨定端矢板は  $y_1=0, y_1''=-\mathfrak{M}_0/EI$

d) 逐次微分係数の基本形

① 主働側:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \alpha_1 x^5 + \alpha_2 x^4 + c_1 x^3 + c_2 x^2 + c_3 x + c_4 \\ y_1' &= 5 \alpha_1 x^4 + 4 \alpha_2 x^3 + 3 c_1 x^2 + 2 c_2 x + c_3 \\ y_1'' &= 20 \alpha_1 x^3 + 12 \alpha_2 x^2 + 6 c_1 x + 2 c_2 \\ y_1''' &= 60 \alpha_1 x^2 + 24 \alpha_2 x + 6 c_1 \\ y_1'''' &= 120 \alpha_1 x + 24 \alpha_2 \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

② 受働側:

$$\left. \begin{aligned} y_2 &= e^{-\beta x} (c_5 \cos \beta x + c_6 \sin \beta x) \\ y_2' &= \beta e^{-\beta x} \{-c_5 (\cos \beta x + \sin \beta x) \\ &\quad + c_6 (\cos \beta x - \sin \beta x)\} \\ y_2'' &= 2 \beta^2 e^{-\beta x} (c_5 \sin \beta x - c_6 \cos \beta x) \\ y_2''' &= 2 \beta^3 e^{-\beta x} \{c_5 (\cos \beta x - \sin \beta x) \\ &\quad + c_6 (\cos \beta x + \sin \beta x)\} \\ y_2'''' &= -4 \beta^4 e^{-\beta x} (c_5 \cos \beta x + c_6 \sin \beta x) \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

e) 積分定数の決定

① 自由端矢板の場合:

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= -(10 \alpha_1 l_1^2 + 4 \alpha_2 l_1) \\ c_2 &= 20 \alpha_1 l_1^3 + 6 \alpha_2 l_1^2 \\ c_3 &= -\{10 \alpha_1 l_1^2 (4 l_1 \beta - 3) + 12 \alpha_2 l_1 (l_1 \beta - 1)\} / \beta^2 \\ c_4 &= \{10 \alpha_1 l_1^2 (2 l_1 \beta - 3) + 6 \alpha_2 l_1 (l_1 \beta - 2)\} / \beta^3 \\ c_5 &= \{10 \alpha_1 l_1^2 (2 l_1 \beta - 3) + 6 \alpha_2 l_1 (l_1 \beta - 2)\} / \beta^3 \\ c_6 &= -(20 \alpha_1 l_1^3 + 6 \alpha_2 l_1^2) / \beta^2 \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

② 錨定端矢板の場合

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{1}{3} \cdot \beta^3 \frac{a_1 a_6 + a_4 a_5 - a_2 a_6 - a_3 a_5}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \\ c_2 &= -\beta^2 \frac{a_1 a_6 - a_3 a_5}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \\ c_3 &= \beta \cdot \frac{a_1 a_6 - a_3 a_5 - a_4 a_5 + a_2 a_6}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \\ c_4 &= \frac{a_4 a_5 - a_2 a_6}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \\ c_5 &= \frac{a_4 a_5 - a_2 a_6}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \\ c_6 &= \frac{a_1 a_6 - a_3 a_5}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \end{aligned} \right\} \dots (10)$$

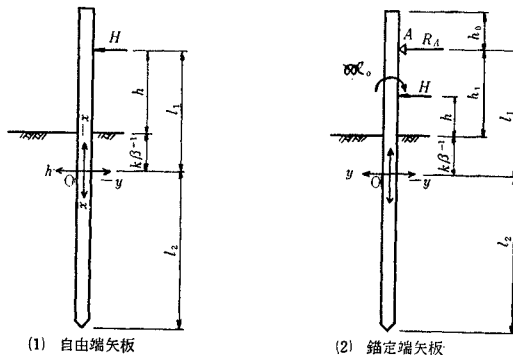
ここに,

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= (l_1 \beta)^3 - 3 l_1 \beta + 3 \\ a_2 &= l_1 \beta \{(l_1 \beta)^2 - 3 l_1 \beta + 3\} \\ a_3 &= 2 l_1 \beta^3 \\ a_4 &= 2 l_1 \beta^3 - 2 \beta^2 \\ a_5 &= -3(\alpha_1 l_1^5 + \alpha_2 l_1^4) \\ a_6 &= -(20 \alpha_1 l_1^3 + 12 \alpha_2 l_1^2 + \mathfrak{M}_0/EI) \\ \mathfrak{M}_0 &= -\int_0^{h_0} c_a (r z + q)(h_0 - z) dz \\ &= h_0^2 (h_0 + 3 q) / 6 \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

(2) 集中荷重が作用する場合

a) 座標系

図-3 座標系



b) 一般解および逐次微分係数

①  $l_1 \leq x \leq 0$  のとき:

式 (3) において  $p_1=0$ . したがって

$$\begin{aligned} y_1 &= c_1 x^3 + c_2 x^2 + c_3 x + c_4 \\ y_1' &= 3 c_1 x^2 + 2 c_2 x + c_3 \\ y_1'' &= 6 c_1 x + 2 c_2 \\ y_1''' &= 6 c_1 \\ y_1'''' &= 0 \end{aligned}$$

②  $0 \leq x$  のとき

式 (8) と同形

c) 境界条件

$x=0$  のとき 自由端矢板, 錨定端矢板とも

$$y_1 = y_2, y_1' = y_2', y_1'' = y_2'', y_1''' = y_2'''$$

$x=l_1$  のとき 自由端矢板は  $y_1''=0, y_1'''=-H/EI$

錨定端矢板は  $y_1''=-(h_1-h)R_A/EI$

$$y_1'''=-(H-R_A)/EI$$

$x=-(h_1+k\beta^{-1})=l_0$  のとき, 錨定端矢板のみ

$$y_1=0$$

d) 積分定数の決定

① 自由端矢板の場合:

$$\begin{aligned} c_1 &= -H/6 EI \\ c_2 &= H \cdot l_1 / 2 EI \\ c_3 &= H(1-2\beta l_1) / 2 \beta^2 EI \\ c_4 &= H(-\beta^{-1} + l_1) / 2 \beta^2 EI \\ c_5 &= H(-\beta^{-1} + l_1) / 2 \beta^2 EI \\ c_6 &= -H \cdot l_1 / 2 \beta^2 EI \end{aligned}$$

② 錨定端矢板の場合:

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= a_3 \cdot R_A + a_4 \\ c_2 &= a_1 R_A + a_2 \\ c_3 &= -\{(3 a_3 + 2 \beta a_1) R_A + (3 a_4 + 2 \beta a_2)\} / \beta^2 \\ c_4 &= \{(3 a_3 + \beta a_1) + (3 a_4 + \beta a_2)\} / \beta^3 \\ c_5 &= \{(3 a_3 + \beta a_1)(3 a_4 + \beta a_2)\} / \beta^3 \\ c_6 &= -(a_1 \cdot R_A + a_2) / \beta^2 \end{aligned} \right\} \dots (12)$$

ここに,

$$R_A = \frac{H(\beta^3 l_0^5 - 3 \beta l_0 + 3) - 3 H l_1 (\beta^3 l_0^2 - 2 \beta^2 l_0 + \beta)}{\beta^3 l_0^3 - 3 \beta l_0 + 3 - 3(h_1 \beta^{-1} + l_1)(l_0^2 \beta^2 - 2 \beta^2 l_0 + \beta)}$$

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= -\{(h_1-h)+l_1\}/2EI, & a_2 &= Hl_1/2EI \\ a_3 &= 1/6EI, & a_4 &= -H/6EI \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

(3) 断面力の計算

以上の式を用いると下記の諸値が求まる。

$$\begin{aligned} \text{たわみ} \dots\dots y & \quad \text{たわみ角} \dots\dots \theta = y' \\ \text{曲げモーメント} \dots\dots M &= -EI \cdot y'' \\ \text{せん断力} \dots\dots S &= EIy''' \\ \text{分布荷重} \dots\dots P &= -EIy'''' \end{aligned}$$

5. 実 験

(1) 室内模型実験

模型実験槽に一定の締固め状態で土を入れ、それに模型矢板を埋め込み、集中荷重を作用させた場合の任意点のひずみを測定し、抵抗モーメントを逆算しようとしたものである。そして第4章で述べた筆者らの計算結果と比較検討を行なった。

a) 模型矢板

図-4 断面図

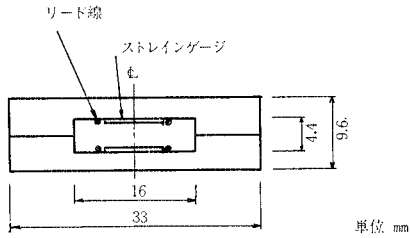
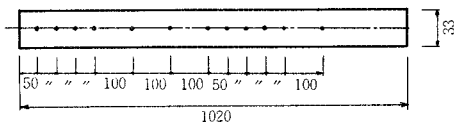


図-5 ストレインゲージ貼布位置



SS-41 33×4.7×1020 の平鋼 2 枚を、それぞれ中央に幅 16 mm、深さ 2.1 mm の溝をフライス加工し、その溝面にストレインゲージ(共和電業製 KP6A<sub>3</sub>) 12 枚ずつを 図-5 の位置に接着剤 PC12(共和電業製)で貼布した。リード線には 0.4 mm φ のエナメル線を用いた。そしてその 2 枚を 図-4 のように接着剤 PC12 で貼り合わせて、模型矢板を作製した。模型矢板の EI を測定した結果は 4.8×10<sup>5</sup> kg·cm<sup>2</sup> であった。

b) 試 料

実験には、試料として下表のような 3 種類の砂を用いた。

表-2 土の物理的性質

土の種類	内 部 摩擦 角	含水比	比 重	単 位 体 積 重 量	備 考
試料 1	30°	5.1%	2.53	1.5 t/m <sup>3</sup>	筑後川産
試料 2	22°	4.5%	2.59	1.4 t/m <sup>3</sup>	山 砂
試料 3	35°	6.4%	2.65	1.5 t/m <sup>3</sup>	筑後川産

c) 実験結果

測定したひずみから抵抗モーメントを逆算して図示すると 図-6~8 のようになる。

図-6 抵抗モーメント図(実測)

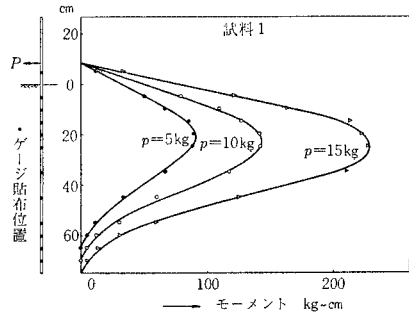


図-7 抵抗モーメント図(実測)

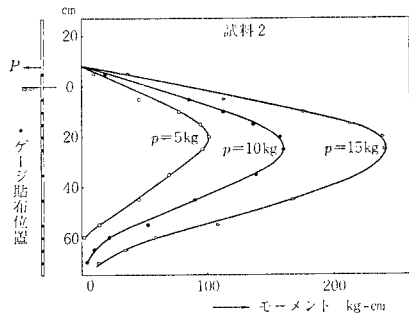
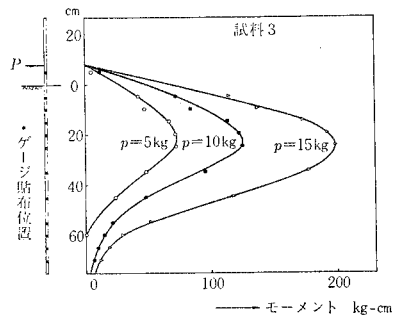


図-8 抵抗モーメント図(実測)



d) 筆者らの考え方による計算結果

以上の値および式を用いてモーメントを計算して図示すると 図-9~17 のようになる。ただし、k=0.4, 0.5, 0.6 についてのみ示した。

図-9 抵抗モーメント図(計算)

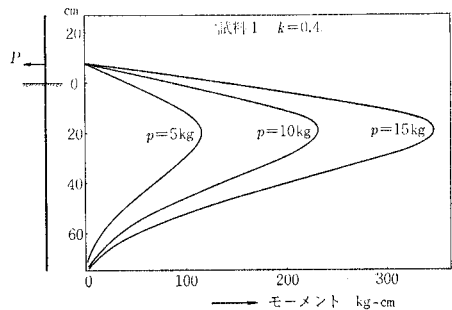


図-10 抵抗モーメント図 (計算)

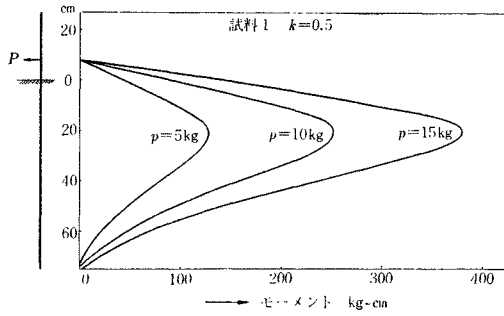


図-14 抵抗モーメント図 (計算)

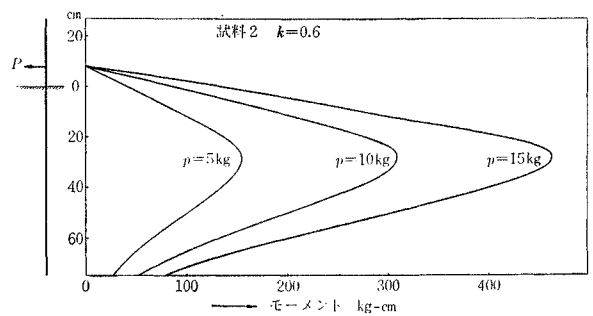


図-11 抵抗モーメント図 (計算)

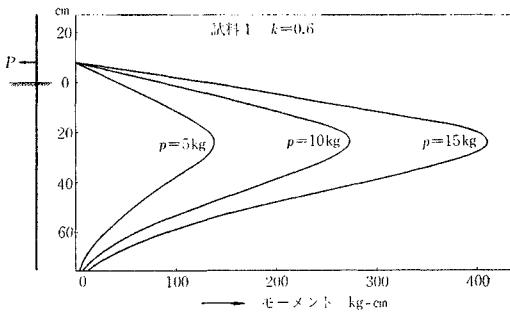


図-15 抵抗モーメント図 (計算)

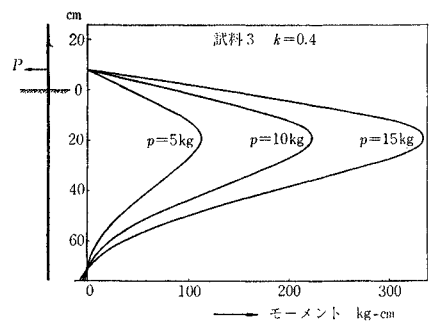


図-12 抵抗モーメント図 (計算)

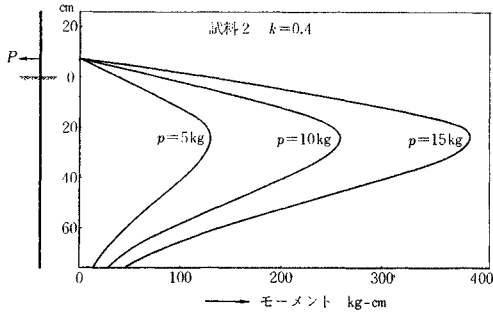


図-16 抵抗モーメント図 (計算)

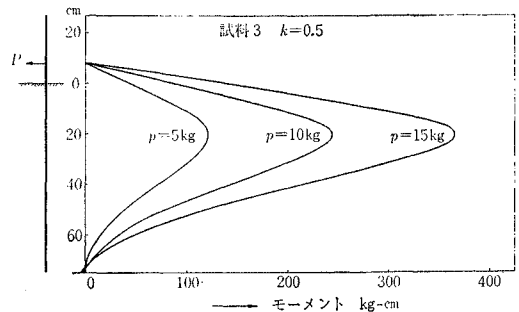


図-13 抵抗モーメント図 (計算)

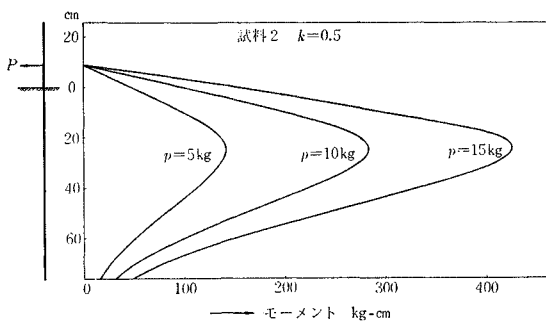
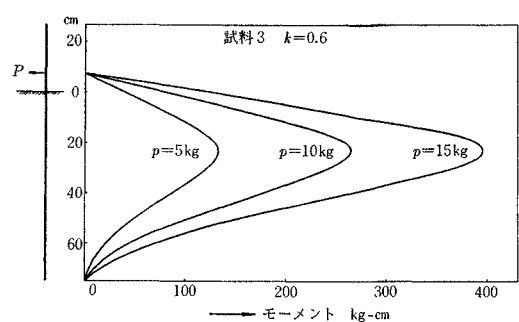


図-17 抵抗モーメント図 (計算)



## e) 考察

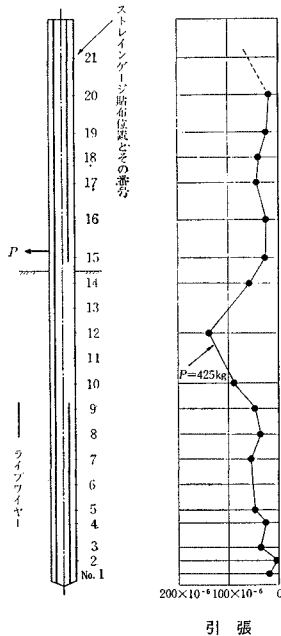
現場実験では土の締固め一定という条件が満たされがたいので、筆者らはその均一性を期して模型矢板実験を行なった。ただし、主働土圧の代りに集中荷重を作用させた。実験結果から得られた部材の抵抗モーメント曲線は、筆者らの計算法から得られたものと定性的に非常に

よく合致する。ただし、筆者らの計算法では抵抗モーメントの最大点は、外荷重に無関係に $k$ 値の増加にしたがって下降する。同一の $k$ に対しては荷重の増加にともなって、抵抗モーメントの最大値が増大するのみで、最大点は変化しない。一方、実験結果からは抵抗モーメントの最大点は、荷重の増加にしたがって下降の傾向が認め





図-21 カuttingし、 $P$  を載荷したときのひずみ (自由端矢板)



プレストレスを除去した際、そりを生じたためではないかと思われる。

自由端矢板の場合は、425 kg の初期集中荷重を与え、その後カuttingを行なってプレストレス再分布に基づくひずみを測定したが、この場合もカuttingによる良好な結果が認められる (図-21)。

## 6. 結 言

PEP 工法を適用する場合、前述したように外荷重を的確に知ることが第1条件である。しかしながら、現状では矢板に作用する土圧論についてまだ未解明な分野が多い。そこで、矢板を計算する場合、筆者らは埋め込み始端下  $k\beta^{-1}$  の点を原点として、それ以下の部分に Chang の式を適用し、それ以上の部分に主働土圧が作用するという考え方で進めた。この計算値は実験値と定性的にはよく合致し、定量的には後者よりかなり大きかった。この要因の一つとして  $\beta$  の値が考えられる。すなわち、 $\beta$  は土の弾性係数  $E_s$  と部材の曲げ剛さ  $EI$  の関数であり、うち  $EI$  はかなりの精度で測定を行なったものの、 $E_s$  は  $E_s = k_h \cdot B$ 、 $k_h = 0.691 N^{0.406}$  というかなり無理な仮定や実験式から求めたためであろう。また、 $E_s$  はプレシオメーター法によって直接求めることもできる。なお、筆者らの計算法がよく合致することを逆に利用すれば、より正確に  $E_s$  を求めることができる。

つぎに  $k$  値は実験結果から外荷重の関数であることがわかったので、設計計算に用いる  $k$  値は厳密には「ある土質の、設計モーメントに対する値」を用いなければならないことになる。

筆者らはとりあえず本工法を PC 矢板に適用したが、本工法を用いれば、従来ポストテンション方式でしか施工できなかった曲線ケーブルに基づくプレモーメント図に相当するものを有する部材が、カuttingによってプレテンション方式の直線ケーブルでも造られうることになる。したがって、本工法の応用範囲はきわめて広く、とくに薄肉の床版などに適用すればその有用性が発揮されるものと思われ、これらについては目下研究中である。

PEP 工法は、これまで行なわれてきた各種工法の型を破るごとく斬新さもなければ画期的なものでもない。従来のプレテンション方式 PC 部材の圧縮部の鋼線を切断し不要なプレストレスを除去したにすぎないからである。しかしながら、わずかにこれだけの所作を加えただけで節約され得る部材断面、鋼線量の意外に大きいことに驚くのは筆者らのみではあるまい。

ものには積極的利用と消極的利用の二面があり、前者については、一般に評価され取組まれやすいのに対し、後者は軽視され、捨ておかれる傾向が強いことは広く痛感される場所であるが、本工法も後者に属するため気付かれず、また気付かれても実行されないままに今日に至った感が強い。消極的利用という面に対する認識を一段と強めた次第である。

そして「将来引張応力の生ずる部分により大きい圧縮応力を、圧縮応力の生ずる部分により大きい引張応力を」というプレストレスの根本原則に、より忠実ならんとすることが、結局は最も経済性を高めるゆえであることを再認識すべきであろう。

終りに、本研究に対して貴重なるご助言を賜りました猪股俊司博士に深謝申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 渡辺 明・石井啓文・前原昭一郎：土木学会西部支部研究発表会論文集 (昭和43年2月)
- 2) 土木学会：プレストレス コンクリート 設計施工指針 (昭和36年度)
- 3) 福岡正巳・宇都一馬：ボーリング孔を利用した基礎地盤の横方向  $k$  値測定について、土と基礎、特集号-1, (1959)
- 4) 長 尚：頭部が剛結された杭の横抵抗計算法、土木技術、16-5 (1961)
- 5) 竹下 淳：横荷重をうけるクイに関する 2, 3 の考察、土木学会北海道支部 技術資料, 18 (1962)

(1968.4.10・受付)