

# (7) アンボンドあるいはアウトケーブル方式による P C 構造物の解析方法に関する研究

名古屋大学工学部

タテタタキ  
正会員 ○ 田 辺 忠 顕

名古屋工業大学工学部

正会員 梅 原 秀 哲

P C 建設業協会中部支部

正会員 牧 豊

## 1. ま え が き

近年、アンボンド工法による P C フレームあるいは P C 板構造の建設が徐々に増加しつつあり、またアウトケーブル方式のボックスなども建設されるようになった。これらの構造物の挙動を終局状態まで有限要素法を用いて解析する場合、コンクリートのひずみと P C 鋼材とのひずみが局所的には一致しないために特に鋼材用の節点を設けるか、あるいは何等かの定式化の工夫が必要となる。著者らは、すでに有限要素法を用いてアンボンド P C 構造物の挙動を解析する手法を開発した<sup>1)</sup>。しかし、この解析手法は以下のような適用限界があり、その範囲をこえて解析を行う場合には解析結果の精度が問題となった。すなわち、直線に配置された P C 鋼材を対象としており、P C 鋼材の曲線配置に対して適用が困難であること、さらに P C 鋼材とシースとの摩擦を近似解以上には考慮していないことである。

そこで本研究では、P C 鋼材の曲線配置とシースとの摩擦を考慮できるように、これまでの解析手法を発展させるとともに、実際の構造物に適用しその挙動の解析を試みた。

## 2. 解析方法

### 2.1 P C はり要素のポテンシャルエネルギー式

この解析手法は、P C 鋼材とコンクリートとの付着状態が、グラウトによる付着が完全な場合からアンボンドの場合までの解析が可能である。したがって、任意の付着状態における P C はり要素の増分系のポテンシャルエネルギー式は、次のように成り立つ。

$$\Delta \pi = \Delta U_c + \Delta U_s + \Delta V + \Delta U_f \quad (1)$$

ここに、 $\Delta U_c$  : コンクリート部分のひずみエネルギー増分

$\Delta U_s$  : P C 鋼材のひずみエネルギー増分

$\Delta V$  : 外力によるポテンシャルエネルギー増分

$\Delta U_f$  : P C 鋼材とコンクリート間のすべり摩擦によるエネルギー損失増分

各エネルギー項は以下に示す式によって表わされる。なお、ここでは部材数を M E M、節点数を J N T、要素数を E L M、P C 鋼材の数を N C A とする。

#### a) コンクリート部分のひずみエネルギー増分

$\Delta U_c$  は式 (2) のように、各荷重段階での同一コンクリート部分におけるひずみエネルギー増分の総和によって定義される。

$$\Delta U_c = \sum_{i=1}^{ELM} \frac{1}{2} \int_{VOL} E_c(p) \Delta \epsilon_{ci}^2 dV \quad (2)$$

ここに、 $E_c(p)$  : 応力履歴によって影響されるコンクリートの接線ヤング係数

$p$  : 応力経路

$\Delta \epsilon_{cs}$  : コンクリートのひずみ増分量

b) PC 鋼材のひずみエネルギー増分

$\Delta U_s$  は PC 鋼材とコンクリートとの間の付着力の有無によってその値が異なる。付着力が完全で、鋼材とコンクリートとの間にすべりが存在しない場合には鋼材のひずみ増分は、鋼材位置のコンクリートのひずみ増分  $\Delta \epsilon_{cs}$  と一致しなければならない。逆に付着力が全く存在しない場合には、図-1 に示すように、鋼材内のひずみ増分  $\Delta \epsilon_{ss}$  は、鋼材の一方の端から他端まで同一で次式で表わされる。なお、図-1 において、一例としてコンクリートの要素は 8 個のはり要素に分割されているが、鋼材については 5 個のコンクリート要素を貫いてひずみを考慮することになる。

$$\Delta \epsilon_{ss} = \frac{1}{L} \int_0^L \Delta \epsilon_{cs} dx \quad (3)$$

多くの実構造物は、上記のケースの中間に存在すると考えられ、その場合の鋼材各位置のひずみは次式で与えられる。ただし、 $L$  は鋼材の長さで、 $K_s$  はすべり係数で一般に応力履歴  $p$  の関数であるが、ここでは取り扱いを簡単にするため一定と仮定する。

$$\Delta \epsilon_s = K_s \left( \frac{1}{L} \int_0^L \Delta \epsilon_{cs} dx - \Delta \epsilon_{cs} \right) + \Delta \epsilon_{cs} \quad (4)$$

式(4)を用いて鋼材のひずみエネルギー増分は次のように与えられる。

$$\Delta U_s = \sum_{k=1}^{MEM} \sum_{j=1}^{NCA} \frac{1}{2} \int_0^{L_{jk}} E_s(p) A_{sjk} \left[ K_s \left( \frac{1}{L_{jk}} \int_0^{L_{jk}} \Delta \epsilon_{cs} dx - \Delta \epsilon_{cs} \right) + \Delta \epsilon_{cs} \right]^2 dx \quad (5)$$

ここに、 $E_s(p)$  : 応力履歴によって影響される

$p$  : 応力経路

鋼材の接線ヤング係数

$A_{sjk}$  :  $k$  部材の  $j$  鋼材の断面積

$L_{jk}$  :  $k$  部材の  $j$  鋼材の長さ

c) 外力によるエネルギー増分

$\Delta V$  は各荷重段階で各節点や要素に加えられる外力によるエネルギー増分を表わしている。

$$\Delta V = - \sum_{i=1}^{INT} [\Delta P_i(u_{ii} - u_{i0}) + \Delta F_i(v_{ii} - v_{i0}) + \Delta M_i(\theta_{ii} - \theta_{i0})] - \sum_{i=1}^{ELM} \int_0^{L_i} \Delta q_i(v_{ii} - v_{i0}) dx \quad (6)$$

ここに、 $\Delta P_i$  :  $i$  節点に作用する軸方向外力増分

$\Delta F_i$  :  $i$  節点に作用する軸直角方向外力増分

$\Delta M_i$  :  $i$  節点に作用するモーメント増分

$\Delta q_i$  :  $i$  要素に作用する分布外力増分

$u_{ij}$  :  $i$  節点の  $j$  段階の  $x$  方向変位

$v_{ij}$  :  $i$  節点の  $j$  段階の  $y$  方向変位

$\theta_{ij}$  :  $i$  節点の  $j$  段階の回転角

d) 鋼材とコンクリート間のすべり摩擦による

エネルギー損失増分

$\Delta U_f$  は鋼材がすべって、コンクリートとの間に相対変位が発生する際の摩擦によるエネルギー損失の増分量を表している。 $x$  の位置でのコンクリートと鋼材の相対変位  $\Delta x$  は、次式のように表わされる。

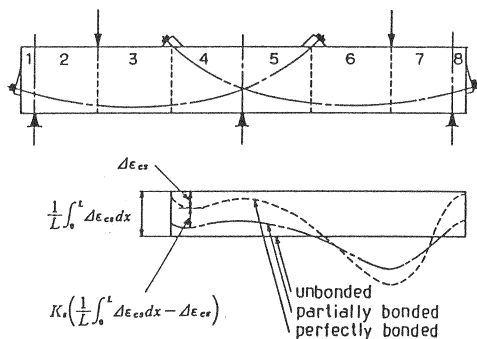


図-1 付着状態により異なる

鋼材のひずみ分布

$$\Delta x = \int_0^x (\Delta \epsilon_s - \Delta \epsilon_{cs}) dx = \int_0^x \left[ K_s \left( \frac{1}{L} \int_0^L \Delta \epsilon_{cs} dx - \Delta \epsilon_{cs} \right) \right] dx \quad (7)$$

$x = x$  で作用している摩擦力を  $\mu \cdot \Delta x$  とすると摩擦エネルギー損失の増分  $\Delta U_f$  は

$$\Delta U_f = \sum_{k=1}^{MEMNCA} \sum_{j=1}^L \int_0^L \Delta x_{jk} \mu \Delta x dx \quad (8)$$

となる。

## 2.2 剛性マトリックス

要素および要素内の変位関数として、ここでは最も簡単な6自由度を有する矩形はり要素を使用した。したがって、変位関数は次のように表わされる。

$$\Delta u^e = [N_u] \Delta d_u^e \quad \Delta v^e = [N_v] \Delta d_v^e \quad (9)$$

ここで、 $\Delta u^e$ 、 $\Delta v^e$  は図-2に示すように、はり軸方向および軸直角方向の変位増分で、 $\Delta d_u^e$ 、 $\Delta d_v^e$  はそれぞれ対応する節点変位増分である。また、部材座標系は  $e$  を付けて表わし、全体座標系には何も付けないことにする。

$$N_u = \left[ 1 - \frac{x}{l}, \frac{x}{l} \right] \quad N_v = \left[ \left( 1 - \frac{3x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3} \right), \left( x - \frac{2x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2} \right), \left( \frac{3x^2}{l^2} - \frac{2x^3}{l^3} \right), \left( -\frac{x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2} \right) \right]$$

要素内の軸方向ひずみ増分は、次のように表わされる。

$$\Delta \epsilon_x^e = \Delta u^{e'} - y \Delta v^{e''} = [N_u', -y N_v''] \begin{Bmatrix} \Delta d_u^e \\ \Delta d_v^e \end{Bmatrix} \quad (10)$$

式(10)を式(2)に代入すれば、 $\Delta U_e$  は次のように表わされる。

$$\Delta U_e = \sum_{i=1}^{ELM} \frac{1}{2} \int_{vol} E_c(p) (\Delta u^{e'} - y \Delta v^{e''})^2 dV = \sum_{i=1}^{ELM} \frac{1}{2} \int_{vol} E_c(p) \Delta d_i^T T_i^T G_i^T G_i T_i \Delta d_i dV \quad (11)$$

ここに、 $G_i = [N_u' - y N_v'']$

$T_i$  : 要素  $i$  についての座標変換マト

リックス

$$\Delta d_i^e = \begin{Bmatrix} \Delta d_u^e \\ \Delta d_v^e \end{Bmatrix}, \quad \Delta d_i = \begin{Bmatrix} \Delta d_u \\ \Delta d_v \end{Bmatrix}, \quad \Delta d_i^e = T_i \Delta d_i$$

一方、P C 鋼材は図-2に示すように一般に曲線に配置されている。そこで図のように、 $x = x$  の位置における鋼材の傾きを  $\theta$  (反時計回りを正) とすると、鋼材方向の鋼材ひずみ増分  $\Delta \epsilon_{x'}$  は、 $\Delta \epsilon_y = 0$ 、 $\Delta \gamma_{xy} = 0$  を仮定すれば、次式のように表わされる。

$$\Delta \epsilon_{x'} = \cos^2 \theta \cdot \Delta \epsilon_x \quad (12)$$

したがって、鋼材が  $\theta$  だけ傾いている位置でのコンクリートの  $\theta$  方向のひずみ増分は、式(10)を用いて、

$$\Delta \epsilon_c(\theta) = \cos^2 \theta \cdot G_i \cdot \Delta d_i \quad (13)$$

となる。 $\Delta \epsilon_{cs} = \Delta \epsilon_c(\theta)$  として、式(13)を式(4)に代入すると、 $\theta$  だけ傾いた鋼材の線材(線に沿った微小長さを  $ds$  とする)に沿ったひずみ増分  $\Delta \epsilon_s(\theta)$  が、次式のように表わされる。

$$\Delta \epsilon_s(\theta) = K_s \left( \frac{1}{L} \int_0^L \cos^2 \theta G_i \cdot \Delta d_i \cdot ds - \cos^2 \theta G_i \Delta d_i \right) + \cos^2 \theta G_i \Delta d_i \quad (14)$$

一方、 $ds = \sqrt{1 + \tan^2 \theta} \cdot dx$ 、 $\cos^2 \theta \sqrt{1 + \tan^2 \theta} = \cos \theta$  より式(14)は

$$\Delta \epsilon_s(\theta) = K_s \left( \frac{1}{L} \int_0^L \cos \theta G_i \cdot \Delta d_i \cdot dx - \cos^2 \theta G_i \Delta d_i \right) + \cos^2 \theta G_i \Delta d_i \quad (15)$$

となる。したがって、式(15)を式(5)に代入すると、 $\Delta U_e$  は次式のようにになる。

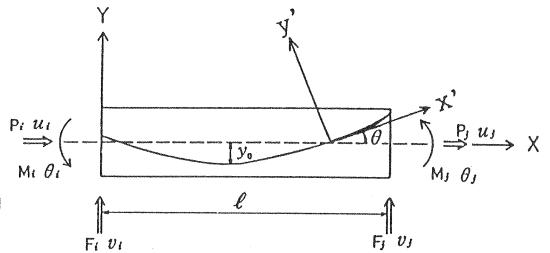


図-2 はり要素

$$\begin{aligned}
\Delta U_s = & \sum_{k=1}^{\text{MEMNCA}} \sum_{j=1}^{\frac{(1-K_s)^2}{2}} \frac{A_{sjk}}{L_{jk}} \int_0^{l_{ijk}} \cos^4 \theta E_s(p) (\Delta u'' - y_{oijk} \Delta v'')^2 dx \\
& + \sum_{k=1}^{\text{MEMNCA}} \sum_{j=1}^{\frac{K_s^2}{2L_{jk}}} A_{sjk} \left( \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_{ijk}} \cos^2 \theta E_s(p) dx \right) \left[ \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_{ijk}} (\Delta u'' - y_{oijk} \Delta v'') dx \right]^2 \\
& + \sum_{k=1}^{\text{MEMNCA}} \sum_{j=1}^{\frac{K_s(1-K_s)}{L_{jk}}} A_{sjk} \left[ \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_{ijk}} \cos^3 \theta E_s(p) (\Delta u'' - y_{oijk} \Delta v'') dx \right] \left[ \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_{ijk}} (\Delta u'' - y_{oijk} \Delta v'') dx \right] \\
= & \sum_{k=1}^{\text{MEMNCA}} \sum_{j=1}^{\frac{(1-K_s)^2}{2}} \frac{A_{sjk}}{L_{jk}} \int_0^{l_{ijk}} \cos^4 \theta E_s(p) \Delta d_i^T T_i^T H_i^T H_i T_i \Delta d_i dx \\
& + \sum_{k=1}^{\text{MEMNCA}} \sum_{j=1}^{\frac{K_s^2}{2L_{jk}}} A_{sjk} \left( \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_{ijk}} \cos^2 \theta E_s(p) dx \right) \Delta d_i^T S_j^T S_j \Delta d_i \\
& + \sum_{k=1}^{\text{MEMNCA}} \sum_{j=1}^{\frac{K_s(1-K_s)}{L_{jk}}} A_{sjk} \left( \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_{ijk}} \cos^3 \theta E_s(p) \Delta d_i^T T_i^T H_i^T dx \right) S_j \Delta d_i
\end{aligned} \quad (16)$$

ここに、 $y_{oijk}$  :  $\kappa$  部材の  $j$  番目の鋼材の  $i$  要素内の  $y$  座標

$$H_i = [N_u, y_{oijk} N_v] \quad S_j = \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_{ijk}} H_i T_i dx$$

外力によるエネルギー増分量は式 (6) より、次式のように表わされる。

$$\Delta V = - \sum_{i=1}^{\text{JNT}} \Delta F_i T_i \Delta d_i - \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_i} \Delta q_i N_i T_i \Delta d_i dx = - \sum_{i=1}^{\text{JNT}} \Delta d_i^T T_i^T \Delta F_i^T - \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_i} \Delta q_i \Delta d_i^T T_i^T N_i^T dx \quad (17)$$

ここに、 $\Delta F_i$  : 節点  $i$  における節点力増分のベクトル

$$\Delta F_i = \begin{Bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta F_i \\ \Delta M_i \end{Bmatrix}$$

$\Delta q_i$  : 要素  $i$  における分布荷重増分のベクトル

$$N_i = [N_u, N_v]$$

図-2 に示すような曲線配置された P C 鋼材のすべり摩擦に対して、P C 鋼材とコンクリートとの間に生じる相対変位が P C 鋼材に沿って生じることから、線材に沿った  $s = s$  の位置での相対変位を  $\Delta s$  とすると、 $\Delta s$  は次式のように表わされる。

$$\Delta s = \int_0^s (\Delta \epsilon_s(\theta) - \Delta \epsilon_c(\theta)) ds \quad (18)$$

式 (13)、(15) を式 (18) に代入して  $ds = \sqrt{1 + \tan^2 \theta} \cdot dx$  の関係を導入すると式 (18) は、

$$\Delta s = K_s \int_0^x \frac{dx}{\cos \theta} \int_0^l \cos \theta G_i \Delta d_i dx - K_s \int_0^x \cos \theta G_i \Delta d_i dx \quad (19)$$

となる。したがって、式 (8) の  $\Delta x$  を  $\Delta s$  に置き換えて式 (19) を代入すると、 $\Delta U_r$  は次式のように表わされる。

$$\Delta U_r = \sum_{k=1}^{\text{MEMNCA}} \sum_{j=1}^{\frac{(1-K_s)^2}{2}} \int_0^{l_{ijk}} \Delta s (\mu \Delta s) ds = \sum_{k=1}^{\text{MEMNCA}} \sum_{j=1}^{\frac{(1-K_s)^2}{2}} \mu K_s^2 \left( \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_{ijk}} \frac{1}{\cos \theta} \Delta d_i^T R_i^T R_i \Delta d_i dx \right) \quad (20)$$

ここに、

$$R_i = \int_0^x \frac{dx}{L_{jk} \cos \theta} \int_0^{l_{ijk}} \cos \theta G_i dx - \int_0^x \cos \theta G_i dx$$

最小ポテンシャルエネルギーの原理を用いると式 (1) より、以下ようになる。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Delta \pi}{\partial \Delta d_i} = & \frac{\partial \Delta U_c}{\partial \Delta d_i} + \frac{\partial \Delta U_s}{\partial \Delta d_i} + \frac{\partial \Delta V}{\partial \Delta d_i} + \frac{\partial \Delta U_r}{\partial \Delta d_i} = \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_{\text{VOL}} E_c(p) T_i^T G_i^T G_i T_i \Delta d_i dV \\
& + \sum_{k=1}^{\text{MEMNCA}} \sum_{j=1}^{\frac{(1-K_s)^2}{2}} (1-K_s)^2 A_{sjk} \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_{ijk}} \cos^4 \theta E_s(p) T_i^T H_i^T H_i T_i \Delta d_i dx \\
& + \sum_{k=1}^{\text{MEMNCA}} \sum_{j=1}^{\frac{K_s^2}{2L_{jk}}} A_{sjk} \left( \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_{ijk}} \cos^2 \theta E_s(p) dx \right) S_j^T S_j \Delta d_i \\
& + \sum_{k=1}^{\text{MEMNCA}} \sum_{j=1}^{\frac{2K_s(1-K_s)}{L_{jk}}} A_{sjk} \left( \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_{ijk}} \cos^3 \theta E_s(p) T_i^T H_i^T dx \right) S_j \Delta d_i \\
& - \sum_{i=1}^{\text{JNT}} T_i^T \Delta F_i^T - \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_i} \Delta q_i T_i^T N_i^T dx \\
& + \sum_{k=1}^{\text{MEMNCA}} \sum_{j=1}^{\frac{(1-K_s)^2}{2}} 2 \mu K_s^2 \left( \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_{ijk}} \frac{1}{\cos \theta} \Delta d_i^T R_i^T R_i \Delta d_i dx \right) = 0
\end{aligned} \quad (21)$$

したがって、最終的に

$$[K_c] + [K_{s1}] + [K_{s2}] + [K_r] \Delta d = [F] \quad (22)$$

ここに、

$$[K_c] = \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_{\text{VOL}} E_c(p) T_i^T G_i^T G_i T_i dV \quad (23 \cdot a)$$

$$[K_{s1}] = \sum_{k=1}^{\text{MEMNCA}} \sum_{j=1}^{\frac{(1-K_s)^2}{2}} (1-K_s)^2 A_{sjk} \sum_{i=1}^{\text{ELM}} \int_0^{l_{ijk}} \cos^4 \theta E_s(p) T_i^T H_i^T H_i T_i dx \quad (23 \cdot b)$$

$$[K_{st}] = \sum_{k=1}^{MEMNCA} \sum_{j=1}^N \frac{K_s^2}{L_{jk}} A_{sjk} \left( \sum_{i=1}^{ELM} \int_0^{\ell_{ijk}} \cos^2 \theta E_s(p) dx \right) S_j^T S_j + \sum_{k=1}^{MEMNCA} \frac{2K_s(1-K_s)}{L_{jk}} A_{sjk} \left( \sum_{i=1}^{ELM} \int_0^{\ell_{ijk}} \cos^2 \theta E_s(p) T_i^T H_i^T dx \right) S_j \quad (23 \cdot c)$$

$$[K_R] = \sum_{k=1}^{MEMNCA} \sum_{j=1}^N 2 \mu K_s^2 \left( \sum_{i=1}^{ELM} \int_0^{\ell_{ijk}} \frac{1}{\cos \theta} \Delta d_i^T R_i^T R_i \Delta d_i dx \right) \quad (23 \cdot d)$$

$$[F] = \sum_{j=1}^{JNT} T_j^T \Delta F_j^T + \sum_{i=1}^{ELM} \int_0^{\ell_i} \Delta q_i T_i^T N_i^T dx \quad (23 \cdot e)$$

ところで、断面の引張ひずみが引張ひずみ限界を上回った場合には、その位置にひびわれが発生する。また、断面内の各位置において応力状態が異なるため、その位置でのヤング係数も異なる。これらを考慮するため、各要素の任意の断面を図-3に示すようにx方向にM等分、y方向にN等分し、各微小要素ごとに応力-ひずみ関係を導入すると、式(23・a)の積分形式は次式のように各微小要素の総和となる。

$$[K_c] = \sum_{i=1}^{ELM} b \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M E_c(i, j, k, p) T_i^T G_i^T G_i T_i \quad (24)$$

ここに、b：要素の幅

このように表わすことによって、コンクリートのひびわれや、材料非線形を考慮することができ、その挙動をより正確に把握することができるものと考えられる。一例として、i要素における剛性マトリックス(6×6)の第1行第1列の成分を $K_{c11}$ とすると、 $T_i$ が単位行列の場合は、次式で表わすことができる。

$$K_{c11} = \sum_{i=1}^{ELM} \int_{vol} \frac{b}{\ell_i} E_c(p) dV = \sum_{i=1}^{ELM} \frac{1}{\ell_i} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M (q_{k+1} - q_k) b_k (r_{j+1} - r_j) E_c(i, j, k, p) \quad (25)$$

また、導入プレストレスについては、その効果を等価な外力で置き換えるために、次式で示す初期ひずみ $\epsilon_{cp}$ を与え、初期ひずみ問題として取り扱った。

$$\epsilon_{cp} = \frac{P}{E_c(p)} \left( \frac{1}{A_c} + \frac{y_o}{I_c} y \right) \quad (26)$$

ここに、 $A_c$ ：コンクリート部分の断面積

$y_o$ ：P C鋼材の偏心距離

$I_c$ ：コンクリート部分の断面二次モーメント

### 3. P C桁への適用

#### 3.1 P C桁の概要

上述の解析方法の妥当性を検討するため、支間19.6mのボストテンションP C単純T桁実橋の支間中央から75cmの位置での2点载荷による単桁破壊実験を対象としてその挙動を解析し、実験結果との比較を行った。この桁の断面形状およびP C鋼材の配置を図-4、図-5に示す。P C鋼材として12φ5のP C鋼線が10ケーブル用いられ、図のように曲線上に配置されている。この解析方法では、P C鋼材の曲線配置を

考慮することが可能であるので、図-5に示すように11要素

に分けてモデル化を行った。また、コンクリートの圧縮強度が426.0kgf/cm<sup>2</sup>、有効プレストレスが1ケーブルあたり20.94tonfとして解析を行った。なお、解析ではグラウトがある場合には、P C鋼材とコンクリートとの完全な付着状態を仮定して $K_a = 0.0$ を、ま

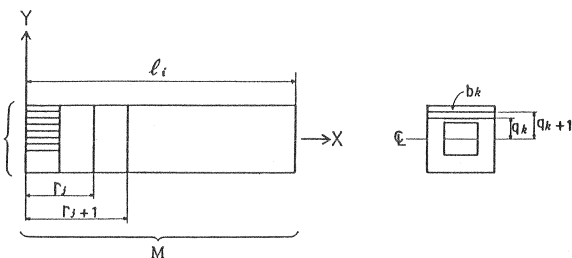


図-3 微小要素

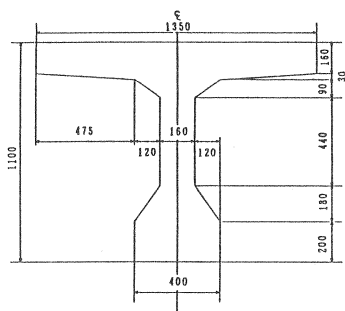


図-4 P C主桁断面

たグラウトがないすなわちアンボンドの場合は  $K_s = 1.0$  を用いればよい。したがって、対象とした桁はグラウトがあるので、実験結果との比較においては  $K_s = 0.0$  の場合の解析結果を用いた。さらに、 $K_s$  の値を変化させることによって

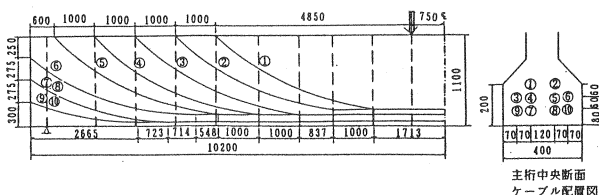


図 - 5 P C ケーブル 配置 図

任意の付着状態での解析が可能であるので、アンボンドの場合 ( $K_s = 0.0$ ) および付着が不十分な場合 ( $K_s = 0.5$ ) の解析を行い、完全な付着状態の場合との挙動の比較を行った。ところで、P C 鋼材とコンクリートとのすべり摩擦は式 (20) により解析の中に取り込むことが可能であるが、解析がかなり複雑になり、また  $K_s$  の同定の中にこのすべり摩擦の影響が含まれている。したがって、実際の計算においてはこの影響を含んだ  $K_s$  を考えることにより、 $\Delta U_r$  を無視することにした。

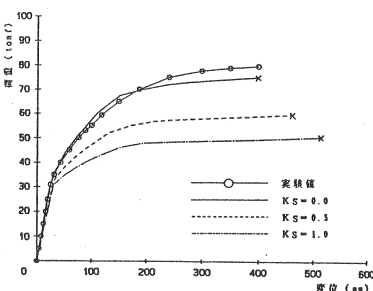


図 - 6 荷重 - たわみ 曲 線

### 3.2 解析結果と実験結果との比較

図 - 6 に実験および解析で得られた荷重と桁中央位置でのたわみの関係を示す。なお、実験値および解析値ともに最大荷重までの関係を示している。完全な付着状態を仮定した解析結果は、ほとんど実測結果と一致しており、これは曲線配置を考慮した解析手法の妥当性を表わしているとともに、対象とした P C 桁はグラウトにより P C 鋼材とコンクリートとの付着が完全であることを示している。また、アンボンドの場合は最大耐力が付着が完全な場合の約 70% に低下し、その時のたわみが約 20% 増加することが明らかとなった。

### 4. 結 論

本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 本研究では、これまでの解析手法を発展させ、新たに P C 鋼材の曲線配置と P C 鋼材とシーすとの摩擦を考慮できるようにした。そして、この解析手法を用いて実橋の挙動を解析することにより、P C 鋼材が曲線配置された桁の挙動を解析的にかなりの精度で推定できることが明らかとなった。
- (2) 本研究で対象とした P C 単純 T 桁をアンボンドとして解析すると、最大耐力が付着が完全な場合の約 70% に低下し、その時のたわみが約 20% 増加することが明らかとなった。

本研究に際し、中部セメントコンクリート研究会で実施した P C 単純 T 桁実橋の載荷試験のデータの一部を使用させて頂きました。ここに厚く謝意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) 梅原秀哲・田辺忠顕・吉田弥智：鋼材の付着状態を考慮した P C ラーメンの履歴挙動に関する研究、土木学会論文集、第 396 号 / V - 9、1988 年 8 月