論文　PC 鋼材の付着すべりを考慮したプレキャスト PC 部材の履歴挙動解析法

前田　博司[*1]・岸本　一蔵[*2]・西山　峰広[*3]

要旨：PC 鋼材とコンクリート間の付着ーすべり関係を考慮できる既往の PC 部材の曲げ挙動解析では，解析の不安定さの要因となる収束計算が含まれていた。本研究では収束計算が不要となるような解析法を提案し，過去に実施されたプレキャスト柱基礎圧着部材の実験結果との比較検討を行った。同解析法では，圧着接合された部材を対象に，圧着面の開口幅（ギャップオープニング）を圧着面における PC 鋼材のすべり量を基に算定することにより，部材全体の挙動解析だけではなく，PC 鋼材の付着ーすべり関係が圧着面の開口幅に及ぼす影響についても調べた。

キーワード：解析法，付着特性，プレストレス，プレキャスト，履歴挙動

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下 PC と略記）部材では，PC 鋼材とコンクリート間の付着ーすべり関係を考慮せずにその挙動を精緻に解明することはできない。PC 部材の挙動解析手法としては、松倉ら [1] が提案する有限要素法によるものと、Nishiyama et al.[2] による分割要素法によるものがあり，文献 [3] では足立らにより，後者の方法を用いて，PC 鋼材とコンクリート間の付着強度と付着剛性の部材の挙動に及ぼす影響が解析的に論じられている。

上記の解析では，PC 鋼材とコンクリートのすべり量が部材に作用するモーメントと相互に影響し合うため，収束計算を行う必要があった。これは解析実行の不安定さの大きな要因となると同時に解析精度に影響を及ぼす。本研究では，特に圧着接合された部材を対象に，付着ーすべり関係を部材剛性方程式に簡略に取込み，収束計算が不要となる解析法を報告する。また，圧着接合骨組では圧着面に変形が集中するが，その程度は PC 鋼材の付着ーすべり関係に大きく影響を受ける。そこで，付着ーすべり関係をパラメータとして解析を行い，部材全体の挙動解析だけではなく，圧着面のギャップオープニング（開口幅）の評価も行った。

2. 解析手法

2.1 概要と基本仮定

解析手法は小阪ら [4] が行った分割要素法に基づいた。小阪らの解析手法では，各要素点のすべり量の仮定値と計算結果との差を収束させていく方法と、材端における主筋の抜け出し量を，定着域を十分に短い有限長さに分割して算定する逐次積分法を用いて算定する方法が採られたが，本論文で提案する解析法では，材端入力変位に対し，各要素点のすべり量と，主筋又は PC 鋼材の抜け出し量が一意に求められる形で計算が行える点に特長がある。

なお，本解析においては，以下のような仮定を用いた。(1)個々の分割要素内での応力度およびひずみ度は一定，(2)コンクリートには平面保持の仮定が成立，(3)せん断による変形は考慮に入れない，(4)普通鉄筋とコンクリート間ではすべりは発生しない，(5)接合部もしくは基礎部のコンクリートは剛体とする。**図ー1** に要素の分割例を示す。

2.2 部材の剛性マトリックスの作成

j 断面での，中心軸の歪み度増分（$\Delta\varepsilon_{0j}$），曲率増分（$\Delta\phi_j$），断面中心軸から i 層までの距離（Z_{ij}）と，i 層におけるコンクリート要素，鉄筋

*1 京都大学大学院　工学研究科建築学専攻　修士課程　(正会員)
*2 大阪大学大学院　講師　博士（工学）　(正会員)
*3 京都大学　工学研究科都市環境工学専攻　助教授　博士（工学）　(正会員)

要素のひずみ度増分（$\Delta_c\varepsilon_{ij}$， $\Delta_s\varepsilon_{ij}$）の関係は平面保持の幾何学的関係から以下のようになる。

$$\Delta_c\varepsilon_{ij} = \Delta\varepsilon_{0j} - {}_cZ_{ij}\cdot\Delta\phi_j \tag{1}$$

$$\Delta_s\varepsilon_{ij} = \Delta\varepsilon_{0j} - {}_sZ_{ij}\cdot\Delta\phi_j \tag{2}$$

また，PC 鋼材位置でのコンクリートの材軸方向へのひずみ度増分は，上式と同様に表され，

$$\Delta_{cp}\varepsilon_{ij} = \Delta\varepsilon_{0j} - {}_{cp}Z_{ij}\cdot\Delta\phi_j \tag{3}$$

となるので，PC 鋼材とコンクリート間の単位すべり量増分を $\Delta_b\varepsilon_{ij}$ とすると，j 断面 i 層における PC 鋼材要素のひずみ度増分 $\Delta_p\varepsilon_{ij}$ は以下で表される。

$$\Delta_p\varepsilon_{ij} = \Delta_{cp}\varepsilon_{ij} - \Delta_b\varepsilon_{ij} \tag{4}$$

j 断面 i 層におけるコンクリート，鉄筋，PC 鋼材の各要素が j 断面に寄与する軸力増分を(Δ_cN_{ij}，Δ_sN_{ij},Δ_pN_{ij})，モーメント増分を(Δ_cM_{ij},Δ_sM_{ij}，Δ_pM_{ij})とし，それぞれの断面積を(${}_cA_{ij}$,${}_sA_{ij}$,${}_pA_{ij}$)，剛性を(${}_cE_{ij}$,${}_sE_{ij}$,${}_pE_{ij}$)とすると，j 断面における軸力増分 ΔN_j・モーメント増分 ΔM_j と，中心軸ひずみ度増分 $\Delta\varepsilon_{0j}$，曲率増分 $\Delta\phi_j$ の間には以下の関係が成立する。

$$\begin{Bmatrix}\Delta N_j\\ \Delta M_j\end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix}\Delta_cN_j+\Delta_sN_j+\Delta_pN_j\\ \Delta_cM_j+\Delta_sM_j+\Delta_pM_j\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}A_j & B_j\\ C_j & D_j\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\Delta\varepsilon_{0j}\\ \Delta\phi_j\end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix}X_j\\ Y_j\end{Bmatrix} \tag{5}$$

ただし，

$$A_j = \sum_{i=1}^{n} {}_cA_{ij}\cdot{}_cE_{ij} + \sum_{i=1}^{2} {}_sA_{ij}\cdot{}_sE_{ij} + \sum_{i=1}^{2} {}_pA_{ij}\cdot{}_pE_{ij}$$

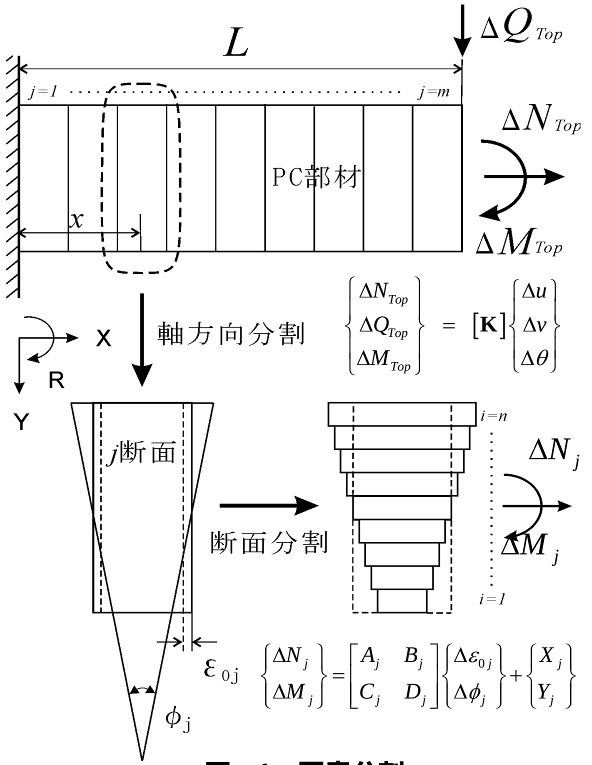
$$B_j = C_j = -\sum_{i=1}^{n} {}_cZ_{ij}\cdot{}_cA_{ij}\cdot{}_cE_{ij} - \sum_{i=1}^{2} {}_sZ_{ij}\cdot{}_sA_{ij}\cdot{}_sE_{ij} - \sum_{i=1}^{2} {}_pZ_{ij}\cdot{}_pA_{ij}\cdot{}_pE_{ij}$$

$$D_j = \sum_{i=1}^{n} {}_cZ_{ij}\cdot{}_cA_{ij}\cdot{}_cE_{ij}\cdot{}_cZ_{ij} + \sum_{i=1}^{n} {}_cE_{ij}\cdot I_{ij} + \sum_{i=1}^{2} {}_sZ_{ij}\cdot{}_sA_{ij}\cdot{}_sE_{ij}\cdot{}_sZ_{ij} + \sum_{i=1}^{2} {}_pZ_{ij}\cdot{}_pA_{ij}\cdot{}_pE_{ij}\cdot{}_pZ_{ij}$$

$$X_j = -\sum_{i=1}^{2} {}_pA_{ij}\cdot{}_pE_{ij}\cdot\Delta_b\varepsilon_{ij}$$

$$Y_j = \sum_{i=1}^{2} {}_pZ_{ij}\cdot{}_pA_{ij}\cdot{}_pE_{ij}\cdot\Delta_b\varepsilon_{ij}$$

ここで，材端の軸方向力，せん断力，モーメントの増分を ΔN_{Top}， ΔQ_{Top}， ΔM_{Top} とし，それに対応する変位を Δu， Δv， $\Delta\theta$ とすると，材の全



図−1　要素分割

長を l， j 断面の接合面からの距離を x_j とすれば，

$$\Delta N_j = \Delta N_{Top} \tag{6}$$

$$\Delta M_j = \Delta Q_{Top}\left(l - x_j\right) + \Delta M_{Top} \tag{7}$$

$$\Delta u = \sum_{j=1}^{m} \Delta\varepsilon_{0j}\cdot l_j \tag{8}$$

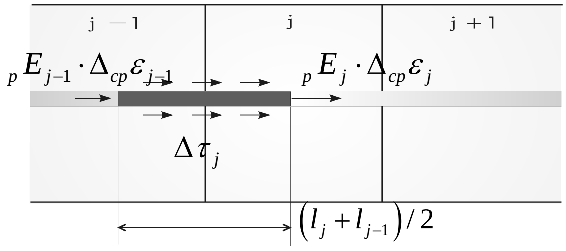
$$\Delta v = \sum_{j=1}^{m} \Delta\phi_j\cdot l_j\cdot\left(l - x_j\right) \tag{9}$$

$$\Delta\theta = \sum_{j=1}^{m} \Delta\phi_j\cdot l_j \tag{10}$$

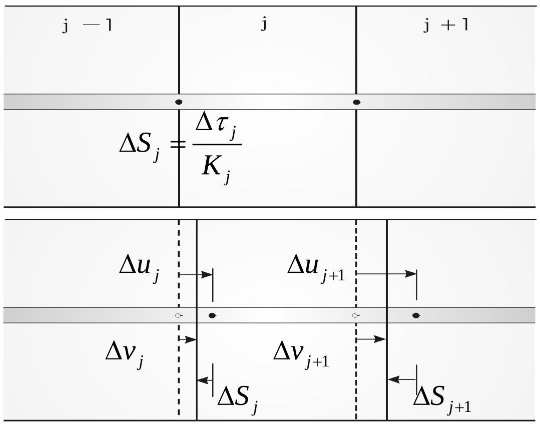
なので、式(5)は以下のように変換できる。

$$\begin{Bmatrix}\Delta u\\ \Delta v\\ \Delta\theta\end{Bmatrix} = \left\{\sum_{j=1}^{m}\frac{l_j}{\lambda_j}\begin{bmatrix}D_j & -B_j(l-x_j) & -B_j\\ -C_j(l-x_j) & A_j(l-x_j)^2 & A_j(l-x_j)\\ -C_j & A_j(l-x_j) & A_j\end{bmatrix}\right\}\cdot\begin{Bmatrix}\Delta N_{Top}\\ \Delta Q_{Top}\\ \Delta M_{Top}\end{Bmatrix} - \sum_{j=1}^{m}\left(\frac{l_j}{\lambda_j}\begin{bmatrix}D_j & -B_j\\ -C_j(l-x_j) & A_j(l-x_j)\\ -C_j & A_j\end{bmatrix}\cdot\begin{Bmatrix}X_j\\ Y_j\end{Bmatrix}\right) \tag{11}$$

式(11)の右辺第 2 項は，各断面における PC 鋼材とコンクリートの単位すべり量増分 $\Delta_b\varepsilon_{ij}$ に基づく値である，既往の解析では，この値を収束計算で求める方法や，前ステップの変位増分から算定される値を用いる方法が使われていたが，本解析においてはこの値を現ステップでの値から算出する方法を用いた。この方法について次節で述べる。



図−2　応力適合基本式



図−3　変形適合基本式

2.3 付着すべりについて

図−3 より，各断面における PC 鋼材とコンクリートの単位すべり量増分（$\Delta_b\varepsilon_{ij}$），PC 鋼材位置のコンクリートのひずみ度増分（$\Delta_{cp}\varepsilon_{ij}$），PC 鋼材のひずみ度増分（$\Delta_p\varepsilon_{ij}$）は

$$\Delta_p\varepsilon_j=\left(\Delta u_{j+1}-\Delta u_j\right)/l_j \tag{12}$$

$$\Delta_{cp}\varepsilon_j=\left(\Delta v_{j+1}-\Delta v_j\right)/l_j \tag{13}$$

$$\Delta_b\varepsilon_j=\Delta_{cp}\varepsilon_j-\Delta_p\varepsilon_j \tag{14}$$

であり，上式と**図−2，3** より k 個の領域に分割されている部材を考えるとき、材端 A，材端 B および各中間要素での PC 鋼材のひずみ度増分とすべり量増分との関係は，以下の式によって表される。

材端 A

$$-{}_pE_1\cdot\Delta_{cp}\varepsilon_1=\left(\frac{{}_pE_1}{l_1}+\frac{{}_pK_1}{{}_pA}\right)\cdot\Delta_pS_1-\frac{{}_pE_1}{l_1}\Delta S_2 \tag{15}$$

中間要素

$$ {}_pE_{j-1}\cdot\Delta_{cp}\varepsilon_{j-1}-{}_pE_j\cdot\Delta_{cp}\varepsilon_j=-\frac{{}_pE_{j-1}}{l_{j-1}}\cdot\Delta S_{j-1}+\left(\frac{{}_pE_{j-1}}{l_{j-1}}+\frac{{}_pE_j}{l_j}+\frac{K_j\cdot\varphi_p\cdot\left(l_{j-1}+l_j\right)}{2{}_pA}\right)\cdot\Delta S_j-\frac{{}_pE_j}{l_j}\cdot\Delta S_{j+1} \tag{16}$$

材端 B

$${}_pE_k\cdot\Delta_{cp}\varepsilon_k=-\frac{{}_pE_k}{l_k}\cdot\Delta S_k+\left(\frac{{}_pE_k}{l_k}+\frac{{}_pK_2}{{}_pA}\right)\cdot\Delta_pS_2 \tag{17}$$

ただし、${}_pE_j$、${}_pA$ ：PC 鋼材の接線剛性、断面積

${}_pK_1$、${}_pK_2$ ：各材端での PC 鋼材の抜け出し剛性

式(15)〜(17)より，各接点における PC 鋼材すべり量増分は, PC 鋼材位置のコンクリートひずみ増分の関係式として次式が得られる。なお、各式中の右下添え字 $x\times y$ は x 行 y 列の行列を示す。

$$\begin{Bmatrix}\Delta_pS_1\\ \Delta S_2\\ \cdots\\ \cdots\\ \Delta S_x\\ \Delta_pS_2\end{Bmatrix}_{k+1\times1}=\mathbf{K_{slip}}^{-1}\cdot\mathbf{E}\cdot\begin{Bmatrix}\Delta_{cp}\varepsilon_1\\ \Delta_{cp}\varepsilon_2\\ \cdots\\ \cdots\\ \Delta_{cp}\varepsilon_{x-1}\\ \Delta_{cp}\varepsilon_x\end{Bmatrix}_{k\times1} \tag{18}$$

ただし、

$$\mathbf{K_{slip}}=\begin{bmatrix}\frac{{}_pE_1}{l_1}+\frac{{}_pK_1}{{}_pA} & -\frac{{}_pE_1}{l_1} & \cdots & \cdots\\ -\frac{{}_pE_1}{l_1} & \frac{{}_pE_1}{l_1}+\frac{{}_pE_2}{l_2}+\frac{K_2\cdot\varphi_p\cdot\left(l_1+l_2\right)}{2{}_pA} & \cdots & \cdots\\ 0 & -\frac{{}_pE_2}{l_2} & \cdots & \cdots\\ \cdots & \cdots & \cdots & -\frac{{}_pE_x}{l_x}\\ symmetrical & \cdots & -\frac{{}_pE_x}{l_x} & \frac{{}_pE_x}{l_x}+\frac{{}_pK_2}{{}_pA}\end{bmatrix}_{k+1\times k+1}$$

$$\mathbf{E}=\begin{bmatrix}-{}_pE_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0\\ {}_pE_1 & -{}_pE_2 & 0 & \cdots & \cdots\\ 0 & {}_pE_2 & \cdots & 0 & \cdots\\ \cdots & 0 & \cdots & -{}_pE_{x-1} & 0\\ \cdots & \cdots & 0 & {}_pE_{x-1} & -{}_pE_x\\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & {}_pE_x\end{bmatrix}_{k+1\times k}$$

式(18)より以下の式が導かれる。

$$\begin{Bmatrix}\Delta_b\varepsilon_1\\ \Delta_b\varepsilon_2\\ \cdots\\ \cdots\\ \Delta_b\varepsilon_{k-1}\\ \Delta_b\varepsilon_k\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\left(\Delta S_2-\Delta_pS_1\right)/l_1\\ \left(\Delta S_3-\Delta S_2\right)/l_2\\ \cdots\\ \cdots\\ \left(\Delta S_k-\Delta S_{k-1}\right)/l_{k-1}\\ \left(\Delta_pS_2-\Delta S_k\right)/l_k\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{K_{b1}}\\ \mathbf{K_{b2}}\\ \cdots\\ \cdots\\ \mathbf{K_{bk\text{-}1}}\\ \mathbf{K_{bk}}\end{bmatrix}_{k\times k}\begin{Bmatrix}\Delta_{cp}\varepsilon_1\\ \Delta_{cp}\varepsilon_2\\ \cdots\\ \cdots\\ \Delta_{cp}\varepsilon_{k-1}\\ \Delta_{cp}\varepsilon_k\end{Bmatrix} \tag{19}$$

これで各断面における PC 鋼材とコンクリートのすべり量 $\Delta_b\varepsilon_{ij}$ が表せたので，X_j，Y_j を計算する。

今，PC 鋼材位置のコンクリートひずみ増分 $\Delta_{cp}\varepsilon_j$ は，中心軸ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_{0j}$ と曲率増分 $\Delta\phi_j$ と中心軸から PC 鋼材までの距離 ${}_pZ_{ij}$ で表すことができるので，$\mathbf{K_{c\,j\,i}}={}_pA_{ij}\cdot{}_pE_{ij}\cdot\mathbf{K_{b\,j\,i}}$ とおくと，X_j，Y_j は以下のようになる。

$$\begin{Bmatrix} X_j \\ Y_j \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^{2} \begin{bmatrix} -\mathbf{K}_{\mathbf{c\,j}\ i} \\ {}_pZ_{ij} \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j}\ i} \end{bmatrix}_{2\times k} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_{01} - {}_pZ_{i1} \cdot \Delta\phi_1 \\ \Delta\varepsilon_{02} - {}_pZ_{i2} \cdot \Delta\phi_2 \\ \cdots \\ \cdots \\ \Delta\varepsilon_{0k-1} - {}_pZ_{ik-1} \cdot \Delta\phi_{k-1} \\ \Delta\varepsilon_{0k} - {}_pZ_{ik} \cdot \Delta\phi_k \end{Bmatrix}_{k\times 1} \tag{20}$$

式(20)の各断面での中心軸ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_{0j}$ と曲率増分 $\Delta\phi_j$ に式(5)からの値を代入してまとめると以下のようになる。

$$\begin{Bmatrix} X_j \\ Y_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11\ \mathbf{j}} & \mathbf{P}_{12\ \mathbf{j}} & \mathbf{P}_{13\ \mathbf{j}} \\ \mathbf{P}_{21\ \mathbf{j}} & \mathbf{P}_{22\ \mathbf{j}} & \mathbf{P}_{23\ \mathbf{j}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta Q \\ \Delta M \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{11\ 1\mathbf{j}} & \mathbf{Q}_{12\ 1\mathbf{j}} \\ \mathbf{Q}_{21\ 1\mathbf{j}} & \mathbf{Q}_{22\ 1\mathbf{j}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{Bmatrix} \tag{21}$$
$$+ \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{11\ 2\mathbf{j}} & \mathbf{Q}_{12\ 2\mathbf{j}} \\ \mathbf{Q}_{21\ 2\mathbf{j}} & \mathbf{Q}_{22\ 2\mathbf{j}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{Bmatrix} + \cdots + \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{11\ k\mathbf{j}} & \mathbf{Q}_{12\ k\mathbf{j}} \\ \mathbf{Q}_{21\ k\mathbf{j}} & \mathbf{Q}_{22\ k\mathbf{j}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_k \\ Y_k \end{Bmatrix}$$

各係数は紙面の都合で一部のみの記載とする。

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}_{11\ \mathbf{j}} = {} & \left(-\mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 1} - \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_1}D_1 + \left({}_pZ_1 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 1} + {}_pZ_2 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_1}\left(-C_1\right) \\
& + \left(-\mathbf{K}_{\mathbf{c\,j2}\ 1} - \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j2}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_2}D_2 + \left({}_pZ_1 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j2}\ 1} + {}_pZ_2 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j2}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_2}\left(-C_2\right) \\
& + \qquad \cdots \qquad + \qquad \cdots \\
& + \left(-\mathbf{K}_{\mathbf{c\,jk\text{-}1}\ 1} - \mathbf{K}_{\mathbf{c\,jk\text{-}1}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_{k-1}}D_{k-1} + \left({}_pZ_1 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,jk\text{-}1}\ 1} + {}_pZ_2 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,jk\text{-}1}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_{k-1}}\left(-C_{k-1}\right) \\
& + \left(-\mathbf{K}_{\mathbf{c\,jk}\ 1} - \mathbf{K}_{\mathbf{c\,jk}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_k}D_k + \left({}_pZ_1 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,jk}\ 1} + {}_pZ_2 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,jk}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_k}\left(-C_k\right)
\end{aligned}$$

$$\mathbf{Q}_{11\ 1\mathbf{j}} = \left(\mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 1} + \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_1}D_1 + \left(-{}_pZ_1 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 1} - {}_pZ_2 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_1}\left(-C_1\right)$$

$$\mathbf{Q}_{12\ 1\mathbf{j}} = \left(\mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 1} + \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_1}\left(-B_1\right) + \left(-{}_pZ_1 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 1} - {}_pZ_2 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_1}A_1$$

$$\mathbf{Q}_{21\ 1\mathbf{j}} = \left(-{}_pZ_1 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 1} - {}_pZ_2 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_1}D_1 + \left({}_pZ_1{}^2 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 1} + {}_pZ_2{}^2 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_1}\left(-C_1\right)$$

$$\mathbf{Q}_{22\ 1\mathbf{j}} = \left(-{}_pZ_1 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 1} - {}_pZ_2 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_1}\left(-B_1\right) + \left({}_pZ_1{}^2 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 1} + {}_pZ_2{}^2 \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{c\,j1}\ 2}\right)\frac{1}{\lambda_1}A_1$$

式(21)を $j = 1 \sim k$ までPC鋼材全体に対して計算し，連立させると以下のようになる。

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ X_2 \\ Y_2 \\ \cdots \\ X_k \\ Y_k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11\ 1} & \mathbf{P}_{12\ 1} & \mathbf{P}_{13\ 1} \\ \mathbf{P}_{21\ 1} & \mathbf{P}_{22\ 1} & \mathbf{P}_{23\ 1} \\ \mathbf{P}_{11\ 2} & \mathbf{P}_{12\ 2} & \mathbf{P}_{13\ 2} \\ \mathbf{P}_{21\ 2} & \mathbf{P}_{22\ 2} & \mathbf{P}_{23\ 2} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{P}_{11\ \mathbf{k}} & \mathbf{P}_{12\ \mathbf{k}} & \mathbf{P}_{13\ \mathbf{k}} \\ \mathbf{P}_{21\ \mathbf{k}} & \mathbf{P}_{22\ \mathbf{k}} & \mathbf{P}_{23\ \mathbf{k}} \end{bmatrix}_{2k\times 3} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta Q \\ \Delta M \end{Bmatrix}$$
$$+ \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{11\ 11} & \mathbf{Q}_{12\ 11} & \mathbf{Q}_{11\ 21} & \mathbf{Q}_{12\ 21} & & \mathbf{Q}_{11\ k1} & \mathbf{Q}_{12\ k1} \\ \mathbf{Q}_{21\ 11} & \mathbf{Q}_{22\ 11} & \mathbf{Q}_{21\ 21} & \mathbf{Q}_{22\ 21} & & \mathbf{Q}_{21\ k1} & \mathbf{Q}_{22\ k1} \\ \mathbf{Q}_{11\ 12} & \mathbf{Q}_{12\ 12} & \mathbf{Q}_{11\ 22} & \mathbf{Q}_{12\ 22} & & \mathbf{Q}_{11\ k2} & \mathbf{Q}_{12\ k2} \\ \mathbf{Q}_{21\ 12} & \mathbf{Q}_{22\ 12} & \mathbf{Q}_{21\ 22} & \mathbf{Q}_{22\ 22} & \cdots & \mathbf{Q}_{21\ k2} & \mathbf{Q}_{22\ k2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & & \cdots & \cdots \\ \mathbf{Q}_{11\ 1\mathbf{k}} & \mathbf{Q}_{12\ 1\mathbf{k}} & \mathbf{Q}_{11\ 2\mathbf{k}} & \mathbf{Q}_{12\ 2\mathbf{k}} & & \mathbf{Q}_{11\ \mathbf{kk}} & \mathbf{Q}_{12\ \mathbf{kk}} \\ \mathbf{Q}_{21\ 1\mathbf{k}} & \mathbf{Q}_{22\ 1\mathbf{k}} & \mathbf{Q}_{12\ 2\mathbf{k}} & \mathbf{Q}_{22\ 2\mathbf{k}} & & \mathbf{Q}_{21\ \mathbf{kk}} & \mathbf{Q}_{22\ \mathbf{kk}} \end{bmatrix}_{2k\times 2k} \cdot \begin{Bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ X_2 \\ Y_2 \\ \cdots \\ X_k \\ Y_k \end{Bmatrix} \tag{22}$$

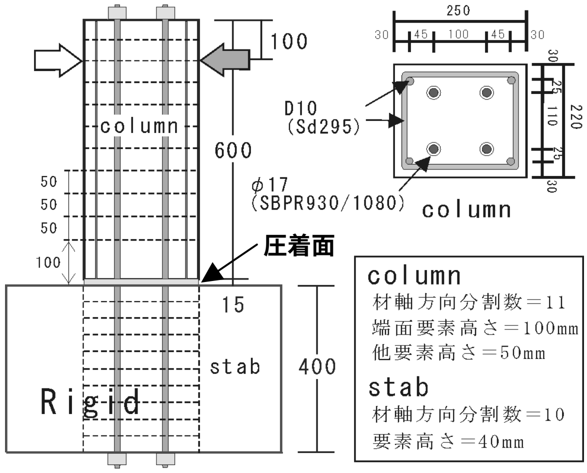
式(22)の左右に $\{X, Y\}$ の項が存在するので，これを移項してまとめることにより，$\{X, Y\}$ と $\{\Delta N_{Top}$ $\Delta Q_{Top}, \Delta M_{Top}\}$ の関係式が得られる。

上記の関係式の解析対象部材の各断面部分を式(11)に代入することで，材端変位と材端荷重の関係が以下の簡単な形で表されることになる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta N_{Top} \\ \Delta Q_{Top} \\ \Delta M_{Top} \end{Bmatrix} = [\mathbf{K}] \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta\theta \end{Bmatrix} \tag{23}$$

3. 実験結果との比較と検討

3.1 実験結果との比較



図－4　試験体形状と要素分割の概略

過去に行われた[11]プレキャスト柱基礎圧着部材（PC鋼材はアンボンド型）への載荷実験結果と本解析の比較検討を行う。**図－4** にその対象とした試験体形状と，本解析での要素分割の概略を示す。

本解析では，PC鋼材のすべり量をPC鋼材長全体に渡って算出するため，式(15)，(17)における各材端での抜け出し剛性は定着板の抜け出し剛性となるが，ここでは定着板でのすべりは発生しないとして，その値を無限大とした。

また，各断面でのコンクリートの層数 i は100とし，コアコンクリート部分については，その拘束効果を崎野[5]らの式を基に、ひずみ勾配[6]や端面による付加拘束[7]があるコンクリートでは中心軸圧縮試験より強度が上昇するという研究を参考に，強度上昇係数αによる簡易な補正を行ったモデル（**図－5** 参照）を単調載荷時の曲線として用い、これに繰返しルールを加えたモデルを使用した。なお、本解析ではα＝4を用いた。

鉄筋とPC鋼材の応力度－ひずみ度関係には、

Ramberg-Osgood 式を用いたモデル [8] を使用した。

コンクリートと PC 鋼材間の付着特性は，初期付着剛性 K_s と付着降伏応力度 τ_y を特性値として，繰返しルールに，異形鉄筋に対する付着すべり関係モデルである森田･角モデル [9] と，ストランドの引抜き試験の結果から提案されたモデル [10] を使用した。**図－6** の左図に森田･角モデルを，右図にストランドを用いる際のモデルを示す。

図－7 に対象試験体（試験体名 PCa-U1 アンボンド, プレストレスレベル $P_c / bDf_c{}'$=0.3, 軸力比 0.15）での荷重－部材角関係の実験結果と解析結果を示す。解析結果は実験結果を比較的良く追跡できている。

3.2 軸力と付着による影響

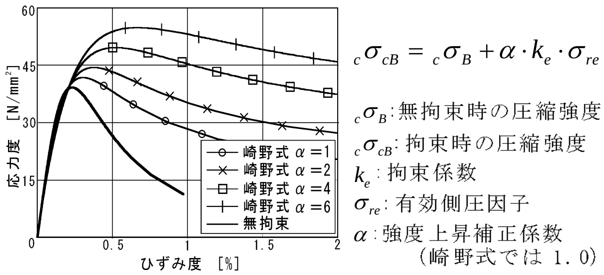
図－8 に対象試験体において軸力比を変えた場合の解析結果を示す。軸力比が小さい程，PC 特有の原点指向性の高い履歴ループとなっている。

図－9 に軸力比 0.15 の試験体を対象に，付着降伏応力度（τ_y）を変化させた（初期付着剛性 K_s は一定値）場合の単調載荷時の荷重－部材角関係を示す。なお，τ_y をパラメータとした理由は τ_y がプレストレス部材の挙動に大きな影響を及ぼすとの解析結果があるためである [3]。なお，τ_y=3 [N/mm^2] は文献 [3] を参照して，PC 鋼材としてストランドを用いた場合を想定しており，比較対象として，付着降伏が発生しない事を想定した τ_y =20 [N/mm^2] で，算定を行った。図中の×印は，τ_y=3 [N/mm^2] とした場合に，引張側 PC 鋼材の圧着面での付着応力度が付着降伏応力度に達した点である。付着のある場合，最大荷重は大きくなり，その後，圧着面において付着降伏が発生すると，付着劣化によってアンボンド部材の曲線に接近していく様子がよく再現されている。

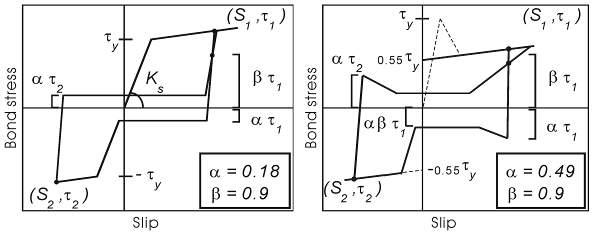
図－10 にアンボンド（τ_y =0）の場合と τ_y =20 [N/mm^2]とした場合の，柱部材の基礎面要素における PC 鋼材応力を示す。付着の程度によって PC 鋼材応力の変動が大きくなることが分かる。

3.3 開口幅の検討

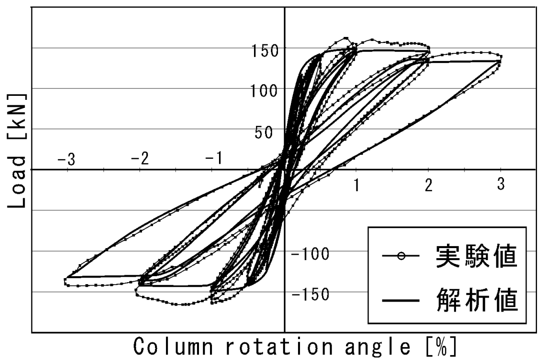
圧着接合骨組では，圧着面においてギャップオープニング（開口）が発生するが，上記の実験の



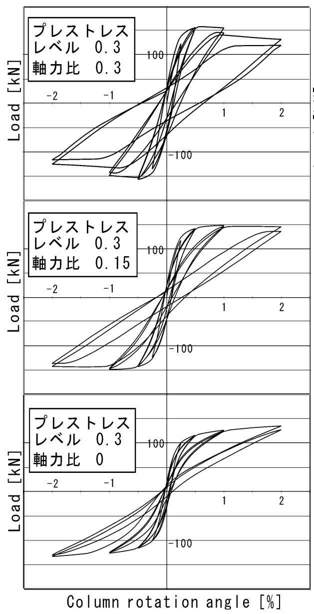
図－5　単調載荷時のコンクリート曲線の補正



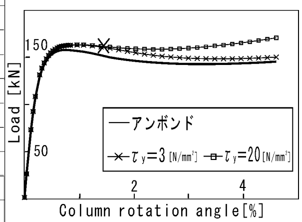
図－6　付着特性



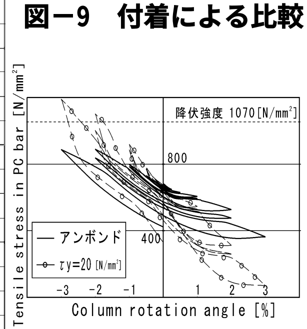
図－7　アンボンド中軸力での実験値と解析値



図－8　軸力による比較

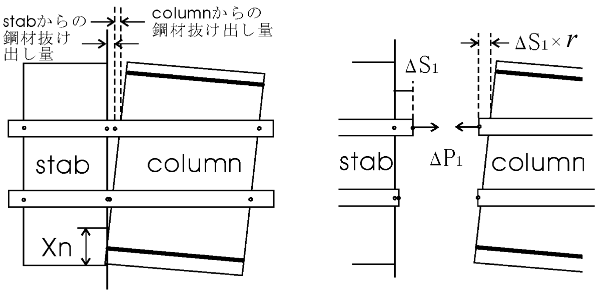


図－9　付着による比較



図－10　PC 鋼材応力

ように普通鉄筋が接合面を貫通しない場合，その開口の程度は，PC 鋼材の付着－すべり関係に大きく影響を受ける。そこで本解析では，開口幅を圧



図−11　開口幅の算定の考え方

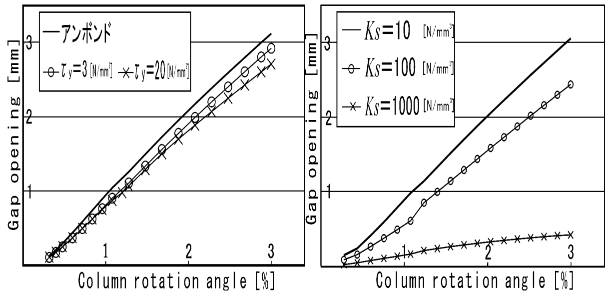


図-12 付着による開口幅への影響

着面における PC 鋼材のすべり量を基に算定した。

図−11 に示すように, PC 鋼材位置の開口幅はスタブからの鋼材抜け出し量と柱からの鋼材抜け出し量の和となる。本解析では，PC 鋼材の接点を基礎の端面にとったため，基礎からの PC 鋼材の抜け出し量は，式(18)を今回の部材に適用した際の ΔS_1 として解析計算上の値として算出されている。今，右図に示すように開口位置でPC鋼材を切断したと考えると，基礎側と柱側に対する PC 鋼材張力は同じである。そこで，まず現ステップにおける基礎と柱の付着状態を持つような別のPC部材をそれぞれ想定し，両部材の PC 鋼材に同じ張力を加えた際の PC 鋼材の抜け出し量の比 r を算出し，この比を基礎からの PC 鋼材の抜け出し量 ΔS_1 に掛けることで，柱からの抜け出し量とみなした。PC 鋼材の抜け出し量を PC 鋼材位置での開口幅とみなし，柱部材の基礎面要素における中立軸位置 X_n を用いて，圧着面における柱最外縁の開口幅とした。

図−12 に付着降伏応力度 τ_y と初期付着剛性 K_s を変えた場合の開口幅を示す。アンボンドの場合に比べて付着のある場合には開口が小さくなるものの，付着降伏応力度の大小が，開口幅に与える影響は小さく，これに対して，初期付着剛性を大きくすると，開口幅は小さくなり，圧着面以外での変形が大きくなる事がわかる。

4. まとめ

本研究によって以下の結果が得られた。

(1)収束計算が不要となる本解析法は実際の PC 部材の挙動を良く捉えていると思われる。

(2)付着－すべり関係が開口幅に与える影響は，初期付着剛性の大小による影響が大きいと予想され，今後詳細に検討する必要がある。

今後，本解析を用いて PC 鋼材の付着－すべり関係が部材の挙動に及ぼす影響について詳細に検討する予定である。

[参考文献]

1）松倉満智子ほか「緊張鋼材の付着すべりを考慮したプレストレストコンクリート梁部材の材料非線形解析」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.709-714，1995.7

2）Nishiyama et al. “Hysteretic Restoring Force Characteristics of Unbonded Prestressed Concrete Structure Under Earthquake Loads”, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering Vol.22,No.2, pp.112-121, June 1989.

3）足立将人ほか「緊張材の付着特性を考慮したプレストレストコンクリート圧着骨組の曲げ挙動に関する解析研究」，日本建築学会構造系論文報告集 第 532 号，pp.161-168，2000.6

4）小阪義夫ほか「エンドクロニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性解析」，日本建築学会論文報告集 第 326 号，pp.78-90，1983.4

5）崎野健治ほか「直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力ーひずみ関係」，日本建築学会構造系論文集 第 461 号，pp.95-104，1994.7

6）嶋津孝之ほか「偏心圧縮を受ける実大鉄筋コンクリート柱の耐力・変形能に関する推定式の提案」，日本建築学会学術講演梗概集 (九州)，pp.429-432，1998.9

7）是永健好ほか「ＲＣ部材端部におけるコンクリートの圧縮強度と曲げ耐力」，日本建築学会学術講演梗概集 (東海)，pp.209-210，2003.9

8）榎本秀文「PRC 梁の履歴性質に関する解析的性質」、大阪大学大学院修士論文，pp.60-65，1981.3

9）森田司郎，角徹三「繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究」，日本建築学会論文報告集第 229 号，pp.1009-1012，1975.3

10）足立将人ほか「PC 鋼より線とグラウト材間の付着特性のモデル化」，日本建築学会学術講演梗概集 (東北)，pp.1009-1012，2000.9

11）西山峰広ほか「アンボンド圧着接合柱の力学性状に関する研究」，日本建築学会学術講演梗概集 (東海)，pp.1009-1012，2000.9