コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，2003

論文　水平打継ぎ面のズレを考慮したチモシェンコＲＣ梁部材の材料非線形解析

平尾　卓也[*1]・越川　武晃[*2]・井上　圭一[*3]・上田　正生[*4]

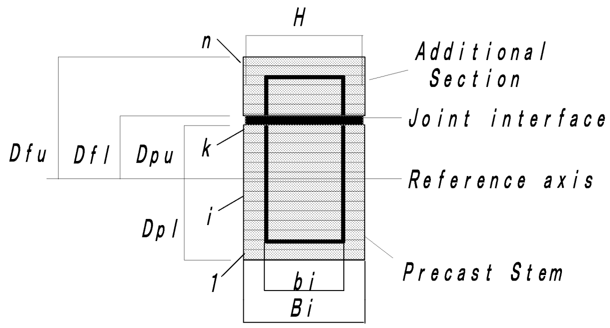
要旨：本論文は,「補強材の付着すべり」ならびに「水平打継ぎ面のズレ変形」を考慮したチモシェンコ RC 梁部材の材料非線形解析法について報告するものである。本論文においては，先ず，最小ポテンシャルエネルギーの原理に基く有限要素法への定式化の概要が示されており，次いで若干の数値解析例により，既往の実験結果との比較考察が行なわれ本解析法の妥当性が検証されている。

キーワード：合成断面部材，接合面のズレ，付着すべり，材料非線形解析，有限要素法

1.　はじめに

近年，ハーフプレキャスト部材や鋼板接着工法，耐震補強のために既存の部材断面に新たなコンクリートを追加打設したり，鉄板などの部材を接着させる工法が多く採用されており,「接合面を有するコンクリート合成断面部材」を形成する構造物が増加している。しかし，解析に当たっては，これらを一体構造とみなしている場合が多く，接合面のズレの影響を容易に考慮し得る解析法を確立しておく必要性は高いように思われる。また，このような合成断面部材の場合，部材丈が従来よりも大きくなりがちであり，部材のせん断スパンが小さくなる場合が多くなることもあり，せん断変形の影響を適切に考慮する必要があると考えられる。

本論文は，著者らが既に報告済みの水平接合面を有するコンクリート梁部材の材料非線形解析法[1)]を更に発展させ，チモシェンコ梁理論に基づきせん断変形の影響を考慮した，水平打継ぎ面を有するＲＣ梁部材の材料非線形解析法について報告するものである。本論文では更に，本解析法に基づき作成された解析プログラムを用いた数値計算例を示し，既往の実験値[3)]との比較検討を行ない，その妥当性を検証している。



図－1: 積層要素の断面記号

2.　基本仮定事項

定式化に際して本論文で設定した仮定事項を以下に示す。

a. 接合面を有する合成断面梁は,「基幹断面」となるプレキャスト部材と，有限な厚さの「接着層」を介して後から接合される「追加断面」とから構成されるものとし，梁には鉛直荷重と軸方向荷重が作用するものとする。

b. 梁断面には，チモシェンコ梁理論に基づき横せん断変形の影響を考慮した微小変形理論が適用できるものとし，基幹断面部分と追加断面部分とは同一の曲率を有するものとする。また，**図－1**に示すように合成断面梁は，基幹断面部分を k 層，追加断面部分を $(n-k)$ 層に仮想分割した，断面全体で n 層の積層要素で示されるものとする。

*1　北海道大学大学院　工学研究科社会基盤工学専攻（正会員）
*2　北海道大学大学院　工学研究科社会基盤工学専攻（正会員）
*3　北海道大学大学院助手　工学研究科社会基盤工学専攻　工博（正会員）
*4　北海道大学大学院教授　工学研究科社会基盤工学専攻　工博（正会員）

c. 積層表示された部材断面は，スターラップ内のコンクリートのコンファインド効果を考慮可能にするため，更に，サブ分割して取り扱い，各層内の歪はすべて各層の中央位置の値で評価される。

d. 接合面には材軸方向の接着ズレ変位が生じ得るものとし，この部分に生じる接着せん断応力 τ_h と相対ズレ変位 h との間には区間線形関係が成立する。

e. 補強材は，全断面内に材軸に平行に m 層（基幹断面内に 1〜j 層，追加断面内に $j+1$〜m 層）直線配置されており，これらの補強材とコンクリートとの間には，配筋方向に付着すべりが生じ得るものとする。また任意の補強材層 i のすべり変位 S_i は，各断面部分からの相対変位で表示され，すべり変位 S_i と付着応力 τ_{bi} との間には区間線形関係が成立する。

f. 解析においては有限要素法による非線形解析手法を用い，荷重増分法を採用して各荷重ステップごとに繰り返し計算によって解を求める。

3. 変位場および歪増分と応力増分

3.1 変位場

前節の仮定に基づき定式化に必要な変位場を以下のように設定する。

$$\left\{\begin{array}{ll}
\text{・梁の基準軸上の材軸方向変位} & u \\
\text{・梁の基準軸上の鉛直方向変位} & w \\
\text{・コンクリート断面の平均せん断回転角} & \beta \\
\text{・水平接合面（接着層）のズレ変位} & h \\
\text{・補強材層のすべり変位 (1〜}m\text{ 層)} & S_1\text{〜}S_m
\end{array}\right.$$

但し，材料非線形解析に当たっては，これら各変位は増分形式で表示されることになる。

3.2 コンクリート層の歪増分と応力増分

(1) 基幹断面内のコンクリート層

基幹断面部の任意のコンクリート層 i の歪増分 $\Delta_p\epsilon_{ci}$ は次式のように表される。（但し，$i = 1$〜k）

$$\Delta_p\epsilon_{ci} = \Delta\epsilon_o + z_i\Delta\phi = \frac{d\Delta u}{dx} + z_i\left(-\frac{d^2\Delta w}{dx^2} + \frac{d\Delta\beta}{dx}\right) \qquad (1)$$

但し， $\Delta\epsilon_o$:梁の基準軸上の軸方向歪増分，$\Delta\phi$:梁断面の曲率増分，z_i:梁の基準軸から i 層の中心までの鉛直距離

従って，基幹断面部内の任意の i 層におけるスターラップ内，外の応力増分 $\Delta_p\sigma_{gi}$，$\Delta_p\sigma_{ci}$ は，それぞれ次式のように表される。

$$\Delta_p\sigma_{gi} = E_{gi}\Delta_p\epsilon_{ci} \qquad (2)$$

$$\Delta_p\sigma_{ci} = E_{ci}\Delta_p\epsilon_{ci} \qquad (3)$$

但し，E_{gi}, E_{ci} はそれぞれスターラップの内，外にあるコンクリート層 i の接線ヤング係数

(2) 追加断面内のコンクリート層

追加断面部の任意のコンクリート層 i の歪増分 $\Delta_f\epsilon_{ci}$ は接合面のズレ変位を考慮すると，次式のように表される。（但し，$i = k+1$〜n）

$$\Delta_f\epsilon_{ci} = \Delta\epsilon_o + z_i\Delta\phi + \Delta\epsilon_h = \frac{d\Delta u}{dx} + z_i\left(-\frac{d^2\Delta w}{dx^2} + \frac{d\Delta\beta}{dx}\right) + \frac{d\Delta h}{dx} \qquad (4)$$

但し，$\Delta\epsilon_h$:接着層のズレ率の増分量

従って，追加断面部内の任意の i 層におけるスターラップ内，外の応力増分 $\Delta_f\sigma_{gi}$，$\Delta_f\sigma_{ci}$ は，それぞれ次式のようになる。

$$\Delta_f\sigma_{gi} = E_{gi}\Delta_f\epsilon_{ci} \qquad (5)$$

$$\Delta_f\sigma_{ci} = E_{ci}\Delta_f\epsilon_{ci} \qquad (6)$$

3.3 補強材層の歪増分と応力増分

(1) 基幹断面内に存在する補強材層

基幹断面内に存在する 1〜j 層の補強材のうち，任意の i 層の歪増分 $\Delta_p\epsilon_{si}$ は，補強材の付着すべりを考慮すると次式のように表される。

$$\Delta_p\epsilon_{si} = \Delta\epsilon_o + z_{si}\Delta\phi + \Delta\epsilon_{ssi} = \frac{d\Delta u}{dx} + z_{si}\left(-\frac{d^2\Delta w}{dx^2} + \frac{d\Delta\beta}{dx}\right) + \frac{d\Delta S_i}{dx} \qquad (7)$$

但し，z_{si}:基準軸から補強材層 i までの鉛直距離，$\Delta\epsilon_{ssi}$:補強材層 i のすべり率の増分量

従って，この i 層の応力増分 $\Delta_p\sigma_{si}$ は次式のようになる。

$$\Delta_p\sigma_{si} = E_{si}\Delta_p\epsilon_{si} \qquad (8)$$

E_{si}:補強材層 i の接線ヤング係数

(2) 追加断面内に存在する補強材層

追加断面内に存在する $j+1$〜m 層の補強材層のうち，任意の i 層の歪増分 $\Delta_f\epsilon_{si}$ は，補強材の付着すべりに加えて接合面のズレ変位をも考慮すると，次式のように表すことができる。

$$\Delta_f\epsilon_{si} = \Delta\epsilon_o + z_{si}\Delta\phi + \Delta\epsilon_{ssi} + \Delta\epsilon_h = \frac{d\Delta u}{dx} + z_{si}\left(-\frac{d^2\Delta w}{dx^2} + \frac{d\Delta\beta}{dx}\right) + \frac{d\Delta S_i}{dx} + \frac{d\Delta h}{dx} \qquad (9)$$

従って，この i 層の補強材の応力増分 $\Delta_f \sigma_{si}$ は次のようになる。

$$\Delta_f \sigma_{si} = E_{si} \Delta_f \epsilon_{si} \tag{10}$$

3.4　せん断歪増分とせん断応力増分

任意のコンクリート層 i の横せん断歪増分 $\Delta\gamma_{xzi}$ は，断面内の梁丈方向の放物線分布を仮定して，これを平均せん断回転角増分 $\Delta\beta$ を用いて以下のように表示する。[2)]

$$\Delta\gamma_{xzi} = \frac{5}{4}\Big(1 - \frac{4z_i^2}{t^2}\Big)\Delta\beta \tag{11}$$

但し，t：梁丈

従って，横せん断応力増分 $\Delta\tau_{xzi}$ は次のようになる。

$$\Delta\tau_{xzi} = \begin{cases} G_{gi}\Delta\gamma_{xzi} & (\text{スターラップ内}) \\ G_{ci}\Delta\gamma_{xzi} & (\text{スターラップ外}) \end{cases} \tag{12}$$

但し，G_{gi}，G_{ci}:それぞれスターラップ内外のコンクリート層 i の接線せん断弾性係数 $G_{gi} = \frac{E_{gi}}{2(1+\nu)}$，$G_{ci} = \frac{E_{ci}}{2(1+\nu)}$，$\nu$:ポアソン比

3.5　補強材のすべり変位増分と付着応力増分

任意の i 層の補強材の付着境界に生じる付着応力増分 $\Delta\tau_{bi}$ とすべり変位増分 ΔS_i の間には，基本仮定より次の関係が成立する。

$$\Delta\tau_{bi} = K_{bi}\Delta S_i \tag{13}$$

但し，K_{bi}：補強材層 i の接線付着係数

3.6　接着層のズレ変位増分と接着応力増分

接着せん断応力増分 $\Delta\tau_h$ とズレ変位増分 Δh の間には下式のように区間線形関係が成立するものとする。

$$\Delta\tau_h = K_h\Delta h \tag{14}$$

但し，K_h は接着層の接線接着（せん断）係数であり，接着層が有限な厚さ Δt を有する場合には，その層の接線せん断弾性係数 G_h を用いて，$K_h = \frac{G_h}{\Delta t}$ と表せる。

4.　材料非線形解析のための定式化

4.1　全ポテンシャル・エネルギー汎関数増分

追加断面を有する合成断面梁の増分表示された全ポテンシャル・エネルギー汎関数は次のように表すことができる。

$$\Delta\Pi = \Delta U - \Delta V = (\Delta_p U_{cn} + \Delta_f U_{cn} + \Delta_p U_{st} + \Delta_f U_{st} + \Delta U_{bs} + \Delta U_h + \Delta U_\beta) - \Delta V \tag{15}$$

但し，

ΔU：内部エネルギー増分
ΔV：外力による負荷ポテンシャル・エネルギー増分
$\Delta_p U_{cn}$：基幹断面部のコンクリート歪エネルギー増分
$\Delta_f U_{cn}$：追加断面部のコンクリート歪エネルギー増分
$\Delta_p U_{st}$：基幹断面部の補強材歪エネルギー増分
$\Delta_f U_{st}$：追加断面部の補強材歪エネルギー増分
ΔU_{bs}：補強材の付着ポテンシャル・エネルギー増分
ΔU_h：接合面の接着ポテンシャル・エネルギー増分
ΔU_β: 横せん断歪エネルギー増分

従って，前節の諸式の関係を用いて，上式に代入し 整理すると，積層表示された合成断面梁 のための増分表示形式の全ポテンシャル・エネ ルギー汎関数 $\Delta\Pi$ は次式のようになる。

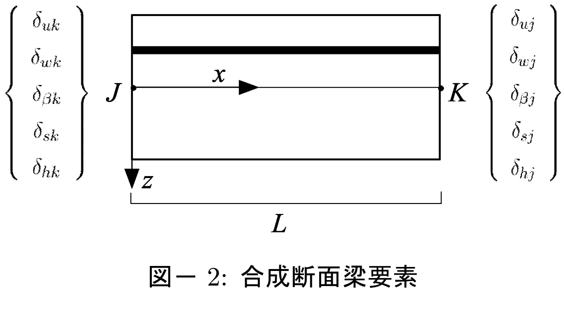
$$\begin{aligned}
\Delta\Pi = \frac{1}{2}\int_0^L \Bigg[& \Big\{\sum_{i=1}^{n}\Delta t_i(B_iE_{ci} + b_i^*E_{gi}) + \sum_{i=1}^{m}A_{si}^*E_{si}\Big\}\Big(\frac{d\Delta u}{dx}\Big)^2 \\
& -2\Big\{\sum_{i=1}^{n}\Delta t_i(B_iE_{ci} + b_i^*E_{gi})z_i + \sum_{i=1}^{m}A_{si}^*E_{si}z_{si}\Big\}\Big(\frac{d\Delta u}{dx}\Big)\Big(\frac{d^2\Delta w}{dx^2}\Big) \\
& +2\Big\{\sum_{i=1}^{n}\Delta t_i(B_iE_{ci} + b_i^*E_{gi})z_i + \sum_{i=1}^{m}A_{si}^*E_{si}z_{si}\Big\}\Big(\frac{d\Delta u}{dx}\Big)\Big(\frac{d\Delta\beta}{dx}\Big) \\
& +2\sum_{i=1}^{m}A_{si}E_{si}\Big(\frac{d\Delta u}{dx}\Big)\Big(\frac{d\Delta S_i}{dx}\Big) \\
& +2\Big\{\sum_{i=k+1}^{n}\Delta t_i(B_iE_{ci} + b_i^*E_{gi}) + \sum_{i=j+1}^{m}A_{si}^*E_{si}\Big\}\Big(\frac{d\Delta u}{dx}\Big)\Big(\frac{d\Delta h}{dx}\Big) \\
& +\Big\{\sum_{i=1}^{n}\Delta t_i(B_iE_{ci} + b_i^*E_{gi})z_i^2 + \sum_{i=1}^{m}A_{si}^*E_{si}z_{si}^2\Big\}\Big(\frac{d^2\Delta w}{dx^2}\Big)^2 \\
& -2\Big\{\sum_{i=1}^{n}\Delta t_i(B_iE_{ci} + b_i^*E_{gi})z_i^2 + \sum_{i=1}^{m}A_{si}^*E_{si}z_{si}^2\Big\}\Big(\frac{d^2\Delta w}{dx^2}\Big)\Big(\frac{d\Delta\beta}{dx}\Big) \\
& -2\sum_{i=1}^{m}A_{si}E_{si}z_{si}\Big(\frac{d^2\Delta w}{dx^2}\Big)\Big(\frac{d\Delta S_i}{dx}\Big) \\
& -2\Big\{\sum_{i=k+1}^{n}\Delta t_i(B_iE_{ci} + b_i^*E_{gi})z_i + \sum_{i=j+1}^{m}A_{si}^*E_{si}z_{si}\Big\}\Big(\frac{d^2\Delta w}{dx^2}\Big)\Big(\frac{d\Delta h}{dx}\Big)
\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
&+\Big\{\sum_{i=1}^{n}\Delta t_i(B_iE_{ci}+b_i^*E_{gi})z_i^2 \\
&\qquad\qquad +\sum_{i=1}^{m}A_{si}^*E_{si}z_{si}^2\Big\}\Big(\frac{d\Delta\beta}{dx}\Big)^2 \\
&+2\sum_{i=1}^{m}A_{si}E_{si}z_{si}\Big(\frac{d\Delta\beta}{dx}\Big)\Big(\frac{d\Delta S_i}{dx}\Big) \\
&+2\Big\{\sum_{i=k+1}^{n}\Delta t_i(B_iE_{ci}+b_i^*E_{gi})z_i \\
&\qquad\qquad +\sum_{i=j+1}^{m}A_{si}^*E_{si}z_{si}\Big\}\Big(\frac{d\Delta\beta}{dx}\Big)\Big(\frac{d\Delta h}{dx}\Big) \\
&+\sum_{i=1}^{m}A_{si}E_{si}\Big(\frac{d\Delta S_i}{dx}\Big)^2 \\
&+2\sum_{i=j+1}^{m}A_{si}E_{si}\Big(\frac{d\Delta S_i}{dx}\Big)\Big(\frac{d\Delta h}{dx}\Big) \\
&+\Big\{\sum_{i=k+1}^{n}\Delta t_i(B_iE_{ci}+b_i^*E_{gi})+\sum_{i=j+1}^{m}A_{si}E_{si}\Big\}\Big(\frac{d\Delta h}{dx}\Big)^2 \\
&+\frac{25}{16}\sum_{i=1}^{n}\Delta t_i(B_iG_{ci}+b_{gi}^*G_{gi})(1-\frac{8z_i^2}{t^2}+\frac{16z_i^4}{t^4})\Delta\beta^2 \\
&+\sum_{i=1}^{m}A_{bsi}K_{bi}\Delta S_i^2+B_hK_h\Delta h^2\Big]dx \\
&-\int_0^L\Big\{\Delta P_u\Big(\frac{d\Delta u}{dx}\Big)+\Delta q_z\Delta w+\sum_{i=1}^{m}\Delta P_{si}\Big(\frac{d\Delta S_i}{dx}\Big)\Big\}dx \qquad (16)
\end{aligned}
$$

但し，L：要素長さ，Δt_i：層 i の丈，B_i：梁幅，b_i：スターラップ内の梁幅，$b_i^*=b_i(1-\frac{E_{ci}}{E_{gi}})$，$A_{si}$：補強材層 i の断面積，$A_{si}^*=A_{si}(1-\frac{E_{gi}}{E_{si}})$，$b_{gi}^*=b_i(1-\frac{G_{ci}}{G_{gi}})$，$A_{bsi}$：補強材層 i の単位長さ当たりの付着表面積，B_h：接着層の幅，ΔP_u:材軸方向の分布荷重増分，Δq_z:鉛直方向の分布荷重増分，ΔP_{si}：補強材層 i の緊張荷重増分

4.2　有限要素方程式

図ー2は接合面のズレを考慮した合成断面梁要素の概要を示したものである。本論文では，この梁要素の設定変位増分 Δu，Δw，$\Delta\beta$，ΔS_i (但し，$i=1\sim m$)，Δh の変位関数をそれぞれ，Δu，$\Delta\beta$，ΔS_i ，Δh は1次，Δw は3次の関数で表現することにする。先の増分汎関数にこで設定した変位関数を代入し，各節点変位増分ベクトル $\{\delta u\}$，$\{\delta w\}$， $\{\delta\beta\}$， $\{\delta S_1\}$，$\cdots$，$\{\delta S_m\}$，$\{\delta h\}$ について，変分をとり整理すると次式のように増分表示された有限要素方程式が得られることになる。

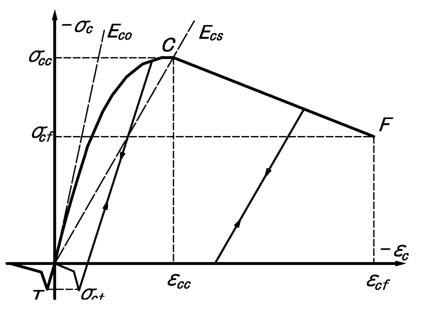


図ー 2: **合成断面梁要素**

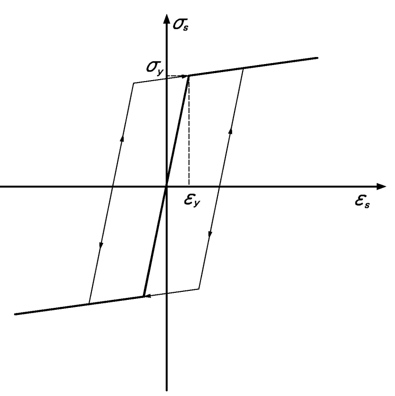
$$
\begin{bmatrix}
K_{uu} & K_{uw} & K_{u\beta} & K_{uS} & K_{uh} \\
K_{uw}^T & K_{ww} & K_{w\beta} & K_{wS} & K_{wh} \\
K_{u\beta}^T & K_{w\beta}^T & K_{\beta\beta} & K_{\beta S} & K_{\beta h} \\
K_{uS}^T & K_{wS}^t & K_{\beta S}^T & K_{SS} & K_{Sh} \\
K_{uh}^T & K_{wh}^T & K_{\beta h}^T & K_{Sh}^T & K_{hh}
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix} \delta u \\ \delta w \\ \delta\beta \\ \delta S \\ \delta h \end{Bmatrix}
=
\begin{Bmatrix} \delta P_u \\ \delta P_w \\ 0 \\ \delta P_S \\ 0 \end{Bmatrix}
\qquad (17)
$$

5.　材料性状の仮定と構成関係

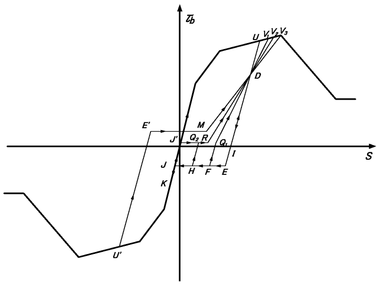
図ー3，**図ー**4及び**図ー**5は解析に当たって採用したコンクリートと補強材の材料性状，および補強材とコンクリート間の付着応力とすべりの構成関係[5)]を示したものである。また，**図ー**6はコンクリート打継ぎ面の接着せん断応力とズレ変位の関係を示したもので，正負単調載荷曲線は，それぞれ4直線で表示する。また，繰り返し載荷経路に関しては，初期勾配と同じ傾きを持つ除荷及び再載荷経路を仮定する。



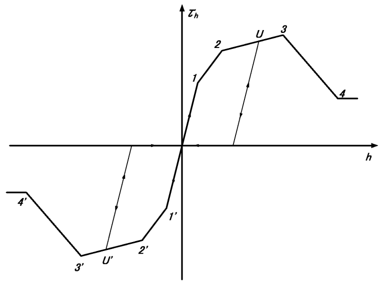
図ー 3: **コンクリートの応力ー歪関係**



図ー 4: **補強材の応力歪関係**



図ー 5: 付着応力ーすべり関係



図ー 6: 接着せん断応力ーズレ変位関係

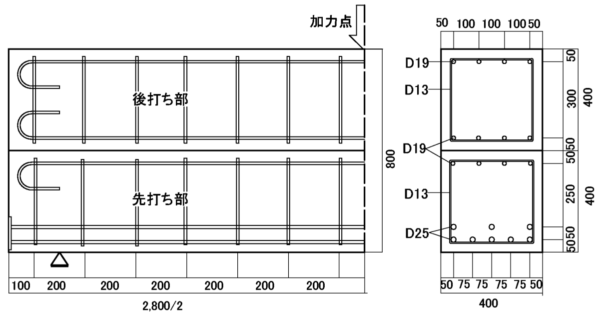
6.　数値計算例

ここでは，本論文で展開した水平打継ぎ面のズレ変形を考慮したチモシェンコ RC 梁部材の材料非線形解析法の妥当性を明らかにするため，本解析法による数値計算例を示し，菊地らの実験値[3]との比較・検討を行なう。

6.1　試験体の概要と解析モデル

図ー7に，菊地らの行ったＲＣ合成断面部材の試験体 C17-C と C25-C の概要と材料性状について示す。この試験体はせん断スパン比が 1.5 と小さく，せん断破壊を意図された試験体であるため，せん断変形の影響が大きいと考えられる。この試験体は先打ち部と後打ち部をスタッドボルトにより接合したコンクリート合成部材で，接合筋比を pt ＝ 0.17 %（C17-C）と pt=0.25 %（C25-C）とした。これらは，先打ち部のコンクリート接合面をはつって後打ち部を打ち継いでいる。**図ー8**に，打継ぎ面の接合に用いたスタッドボルトの配置形態について示す。

本解析では，試験体の特性を適切に模擬するため，スタッドボルトを含む要素（スタッドボルトの直径幅），コンクリート接合面のみを含む要素，先打ち部と後打ち部の付着を切った要素の計 3 種でモデル化し，実験の対称性を考慮してスパンの 1/2 を梁の材軸方向に 30 要素に分割した。接合面の力学特性については，菊地らの行った接合部の直接せん断試験[4]を基に**図ー9**のように仮定した。スタッドボルトには純せん断力が生じると仮定し，降伏せん断応力を一軸引張降伏応力の $1/\sqrt{3}$ とし，接合面のせん断応力—ズレ変位関係は bi-linear 型とした。コンクリートの接合面については，接合部の直接せん断試験の結果から，スタッドボルトのせん断応力を差し引いて算出し，コンクリートせん断応力特性として設定した。

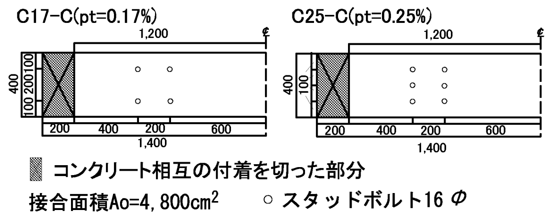


<u>コンクリート</u>
<u>先打ち部</u>
圧縮強度　:34.7 (N/mm^2)
ヤング係数:2.70×10^4 (N/mm^2)
<u>後打ち部</u>
圧縮強度　:33.0 (N/mm^2)
ヤング係数:2.66×10^4 (N/mm^2)

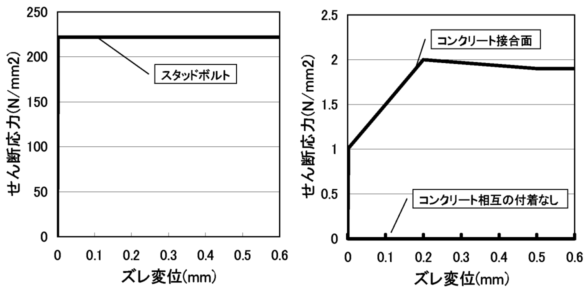
<u>鋼材</u>
<u>D−25</u>
降伏点強度:371.0 (N/mm^2)
ヤング係数:1.92×10^5 (N/mm^2)
<u>D−19</u>
降伏点強度:385.0 (N/mm^2)
ヤング係数:1.84×10^5 (N/mm^2)

<u>D−13</u>
降伏点強度:415.0 (N/mm^2)
ヤング係数:1.86×10^5 (N/mm^2)
<u>スタッドボルト 16Φ</u>
降伏点強度:383.0 (N/mm^2)
ヤング係数:2.14×10^5 (N/mm^2)

図ー 7: 菊地らの合成断面部材の概要



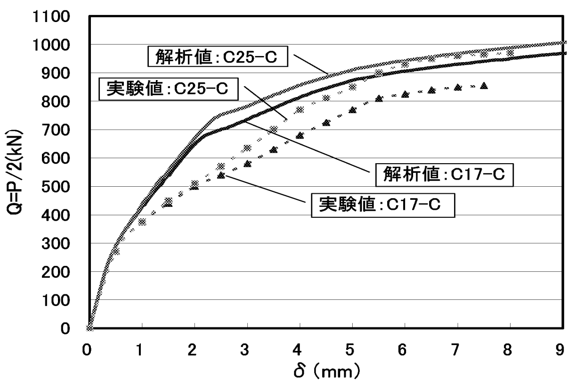
図ー 8: 接合筋の配置形態



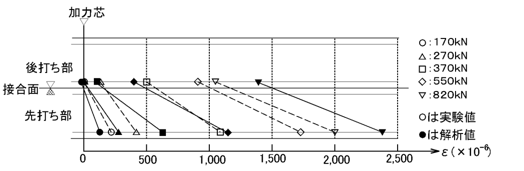
図ー 9: 各要素の接合面せん断応力—ズレ関係

6.2　実験値と解析値の比較と考察

図ー10は，スパン中央点における荷重—変位曲線を，試験体 C17-C，C25-C の実験値と本解析値を比較して示したものである。この図より，実験において曲げせん断ひび割れが生じ始める $300kN$ 程度までは，本解析値は実験値と同等の変形挙動を示しているが，それ以降は実験値に比べ解析値の剛性が大きくなっていることが分



図ー 10: 解析値と実験値の荷重—変位関係

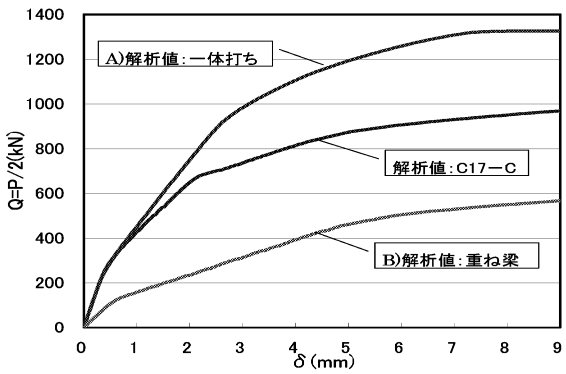


図ー 11: 加力芯における主筋のひずみ（pt=0.17%）

かる。これは本解析ではせん断変形の影響を考慮しているが，梁理論の宿命として斜めせん断亀裂を表現出来ないのに対し，実際にはせん断ひび割れの影響により，変形が大きくなるためであると考えられる。このために、本解析はせん断スパン比が非常に小さいこの試験体においては、最大耐力を高く評価する結果となった。また，解析値は実験値と同様に，変位が 2mm 程度から接合筋比の違いによる影響が現れており，接合筋比による影響については適切に評価していると考えられる。

図ー 11 に，Q =170,270,370,550 及び 820kN 時の加力芯における先打ち部と後打ち部の下端筋のひずみを示した。$Q = 170kN$〜$550kN$ では，実験値のひずみが解析値より大きくなっているが，これもせん断ひび割れにより変形が大きくなっているためであると考えられる。

図ー 12 は，２体の試験体のうち C17-C を例にとって，この梁の剛性が両極の接合剛性，即ち，A）一体打ちの梁に対応する解 (接合面の接着係数として $K_h = 10^5(N/mm^3)$ を使用)，及びB）重ね梁に対応する解（接合面の接着係数として $K_h = 10^{-5}(N/mm^3)$ を使用）と，どのような関係にあるかを見るため，先の図ー 10 の場合と同様，中央点の荷重—変位曲線で比較したものである。本解析結果は，一体打ちのモデルは初期剛性，最大強度とも大きく，単なる重ね梁のモデルのそれらは，当然のことながら小



図ー 12: C17-C と両極接合状態の梁との比較

さくなる結果を明示している。C17-C の解析結果は，Q=400kN 程度までは一体打ちと同等であり，その後徐々に接合面にズレが現れている。Q=700kN 程度でスタッドボルトを含む要素においてせん断降伏が起り，剛性が小さくなる様子を示している。以上のことより，本解析法は，接合面の力学特性を比較的良好に評価しており，充分な有用性があるものと考えられる。

7. まとめ

本論文では,「チモシェンコ梁理論によってせん断変形を考慮し，水平打継ぎ面のズレをも勘案した合成断面ＲＣ梁部材」の材料非線形解析のための全ポテンシャル･エネルギー汎関数を導き，それを用いた有限要素解析法について論じた。更に本解析法による数値計算例を掲げ，既往の実験結果との比較により本解析法の妥当性を明らかにした。

参考文献

1) 浅野，上田，内山，和田：接合面のすべりを考慮した合成断面梁の材料非線形解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.325-330，2001
2) 越川，上田，内山，和田：補強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・チモシェンコ梁の材料非線形解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.301-306，2001
3) 菊地，小畠，武田：WALL FOUNDATION による耐震架構の開発研究（その２），大林組技術研究所報，No.31，pp.26-30，1985
4) 菊地，小畠，武田：WALL FOUNDATION による耐震架構の開発研究（その１），大林組技術研究所報，No.30，pp.20-24，1985
5) 松倉満智子，上田正生，内山武司，土橋由造：緊張鋼材の付着すべりを考慮したプレストレスト梁部材の材料非線形解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.17，No.2，pp.709-712，1995