

鉄骨埋込み柱脚の構造性能に関する解析的研究

接触要素を用いた非線形有限要素法解析

鈴木 英之* 田畑 卓* 西原 寛*

An Analytical Study on the Structural Performance of Embedded Type Column Bases Using Square Steel Pipe

Nonlinear finite element method analysis using interface elements

by Hideyuki SUZUKI, Taku TABATA and Hiroshi NISHIHARA

Abstract

Three-dimensional nonlinear finite element method analyses of embedded type column bases using square steel pipe were carried out. It was possible to represent the experimental results in terms of the interface elements that were imitated bearing, separation, friction and bond set on the face of the embedded steel column. The principal parameters were the embedded length of the steel column, the yield strength of the steel, the existence of infilled concrete in the embedded steel column and the hoop reinforcement ratio around the embedded region. The analysis results indicated that the embedded length of the steel column had a strong influence on the stiffness of the column base.

要 旨

角形鋼管を使用した鉄骨埋込柱脚に関して、試験体を模擬した解析モデルを作成し、三次元非線形有限要素法解析を行った。鉄骨が埋め込まれている部分に支圧、剥離、摩擦および付着をモデル化した接触要素を設けることで、実験結果を再現することが可能であった。試験体を模擬した標準解析モデルを基準とし、鉄骨の埋込み長さ、鉄骨の降伏強度、埋込部への充填コンクリートの有無、および埋込部周囲の横補強筋量を変動させた解析を実施した。その結果、埋込み長さが部材の剛性に与える影響が大きいことが明らかとなった。

キーワード：埋込み柱脚／鉄骨柱／基礎梁／コンクリート／非線形有限要素法解析

1. はじめに

前報[1]において鉄骨埋込み柱脚の1/3縮尺モデルの構造実験が行われ、その構造性能が確認された。このような構造実験は、比較的大規模な加力装置と詳細な模型試験体によって行われているが、費用や時間の制限により、試設計に基づいた標準試験体による確認実験となることが多く、複数の要因を変動させた実験を行うのは困難である。

一方で、非線形有限要素法解析（以下、非線形FEM解析）は鋼構造の分野はもとより、鉄筋コンクリート構造の分野においても、多くの研究者によるコンクリートの非線形モデルの提案と、解析コー

ドや電算機等の進歩によって、比較的身近なツールとなりつつある。しかし鉄骨埋込み柱脚のように、鋼とコンクリート間の応力伝達を考慮する必要がある部材に対して非線形FEM解析を適用した例は少ない。このような部材を対象としたFEM解析は、鋼とコンクリート間の接触要素として支圧、剥離、摩擦および付着をモデル化する必要がある。

本研究は、まず実験で使用した試験体の形状と、鋼とコンクリート間の接触要素をモデル化し、実験結果を再現することを第一の目的とした。つぎに、その標準解析モデルを基に、鉄骨の埋込み長さおよび鉄骨が埋め込まれた部分のディテールを変動要因

* 技術研究所構造グループ

としたモデルの解析を行い、それらが鉄骨埋込み柱脚の構造性能に及ぼす影響を把握することを目的とした。

2. 解析

2.1 鉄骨柱脚試験体のモデル化

本解析には、主にコンクリート系構造物を対象とした三次元非線形有限要素法解析コードである ATENA3D を使用した。表 1 に解析ケースの一覧、図 1 に解析モデルの形状を示す。20DN は前報[1]に

表 1 解析ケース一覧

解析ケース	埋込み長さ L_e (mm) (D_c : 鉄骨せい)	要因
15DN	1.5 D_c (262.5mm)	
20DN	2.0 D_c (350mm)	試験体CN-Iモデル
25DN	2.5 D_c (437.5mm)	
20DG	2.0 D_c (350mm)	埋込部分散鉄筋増量
20DF	2.0 D_c (350mm)	埋込部鋼管内部にコンクリート要素
20D235	2.0 D_c (350mm)	鋼管要素 σ_y 235N/mm ²
20D355	2.0 D_c (350mm)	鋼管要素 σ_y 355N/mm ²

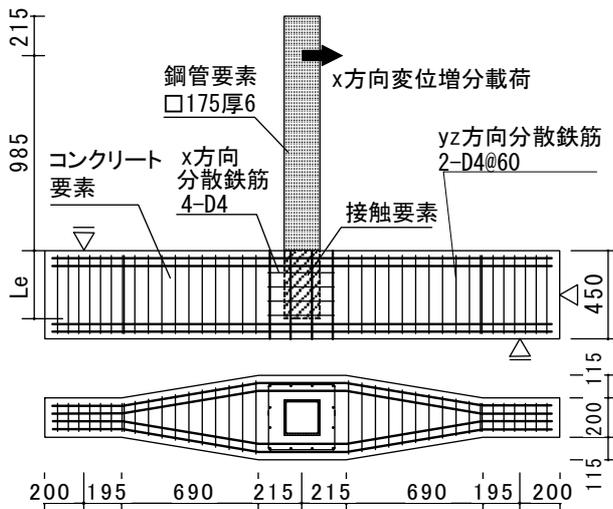


図 1 解析モデルの形状図

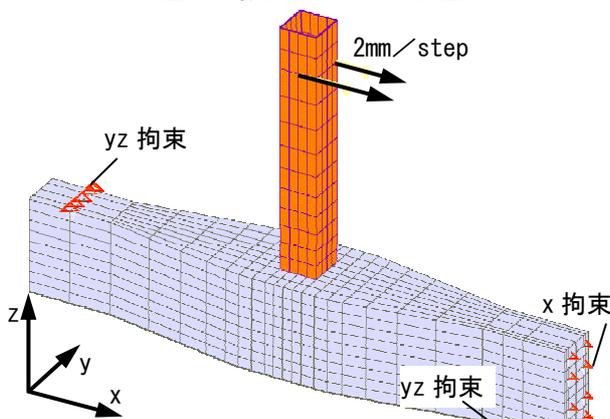


図 2 要素分割と荷重拘束条件

示した試験体のうち中柱タイプの CN-I をモデル化した。ただし、試験体に使用した角形鋼管は四隅が曲線で構成されているが、解析モデルでは正方形断面の鋼管とし、鋼管の最下端には鋼管の外形と大きさが等しい厚さ 9mm のベースプレートを取付けた。20DF 以外の鋼管内部は中空とした。15DN と 25DN は、試験体をモデル化した標準解析モデルである 20DN を基準として、鋼管の埋込み長さを鋼管柱せい(D_c)のそれぞれ 1.5 倍、2.5 倍とした。実験では、鋼管の周囲にせん断状のひび割れが多数発生した。このひび割れの抑制あるいは、鋼管周囲のコンクリートを拘束する目的で、鋼管周囲に帯筋を多く配する方法が考えられる。そこで、20DG は鋼管が埋め込まれる周囲の横補強筋量を 20DN の 5 倍とした。

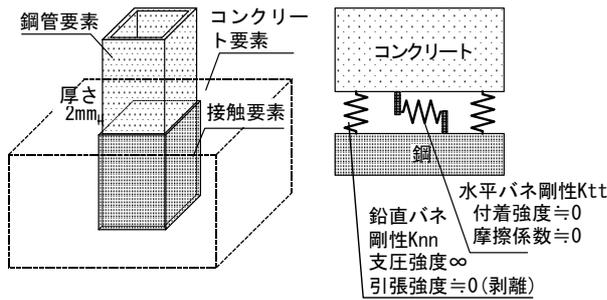
20DF は鋼管が基礎梁に埋め込まれている部分(以下、埋込み部)の鋼管内部にコンクリート要素を設けた。これは、鋼管内部にコンクリートを打設することによって支圧を受ける鋼管の面外剛性を高める効果を期待している。

前報の実験では鋼管の材料強度が 414N/mm²であったが、実際の施工で使用されることがある鋼板厚さが 12mm 以上の BCP235 は、降伏強度の下限値と上限値が規定されている。そこで、試験体モデルと比較する目的で鋼管の降伏強度を下限値の 235 N/mm²および上限値の 355N/mm²とした解析を行った。

図 2 に要素分割および境界条件を設定した解析モデルの形状を示す。コンクリートと鋼管は三次元 6 面体 8 節点要素、主筋は一次元 2 節点線要素による分散鉄筋モデル、あばら筋、および鋼管周囲の補強鉄筋はコンクリートと複合させた分散鉄筋モデルとし、主筋とコンクリート間は完全付着とした。

2.2 接触要素のモデル化

要素を作成する際、隣り合う要素で節点を共有するとその要素間は完全付着となる。本解析で対象とする異種材料で構成される部材をモデル化するためには、異種材料間の接触問題をモデル化する必要がある。そこで本解析では、鋼要素とコンクリート要素が接触する節点間に ATENA3D に用意されているインターフェース要素(以下、接触要素)を用いた。図 3 に接触要素の形状と定義を示す。同図 a に示すように鋼管が埋め込まれている範囲において、鋼管とコンクリート間に厚さ 2mm の接触要素を設けた。また、同図 b に示すように、接触要素は鋼要素とコ



a. 接触要素の形状 b. 接触要素の定義

図3 接触要素の形状と定義

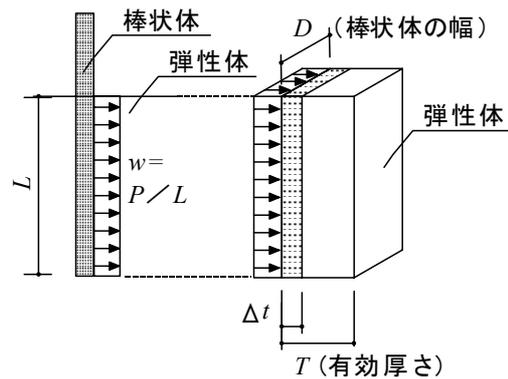
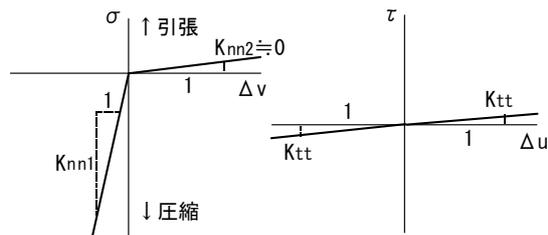
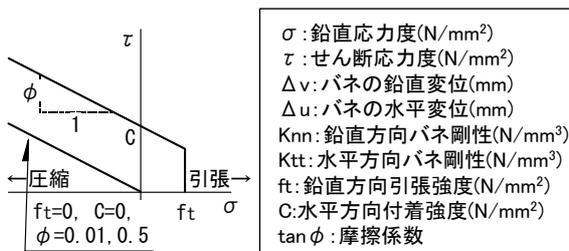


図5 支圧バネ変位方向の有効長さ



a. 鉛直バネ b. 水平バネ



c. 接触要素の破壊曲面

図4 接触要素を構成する材料モデル

ンクリート要素が接触する面に対して鉛直方向のバネと平行なバネで構成される。これを数式にすると式(1)で表される。

$$\begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{tt} & 0 \\ 0 & K_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 τ ：接触要素に作用するせん断応力度(N/mm²)、 σ ：同鉛直応力度(N/mm²)、 K_{tt} ：水平方向バネ剛性(N/mm³)、 K_{nn} ：鉛直方向バネ剛性(N/mm³)、 Δu ：バネの水平方向変位(mm)、 Δv ：同鉛直方向変位(mm)。

垂直バネのうち、圧縮側は鋼とコンクリート要素間の支圧、引張側は剥離を表している。また、平行バネは鋼とコンクリート要素間の面内方向の滑りを表しており、鋼とコンクリート要素間の付着力と垂直バネの応力に比例する摩擦力を表している。接触要素に割り当てた材料モデルを図4に示す。

本解析では、鋼とコンクリート要素間が鉛直方向に離間する強度、すなわち接触要素の引張強度および、水平方向の付着強度を0とし、摩擦係数は0.01とした。

鋼とコンクリート要素間の鉛直方向の支圧バネとは、両要素間に作用する圧縮応力によって、鋼の弾性係数とコンクリートの弾性係数に応じたひずみが発生し、そのひずみにある有限長さに乗じて変位として表すことであり、その単位は N/mm³ で表される。ここで、鋼の弾性係数はコンクリートの約 10 倍であり、かつコンクリート要素の方が鋼管要素と比較して厚いことから、支圧による収縮変位はコンクリート側だけを考えることとする。

中島等[2]は、コンクリートに埋め込まれた弾性支承梁に作用する応力と変位関係を表す微分方程式である式(2)を基に式(3)を提案している。ここで、式(3)は、式(2)の左辺第 2 項を材の変位に比例する支圧力として $p(y)=E_s \cdot y$ としている。また、式中の E_s をコンクリートの弾性係数 E_c とすることで鉄骨埋込み柱脚の剛性を評価できるとしている。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + p(y) = 0 \quad (2)$$

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + E_s \cdot y = 0 \quad (3)$$

ここで、 y ：材の変位(mm)、 E_s ：埋込み部の単位長さ当たりの単位の変位を生じるのに要する力(N/mm²)。

式(3)は以下のようにも解釈することができる。弾性係数は応力とひずみの関係であるので、バネ剛性をコンクリートの弾性係数に置き換える場合は、弾性係数をひずみ方向の有効長さで除する必要がある。

図5において、棒状体から弾性体へ面積が $D \times L$ の面に分布荷重 w が作用し、埋め込まれた部分の弾性体が Δt 縮んだとする。この弾性体の弾性係数を E_c とすれば、式(4)および(5)の関係が成り立つ。

$$\frac{P}{D \cdot L} = E_c \cdot \frac{\Delta t}{T} \quad (4)$$

$$w = \frac{P}{L} = E_c \cdot \frac{\Delta t}{T} \cdot D \quad (5)$$

ここで、 P ：水平力(N)、 D ：棒状体の幅(mm)、 L ：埋込み長さ(mm)、 E_c ：弾性体の弾性係数(N/mm²)、 T ：変位方向の弾性体の有効長さ(mm)、 Δt ：水平力 P によって生じた変位量(mm)。

つまり、式(3)の E_s に弾性係数 E_c を代入するということは、変位方向の弾性体の有効長さ T を棒状体の幅 D とすることである。よって式(6)に示すように、支圧バネ剛性 K_{nn1} はコンクリートの弾性係数 E_c を鉄骨幅 B_s で除した値とした。

$$K_{nn1} = E_c / B_s \quad (\text{N/mm}^3) \quad (6)$$

なお、接触要素の剛性はその要素厚さに依存しないため任意の厚さとしてできるが、ここでは、鋼管から支圧を受けるコンクリート要素の圧壊や目開きを表現するため、その要素厚さを 2mm とした。

2.3 使用材料のモデル化

解析に用いた材料モデルの材料強度を表2に示す。コンクリートは引張強度を考慮し、圧縮引張共に最大耐力時からの軟化曲線は破壊エネルギーを考慮したモデルとした。鋼管要素は Von Mises の降伏関数を考慮したバイリニア形、主筋、あばら筋および埋め込み部周囲の帯筋は降伏強度を折れ点とする一軸のバイリニア形とした。

表2 材料強度

	種類	弾性係数 N/mm ²	降伏強度 N/mm ²
鋼管	□175厚6mm	2.13E+05	414,355,235
主筋	D13	1.95E+05	403
あばら筋	D4	1.74E+05	370
	弾性係数 N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²
コンクリート	2.36E+04	27	2.7

2.4 解析方法

図2中に、解析上の拘束条件と荷重位置を示す。基礎梁の反曲点位置の上端と下端に yz 拘束のローラーを設け、基礎梁小口面に x 方向を拘束するローラーを設けた。荷重は変位制御とし、各ステップで鉄骨頂部に強制変位を増分させ、一方向単調荷重とした。また非線形求解法として非線形 Newton-Raphson 法を用いた。

3. 解析結果

3.1 応力図とひび割れ図

図6に 15/1000rad.時における解析モデルの最小主ひずみのコンターに、ひび割れ図を重ねた図を示す。これによると、いずれも鋼管柱脚部の加力方向面に圧縮ひずみが集中しているのがわかる。図中のひび割れは目視可能なひび割れ幅として 0.05mm 以上のものを表示している。標準解析モデルである 20DN をみると、ひび割れの分布は前報に示した実験結果を概ね再現していると言える。

20DN と 20DF は埋込部の鋼管内へのコンクリート充填の有無を比較要因としているが、鋼管とコンクリートのひずみ分布と、ひび割れに関しては大きな差異が見られなかった。埋込部周囲の帯筋量を増した 20DG は埋込部の支圧応力によるコンクリートのひずみが小さくなっていった。降伏強度の小さい材料モデルを使用した 20D235 は支圧応力によるコンクリートのひずみが小さく、鋼管の曲げによるひずみが大きくなっており、支圧によるコンクリートの劣化が進む前に柱脚部に降伏ヒンジが形成されていた。

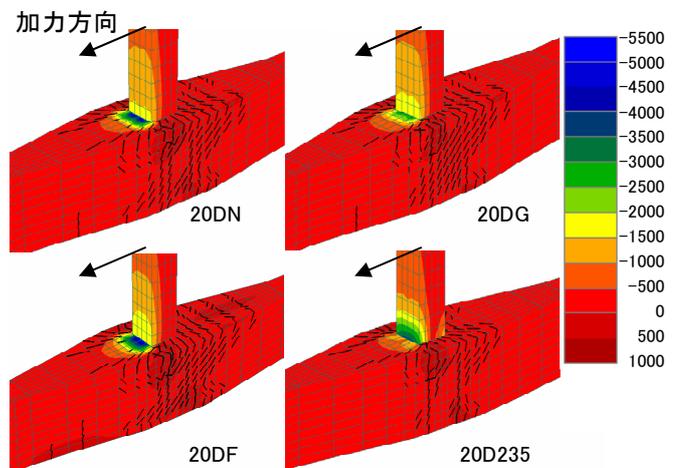


図6 15/1000rad. 時の最小主ひずみとひび割れ

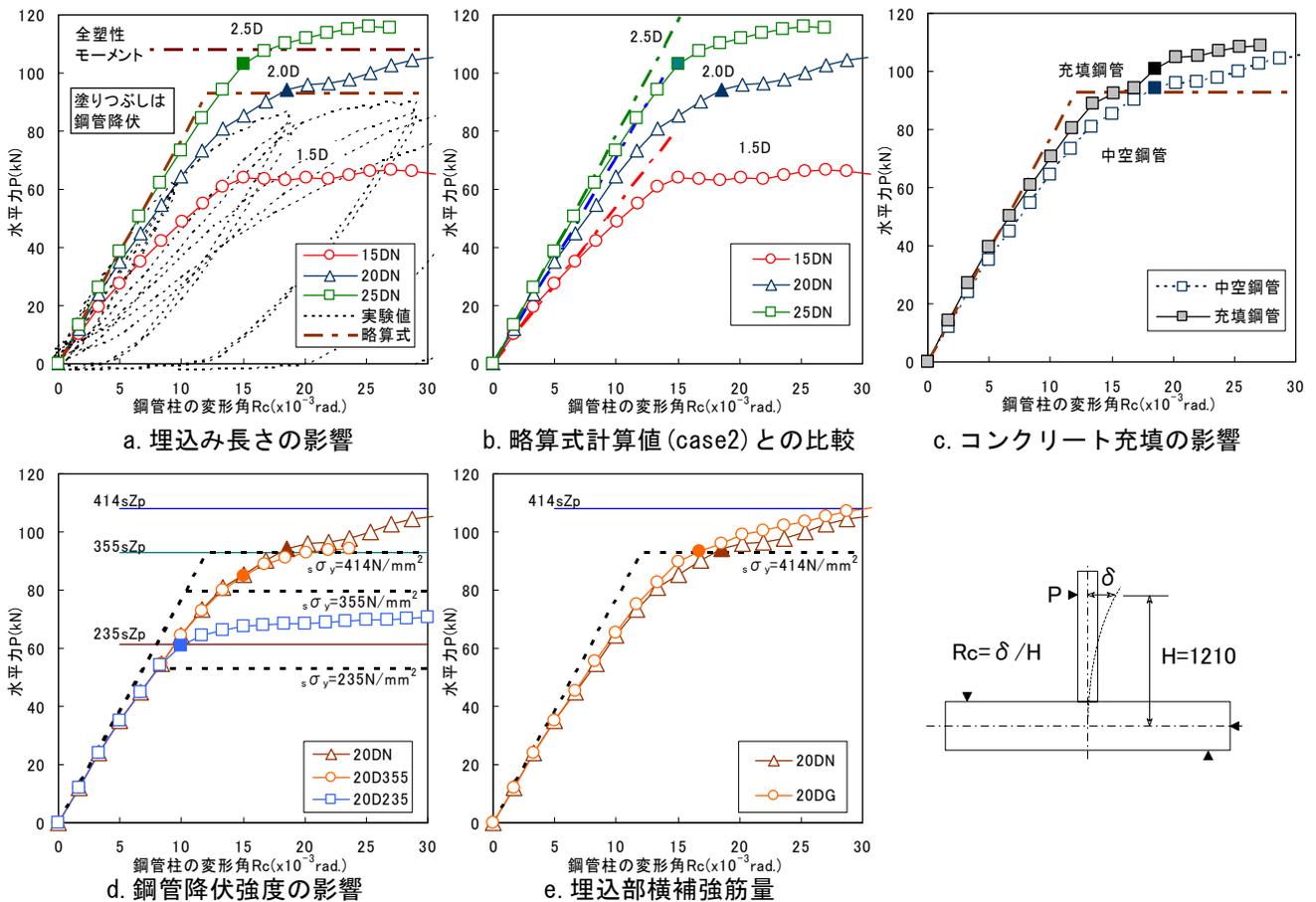


図7 鋼管柱の荷重変形角関係

3.2 荷重変形関係

図7に鋼管頂部に与えた水平力と鋼管柱の回転角関係を示す。同図aは鋼管の埋込み長さを変動要因とした15DN, 20DN, 25DNの比較であり、図中には前報に示したCN-I試験体の実験結果を破線で表した。CN-I試験体の実験結果と同試験体をモデル化した20DNを比較すると、初期剛性から降伏時剛性にかけての剛性低下まで概ね一致した結果が得られた。

25DNはステップ9で鋼管柱脚部が曲げ降伏しており、その後、剛性が低下した。20DNは18.5/1000radでフランジが曲げ降伏したが、全塑性モーメントには達しなかった。これは20/1000rad時に柱脚部の鋼管フランジが降伏した実験結果と同様な傾向を示している。15DNはステップ8以降に剛性の低下が見られたが最終ステップまで鋼管は降伏せず、鋼管の最大ひずみは降伏ひずみの約75%だった。

これらより、埋込み長さが2.0Dc以下の15DN, 20DNの主な剛性低下の原因は、支圧部コンクリートの圧壊によると考えられる。このように、埋込み

長さを1.5Dcから2.5Dcまで変化させた場合、埋込み長さによって、部材剛性が変化することが解析結果から確認された。

図中の一点鎖線は、前報[1]の式(6)に示した埋込み深さ1.5Dcの位置を回転中心とした時の鋼管変位から求まる弾性剛性と降伏強度からなる計算値(Case1)である。埋込み長さを2.5Dcとした解析値は剛性、降伏強度、全塑性強度ともにこの計算値にほぼ一致していた。ここで、計算に用いた鋼管の断面係数および塑性断面係数は175mm角の正方形鋼管として算出しているため、実験で用いた四隅が円弧の角形鋼管よりも約4%断面係数が大きくなっている。

同図bは埋込み長さを変化させた3種類の解析ケースに、前報[1]の式(7)に示した計算式(Case2)から算出した各埋込み長さの初期剛性を重ね合わせたものである。この計算式は弾性支承された部材の変形を求める式であり、図中の一点鎖線はその弾性係数を0.3Ecとした時の剛性を表している。0.3という値には工学的な意味はないが、埋込み長さを変動要因としたFEM解析結果と比較すると、いずれの埋

込み長さに対しても、概ね 8×10^{-3} rad.以下の初期剛性と計算式から得られた値が一致していた。

同図 c に中空鋼管を埋め込んだ 20DN とコンクリート充填鋼管を埋め込んだ 20DF の比較を示す。これによると、コンクリートを充填することによって、降伏前の部材剛性が高くなることが確認された。しかし、剛性低下の主な原因は支圧部コンクリートの圧壊であり、最終的な耐力はほとんど差がなかった。

同図 d に鋼管の降伏強度を変動させた時の比較を示す。各解析ケースで鋼管の降伏が始まるまで剛性の差は見られなかったが、20D235 と 20D355 は鋼管の降伏によって剛性が低下しており、その最大耐力は鋼管の全塑性モーメントから求まる耐力を越えていた。20DN は鋼管の降伏以前より剛性が低下しており、最終耐力は鋼管の全塑性モーメントに達しなかった。つまり、鋼管の曲げ耐力を適切に評価し、それに応じた支圧設計を行えば、埋込み長さ $2.0D_c$ でも鉄骨柱脚の降伏が保証されることが確認された。

同図 e に埋込部周囲の横補強筋量を変動させた比較を示す。図 6 に示したように横補強筋量を増やすことによって、支圧応力によるコンクリートのひずみが小さくなっていった。20DN と 20DG は初期剛性の差はないが、 $1/100$ rad.以降に剛性の差が若干見られた。

以上の解析結果より、鋼管埋込柱脚の剛性に影響を及ぼす要因として、鋼管内部の充填コンクリートの有無、埋込部周囲の横補強筋量も挙げられるが、最も大きな要因は鋼管のコンクリートへの埋込み長さであることが確認された。

3.3 接触要素に作用する支圧応力分布

本解析では図 8 に示す位置に接触要素を設けている。この接触要素を挟む形でコンクリート要素と鋼要素が位置しているため、接触要素の鉛直パネに作用する応力が鋼管とコンクリート間に作用する支圧応力となる。図 9 に接触要素面に作用する支圧力の分布を示す。ここで、加力方向の面を加力方向面、その反対側を裏面とする。

加力方向面では埋込み始端側の支圧応力が大きく、裏面は逆に埋込み深部側の支圧応力が大きくなっており、てこ作用が働いていることが確認された。

コンクリートが充填されていない場合は、支圧を受ける面のうち幅方向の中心付近の支圧応力が小さく、両側 1/4 から外側部分の支圧応力が大きくなっていった。一方、裏面では幅方向の分布は表側ほど起

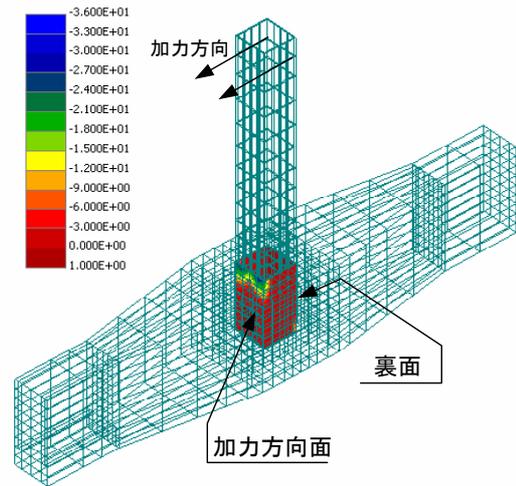


図 8 接着要素の位置

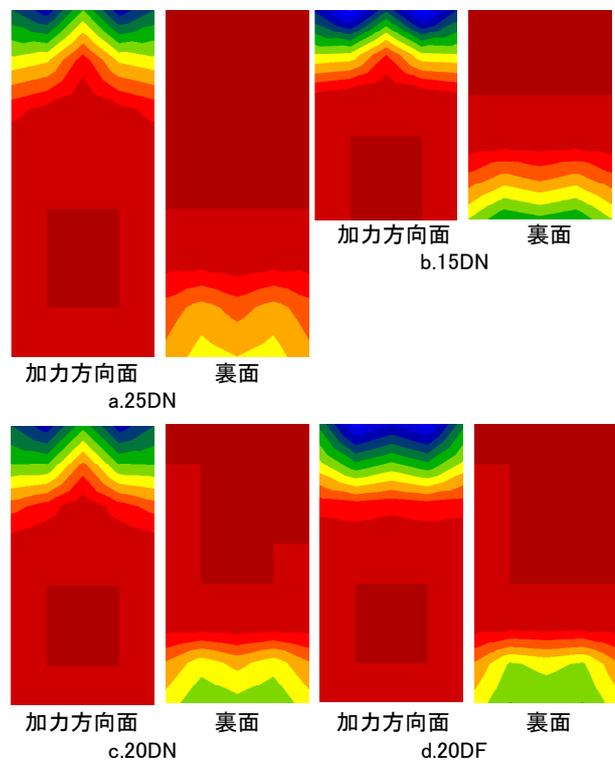


図 9 接着要素の支圧応力分布

伏がない。これは、埋込み部の下端にベースプレートが設けられているため、支圧を受ける面の面外剛性が高まり、応力分布が均一化されたものと考えられる。裏表ともに、深さ方向の等高コンターの幅は概ね一定であり、深さ方向に関しては三角形分布になっていると考えられる。また、支圧応力が作用する深さ方向の範囲は概ね $1.0D_c$ 以下であった。

コンクリートを充填した 20DF は 20DN と比較すると、応力分布の形状が異なっており、幅方向の応力分布の形状が平坦に近くなっていった。これは、鋼管内部の充填コンクリートによって鋼管の面外剛性が高まっているためと考えられる。

4. まとめ

本解析の結果より、以下の知見が得られた。

- 1) 鋼要素とコンクリート要素間に、支圧、剥離、摩擦および付着をモデル化した薄い接触要素を設けることによって、異種材料で構成される鉄骨埋込柱脚の解析を行うことが可能となり、破壊性状と剛性に関しては実験結果を再現することができた。
- 2) 水平加力時の鋼管柱の剛性は、鋼管の埋込み長さによる影響が大きかった。
- 3) 鋼管からコンクリートに作用する支圧応力の範囲は、埋込み深さ方向では概ね $1.0D_c$ であり、その形状は三角形分布に近かった。また、幅方向の分布は中空な角形鋼管では両側 $1/4$ からウェブが付く部分の支圧応力が大きくなっているが、ベースプレートや内部に充填コンクリートを施すことによって、柱幅方向の応力分布が平坦になることが確認された。

参考文献

- [1] 田畑卓，西原寛，本多徹哉他：鉄骨柱脚箱抜き工法の構造性能に関する実験的研究，安藤建設技術研究所報 Vol.11, pp.77-88, 2005.10
- [2] 中島茂壽，五十嵐定義：曲げモーメントとせん断力をうける角形鋼管柱の埋込み形式中柱柱脚部における力学性状（その 2），日本建築学会構造系論文報告集，第 374 号, pp.63-76, 1987.4

