

拡張節を用いた中掘り鋼管杭先端根固め部のずれ止め機構に関する研究

Mechanical characteristics of the nodular shear connector for the inner excavating steel pipe pile tip

西海 健二*, 木下 雅敬**, 寺崎 滋樹***, 大貫 博史****

Kenji Nishiumi, Masanori Kinoshita, Shigeki Terasaki, Hiroshi Oonuki

*工修, 新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所鋼構造研究開発センター (〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1)

**Ph.D., 新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所鋼構造研究開発センター (〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1)

***新日本製鐵(株) 建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

****工修, 新日本製鐵(株) 建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

On the inner soil excavating steel pipe pile driving method, the soil cement bulb is formed in the pile tip. In order to transfer the axial force of pipe to soil cement bulb, shear connectors such as steel bars are attached on the inner pipe tip. A new “nodular shear connector” which is formed by pipe expanding method, has been developed.

In order to investigate the performance of the nodular shear connector, axial loading tests and shear loading tests were carried out. The test results showed the node acted as the shear connector and shear resistance were varied by the node shape.

Key Words: inner excavating steel pipe pile, shear connector, nodular pipe

キーワード: 中掘り鋼管杭, ずれ止め, 拡張節

1. はじめに

中掘り鋼管杭工法は、先端開放の鋼管杭内にオーガースクリューなどを設置して、掘削・排土を行いながら鋼管杭を地中に建て込む工法であり、打撃工法と比較して騒音・振動を低減できる工法である¹⁾。しかし、内部掘削のままでは杭の先端支持力が閉塞杭として考慮できないため、一般には杭打設後に、杭先端にセメントミルクを噴出し、攪拌混合して根固め球根部を築造することにより先端閉塞杭として支持力を確保する工法が用いられる²⁾。この根固め球根部と鋼管杭との荷重伝達を図るために、杭先端には図-1(a)に示すようにずれ止めが設けられる。各種工法によりずれ止めの仕様は異なるが、一般には、杭先端の内周に丸鋼や鋼板を溶接により取り付けられている。また、鋼管先端外面には中掘り施工時の周面摩擦力の低減を目的としたフリクションカッターが取り付けられている。しかし、このようなずれ止めやフリクションカッターは全て手作業による溶接により取り付けられるため、ずれ止め加工費を削減できる新しいずれ止めが求められている。このような中掘り鋼管杭先端根固め部における新しいずれ止めとして拡張節の適用性の研究を行っている。

拡張節とは、鋼管の一部を冷間成形により周方向に拡張加工することにより作成した節形状の突起であり、図

-1(b)に示すように突起部において先端根固め部とのずれ止めとしての機能を期待した構造である。本論文では、この拡張節の適用性の検討を目的として、数値解析および構造試験によるずれ止め機構に関する研究結果を報告する。拡張節部は直管と比較して軸耐力の低下が懸念される。拡張節内部にコンクリートが充填されている場合には、非充填の場合と比較して座屈耐力の向上が期待できるが、まず、非充填鋼管を対象として節形状と座屈耐力の関係性を把握することを目的として、有限要素解析および模型試験を実施した。次に、拡張節部内にコンクリートを充填した状態での押し抜きせん断試験を実施し、拡張節ずれ止めの破壊モードを把握するとともに、節形状とずれ止め耐力の関係性を把握した。最後に、直径 800mm

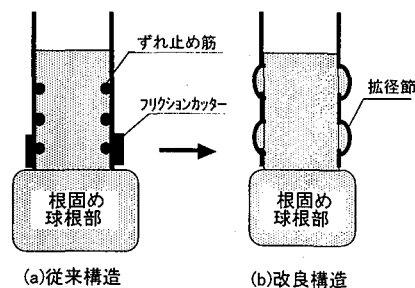


図-1 杭先端部拡張節ずれ止め

の実大鋼管杭を対象としたずれ止め耐力の確認試験を実施した。

2. 拡張節部の軸圧縮解析

2. 1 解析方法

拡張節を有する鋼管は、鋼管の座屈形状と類似しており、一般部と比較して軸圧縮耐力（以下、軸耐力と呼ぶ）の低下が懸念される。しかし、拡張節部の軸耐力は拡張節形状や板厚などにより異なることが想定されることから、拡張節により節を形成した鋼管の軸耐力の把握および軸耐力向上策の検討を目的として有限要素解析を実施した。解析ケースは、直径が D400mm、板厚が $t=4, 6, 8\text{mm}$ の 3 種類、材質が SKK400, SKK490 の 2 種類の鋼管を対象として、各々の鋼管に対して、表-1 に示す節高さ、節形状半径が異なる 12 ケースとし、計 72 ケースの解析を実施した。拡張節の加工は所定の半径を有する拡張ブロックを鋼管周方向に拡張して形成することから、拡張ブロックの形状が最終的に形成される節の形状を決定する。この拡張ブロックの軸方向半径を節形状半径 R として設定し、拡張ブロックの周方向への変位を節高さ Δ とする。

解析方法は図-2 に示すように、鋼管素管状態から拡張過程をシミュレートする解析を行った後、軸圧縮解析を行った。すなわち、拡張過程においては所定の形状を有する拡張ブロックを周方向に所定の節高さ分変位させることにより鋼管に節部を形成し、この時の鋼管の形状と発生した内部応力状態を次のステップである軸圧縮過程の初期状態として、鋼管自由端部に約 20mm まで段階的に強制変位を与え、節点反力を軸圧縮力とした。解析ソフトは市販の有限要素解析プログラム（MARC Ver. 6）を用い、要素分割は鋼管の対称性を考慮して、鋼管の軸方向に二分割し（長さ 800mm）、また軸対称ソリッド要素を用いた二次元解析とした。鋼管の材料特性は加工硬化特性を考慮して、SKK400 材（SKK490 材）では第一降伏点を規格降伏強度 240N/mm^2 （ 320N/mm^2 ）とし、第二降伏点を軸ひずみ 5% の時に規格引張強さの 90% として 360N/mm^2 （ 440N/mm^2 ）とし、軸ひずみ 20% の時に規格引張強さ 400N/mm^2 （ 490N/mm^2 ）となるトリリニアモデルとした。

2. 2 解析結果

拡張過程終了時および軸圧縮過程終了時の鋼管の変形図を図-3 に示す。拡張過程終了時の節形状は、節頂部は拡張ブロックの形状に沿ったなだらかな節形状が形成されている。解析では節部に大きな面外曲げ応力が作用しており、節頂部では周長の拡大により塑性ひずみが生じている。また、軸圧縮過程では、軸縮みが進行するにつれて、節部が周方向に膨らみを生じていることが解る。また、板厚の薄い鋼管では節底部において鋼管内への変形も生じていた。

図-4, 5 に SKK400 の直径 400mm、板厚 6mm の鋼管を対象とした解析により得られた、軸圧縮過程における鋼管

表-1 解析パラメータ

形状半径	R=50mm R=100mm R=250mm R=400mm	節高さ				
		$\Delta=5\text{mm}$	$\Delta=10\text{mm}$	$\Delta=15\text{mm}$	$\Delta=20\text{mm}$	$\Delta=25\text{mm}$
形状半径	R=50mm	Case1	Case2	Case3		
	R=100mm		Case4	Case5	Case6	
	R=250mm			Case7	Case8	Case9
	R=400mm			Case10	Case11	Case12

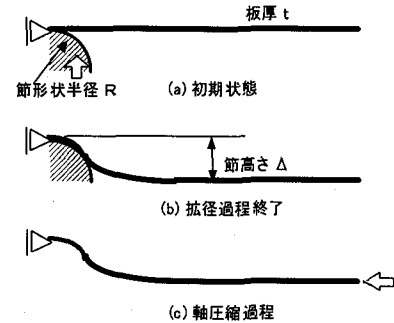


図-2 解析ステップ

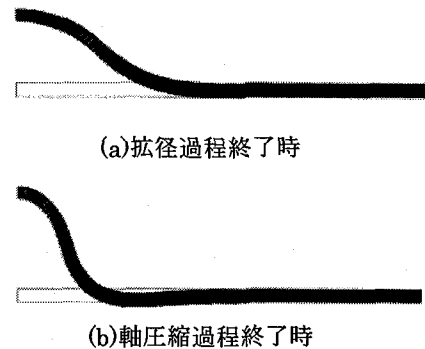


図-3 変形図

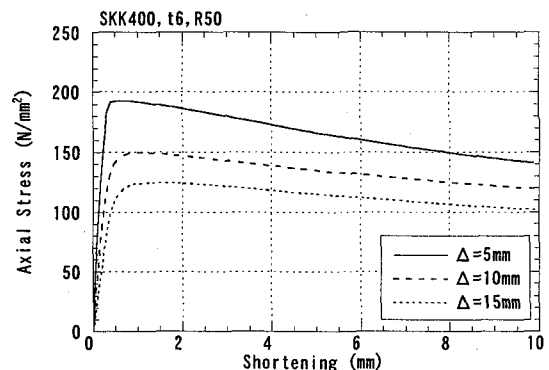


図-4 軸圧縮解析結果（R=50mm）

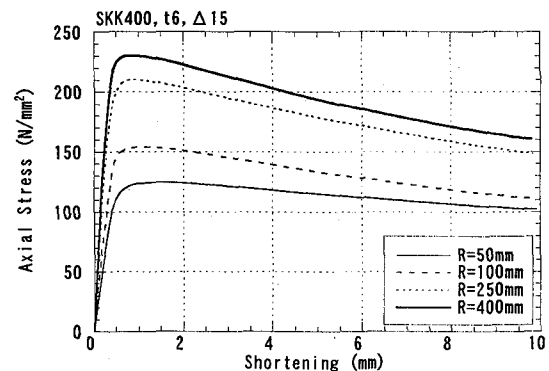


図-5 軸圧縮解析結果（ $\Delta=15\text{mm}$ ）

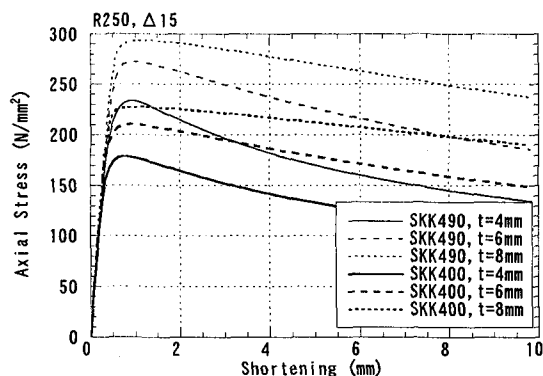


図-6 軸圧縮解析結果 (R=250mm, Δ=15mm)

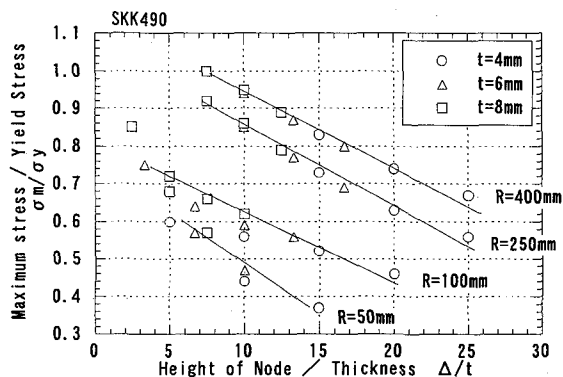


図-7 最大応力度比 (節高さ/板厚)

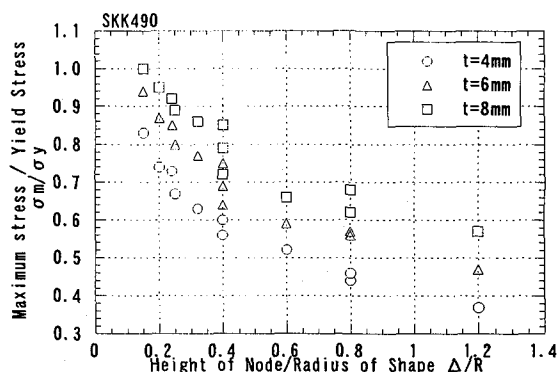


図-8 最大応力度比 (節高さ/節形状半径)

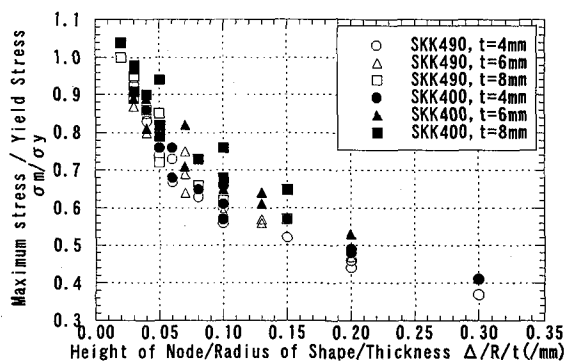


図-9 最大応力度比 (節形状パラメータ)

の軸応力度と軸縮み量の関係図を示す。図-4 は節形状半径が全て R=50mm で節高さが異なる解析結果であり、図-5 は節高さが全て Δ=15mm で節形状半径が異なる解析結果である。軸応力度は軸圧縮荷重を鋼管断面積で除した値であり、軸縮み量は載荷点の変位とした。全ての結果において節部が周方向へ膨らむモードで座屈が生じており、それ以後徐々に軸応力が低下しているが、最大軸応力度は節高さが小さいほど増大しており、Δ=5mm の最大軸応力度は Δ=15mm のその約 1.55 倍であった。また節形状半径が大きいほど最大軸応力度が増大しており、R=50mm と比較して R=400mm の最大軸応力度は約 1.85 倍であった。節高さが低く、節形状半径が大きいほど、すなわちならかな節形状であるほど最大軸応力度が増大する結果となった。

節形状半径が R=250mm、節高さが Δ=15mm と節形状が等しいが、鋼管の板厚および材料強度が異なる 6 ケースより得られた軸応力度と軸縮み量の関係図を図-6 に示す。板厚が厚くなるほど最大軸応力度は増加し、最大応力度以後の荷重低下も緩やかになっている。また材料強度が高いほど軸応力度が増大する結果となっている。材料強度の違いによる最大軸応力度の増加率は、節形状などにより異なるが SKK490 の最大軸応力度は SKK400 の約 1.2~1.3 倍となっており、ほぼ材料強度の比率と類似していた。また、図-6 中の SKK400, t=8mm の最大軸応力度は 227N/mm² であり鋼管の降伏強度の約 97% にまで達している。

以上のパラメータによる最大軸応力度の比較から、(1) 節高さが小さく、節形状半径が大きく、板厚が厚いほど、最大軸応力度が向上する、(2) 材料強度が高いほど最大軸応力度が向上する、ことが解った、これらの影響因子と最大軸応力度の関係を簡易に把握することを試みた。図-7, 8 に SKK490 シリーズで得られた節高さ/板厚および節高さ/形状半径と最大応力度比の関係図を示す。最大応力度比は最大軸応力度と降伏応力度の比率とした。図-7 に示すように、節高さを板厚で除して比較すると節形状半径ごとに相関関係が認められる。また、図-8 に示すように、節高さを節形状半径で除して比較すると板厚ごとに相関関係が認められる。そこで、節高さを節形状半径と板厚で除した値と最大応力度比の関係図を図-9 に示す。かなりのばらつきが認められるが、各パラメータの影響が除去され、ほぼ一つの相関曲線に包括できる可能性を示している。ここで、節高さ/節形状半径/板厚を節形状パラメータと呼ぶこととする。ただし、材質の違いに着目すると、降伏強度の高い SKK490 材の方が SKK400 材の結果と比較して若干小さくなる傾向にある。しかし、この結果より節形状パラメータを 0.05 (/mm) 以下に抑えることにより、最大応力度比が 0.8 倍程度確保できると考えられる。ただし、この節形状パラメータに鋼管径の影響が含まれていないことに留意する必要がある。また、本解析は軸対称モデルであるために、3 章の軸圧縮試験で述べるダイヤモンド座屈などはシミュレートすることができない。

3. 節部の模型軸圧縮試験

3. 1 試験概要

2章で述べた拡張節部の軸圧縮解析により、節形状パラメータにより最大軸応力度が変化することが解った。解析結果の確認を目的として、拡張節部を有する鋼管の軸圧縮試験を実施した。試験体は表-2 および図-10(a)に示すように、直径 355.6mm および 400mm、長さ 2D (700, 800mm) の鋼管を用いて、鋼管板厚・節高さ・節形状半径をパラメータとした 7 体とした。すなわち、DC-1 ~5 の試験体は節形状半径 $R=50\text{mm}$ と比較的節形状が急峻な形状であり、DC-6, 7 は節形状半径 $R=400\text{mm}$ となだらかな節形状とした。ただし、DC-5 は鋼管寸法、節高さおよび節半径が DC-1 と同じであるが、節長さを 1.5 倍とした試験体である。鋼管材料は DC-1 ~5 には市販の電鍮管 (SKK400) を使い、DC-6, 7 は厚板 (SM490) を所定の板厚に削りだした後、板巻き加工により作成した。載荷試験は、5000kN 構造物試験機により鋼管端部に直接鉛直荷重を載荷し、図-10(b)に示すように載荷荷重、500mm 区間の軸縮み量および鋼管節部のひずみの計測を行った。

DC-7 試験体作成段階において、拡張前と拡張後の鋼管より素材試験片を切り出し、材料試験を実施した。図-11 に材料試験で得られた応力-ひずみ関係の一例を示す。素管の材料試験結果より得られた降伏強度、引張強さおよび破断伸びは 381.7 N/mm^2 , 552.8 N/mm^2 , 26.5% であるのに対し、拡張後の結果は各々 431.6 N/mm^2 , 584.8 N/mm^2 , 21.7% であった。鋼管は厚板の板曲げ加工により作成したために若干降伏棚が短い明確な降伏棚を有している。一方、拡張後の素材試験では降伏棚が無くなり降伏強度が増加するとともに、破断伸びも短くなっている。図-11 では拡張前と拡張後の破断伸び分 (4.8%) シフトして作図しているため、ひずみ量 7% 以降において拡張後の応力-ひずみ曲線がよく一致していると言える。これは、拡張加工により鋼管に塑性ひずみが生じ、見かけの降伏強度が増加したためであり、この拡張時における加工硬化の影響が拡張節部の軸耐力増加に影響を与えたと考えられる。

3. 2 試験結果

(1) 荷重-縮み量関係

軸圧縮試験により得られた軸圧縮応力度と軸縮み量の関係図を節形状半径の小さな DC-1 ~5 と節形状半径の大きな DC-6, 7 に分けて図-12, 13 に示す。軸圧縮応力度は載荷荷重を鋼管断面積で除した値である。節形状半径の小さい DC-1 ~5 の試験では、軸圧縮応力度の増加に伴い節部の面外変形がしだいに増加し、最大荷重に達した。しかし、節高さの小さい DC-2 を除いて、最大荷重以降の荷重低下は比較的ゆるやかであった。板厚が等しく、節高さが 35mm , 10mm と異なる DC-1, 2 を比較すると、最大軸応力度は節高さが低い DC-2 が DC-1 の約 1.8 倍となっており、初期の軸剛性も向上していることがわかる。節

表-2 軸圧縮試験体諸元

試験体	鋼管径 D (mm)	板厚 t (mm)	節高さ Δ (mm)	節半径 R (mm)	パラメータ $\Delta/R/t$
DC-1	355.6	6.4	35	50	0.109
DC-2	355.6	6.4	10	50	0.031
DC-3	355.6	11.1	22	50	0.040
DC-4	355.6	4.5	35	50	0.156
DC-5	355.6	6.4	35	50	0.109
DC-6	400.0	4.0	10	400	0.006
DC-7	400.0	4.0	22	400	0.014

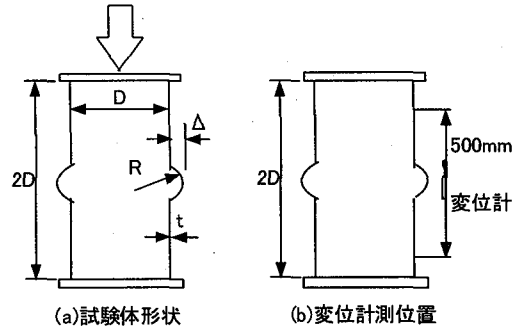


図-10 試験体形状図

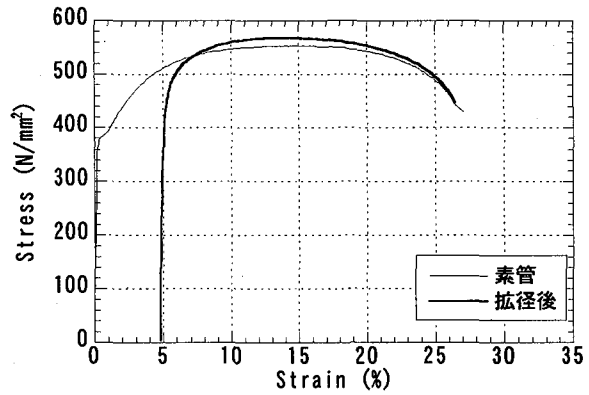


図-11 素材引張試験結果 (DC-7)

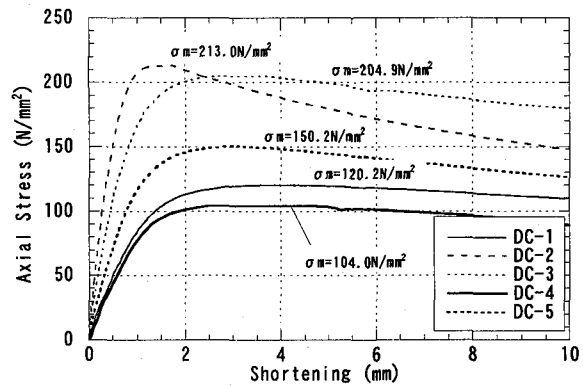


図-12 軸応力度-縮み量関係 (R=50mm)

形状がほぼ等しく、鋼管の板厚が 6.4mm と 4.5mm と異なる DC-1, 4 を比較すると、最大軸圧縮応力度は、板厚が厚い DC-1 が約 1.16 倍高い結果であった。これらの傾向は、数値解析により得られた傾向と同じである。DC-1 ~5 の鋼管材料は SKK400 材であるが、実降伏強度は約 340 N/mm^2 とかなり高いために、最大応力度比の評価が困難である

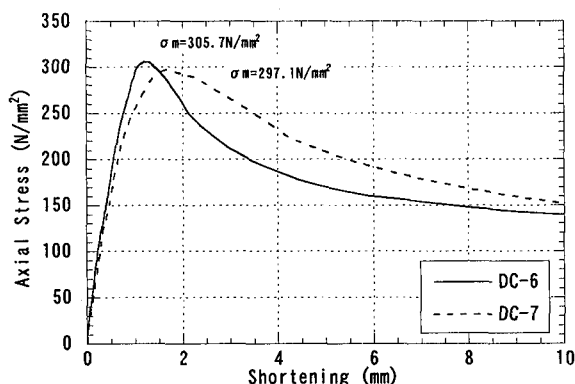


図-13 軸応力度-縮み量関係 (R=400mm)

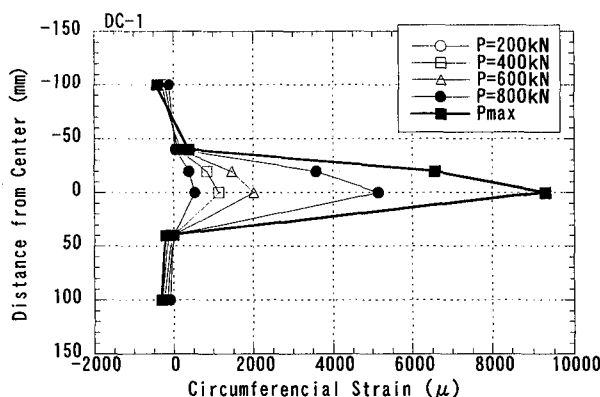
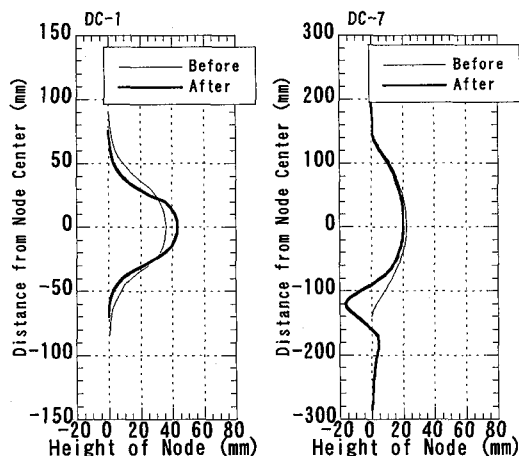


図-15 周方向ひずみ分布 (DC-1)



(a) DC-1

(b) DC-7

図-14 座屈波形

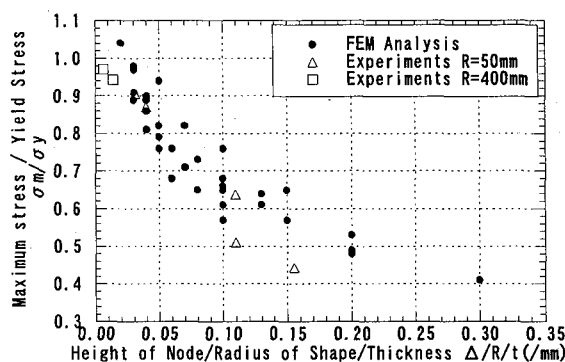


図-16 最大軸応力度比

が、最大軸応力度が最も高い DC-2 試験において規格降伏強度に対する比率は 91%であり、実降伏強度に対する比率は 62%となった。

節形状半径が大きくなだらかな節形状を有する試験 (DC-6, 7) では、最大軸圧縮応力度は各々 306, 297N/mm² とほぼ降伏応力度近くまで達したが、その後、節部の座屈により急激に耐力を消失した。しかし、DC-1~5 の座屈モードは節部が周方向に均等に突出するモードであるのに対し、DC-6, 7 では節部において外側への突出と内側へのへこみが周方向に交互に発生する、いわゆるダイヤモンド座屈のモードが生じた。したがって、節高さによる最大軸応力度の違いは明確に出ていないが、規格降伏強度および実降伏強度に対する最大応力度比は各々 93~95%と 78~80%であり、節形状をなだらかにすることによりほぼ軸降伏強度を確保できることが確認できた。

(2) 鋼管ひずみ挙動

図-14に DC-1, 7 試験体の軸圧縮試験の前後における節形状を歯型ゲージにより計測した結果を示す。DC-1 試験では数値解析で得られたのとはほぼ同様に、節部の膨らみが増大し座屈が生じており、外側のみに座屈波形が生じている。これは節形状半径の小さい DC-2~5 でも同じような傾向であった。一方、DC-7 は径厚比が大きいため

に外側への座屈と内側への座屈が軸方向と周方向に交互に生じている。このようなモードは軸対称モデルでの数値解析では得られない挙動である。

図-15 に DC-1 試験体の各荷重ステップで得られた鋼管の周方向ひずみ分布図を示す。軸圧縮力の増大に伴い、節部の周方向に引張ひずみが卓越して生じていることが解る。この傾向は全ての試験で同様であり、最大荷重状態では約 9000μ のひずみに達していた。このことから節部においては、軸力の増大に伴い周方向に降伏することにより座屈が進行することが解る。

(3) 拡張節部の軸耐力

図-16 は軸圧縮試験で得られた、節形状パラメータ (節高さ/節形状半径/板厚) と最大軸応力度比の関係を数値解析結果と比較して節形状半径ごとに示す。実験に用いた電縫管は製造過程において既に塑性加工を受けており、実降伏強度はかなり高くなっているため、最大軸応力度比は規格降伏応力度との比較とした。素材の材料特性が異なるために数値解析結果との直接的な比較は難しいが、節高さが小さく板厚が厚いほど、また節形状半径が大きくなるやかな節形状ほど最大応力度比は上昇する傾向である。また、節形状パラメータを 0.05 以下に設定することにより、拡張節部の軸耐力は鋼管の降伏強度の

ほぼ 80%を確保することができると考えられる。ただし、薄肉鋼管の場合には拡張節部でダイヤモンド座屈が生じるために、急激な耐力低下に至ることに留意する必要がある。

4. 拡張節の模型ずれ止め試験

4. 1 中掘り鋼管杭の先端支持力

拡張節部のコンクリートとの先端根固め部におけるずれ止め特性の把握を目的として、コンクリートを充填した模型節付き鋼管の押し抜きせん断試験を実施した。試験概要を説明する前に、中掘り鋼管杭の先端支持力の考え方を述べる。

中掘り鋼管杭の先端根固め部は、一般に圧縮強度 20N/mm^2 のセメントミルクを高圧噴射し、現場の土砂と攪拌混合により固結させたソイルセメントで築造される。この時の施工機械、施工管理方法により中掘り鋼管杭の支持力が決められている。道路橋基礎杭では、道路橋示方書・同解説の下部構造編³⁾において、セメントミルク噴出攪拌方式の中掘り杭工法における砂れき層の杭先端の極限支持力として式(1)で定められている。一方、建築基礎杭では、施工方法ごとに旧建築基準法の規定に基づく大臣認定によりその支持力が認められており、中掘り鋼管杭工法の一つである TN 工法の極限支持力は式(2)として認定を取得している⁴⁾。

$$R_p = q_d \cdot A_p = 20N \cdot A_p \tag{1}$$

$$R_p = \alpha \cdot N \cdot A_p = 25N \cdot A_p \tag{2}$$

ここで、 N : 杭先端の平均 N 値、 A_p : 杭先端面積を示す。すなわち、先端根固め部はこの極限支持力以上の地盤強度が求められることとなる。最大の地盤強度となるのが、式-2 の N 値=60 の時、 $25N=1500(\text{tf/m}^2) \approx 15(\text{N/mm}^2)$ となり、地盤の軸圧縮強度は 15N/mm^2 となる。

4. 2 試験概要

コンクリートを充填した模型節付き鋼管の押し抜きせん断試験の試験体は、鋼管杭下杭の径厚比は一般的に 1 ～ 2%であることを考慮して、直径 355.6mm、板厚 6.4mm と直径 400mm、板厚 4.0mm の 2 種類の鋼管を用いた。試験体の種類は、表-3 に示す節高さ・節形状半径・節段数を異なる 8 体である。表中の DS-3 は DS-1 と同じ節形状半径を有するが、節の軸方向長さを DS-1 の 1.5 倍と長くすることにより節内部コンクリートのせん断面積を大きくした試験体である。また、DS-4、7、8 は 2 段および 3 段の節を設けた試験体であり、節を複数段配置した場合にずれ耐力の累加が成立するかの確認を目的とした。なお、複数の節は試験体長方向に均等に配置し、DS-4、7、8 の節間隔 L_n は各々 190mm、250mm、400mm とした。また、節形状は DS-1 ～ 4 試験体で節形状半径を $R=50\text{mm}$ とし、DS-5 ～ 8 試験体では節形状半径 $R=400\text{mm}$ とした。また、節高さに

おいては、中掘り鋼管杭のフリクションカッターの最大厚さが 22mm であることを考慮して、最大節高さを 22mm に設定した。

鋼管内のコンクリートは現場生成ソイルセメントを想定し、前節で説明した通り、設計基準強度 15N/mm^2 のコンクリートを充填した。コンクリートの打設は、ブリージングの影響を考慮して試験体下側より打設し、鋼管内面には表面付着を除去するために、グリースを塗布した後、油紙を配置した。押し抜きせん断試験の荷重方法は、図 17 に示すように、鋼管内径と同径の荷重ベース上に試験体を設置し、鋼管上部より軸力を荷重することにより、押し抜きせん断力を荷重した。試験に際しては、荷重荷重、試験体下端における鋼管とコンクリートの相対ずれ量および鋼管ひずみの計測を行った。

4. 3 試験結果

(1) 荷重—ずれ量関係

節形状半径の小さい DS-1 ～ 4 試験体により得られた、軸応力度と相対ずれ量の関係図を図-18 に示す。節高さが

表-3 ずれ止め試験体諸元

試験体	鋼管径 D (mm)	板厚 t (mm)	節高さ Δ (mm)	節半径 R (mm)
DS-1	355.6	6.4	22	50
DS-2	355.6	6.4	10	50
DS-3	355.6	6.4	22	50
DS-4	355.6	6.4	22+22	50
DS-5	400.0	4.0	10	400
DS-6	400.0	4.0	22	400
DS-7	400.0	4.0	10+10+10	400
DS-8	400.0	4.0	10+22	400

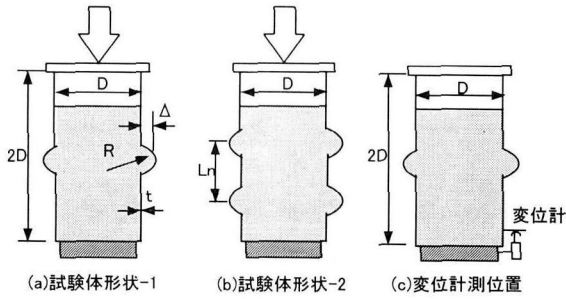


図-17 試験体形状図

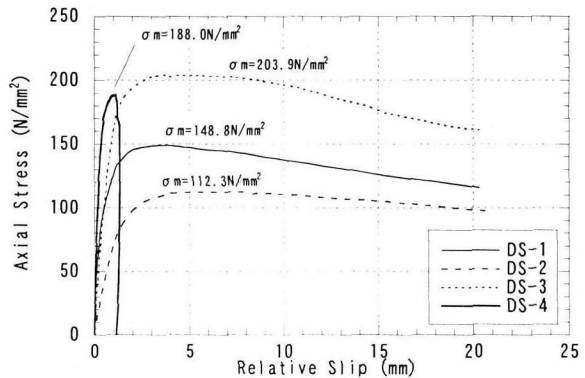


図-18 軸応力度—相対ずれ量関係 (R=50mm)

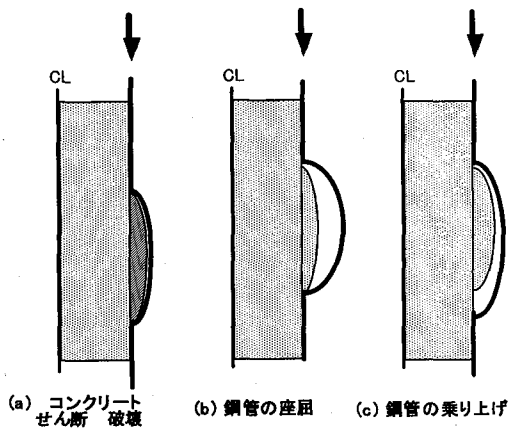


図-19 拡張節ずれ止めの破壊モード

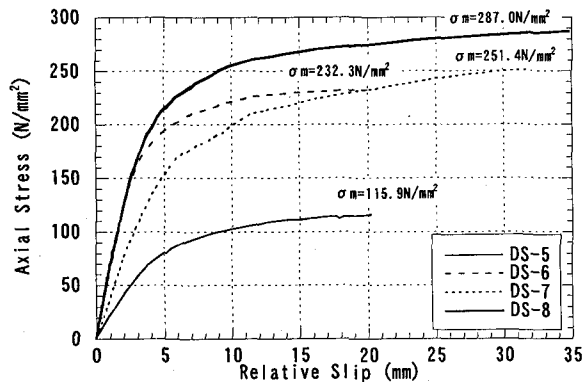
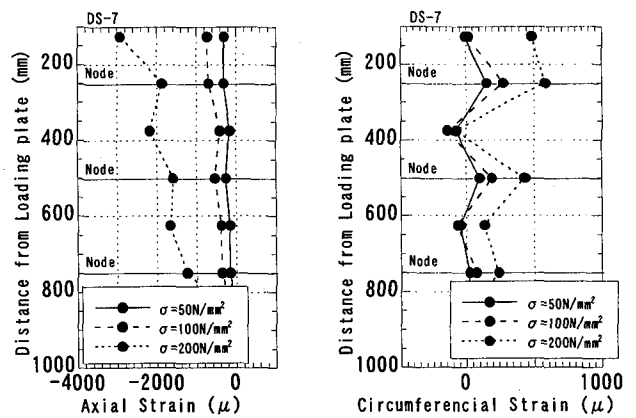


図-20 軸応力度—相対ずれ量関係 (R=400mm)

異なる DS-1, 2 試験における最大応力度は $149, 112 \text{ N/mm}^2$ であり、節高さが高いほど最大応力度は向上しており、節部コンクリートのせん断破壊により最大値に達した後、徐々に荷重を低下した。節高さが DS-1 と等しいが節長さを 1.5 倍長くして、節部コンクリートのせん断抵抗面積を大きくした DS-3 試験の最大応力度は 204 N/mm^2 と DS-1 の約 1.37 倍となった。この試験体の破壊モードはコンクリートのせん断破壊ではなく、節部コンクリートを鋼管が乗り上げるによりずれ量が增大し最大応力度に達した。また、節高さ 22mm の節を 2 段配置した DS-4 試験では、軸応力度が 188 N/mm^2 に達した時に上段節部で鋼管の座屈が生じ、最大荷重に至った。初期のずれ剛性に着目すると、節高さが小さい方がずれ剛性が小さく、また 2 段配置することによりずれ剛性が増加する傾向にある。なお、図-18 の DS-4 の荷重—ずれ量関係で急激に荷重が低下しているのは、ずれ量を試験体下部で計測しているために、載荷変位が増大しても上段の節部で座屈が生じ、試験下部にずれが生じなかったためである。

以上の試験結果より、拡張節のずれ止めは図-19 に示す (1) 節部内部コンクリートのせん断破壊、(2) 節部鋼管の座屈、(3) 節部鋼管の乗り上げ、の 3 つの破壊モードが存在することが解った。すなわち、節形状の長さが短く、コンクリートのせん断抵抗面積が小さい場合にはコン



(a) 軸ひずみ分布 (b) 周ひずみ分布

図-21 鋼管のひずみ分布図 (DS-7)

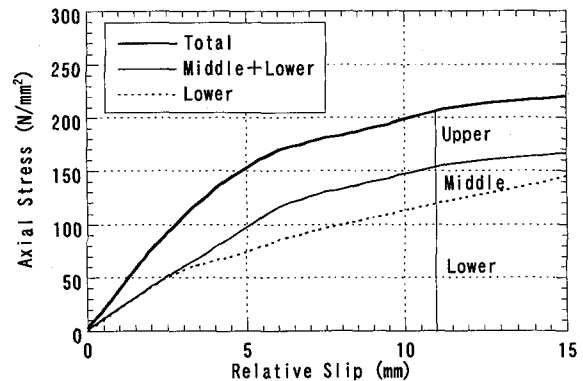


図-22 節部の荷重分担 (DS-7)

リートのせん断破壊に至り、節形状の長さが長くなだらかな節形状の場合には鋼管の乗り上げが生じる。また、複数段の節を配置した場合に鋼管の作用軸応力度が高くなると、鋼管の座屈が生じることとなる。

節形状半径が $R=400 \text{ mm}$ の DS-5~6 試験で得られた軸応力度と相対ずれ量関係を図-20 に示す。1 段の節で節高さが異なる DS-5, 6 試験の最大応力度は各々 $116, 232 \text{ N/mm}^2$ であり、節形状半径 50mm の試験結果より若干高い値を示した。また、この試験では節形状がゆるやかであるために、コンクリートのせん断破壊に至らず、鋼管の乗り上げが生じたために明確な最大応力度を示さず、相対ずれ量が 20mm に達しても安定したずれ耐力を有している。複数段配置した DS-7, 8 でも全て鋼管の乗り上げによりずれが生じており、明確な最大耐力には至っていない。実験で得られた最大応力度は $251, 287 \text{ N/mm}^2$ であり、1 段の最大応力度の単純累加と比較して各々 72%, 82% であった。また、ずれ剛性に着目すると、節形状半径が小さな DS-1~4 と比較して、かなりずれ剛性が小さいが、節の高さ、節段数の増加に伴い、ずれ剛性が大きくなる傾向にある。

(2) ひずみ挙動

図-21 に節を 3 段配置した DS-7 試験の各荷重ステップで得られた、鋼管の軸ひずみ分布、周ひずみ分布を示す。

節頂部の軸ひずみには面外ひずみが生じているために軸ひずみが不連続となっているが、節間のひずみでは節部で軸力を徐々に伝達していることがわかる。また、周ひずみでは、節頂部で引張ひずみが卓越しており、このことから拡張節部の鋼管が周方向に拡張に、節部を乗り上げている状況が類推できる。

図-22 に、節高さ 10mm の節を 3 段配置した DS-7 試験における相対ずれ量と各節部の負担応力度関係を示す。各節部の負担応力度は図-21 (a) に図示した鋼管の軸ひずみより、節上部の鋼管一般部に作用している軸応力度を算定し、その差分を各節部の負担応力度とした。荷重レベルの増大に伴い荷重分担は変化するが、下段の負担が最も大きく、次に上段の負担が大きく、中間の節部の荷重分担が小さい結果となった。このように複数の節を多段に配置すると、各節における荷重分担が異なるために、1 段の節の単純累加耐力には至らないと考えられる。

(3) ずれ耐力

コンクリートの一面せん断破壊に至った DS-1, 2 試験体において、最大荷重をせん断面積で除すことにより、コンクリートの一面せん断強度を算定すると、各々 6.16, 6.40N/mm² であり、コンクリート強度との比率は各々 0.47, 0.49 であった。一方、コンクリートの一面せん断破壊に至らなかった DS-3, 4 のコンクリート強度比は各々 0.39, 0.26 であり、せん断抵抗面積を大きくすることにより、コンクリートのせん断破壊を避けることができると考えられる。

一方、鋼管の乗り上げによりずれが生じた試験では、周方向ひずみ分布からも明らかのように、節頂部より上側の鋼管が周方向に拡張し、節部コンクリートを乗り上げるにより、ずれが生じている。この時に鋼管が加工硬化により強度が増大するためにずれが生じても荷重が増大すると考えられる。したがって、ずれ耐力は鋼管の節高さが高いほど、加工硬化の影響により向上し、節長さが長く、鋼管板厚が厚いほど、乗り上げに伴う鋼管の拡張の抵抗面積が増加し、ずれ耐力が上昇すると考えられる。そこで、鋼管の乗り上げが生じた DS-3 および DS-5～8 に対して、節高さと節長さと鋼管板厚の積と最大応力度の関係図を図-23 に示す。この指標が増加するほどほぼ線形に最大軸応力度が増大することが解った。

5. 拡張節の実大構造試験

5. 1 試験概要

前章までの知見を活かして、実大サイズにおける拡張節のずれ止め効果の確認試験を実施した。試験体は、表-4、図-24 に示す 3 体とし、鋼管径 800mm,t=10mm (SKK490) に節形状半径 R=920mm、節高さ Δ=22mm の節形状を形成した試験体とし、非充填鋼管部材の軸圧縮試験 (1 体) と充填鋼管の押し抜き試験 (2 体) の計 3 体とした。節形状の選定においては、節高さはフリクシ

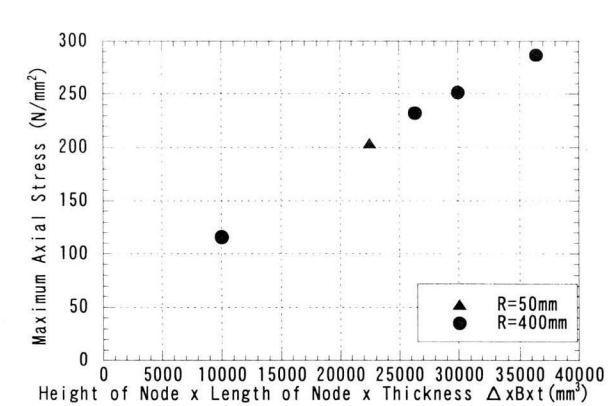


図-23 乗り上げ破壊の最大応力度

表-4 実大試験体諸元

試験体	鋼管径 D (mm)	板厚 t (mm)	節高さ Δ (mm)	節半径 R (mm)
RT-1	800.0	10.0	22	920
RT-2	800.0	10.0	22	920
RT-3	800.0	10.0	22+22+22	920

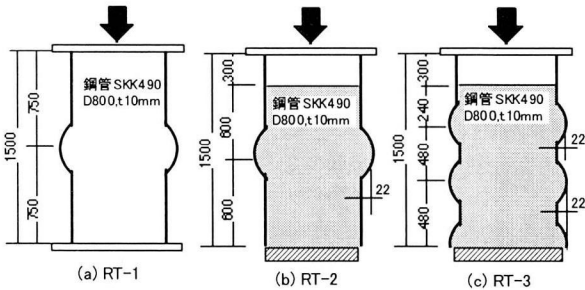


図-24 試験体形状図

ョンカッターの厚さ制限を考慮して 22mm とし、拡張節部での座屈を抑制するために節形状パラメータ Δ/R/t=0.0024/mm とした。ずれ止め試験体は、節が 1 段の試験と 3 段の試験としたが、節部で乗り上げが生じた時に抵抗するのは節波形の中で頂部より上側であることを考慮して、最下段の節では半波長とした。

事前の予備試験体で拡張節加工を行い、鋼管一般部および拡張節部より試験片を切り出し、素材引張試験を実施した。鋼管一般部の降伏強度、引張強さおよび破断伸びは各々 331N/mm², 533N/mm², 40.3% であるのに対し、拡張節部の降伏強度、引張強さおよび破断伸びは各々 436N/mm², 561N/mm², 29.2% であった。すなわち、鋼管を 5.5% 拡張することにより鋼材が加工硬化を生じて降伏強度が 30% 増大していた。ずれ止め試験体は、鋼材加工後に鋼管内に呼び強度 15N/mm² のコンクリートを充填した。試験日における強度および静弾性係数は各々 RT-1 試験体で 19.2 N/mm², 2.895x10⁴ N/mm², RT-2 試験体では 20.1 N/mm², 2.874x10⁴ N/mm² であった。

なお、鋼管の内面付着は未処理とし、コンクリートの

打設は、節部でのブリージングの影響を極力避けるために試験体の下側より打設した。

5. 2 軸耐力試験結果

鋼管単体の軸圧縮試験で得られた軸応力度—縮み量関係を図-25 に示す。軸縮み量は、節部を含む 800mm 区間の軸縮み量であり、軸応力度は載荷荷重を鋼管断面積で除した値である。載荷試験は、鋼管応力度が 200N/mm² に達した時に一旦徐荷した後、最大荷重まで載荷を行った。軸応力度が 250N/mm² 当たりより剛性が徐々に低下し、軸縮み量が 2.2mm に達した時に最大軸応力度 $\sigma_m=307.4\text{N/mm}^2$ を記録し、鋼管の座屈により急激に耐力を低下した。座屈は、節部を含む約 700mm 区間でダイヤモンド座屈を生じており、模型試験の薄肉タイプとはほぼ同様の傾向であり、鋼管のほぼ降伏強度まで軸耐力を保持することが確認できた。

5. 3 ずれ止め試験結果

(1) 相対ずれ量関係

ずれ止め試験により得られた軸応力度—相対ずれ量の関係図を図-26 に示す。節が 1 段の RT-2 試験体では、軸応力度 26.1N/mm² まではほとんどずれが生じていないが、その後相対ずれが生じた。この時点で鋼管の表面付着が切れたと考えられる。軸応力度 120N/mm² 当たりよりずれ剛性が徐々に低下し、軸応力度が 157.7N/mm² で相対ずれが 18mm に達し、ほぼ荷重増加が見込めなかったので試験を終了した。節を 3 段配置した RT-3 試験体では、RT-2 と同様に軸応力度 23.8N/mm² まではほとんどずれが生じていないが、その後ずれが生じて、軸応力度 250N/mm² 当たりよりずれ剛性が徐々に低下し、軸応力度 324.4N/mm² で相対ずれが 12mm に達した時点で試験を終了した。試験体の破壊モードは鋼管の乗り上げが生じており、破壊後鋼管を撤去し内部コンクリートの状態を確認したが、コンクリートの損傷は認められなかった。3 段配置した RT-3 の最大軸応力度は、RT-1 の最大軸応力度から表面付着分を除いた累加耐力の約 83% であり、節を多段に配置することにより鋼管のほぼ軸降伏強度までずれ止めとして機能することが確認できた。

(2) ひずみ挙動

図-27 に RT-3 試験の各荷重ステップで計測した鋼管の軸ひずみ、周ひずみ分布図を示す。軸ひずみ分布図では、節位置で不連続となっているが、節頂部および節底部では鋼管の乗り上げに伴い面外ひずみが生じている。周方向ひずみ分布図に着目すると、節頂部の上側の鋼管に大きな引張りひずみが生じていることから、鋼管の周長が拡大して乗り上げが生じていることがわかる。

図-28 に軸ひずみ計測データより各節部の荷重分担を算定し、軸応力度が 200N/mm² に達するまでの相対ずれ量と各節部の荷重分担の関係を示す。本試験結果では、下段の負担が若干小さいが、図-22 で示した模型試験結果と比較して、荷重分担が均等化されている。これは、節形状がなだらかである場合には、各節部のずれ剛性が小

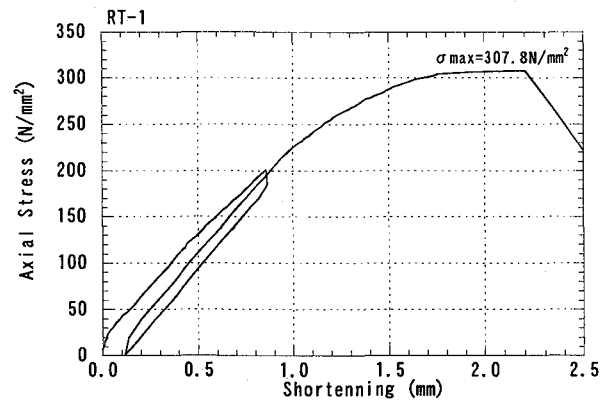


図-25 軸圧縮試験結果

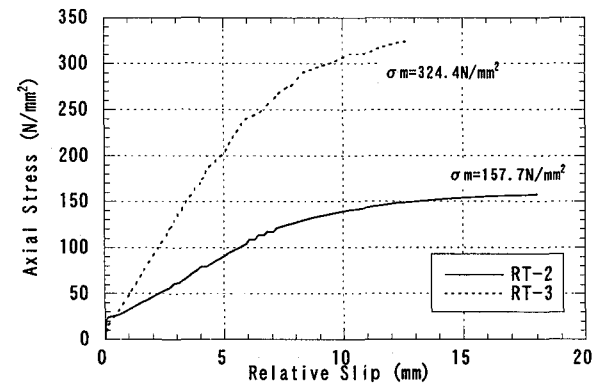
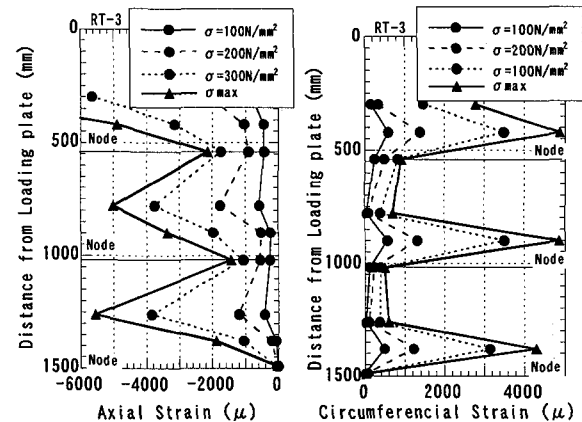


図-26 軸応力度—相対ずれ量関係



(a) 軸ひずみ (b) 周ひずみ

図-27 鋼管ひずみ分布

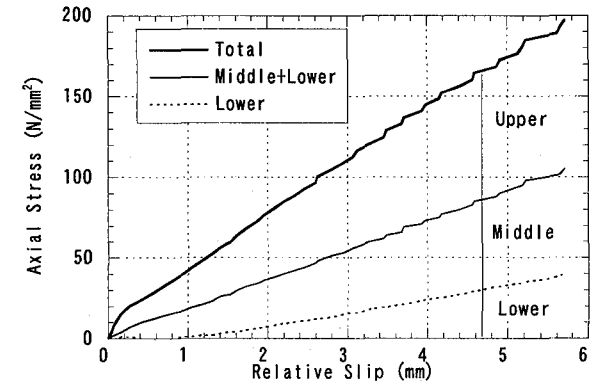


図-28 節部の荷重分担 (RT-3)

さいために、ずれ止めの荷重分担が均等化されたためであると考えられる。すなわち、節部の荷重分担には、ずれ剛性に影響をおよぼす節形状や鋼管の径厚比および節間隔などにより影響を受けると考えられる。

6. まとめ

中掘り鋼管杭先端根固め部において、拡張節のずれ止めとしての適用性の検討を目的として、基本的な性能試験を実施した結果、以下の知見を得た。

拡張節部の形状と軸耐力特性に関しては、

- (1) 拡張節部に軸圧縮力が作用すると、節部の周長が増加することにより、座屈が生じるが、その座屈軸応力度は鋼管板厚が厚く節高さが小さいほど、また節形状がなだらかなほど高くなる。
- (2) 拡張節部の座屈軸応力度は、節形状パラメータ（節高さ／節形状半径／板厚）で整理することにより一定の傾向が得られ、節形状パラメータを 0.05 以下に設定することにより、座屈軸応力度は鋼管の降伏強度のほぼ 8 割を確保することができる。

また、拡張節部のコンクリートとのずれ止め特性に関しては、

- (1) 拡張節と充填コンクリートとのずれ止めとしての破壊モードは、鋼管の座屈、コンクリートのせん断破壊、鋼管の乗り上げのモードが生じる。

(2) 拡張節の形状をなだらかにすることにより、コンクリートのせん断抵抗面積が増大し、コンクリートのせん断破壊耐力を向上することができ、鋼管節部の乗り上げ破壊に移行する。

(3) 鋼管の乗り上げによるずれ耐力は、節高さが高く、なだらかな形状であるほど向上する。

(4) なだらかな拡張節を複数段配置することにより、ずれ止め耐力の累加がほぼ可能であり、鋼管の降伏応力度までのずれ耐力の確保が可能である。しかし、節部における荷重分担は節形状や鋼管の径厚比などが影響すると考えられる。

参考文献

- 1) 大貫 博史, 寺崎 滋樹: 中掘り鋼管杭工法の現状と施工事例, 基礎工, Vol. 28, No. 12, p60-64, 2001
- 2) 鋼管杭協会: 鋼管杭の中掘り杭工法 (セメントミルク噴出攪拌方式) 施工要領, 2000
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, 1996
- 4) 建設省: TN工法, 建設省東住指第 35 号, 2001

(2001 年 9 月 14 日受付)