

論文 節を有する杭の軸力載荷時の挙動に関する研究

高橋 豪^{*1}・杉本 訓洋^{*2}・藤本 効^{*3}・黒川 洋一^{*4}

要旨：既製コンクリート杭体の設計において、節の有無の影響は考慮されていない。一方、節を有する杭体においては節付け根部に圧縮応力集中現象が生じることが報告されており、その影響を杭体の設計において無視出来ないもの考える。本研究は、節の大きさをパラメータとし非線形 FEM 解析と一方向載荷試験を行い、節の影響を確認した。その結果、節部が拘束効果を有すること、節の大きさと拘束効果に関連があること、節の近傍にひずみ集中部が生じることが明らかとなった。

キーワード：節付き既製コンクリート杭、応力集中、軸力載荷試験、非線形 FEM 解析

1. はじめに

節付き既製コンクリート杭（以下、節杭）は、節の存在により高い支持能力が期待出来るため、摩擦杭だけではなく支持杭としても使用される場合が増えている¹⁾。そのため、軸応力を受けた杭体挙動を知ることが重要である。ところで、既往の研究において節付け根部に圧縮応力集中部が生じることが確認されている^{2),3)}。しかしながら、現状では杭体の設計においてそれは特に考慮されていない。さらに、杭体の曲げ耐力が圧縮側コンクリートにより決まる場合、その応力集中現象を無視する危険側評価となることが危惧される。これらのことから、節付け根部の挙動確認は重要であると言えよう。本研究は、節付け根部近傍の力学的性状確認を目的として載荷実験と解析を行うものである。本報では、予備検討として行った非線形 FEM 解析と、一軸圧縮載荷実験について述べる。

2. 解析

ここでは、実験に先立って行った非線形 FEM 解析による予備的検討について述べる。

解析対象（以下、解析試験体）は、節杭の軸部径および厚さは共通とし、JIS 規格寸法ものを標準（A-1）とし

て節部の大きさを変化させた4体のほか、節のないストレート杭を含む計5体とした。解析試験体の寸法形状を表-1、図-1に、モデル図を図-2に示す。配筋等は図に示す通りで、節部は無筋である。寸法形状は、後述する実験と同様に、軸部径 500mm の節杭を 16/25 に縮尺したものである。また対称性を考慮し、部材の 1/4 の部分（上部から見て 1/4 円のみ）をモデル化した。対称性を表現するため、1/4 円切断面の節点は、切断面の法線方向を拘束した。非線形 FEM 解析は、汎用解析プログラム「FINAL」⁴⁾で行った。鉄筋の応力度ひずみ関係はバイリニアとし、コンクリートの応力度ひずみ関係および圧縮強度後の軟化域については、修正 Ahmad モデル⁵⁾とした。なお、コンクリート強度は JIS 既製品に合わせ 85N/mm²とした。

3. 解析結果

3.1 荷重－変位関係

軸応力－軸変位関係を図-3に示す。最大荷重に至るまでの挙動に顕著な差は見られないが、初期剛性は、節部の大きい解析試験体（A-2、A-3）が他に比べ若干高くなっている。節部と軸部の軸方向変位率（ここでは、節点間距離の変化量を元の長さで除したものである）を比

表-1 解析試験体の形状寸法一覧

No.	共通項目	節部径:D2 [mm]	節高さ:h [mm]	節幅:S [mm]	節斜部幅:w1 [mm]	節頂部幅:w2 [mm]
A-S(節無し)	軸部径:D1 320mm					
A-0(節小)						
A-1(節標準)	軸厚さ:t 51.2mm					
A-2(節中)						
A-3(節大)	コンクリート 強度:Fc 85N/mm ²					

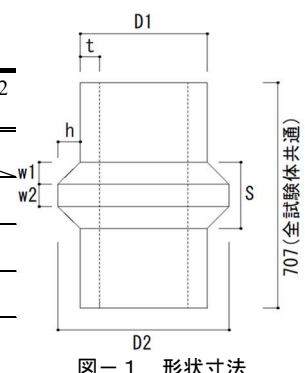


図-1 形状寸法

*1 (一財) ベターリビング (兼 横浜国立大学大学院) (正会員)

*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 准教授 博 (工) (正会員)

*3 (一財) ベターリビング 博 (工)

*4 (一財) ベターリビング (正会員)

較すると、節部の変形率が軸部より小さく、その比率は節部寸法が大きいものほど顕著であった。

3.2 節部周りの性状

節部周辺のひび割れ状況を図-4に、節頂部の要素の軸応力-主ひずみ関係を図-5に示す。節付け根部は上軸部の節付け根部の最外縁要素（7要素）を、節頂部は節頂部上部の最外縁要素（7要素）を出力対象とし、それぞれの平均値にて検討を行った。節頂部において、最小主ひずみ（圧縮ひずみ）は、概ね部材軸方向に生じ各試験体とも軸応力が 40N/mm^2 程度の時点で最大で約 $80\sim 100\mu$ である。これは、軸部ひずみ（約 1000μ ）の $1/10$ 程度以下と非常に小さく、節頂部は軸方向の応力負担に殆ど寄与していないことを示している。軸応力と節頂部周方向に生じる最大主ひずみ（引張ひずみ）の関係において軸応力 30N/mm^2 あたりから顕著な剛性変化が見られる。これは、図-4に示した縦ひび割れの発生に伴うもので、周方向の膨らみ挙動を示すものである。また、節頂部に発生したひび割れは、 50N/mm^2 では節付け根部

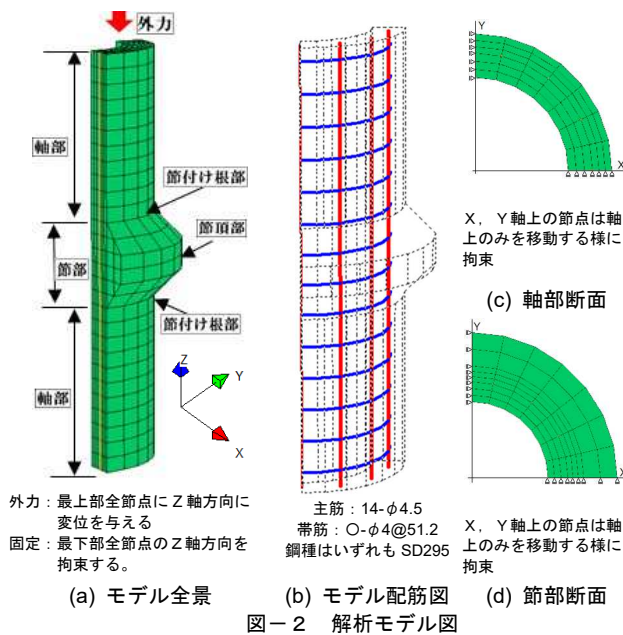


図-2 解析モデル図

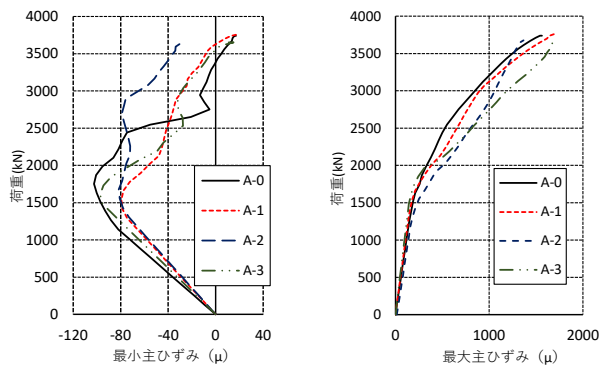


図-5 軸応力-主ひずみ関係(節頂部)

に達している。節付け根部における各軸応力レベルの最小主ひずみを表-2に、軸応力-主ひずみ関係を図-6に、節付け根部が既定ひずみ値(ここでは、圧縮強度 85N/mm^2 をヤング係数 (40000N/mm^2) で除した値, 2015μ とする)に到達した時点の最小主ひずみコンター図を

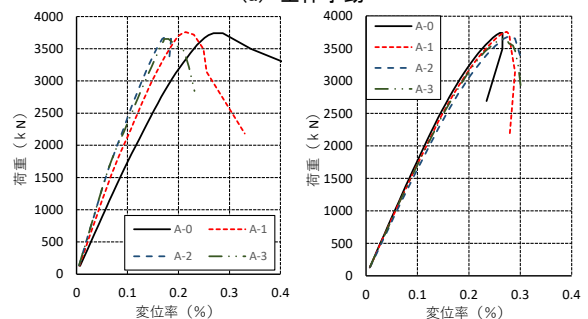
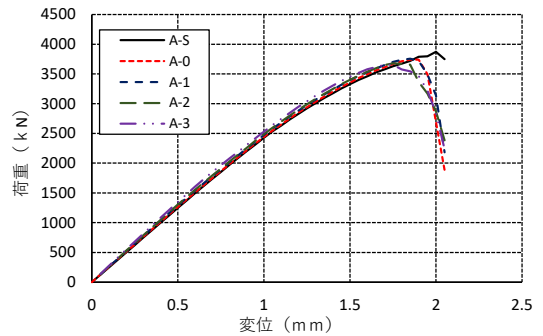


図-3 軸応力-変位関係

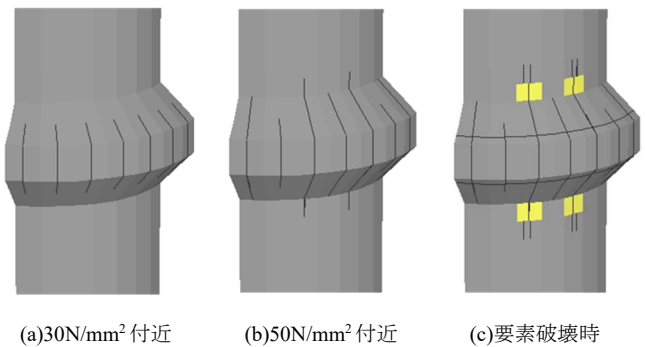


図-4 ひび割れ状況 (A-1 (節標準))

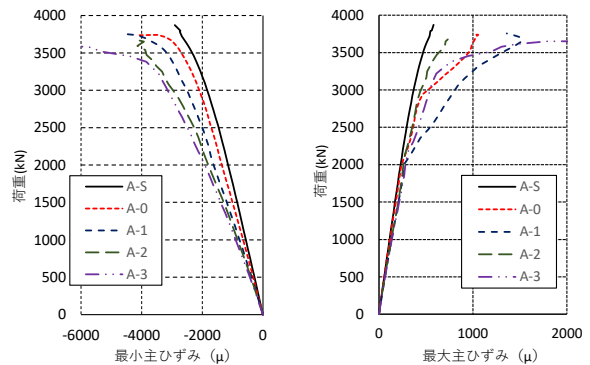
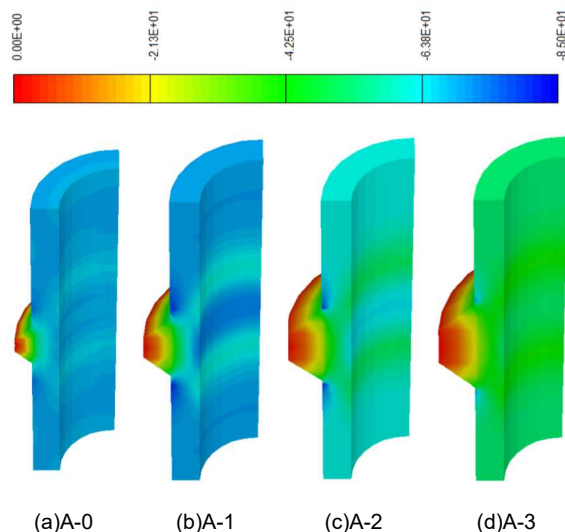


図-6 軸応力-主ひずみ関係(節付け根部)

表－2 節付け根部における最小主ひずみ一覧 [単位: μ]

軸力比	0.2(750kN)		0.3(1125kN)		0.4(1500kN)		0.5(1875kN)	
試験体	値	比率	値	比率	値	比率	値	比率
A-S	-415	1.00	-623	1.00	-834	1.00	-1050	1.00
A-0	-477	1.15	-725	1.16	-981	1.18	-1243	1.18
A-1	-558	1.35	-856	1.37	-1167	1.40	-1490	1.42
A-2	-603	1.45	-927	1.49	-1268	1.52	-1641	1.56
A-3	-651	1.57	-1000	1.60	-1240	1.49	-1742	1.66

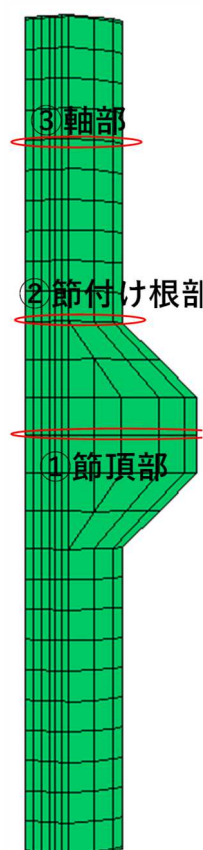


図－7 コンター図（最小主ひずみ：単位[μ]

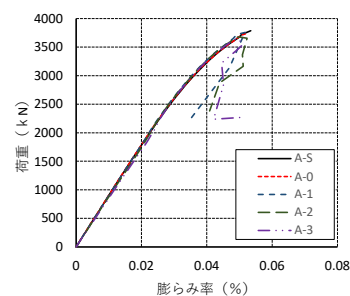
図－7に示す。節付け根部の最小主ひずみは、ストレート杭に比べ大きい。また、節が大きいほど節付け根部における圧縮応力集中が顕著となる。図－4に示すように、要素破壊（図中の黄色部分）も節付け根部から生じている。図－6に示すように、節付け根部の最大主ひずみは、ストレート杭(A-S)より若干大きい値となった。これは、節頂部に生じた縦ひび割れが付け根に進展していることが影響しているものと考えられる。図－7によると、節が小さいものほど、軸部に生じる圧縮ひずみは大きく、既定ひずみ値となる要素が発生する軸応力レベルは節の大きさと相関するものと考えられる。また、いずれの解析試験体においても、節付け根部に圧縮ひずみが集中するが、節頂部には殆ど圧縮ひずみが生じていない。

3.3 膨らみ変位

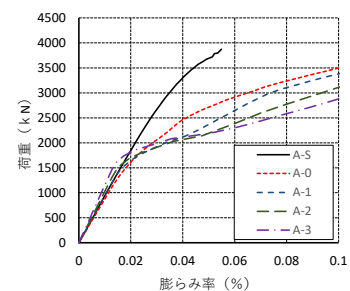
各試験体の膨らみについて、①節頂部、②節付け根部、③軸部の3断面について検討を行った。検討断面を図－8に、荷重－膨らみ率関係を図－9に示す。ここで膨らみ率は、節点の半径方向移動量を元の半径で除したものとし、各検討断面の最外縁の節点（8節点）の平均値を用いて検討を行った。節頂部の膨らみ率は、荷重が小さいレベルでは、節が大きくなるに従い、僅かながら小さくなる傾向を示した。節付け根部の膨らみ率も同様であり、より顕著となる。荷重1500～2000kN以降では、節



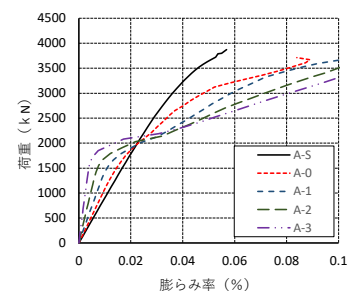
図－8 検討断面



(c) ③軸部



(b) ②節付け根部



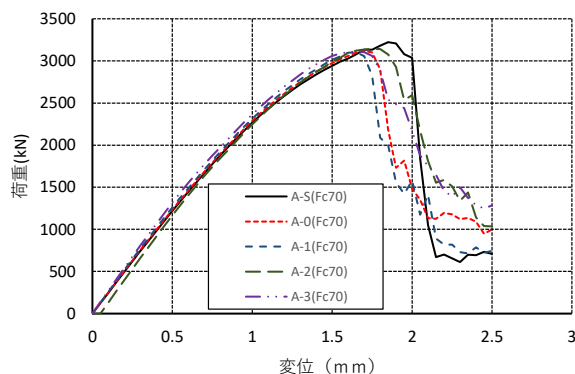
(a) ①節頂部

図－9 荷重－膨らみ率関係

頂部と節付け根部の膨らみ率は急激に増大する。これは、節頂部に発生した縦ひび割れが節付け根部および内部へと進展したことにより、拘束効果が低下することによるものと考えられる。この傾向は、3.2節で述べた節頂部の縦ひび割れ発生と整合している。これらのことから、節を有する杭は、節の影響によりストレート杭に比べ早期に損傷が現れることが示された。すなわち、圧縮力を受ける節杭の軸部は、ポアソン効果により膨らみを生じるが、節部は節内軸部の膨張により周方向の伸び変形を強制され、縦ひび割れが生じる。また、節部は軸部を拘束するため、節付け根部に圧縮ひずみ集中部が生じる。

3.4 コンクリート強度の影響

コンクリート強度の影響を確認するため、強度を70N/mm²に変えた場合の解析を行った。結果の例として、図－10に荷重－変位関係を、図－11に節付け根部における荷重－最小主ひずみ関係を示す。図－3と比較して、最大耐力に違いはあるものの、荷重－変位関係におよぼす節の大きさの影響は、殆ど違いは見られない。また、最小主ひずみにおいても、図－6と同様の傾向であり、コンクリート強度の違いによる影響は見られなかった。

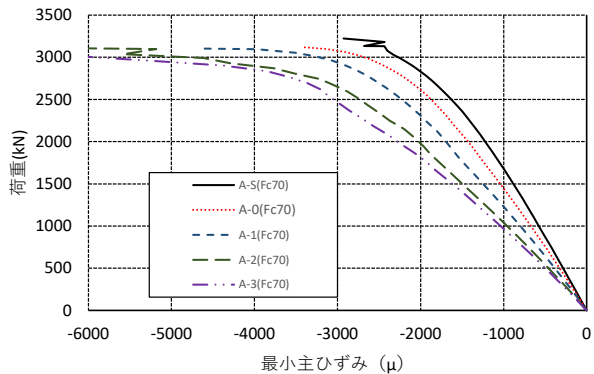


図－１０ 軸応力-変位関係(Fc70)

3.5 解析まとめ

解析結果を以下にまとめる。

- 1) 杭体全長の軸変形挙動に顕著な違いは生じない。ただし、初期剛性は、節の大きさに相関して若干高くなる。
- 2) 節頂部の最小主ひずみは、軸部に対して 1/10 程度となり、応力を殆ど負担していない。
- 3) 節頂部では、引張ひずみが周方向に生じ、軸応力 30N/mm^2 程度でひび割れが発生する。これは、節部がポアソン効果による軸部の膨らみを拘束していたことによる。
- 4) 節付け根部では、ストレート杭と比べ大きな圧縮ひずみを生じる部分が存在し、節が大きいほどその値は顕著となる。
- 5) 30N/mm^2 程度で発生した節頂部のひび割れは、その後節部全体に進展し、軸応力 50N/mm^2 近くで節付け根部に達していることから、その時点で節の拘束効果は低下しているものと考えられる。
- 6) 節頂部および節付け根部の膨らみ量は、節の大きさに相関して小さくなる傾向を示した。
- 7) 節があることで見かけの軸剛性が高くなり、節付け根部に圧縮応力が集中していると考えられる。
- 8) コンクリート強度 70N/mm^2 から 85N/mm^2 の範囲では、



図－１１ 軸応力-最小主ひずみ関係(Fc70)

強度の違いが杭体の挙動性状に影響しない。

4. 載荷実験

本章では、解析により得られた知見を確認するために、杭体を模擬した試験体に対する一軸載荷試験について述べる。

4.1 試験体概要

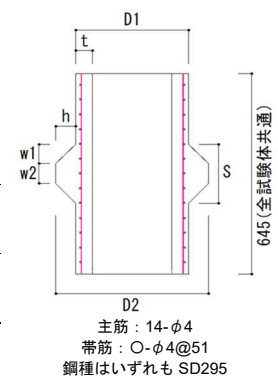
試験体は、解析試験体と同じく、軸部径および厚さは共通とし、節部の大きさを変えたものとした。表－３に試験体諸元を、図－１２に試験体図を、表－４に材料特性をそれぞれ示す。試験体数は、節寸法が異なる４体で、うち一体は無節（ストレート杭）である。

4.2 加力方法と計測項目

加力は、一方向繰返し載荷とした。繰返し荷重レベルは、コンクリート材料試験結果をもとに設定し、 $0.2\sigma_b$ 、 $\Rightarrow$ 除荷 $\Rightarrow 0.4\sigma_b \Rightarrow$ 除荷 $\Rightarrow 0.5\sigma_b \Rightarrow$ 除荷 $\Rightarrow 0.6\sigma_b$ （節付き試験体のみ実施） $\Rightarrow$ 除荷 $\Rightarrow$ 押切り載荷とした（ σ_b : 加力開始直前に行った材料試験によるコンクリート圧縮強度で 63.2N/mm^2 ）。変位は、試験体下部に取り付けた加力板から試験体標点の軸方向および水平方向（膨らみ）を計測した。なお、押切り載荷時は、代表軸方向変位以外の変位の計測は行わなかった。ひずみ計測は、鉄筋およびコンクリート表面について行った。図－１３に加力模式図を示す。

表－３ 実験試験体の形状寸法一覧

No.	共通項目	節部径:D2 [mm]	節高さ:h [h]	節幅:S [mm]	節斜部幅:w1 [mm]	節頂部幅:w2 [mm]
E-S(節無し)	軸部径:D1 320mm					
E-0(節小)	軸厚さ:t 51mm	384	32	96	32	32
E-1(節標準)	コンクリート 設計基準強度:Fc 60N/mm ²	416	48	144	48	48
E-3(節大)		480	80	240	80	80



図－１２ 試験体断面

表-4 材料特性

(a) コンクリート[単位：N/mm²]

σ_b	E_c	σ_t
63.2	3.27×10^4	3.79

σ_b :圧縮強度 E_c :ヤング係数 σ_t :割裂強度

(b) 鉄筋[単位：N/mm²]

径(鋼種)	σ_y	E_s	σ_u
D4(SD295)	392	1.83×10^5	552

σ_y :降伏強度 E_s :ヤング係数 σ_u :引張強さ

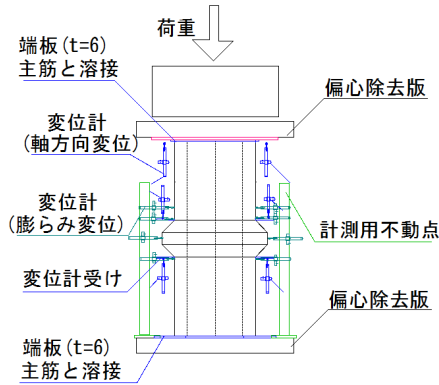


図-13 加力模式図



写真-1 試験状況



写真-2 最終破壊状況

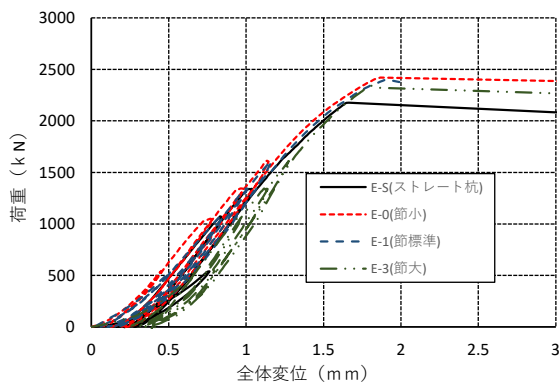
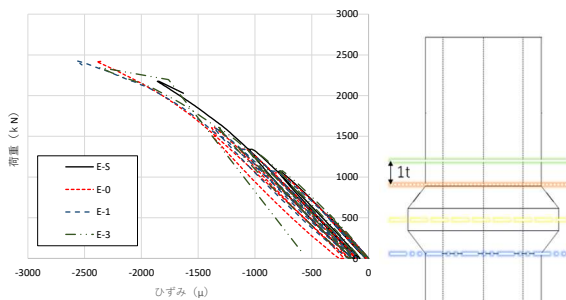
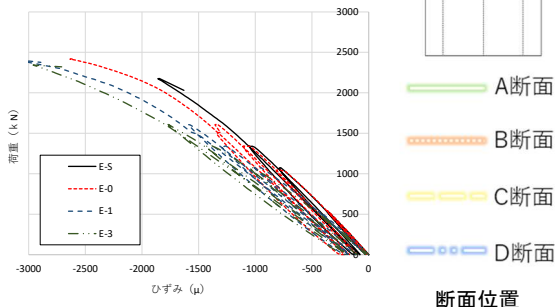


図-14 荷重-変位関係



(b) 軸部 (A断面)



(a) 節付け根部 (BD断面)

図-15 荷重-軸方向ひずみ度関係

5. 試験結果

5.1 荷重-変形関係

図-14に荷重-変位関係を、写真-1に試験状況を、写真-2に最終破壊状況を示す。節付きの試験体は、いずれも節部の爆裂破壊であった。図-14の初期変位のスリップ挙動は、全試験体で共通して見られており、加力板と試験体端板（鋼板）間のギャップによるものである。最大耐力は、節付きの試験体では節の大きさに相関して若干小さくなる傾向を示した。また、解析と同様に節部と軸部の軸方向変形率を比較すると、節部の変形率は軸部より小さく、その比率は節部寸法が大きいものほど顕著となった。しかしながら、剛性などの性状については、節の大きさの違いによる顕著な違いは確認出来なかった。なお、ストレート杭(E-S)は、最大耐力前に主筋ひずみのアンバランスが見られたことから、何らかの原因で偏心が生じていたと考えられ、結果として最大耐力が他に比べ低くなった。

5.2 節部周りの性状

材軸方向の各断面における荷重-軸方向ひずみ(コンクリート)関係を図-15に示す。A断面(軸部)における軸方向ひずみは全試験体でほぼ同じ性状を示しており、節付け根部から1t(t:軸部厚さで51mm)程度離れた個所では、軸部は節部の影響を受けていなかった。BD断面(節付け根部)における軸方向ひずみは、ストレート杭(E-S)に比べて大きく、それらの値は、節の大きさに相関し、解析で確認された挙動とよく対応していた。この性状が節付き試験体の最終破壊性状に起因していると考えられる。C断面(節頂部)では、ほぼ軸方向ひずみは発生しておらず、周方向の引張ひずみが生じていた。ストレ

ート杭(E-S)を除くすべての節付き杭試験体で、 $0.2\sigma_b$ から $0.4\sigma_b$ の荷重荷重レベルまでに、節頂部に縦ひび割れが生じていた。しかしながら、解析では節頂部の縦ひび割れは、最終的に軸部まで進展していたのに対して、実験では最終破壊に至るまで、ひび割れは節頂部でのみ確認された。さらに、解析では節の大きさに相関して縦ひび割れ耐力は高くなる傾向を示したが、実験においては節が大きいくほど早期に縦ひび割れが確認された。これらの点で解析と実験は対応していないものの、その他の挙動は解析結果と一致している。これらのことから節が大きくなるほど軸部への影響が大きく、軸部挙動に影響することが実験においても確認出来た。

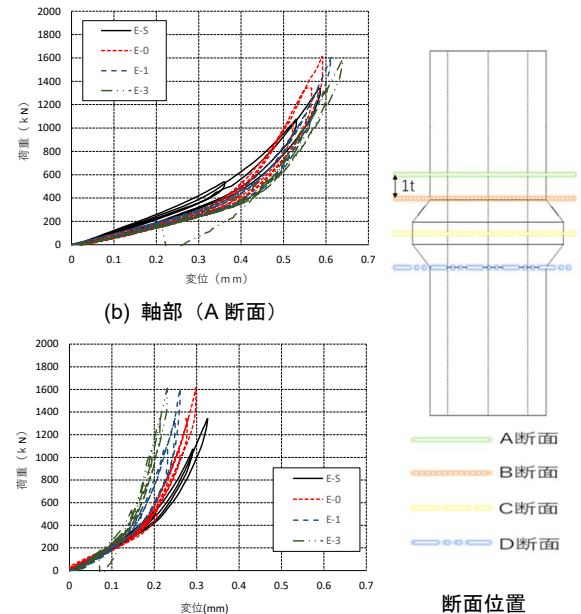
5.3 膨らみ変位について

各断面における荷重－膨らみ変位（水平方向の変位計測結果）関係を図－16に示す。A断面(軸部)においては全試験体で同様の挙動を示しており、軸方向ひずみと同様に、節付け根部から $1t$ (t :軸部厚さ)程度離れた個所では、軸部は節の影響を受けていない。一方、BD断面(節付け根部)においては、節の大きさに相関して膨らみ変位が小さくなる傾向を示した。しかし、実験ではある荷重を超えてから膨らみが増大するような傾向は見られず、解析で確認されたような、節頂部の縦ひび割れ発生前後での性状の変化は確認出来なかった。解析では縦ひび割れが軸部まで進展したが、実験ではひび割れは節頂部のみの発生であることが影響しているためと考えられる。この点に関しては解析の精度向上とあわせて今後の検討課題となる。

6. まとめ

解析および実験から得られた知見を以下にまとめ示す。

- 1) 全体の荷重-変位関係に節の影響は顕著ではない。しかし、節部の軸方向変位については、節の大きさに相関して小さくなる。
- 2) 節付け根部には圧縮応力集中部が生じ、節の大きさに相関して早期に発生する。
- 3) 実験では、節の爆裂により耐力が決定した。これは、節付け根部への圧縮応力集中に起因するものと考えられる。
- 4) 節付け根部の膨らみ変位は、節の拘束効果により、節の大きさに相関して小さくなる。
- 5) 節付け根部から、 $1t$ (t =軸部厚さ)離れた個所では、節の大きさに関わらず軸方向ひずみ、膨らみ変位ともに同様の挙動を示すことから負医師の影響が及ばないものと考えられる。



(a) 節付け根部 (BD 断面)
膨らみ変位の計測は、押切荷重前までしか行っていない
図－16 荷重－膨らみ変位関係

- 6) 節頂部は、軸力をほぼ負担していない。また、周方向に縦ひび割れが発生する。
- 7) ひび割れの性状を除き、解析は実験結果を良く一致している。

参考文献

- 1) 本間裕介, 富永晃司, 徐挺: ソイルセメント埋込み杭工法で施工された節杭の水平荷重試験, 第 39 回地盤工学研究発表会, pp. 1511-1512, 2004
- 2) 本間裕介, 小椋仁志: 拡張節杭の軸力伝達機構の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 559-560, 2003
- 3) 高橋豪, 杉本訓祥, 藤本効: 軸力を受ける節を有する杭の非線形 FEM 解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 419-420, 2022
- 4) 長沼一洋, 米澤健次, 江戸宏彰: RC 構造物の三次元繰返し FEM解析の精度向上 その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 427-428, 2003
- 5) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170,1995.8