

# 論文 場所打ちコンクリート杭に使用した高強度主筋の定着性状

篠原 保二\*1・田丸 修也\*2

**要旨:** 場所打ち杭に高強度主筋を使用し、定着板を用いることによって定着長を短くしたときの定着性状について検討するため、既往の実験結果を解析対象とした3次元有限要素法解析を行い、実験で定着破壊した試験体と比較した。さらに、定着長の新たな変数を設定し、定着長が杭耐力に及ぼす影響を検討した。定着破壊する際、杭主筋の引張力に抵抗する付着力と定着板による支圧力のうち、支圧力による負担分が大きくなり定着破壊に至ることを示した。また、定着長を長くすることで、付着力による負担分が大きくなり、最大耐力が上昇することを示した。

**キーワード:** 場所打ち杭, 高強度鉄筋, 定着性状, 機械式定着, 3次元非線形有限要素法

## 1. はじめに

中高層以上で使用される場所打ちコンクリート杭は地耐力の関係で杭径が大断面となる場合、杭底部以外の杭径を細くする拡底杭が現在広く用いられている。また、現在高層建物の多くは終局時における杭の安全性に関する検討を行うようになってきている。その結果、杭の曲げ耐力を高めるために、杭主筋量が大幅に増え、配筋施工が困難になりつつある。この過密配筋を解消するために杭主筋に対して高強度鉄筋の使用が検討されている。

筆者<sup>1)</sup>らは主筋およびせん断補強筋に高強度鉄筋を用いた場所打ち杭の短期、長期、終局時荷重下を想定した軸力における繰り返し載荷実験を行い、標準的な杭と同様の曲げ変形性能を得られることを報告した。しかし、高強度鉄筋を主筋に用いると、パイルキャップ内杭主筋の高引張応力を安全に定着させるために、定着長を長くとる必要がある。定着長を長くするとパイルキャップのせいに影響し、施工性、経済性に問題がある。この問題を解決するには、杭主筋先端に機械式定着工法による定着板を用い、定着長さを短くすることが有効であると考えられる。そこで、場所打ち杭に用いた定着板を有する高強度主筋の定着性状について検討する必要があると考えられ、筆者ら<sup>3)</sup>は、杭断面の一部を模擬し、鉄筋径、定着長、コンクリート強度、パイルキャップのせん断補強筋量、パイルキャップ寸法を変動要因とした実物大要素実験を行った。その結果、定着長を最低主筋径の30

倍は設ける必要があることや、はしあき長さ(図-2 参照)が定着性状に影響することなどを報告した。本研究では、この実物大要素実験を解析対象とした3次元有限要素解析を行い、実験結果との整合性を検討した。さらに、解析上で定着長の新たなパラメーターを設定し、定着長が最大耐力に及ぼす影響を検討した。

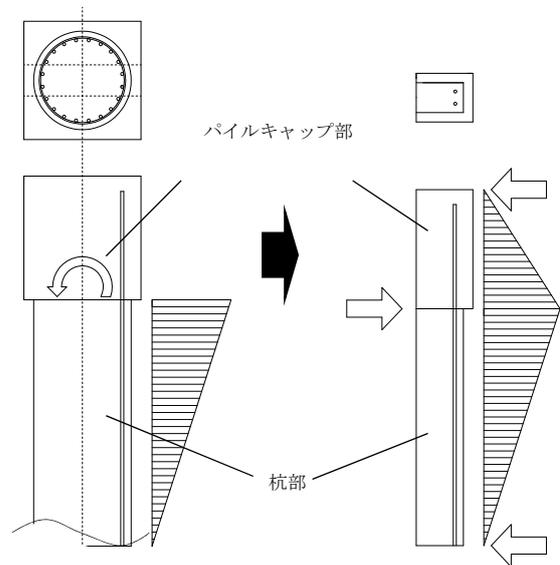


図-1 試験体の抽出

表-1 試験体詳細

No.	試験体名	想定杭径(mm)	想定パイルキャップ径(mm)	はしあき(mm)	定着長(mm)	杭主筋	杭せん断補強筋	パイルキャップせん断補強筋	実験破壊形式
17	Fc25-D41-25d	1500	1800×1800	150	1025	4-D41(USD685)	D16@100(SD345)	D16@175(SD345)	定着破壊
18	Fc25-D41-20d				820				定着破壊

\*1 東京工業大学 建築物理研究センター准教授 工学博士 (正会員)

\*2 日本交通技術(株) 修士(工学)

## 2. 解析対象実験概要

### 2.1 解析対象とする試験体の概要

解析対象とする試験体は、表-1 に示す既報の実験<sup>3)</sup>での試験体 No.18, No.17 とする。

杭断面の一部を抽出した実物大試験体を用い、実際に杭頭に作用するモーメント分布と同様になるよう、片押し載荷実験を行った。試験体は、杭主筋に USD685 の D41 を用い、すべての試験体において杭主筋端部に定着板を取り付けた。破壊性状は、曲げ降伏型 No.17 とパイルキャップ部での定着破壊 No.18 になるよう設計したが実験ではどちらも曲げ降伏前に定着破壊している。試験体の抽出方法を図-1 に、試験体の配筋断面図を図-2 に示す。

コンクリート強度は  $24 \text{ N/mm}^2$  とし、定着長は No.18 が  $20d$  (主筋径の 20 倍)、および No.17 が  $25d$  と定めた。はしあき長さは実際に設計された建物の図面より、杭半径の 2 割程度を目標とした。D41 に見合った杭径  $2000\text{mm}$  の場合、はしあき長さは  $200\text{mm}$  なるが、試験体の搬入出の制限から、試験体寸法が杭径  $1500\text{mm}$ 、はしあき長さ  $150\text{mm}$  と、危険側となるように設定されている。ただし、付着割裂破壊やせん断破壊の防止策としてせん断スパンの延長などの改良は行った。使用したコンクリートおよび鋼材の材料特性を表-2 に示す。

### 2.2 加力方法および測定方法

加力装置図を図-3 に示す。パイルキャップの端部 (危険断面側) を加力することとし、変位制御で片側繰返し載荷を行った。変位はパイルキャップ部を剛体と考え、パイルキャップ固定端から回転中心点までの高さ (図-3 中の  $h$ ) で除した値を部材角  $R$  と定義し、加力は、 $R=1/400$  を 1 回、 $1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33$  を各 2 回、 $R=1/25$  を 1 回行い終了した。なお、試験体の損傷が激しく載荷が困難であると判断した際には、その時点で載荷を止めた。

## 3. 解析概要

### 3.1 解析モデル概要

解析対象とする試験体 No.18, No.17 を、3次元有限要素法を用いて実験結果のシミュレーションを行った。また、実験では行われていない定着長  $30d$  を新たな変数として解析上で設定し、定着長の影響を検討した。解析ソフトは、DIANA ver 9.4.4 を使用した。解析モデルを図-4 に示す。コンクリート、定着板、載荷板は中間節点を有する 20 節点直方体要素を使用し、定着板は、支圧面積と体積を実験に用いたものと同様になるようモデル化した。杭主筋はトラス要素でモデル化し、インターフェイス要素を用いて付着すべりを考慮し、せん断補強筋は埋め込み鉄筋要素を用い完全付着でモデル化した。また、実験で見られたかぶりコンクリートを掻き出すようなひび割れが発生した位置に、コンクリートの引張特性を有する

インターフェイス要素による離散ひび割れとしてモデル化した。試験体の対称性を利用し、半分のみをモデル化し、切断面のすべての節点を面外方向に拘束した。

表-2 コンクリート・鉄筋の力学特性

コンクリート	$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )
F24	24.4	2.36	2.27
鉄筋	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{st}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_s$ ( $\times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> )
D41 USD685	705	917	2.19
D16 SD345	367	559	1.96

$\sigma_B$ : 圧縮強度,  $\sigma_t$ : コンクリート引張強度,  $E_c$ : 1/3割線係数  
 $\sigma_y$ : 降伏強度,  $\sigma_{st}$ : 引張強度,  $E_s$ : ヤング係数

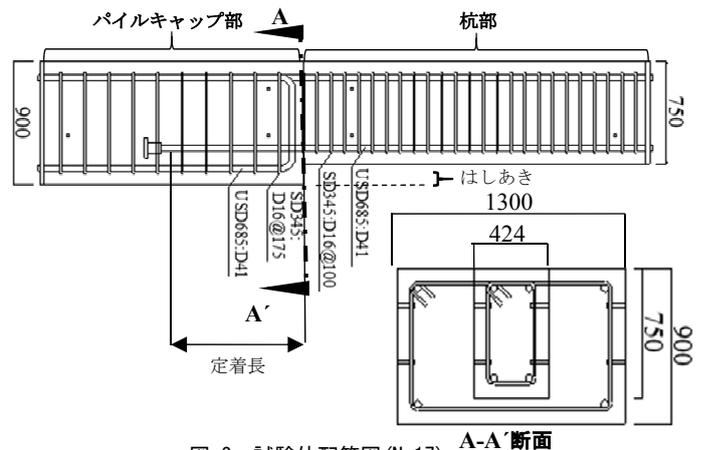


図-2 試験体配筋図 (No17) A-A'断面

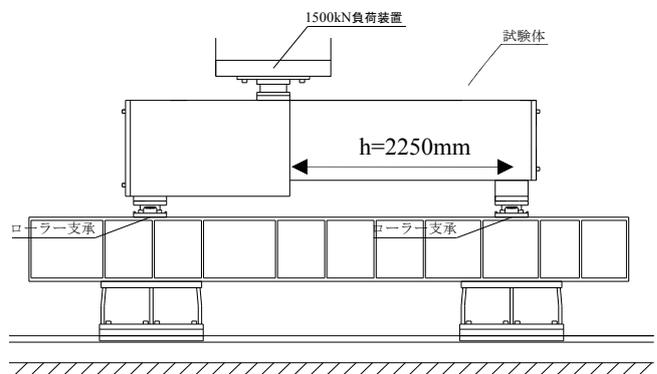


図-3 加力装置

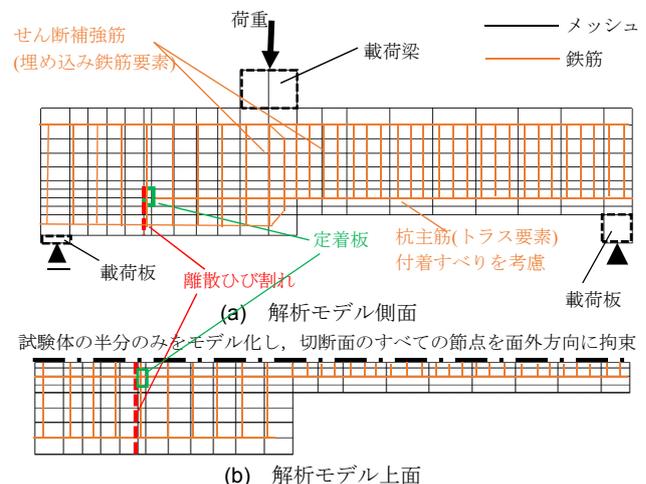


図-4 解析モデル (試験体 No17)

### 3.2 構成則

解析で使用した構成則を図-5に示す。コンクリートの圧縮上昇域は Popovics<sup>4)</sup>モデルを用い、圧縮強度後は線形軟化を仮定した。破壊基準には Drucker-Prager の基準を用い、内部摩擦角を 20°とした。コンクリートのひび割れモデルは、しきい角を 60°とした多方向固定ひび割れモデルを使用し、軟化域は、破壊エネルギーを 0.1(N/mm)とした Hordijk<sup>5)</sup>モデルを使用し、ひび割れ後のせん断剛性は伝達係数  $\beta$  をひび割れひずみ  $\epsilon_{cr}$  の関数(式は図-5を参照)で表現したモデルを使用した。また、実験で観測された杭主筋端部からの被りコンクリートを掻き出すようなひび割れを表現した離散ひび割れ要素(図-4 参照)は、コンクリートの引張強度に達したときにひび割れが発生するような特性を持たせ、ひび割れ発生後の軟化域は実験結果と整合するようにモデル化した。鉄筋の応力-ひずみ関係は、ひずみ硬化を考慮したバイリニア型で表現し、降伏後の剛性は、初期剛性の 1/100 とした。降伏条件は Von Mises の条件を使用した。付着-すべり関係は、藤井らの研究<sup>6)</sup>を参考にモデル化した。

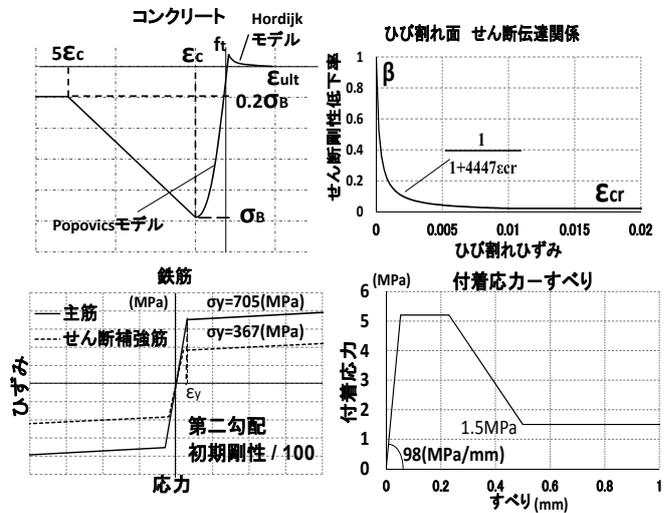


図-5 構成則

## 4. 解析結果

### 4.1 杭荷重-変形角関係

図-6に杭荷重-変形角関係を、表-3に最大耐力とそのときの変形角を示す。定着長 20d, 25d の実験結果をシミュレーションした結果、解析上でも実験と同様に定着板がかぶりコンクリートを掻き出すようなひび割れ(離散ひび割れ箇所の近傍)と定着板先端からの斜めひび割れ(図-7の①)が大きくなり、耐力低下に至った。コンクリートを掻き出すようなひび割れに関しては、離散ひび割れモデルで表現したが、離散ひび割れ自体は開かず、その隣のコンクリートの要素に分散ひび割れとして現れた。最大耐力は実験結果とほぼ一致しているが、剛性は実験より高めに評価している。これは、実験ではパイルキャップ部の底面にコーン状のひび割れが発生したが(図-8参照)、解析では離散箇所にはひび割れが集中し、コーン状のひび割れが発生しないまま最大耐力に至ったこと、さらに付着すべり関係の問題やストレスロッキングが要因として考えられる。

定着長 20d, 25d の解析で用いた解析モデルとほぼ同様のモデル化を行い、実験では行われなかった、定着長 30d の試験体の解析を行った。解析の結果、定着長を 30d に伸ばした場合、変形角 1.4%付近で杭主筋が降伏し、その直後、定着筋先端からの斜めひび割れ、及び離散ひび割れ箇所近傍の要素のひび割れが大きくなり、耐力低下に至った。既報の実験結果<sup>3)</sup>では、はしあきを杭径の 2 割、定着長さ 30d を設けた試験体は定着破壊をおこさなかったが、今回解析した試験体は、2.1 で述べたように、

はしあき長さが小さいため、定着長を 30d 設けても定着部の損傷が集中したと考えられる。

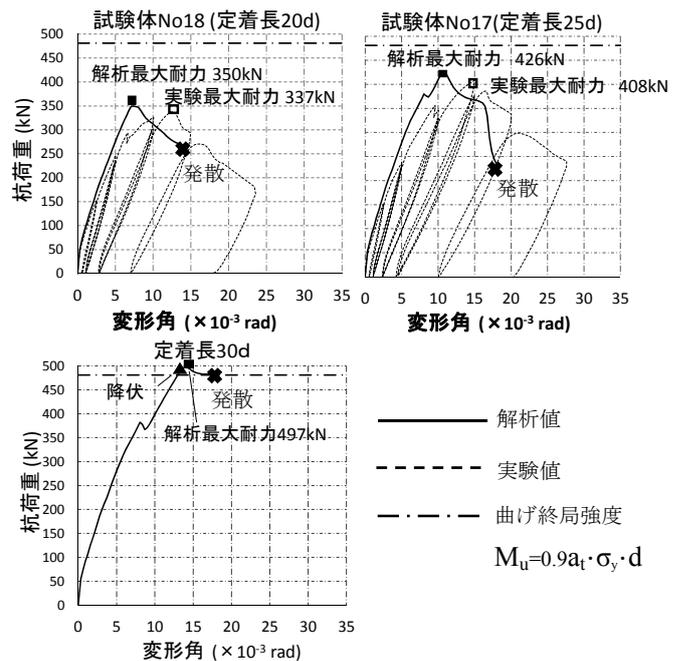


図-6 杭荷重-変形角関係

表-3 実験・解析結果

	実験		解析	
	最大耐力 (kN)	変形角 ( $\times 10^{-3}$ rad)	最大耐力 (kN)	変形角 ( $\times 10^{-3}$ rad)
定着長 20d	337	12.64	350	7.74
定着長 25d	408	14.98	426	10.84
定着長 30d			497	13.94

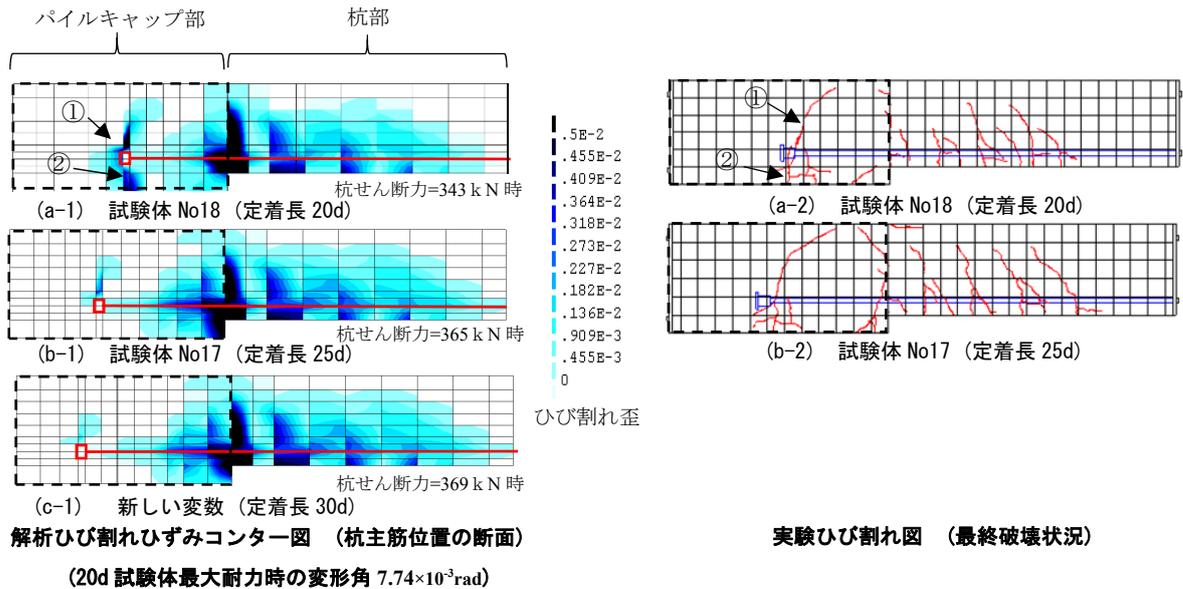


図-7 解析・実験ひび割れ図(側面)

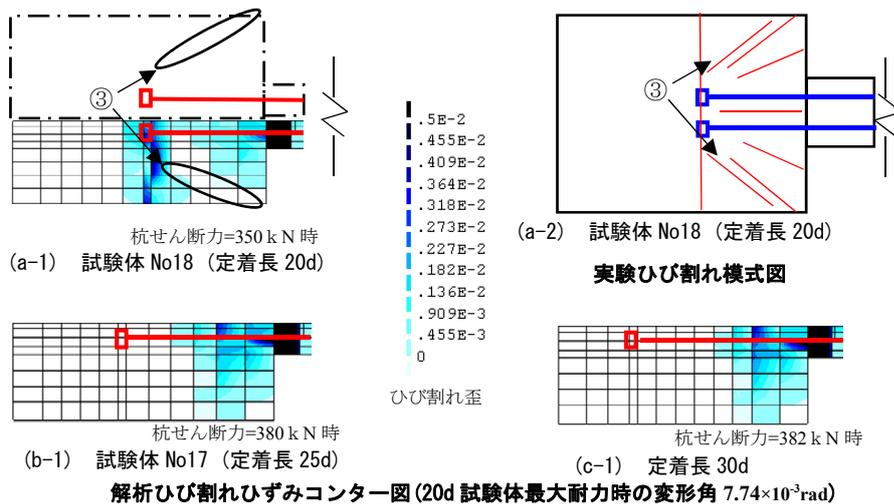


図-8 解析・実験ひび割れ図 (パイロキャップ部底面)

#### 4.2 ひび割れ性状

図-7に解析でのひび割れひずみコンター図、実験での最終ひび割れ状況の側面図を示す。図-7に示す解析のひび割れひずみコンター図は、定着長 20d 試験体が最大耐力に至ったときの変形角に合わせている。また、解析のコンター図は杭主筋位置の断面で切断したものを示している。図-8には、解析によるパイロキャップ底面のひび割れひずみコンター図および実験で観察された主要なひび割れの模式図を示している。解析のコンター図は図-7と同じ変形角時のものを示している。

解析と実験を比較すると、解析では実験で見られたような定着板からの斜めひび割れ(図-7の①)が発生した。また、かぶりコンクリートを掻き出すようなひび割れ(図-7の②)が離散ひび割れ箇所近傍に発生した。定着長 25d

試験体の最大耐力時も同様のひび割れが発生した。実験では、パイロキャップ部の底面に、コーン状の大きなひび割れ(図-8中の③)が現れたが、解析上では、表現できなかった。これは、離散ひび割れ箇所付近にひび割れが集中したことが原因だと考えられる。次に、図-7の a-1, b-1, c-1 を比較し、定着長の違いによる損傷の違いを検討する。定着長 20d 試験体の損傷は定着筋先端に集中し、耐力低下に至っているが、定着長を伸ばすと、付着による引張力の負担分が大きくなるため、パイロキャップ定着部に損傷が集中しておらず、定着長を伸ばすことによって、ひび割れの局所化を抑制することができることがわかる。また、図-8のパイロキャップ底面図でも、定着長を長くしたものは、定着長が短い 20d 試験体に比べて、定着部が損傷していないことがわかる。

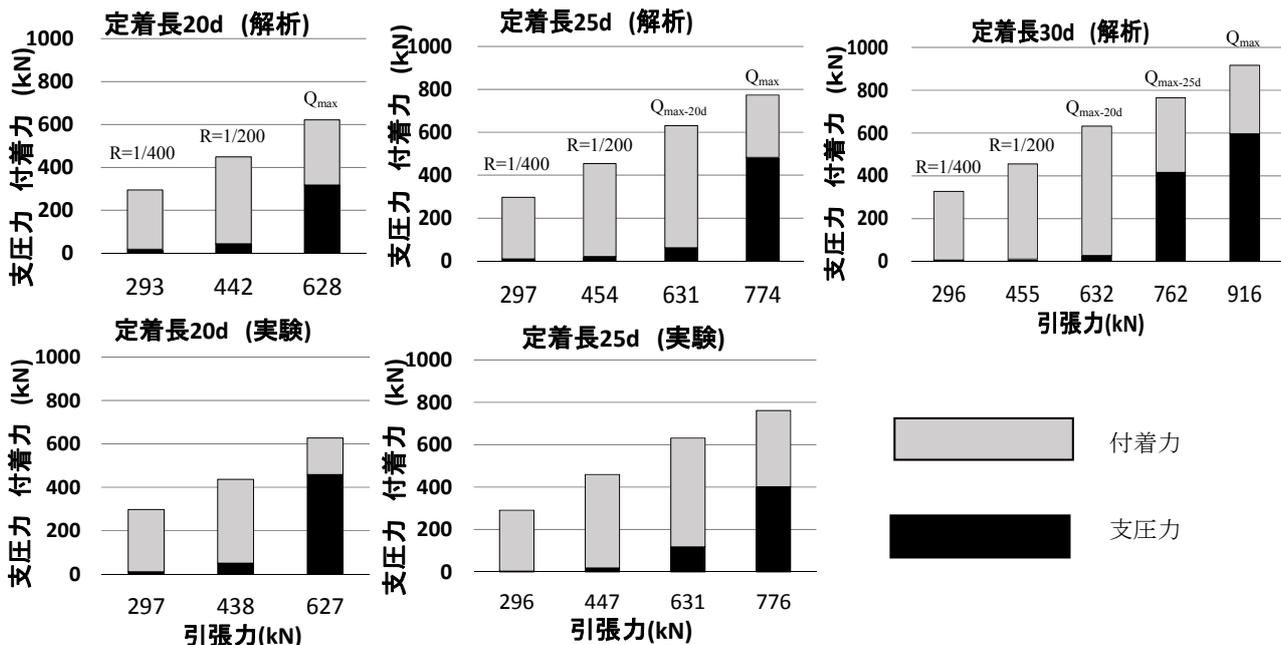


図-9 杭主筋引張力負担割合

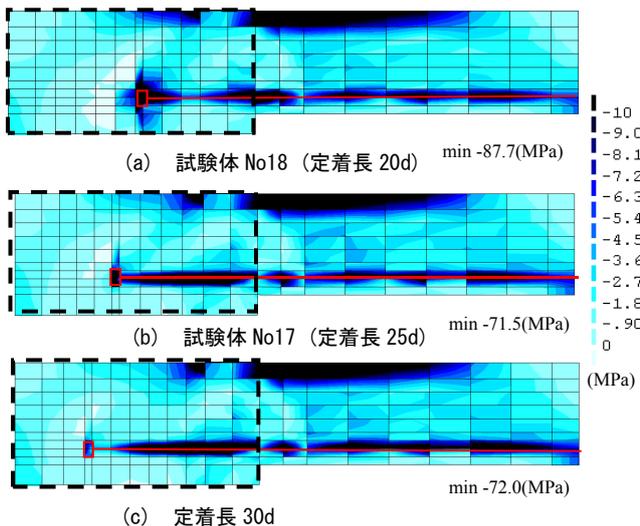


図-10 最小主応力コンター図 (杭主筋位置の断面)

### 4.3 杭主筋引張力の負担割合

図-9に、杭主筋にかかる引張力を、パイルキャップ内定着部主筋の付着力と定着板の支圧力に分けた場合の、負担割合を示す。図のグレーのものが付着力、黒いものが支圧力を表しており、棒グラフの下に書いてある数字は危険断面位置における杭主筋の引張力を示している。解析の定着長20d試験体において、図に示した引張力は、変形角1/400の時、1/200の時、最大耐力時の値となっており、実験はこのときの引張力と最も近いときの値を採用している。また、定着長を長くするにつれて、定着長20d試験体の最大耐力時の引張力と近い値に加え、その試験体の最大耐力時の値を加えている。実験による負担割合は、定着板手前の主筋の歪みゲージから算出した引張力を定着板による支圧力負担分とし、危険断面位置の主筋のひずみゲージから算出した引張力との差をとるこ

とによって、付着負担分の値とした。解析は、危険断面位置の主筋に張ってあるゲージ、及び定着板手前の主筋に張ってあるゲージに最も近い積分点のひずみから引張力を算出した。

実験結果と解析結果を比較すると、定着長20d試験体に関しては最大耐力を迎える前までは比較的よい対応を示している。しかし、最大耐力時には支圧力の負担分を実験よりも低く評価している。定着長25d試験体に関しては、引張力631kN時に解析結果が実験結果に対して、やや低く評価しているが、最大耐力時には、逆に解析値が実験値より高くなる。引張力が大きくなると、支圧割裂ひび割れの外に、曲げせん断の影響も大きくなり、実験結果と解析結果の整合性が悪くなったと考えられる。解析結果において、定着長の違う3体を比較すると、杭主筋に作用する引張力が同程度のとき、定着長を長くするにつれて付着力による負担割合が大きくなるのが図からわかる。また、最大耐力を迎えるころには、いずれの試験体も支圧力による負担割合がおよそ50%~70%ほどになっており、定着破壊時には支圧力による負担割合が大きくなるのがわかる。

### 4.4 最小主応力分布図

図-10に杭主筋がある断面で切断した最小主応力コンター図を示す。変形角は、定着長20d試験体が最大耐力に至ったときの変形角に揃えている。

図から最大耐力を迎えている定着長20d試験体は、定着板からの支圧力が大きく働いている様子がわかる。また、定着長を伸ばしていくに従って、支圧力が小さくなっていく様子も図からわかる。

### 4.5 ひずみ分布図

図-11 に杭主筋のひずみ分布図を示す。縦軸に危険断面からの距離を示しており、プラス方向が杭部へ向かう方向でマイナスがパイルキャップ内への定着方向を示している。横軸は杭主筋のひずみを示しており、実験結果はひずみゲージの値から、解析結果はひずみゲージ位置に最も近い点での積分点の値を示している。実線で示しているのが実験結果、点線で示しているのが解析結果となっており、一点鎖線は解析の材料特性における、杭主筋の降伏ひずみ(図-5 参照)を示している。実験と解析の比較に関しては、杭主筋に作用する引張力がほぼ同様になるときのものを比べている。解析の定着長 20d 試験体において、図に示した 3 本のひずみ分布は、変形角 1/400 の時、1/200 の時、最大耐力時の値となっており、実験はこのときの引張力と最も近いときの値を取り出している。また、定着長を長くするにつれて、定着長 20d 試験体の最大耐力時の引張力と値が近い引張力に加え、その試験体の最大耐力時のひずみ分布を加えている。

実験と解析を比較すると、定着長 20d, 25d のひずみ分布は、どちらも比較的よい対応をしているが、定着長 20d のものは引張力 630kN 時に実験結果よりひずみがやや低くなった。また、実験では危険断面位置でのひずみが最も大きくなっているが、解析結果はすべて危険断面よりも杭部の方向にずれた位置のひずみの値がやや大きくなった。これは、解析ではこの位置でのひび割れひずみが危険断面位置と同様に大きくなっており、このような結果になったと考えられる。杭主筋の引張力が大きくなるにしたがって、ひずみ分布の勾配が小さくなっていくことがわかり、付着力による負担から支圧力による負担へと移行しているのがわかる。

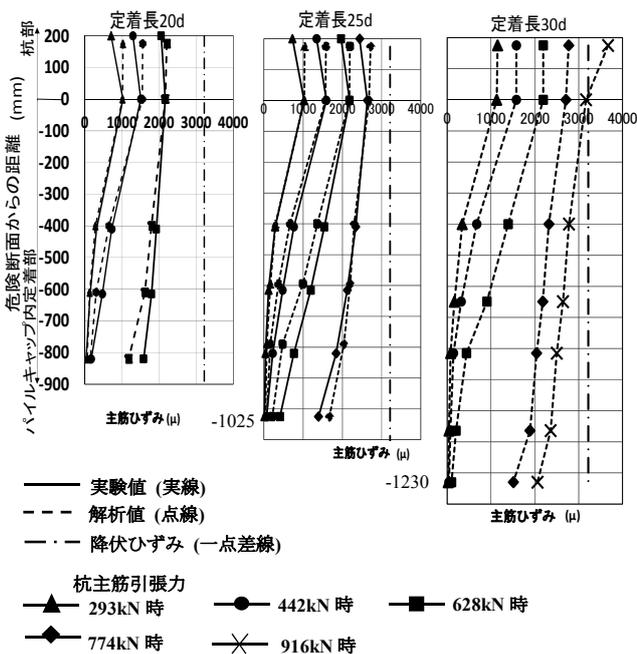


図-11 主筋ひずみ分布

## 5. まとめ

主筋に高強度鉄筋を使用した場所打ちコンクリート杭における数値解析から、以下の知見を得た。

- (1) 定着破壊する試験体を解析上でシミュレーションしたところ、最大耐力は実験を概ね再現できたが、剛性は実験よりも大きく評価した。
- (2) 解析で新たに設定した定着長 30d のものは主筋降伏後に定着破壊に至った。既報<sup>3)</sup>の実験結果では定着長を 30d 設ければ、定着破壊に至らなかったが、今回解析対象とした試験体は、主筋径に対してはしあきが小さかったため、主筋降伏後に定着破壊に至ったと考えられる。
- (3) 定着長を長くするほど、杭主筋に作用する引張力に抵抗する付着力の負担割合が大きくなり、定着板による支圧力への移行が遅れ、定着筋先端に集中する損傷を抑制し、最大耐力が上昇した。

## 謝辞

東京鉄鋼株式会社には、鉄筋をご提供いただきました。ここに関係各位に深く感謝の意を示します。

## 参考文献

- 1) 篠原保二, 鈴木翔太, 日比野陽, 林静雄: 高強度鉄筋を主筋に用いた場所打ち杭の軸力の違いが曲げ性状に及ぼす影響, 日本建築学会学術講演梗概集 C-2, pp.779-782, 2011.9
- 2) 日比野陽, 堺勤, 篠原保二, 林静雄: 高強度鉄筋を主筋に用いた場所打ち杭の曲げ性状に関する研究 コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.853-858, 2010.7
- 3) 鈴木翔太, 近藤慶一, 篠原保二, 日比野陽, 林静雄: 高強度主筋を使用した場所打ち杭における定着性状(その1, その2), 日本建築学会東海支部 学術講演梗概集 2012(構造IV), 709-712, 2012-09-12
- 4) S.Popovics: A Numerical Approach to the Complete Stress - Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, pp.583-599, 1973
- 5) CORNELISSEN, H. A. W., HORDIJK, D. A., AND REINHARDT, H. W.: Experimental determination of crack softening characteristics of normal-weight and lightweight concrete. Heron 31,2 (1986)
- 6) 藤井 栄: 鉄筋コンクリートにおける付着・定着特性とその部材性能に及ぼす影響に関する研究, 京大大学学位論文, 1992,1
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型 耐震設計指針・同解説 1999
- 8) TNO DIANA: DIANA User's Manual Release 9.4.4