

〔論文〕

杭の水平耐力に関する解析的研究

(その2 100号館の解析結果)

松本 豊^{*1}・上原 修一^{*1}

Analytical Study on the Ultimate Strength of Pile Foundations (Part 2 Analysis result of building No. 100)

Yutaka MATSUMOTO^{*1}, Shuichi UEHARA^{*1}

Abstract

In this study, the ultimate strength of the concrete pile constructed in Building No. 100 of the Kurume Institute of Technology was calculated using an analysis model that can demand the ultimate strength of the pile foundations, which was proposed in a previous report. Furthermore, the bending moment, shear force, and displacement of the process until the ultimate strength were inspected.

Key Words : concrete pile, ultimate strength, discrete multi spring model, failure mechanism, pile damage

1. はじめに

下部構造の耐震設計は、2001年の建築基準法の改正に伴い、杭基礎の許容応力度設計（1次設計）が義務化されものの上部構造と同様の終局強度設計法（2次設計）は、法的に義務化されておらず、依然として許容応力度設計に留まっている。その理由としては、上部構造の柱や梁の破壊に対し、基礎の破壊および地盤の崩壊は、直接人命にかかわる被害がほとんど生じていない。地盤という不確定な条件が、終局強度設計法の導入を遅らせた。また、これまでの日本国内の地震では、地下部分の破壊により建築物が崩壊に至った例は報告⁽¹⁾されていない等による。

しかしながら、2011年の東北地方太平洋沖地震では、構造設計時に十分な検討が明示的に求められていない部位の損傷が顕在化しその結果、建築物が地震後、継続使用できなくなる事例が報告⁽²⁾されている。2016年熊本地震では、1980年に竣工された市庁舎地上3階の鉄筋コンクリート建造物で2012年に耐震改修を実施されていたものの、西側の一部の既製コンクリート杭の頭部に損傷が生じて傾斜し、継続使用が困難となった事例も報告⁽³⁾されている。

以上の背景により、近年の研究では東日本大震災にて被災した既製杭を対象とした被害再現のための曲げせん断実験⁽⁴⁾をはじめとして、種々の既製杭の杭頭曲げせん断実験⁽⁵⁾、杭・パイルキャップ・基礎梁を有する部分的な架構実験⁽⁶⁾等の他、東北太平洋沖地震によって被災した杭基礎構造の被害要因分析のための解析的検討^{(7),(8)}に加え、大地震時の地盤応答変位を考慮した杭基礎構造設計法についての検討^{(9),(10)}が実施されつつある。

一方で、日本建築学会からは、大地震に対する終局強度設計法が義務付けられている上部構造と同様に、それを支持する下部構造も建物重要度や継続使用の必要性を考慮した終局強度設計のクライテリアを示すため、建築基礎構造設計指針⁽¹¹⁾が改訂された。この指針では、終局時に対する安全性の検証方法、検証に用いる荷重・耐力係数法の設計用限界値が明確に示された。以上より、下部基礎に対する終局強度設計法の必要性が、高まっていることが分かる。

そこで本研究の目的は、前報で著者らが提案した下部構造の水平耐力を求めることが可能な解析モデル（以下、本解析モデル）を用いて、久留米工業大学（以下、本学と呼ぶ）100号館（テクノみらい館）に施工されている場所打ちコンクリート杭の水平耐力を求める。また水平耐力に至るまでの曲げモーメント、せん断力および曲げモーメントの推移について検証を行う。なお、100号館の杭の構造設計は許容応力度設計のみで終局強度設計は行われていない。

^{*1} 建築・設備工学科
令和2年10月7日受理

2. 建物と地盤の概要

2・1 建物および杭の概要

解析対象とした建築物は、福岡県久留米市上津町国道3号線沿いに立地する久留米工業大学内の100号館である。100号館は地上9階／塔屋1階、軒高さ46.45m、延床面積7432m²で2015年3月に竣工した建築物である。構造形式はX、Y方向共にブレース付き鉄骨ラーメン構造であり、スパンはX方向6スパン51.7m、Y方向は5スパン32mである。

図1に杭伏図を示す。杭は、アースドリル工法による場所打ちコンクリート杭である。柱1本あたり1本の杭で建築物荷重を支持している。基礎梁は、鉄骨鉄筋コンクリートが使用されており幅は、端部1400mmから中央部800mmで水平ハンチを設けてある。せいは1500mmである。なお、内臓されている鉄骨梁はH-900x250x16x25である。ボーリング調査は、100号館周辺で4か所実施している。本論では、図中の四角で囲まれたX8/Y1通り（P12）、X8/Y4通り（P12）、X5/Y2通り（P15）、X1/Y1通り（P13）の杭4本について本解析モデルを用いて行った。

表1に、杭の断面図を示す。杭長22.25m～27.5m、杭径φ1200、φ1300、φ1500の3種類である。主筋とフープ筋量は杭軸方向の中心から上部と下部で分けられており、経済設計が図られている。主筋D29（SD390）、フープ筋D16（SD295A）が用いられている。コンクリートの設計基準強度（F_c）は27N/mm²相当である。

2・2 地盤の概要

図2に100号館の建設時に周辺で行われたボーリング調査結果と杭の位置関係を示す。

この図より、地盤構成は、GL-3.2mまで、N値8～29の埋土、GL-3.2～-6mまで、N値18～22のシルトである。北側のNo.4では粘土混り砂となり、シルトは消滅している。GL-6～-12.1mまで、N値23～25の礫混り砂である。GL-12.1～-22.4mまで、N値50以上の固結シルトである。この固結シルト層が杭の支持層である。地下水位（孔内水位）は、GL-7.1mである。No.1～No.4の調査結果から分かるように地層構成は類似しているものの層厚やN値はばらついており、複雑な地層構成となっていると推定される。

Table 1 Pile list

	P12	P13	P15
Upper Section			
Diameter	1200	1300	1500
Long.Steel	12-D29	21-D29	25-D29
Hoop	○-D16@150	○-D16@150	○-D16@150
Lower Section			
Diameter	1200	1300	1500
Long.Steel	12-D29	12-D29	16-D29
Hoop	○-D16@300	○-D16@300	○-D16@300

F_c=27N/mm², D16:SD295A, D29:SD390

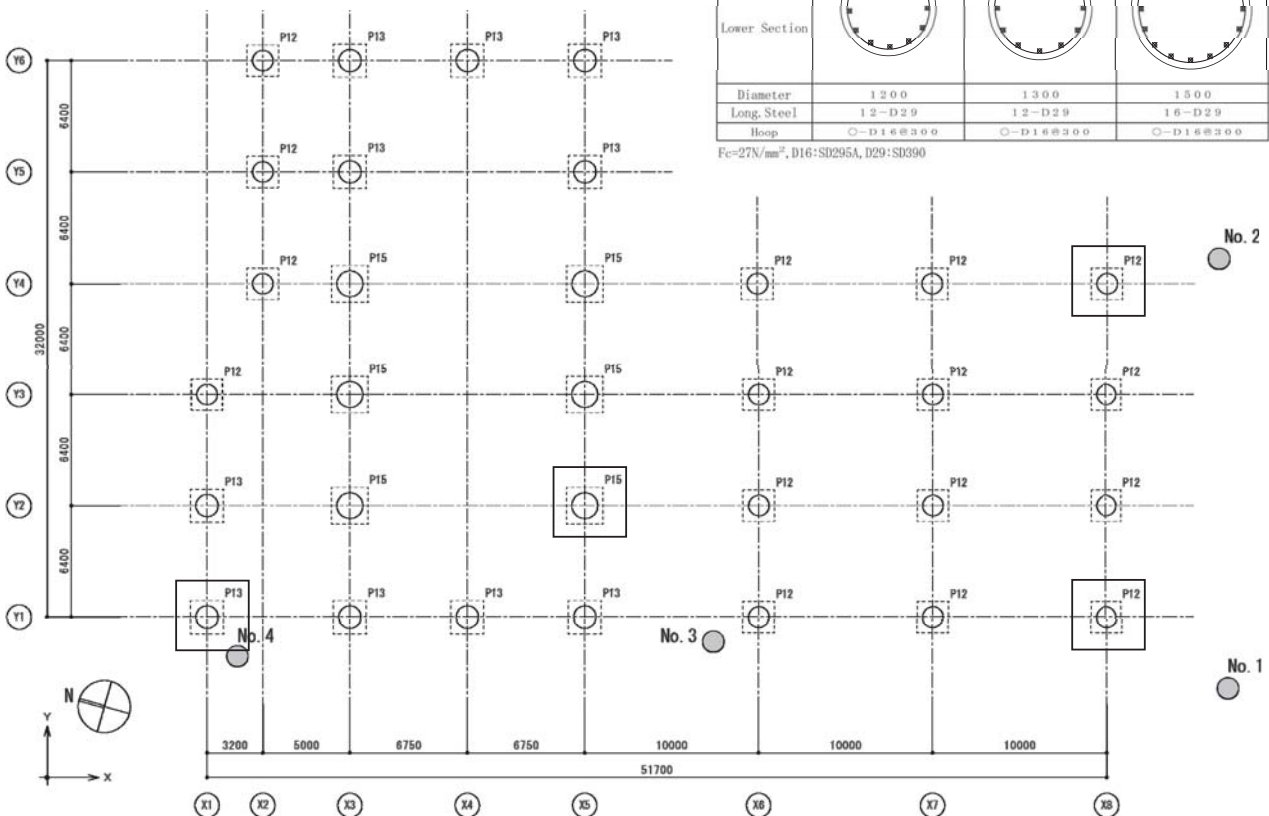
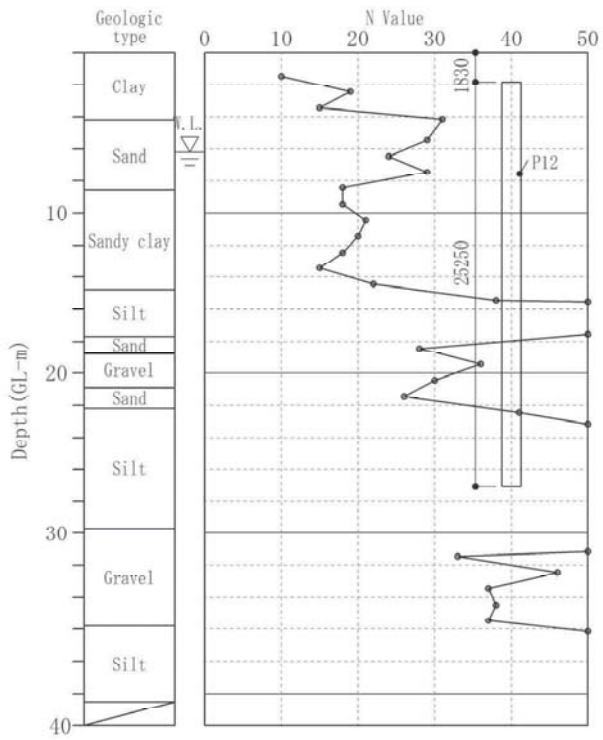
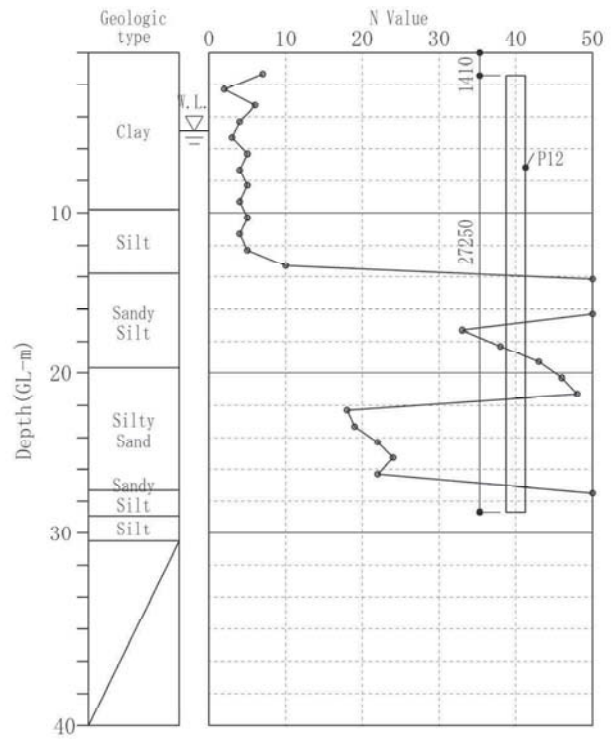


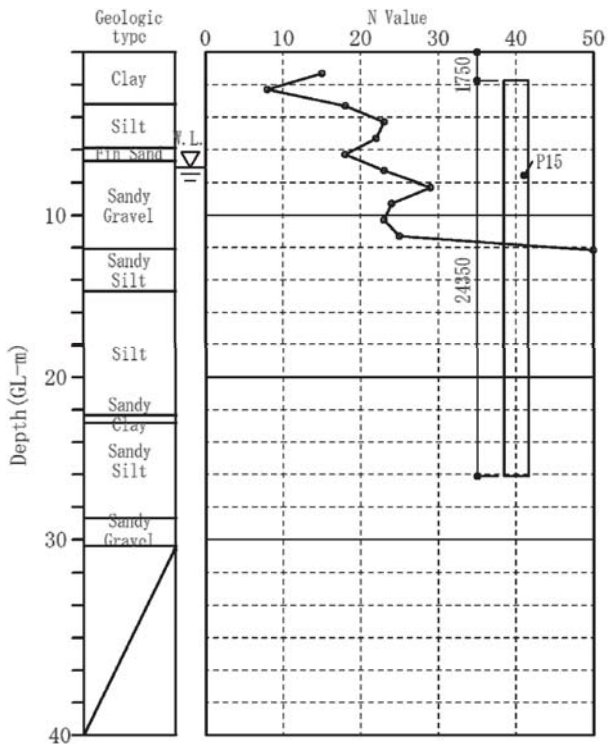
Fig. 1 Pile layout



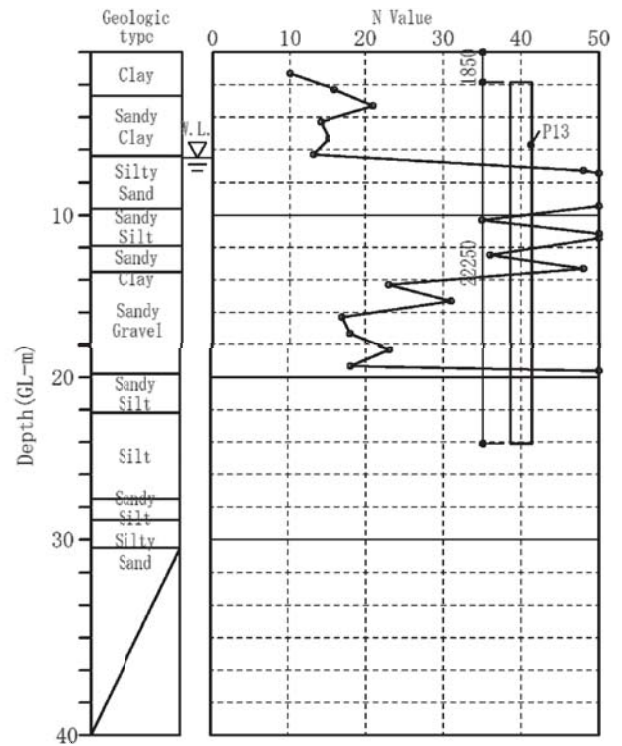
(a) Bor. No.1



(b) Bor. No.2



(c) Bor. No.3



(d) Bor. No.4

Fig. 2 Soil Profile

3. 増分解析

3・1 解析モデル

図3は、解析モデルを示している。この図より、杭頭はフーチングと基礎梁で拘束されている為、回転を固定、杭先端をピン支持とした単杭の解析モデルであり、杭部材の曲げ剛性は一定とした。地盤剛性は、ばね支点として離散化し、前報で述べた地盤反力係数 K_h を用いて評価した。

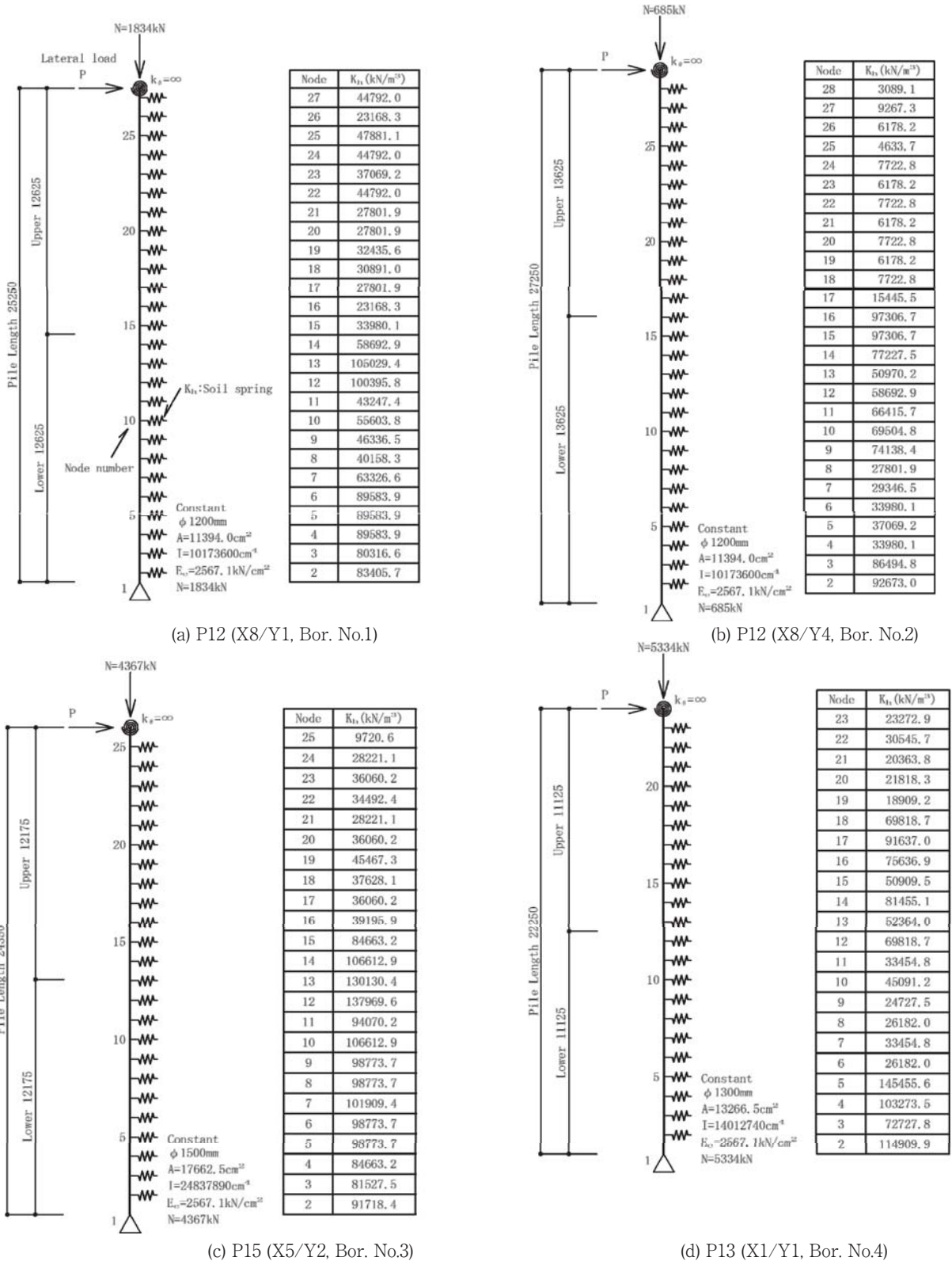


Fig. 3 Analytical model

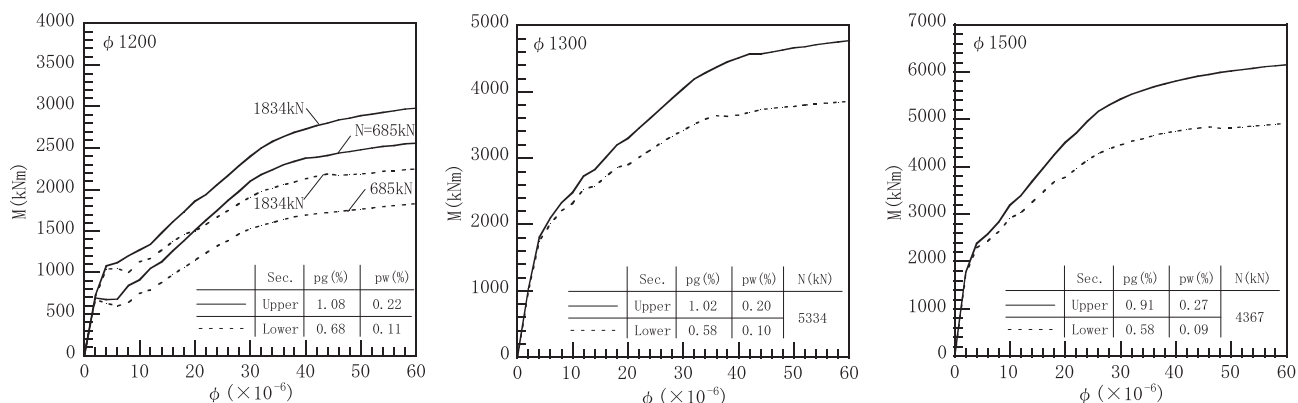


Fig. 4 M- ϕ curve for analyses

さらに、地盤ごとに節点を設け地盤剛性のモデル化を行っている。鉛直方向の軸力は、上部構造の構造計算より得られた Y 方向加力の保有水平耐力時における支点反力を用いて、杭頭部の節点に入力した。水平荷重 P を水平耐力に達するまで増分させる。

図 4 は武藤・梅村の e 関数法⁽¹²⁾により、断面解析を行って得られた曲げモーメント m-曲率 ϕ の関係である。杭軸方向の中心から上部と下部で主筋およびフープ筋が分けられているため、各々断面解析を行った。図中に示す実線は上部、破線は下部の杭を示す。なお、 p_g は杭断面に対する主筋量の比、 p_w はフープ筋比を示している。曲げ剛性は、杭頭部に上部構造の水平耐力時における支点反力が、一定に作用しているものと仮定し、e 関数法により得られた M- ϕ 関係をバイリニアールモデルとした。なお、杭が 2 点ヒンジ状態に達した時点を水平耐力と定義した。

3・2 解析結果

(1) 荷重-変位関係

図 5(a)~(d)は、本解析モデルより得られた杭頭荷重-杭頭変位関係を表したものである。図中に示す①は、杭頭部のひび割れ発生（弾塑性時）、②は杭頭部分の塑性ヒンジ発生時（弾塑性時）、③は杭体の水平耐力（崩壊時）を示す。図中の数字は、上部構造の層間変形角 0.01% および 0.02%、すなわち保有水平耐力時および崩壊メカニズム時の 1 階柱が負担している水平力である。

この図から分かるように、杭頭部の曲げ応力が卓越し初期ひび割れが発生する。水平荷重が増加すると降伏曲げ耐力に達し、ヒンジが発生する。さらに水平荷重が増加すると地中部分の曲げモーメントが卓越し始め、ひび割れが発生し、降伏曲げ耐力に達する。この時、杭体に 2 点ヒンジ状態に達し杭頭変位が増大している為、崩壊メカニズムを形成している。すなわち水平耐力に達したと考えられる。また、上部構造が崩壊メカニズムに達しても、杭はひび割れに達する程度であることが分かる。

図 5(a), (b)の水平耐力および水平変位を比較すると、先ず図 5(a)の水平耐力が図 5(b)より大きいことが分かる。これは、同一断面の杭ではあるが、上部構造の水平耐力時における支点反力が大きい為、図 5(a)の降伏曲げ耐力が大きくなったと考えられる。次に、水平変位に関しては、図 5(a)の水平変位が図 5(b)より小さいことが分かる。これは、図 5(a)の杭は Bor. No. 1 の N 値を採用しているからである。すなわち Bor. No. 1 の地盤構成は、GL-2.0m まで、N 値 10~31 の埋土、GL-2~-4.2m まで、N 値 17~38 の砂礫、GL-4.2~-12.8m まで、N 値 15~30 の砂質粘土の非常に地盤剛性が大きいからである。

図 5(c), (d)では、杭径が異なるものの水平耐力は、概ね同じ値となった。この理由は、図 5(c)の杭は、図 5(d)と比べると主筋量が小さくかつ、上部構造の水平耐力時における支点反力が小さいため、降伏曲げ耐力が小さくなったからと考えられる。

以上より、本解析モデルを用いて、限られた条件ではあるが本学 100 号館の水平耐力および崩壊メカニズムを求めることが確認できた。

今後は、杭体の非線形特性をトリリニアールモデルおよび地盤ばねに非線形性を考慮して、水平耐力および水平変位をさらに精度を高めた解析モデルの開発を行う予定である。

(2) 各応力と変位

図 6(a)~(d)は、本解析モデルにより得られた曲げモーメント M、せん断力 Q、軸力 N および水平変位 δ の水平力に

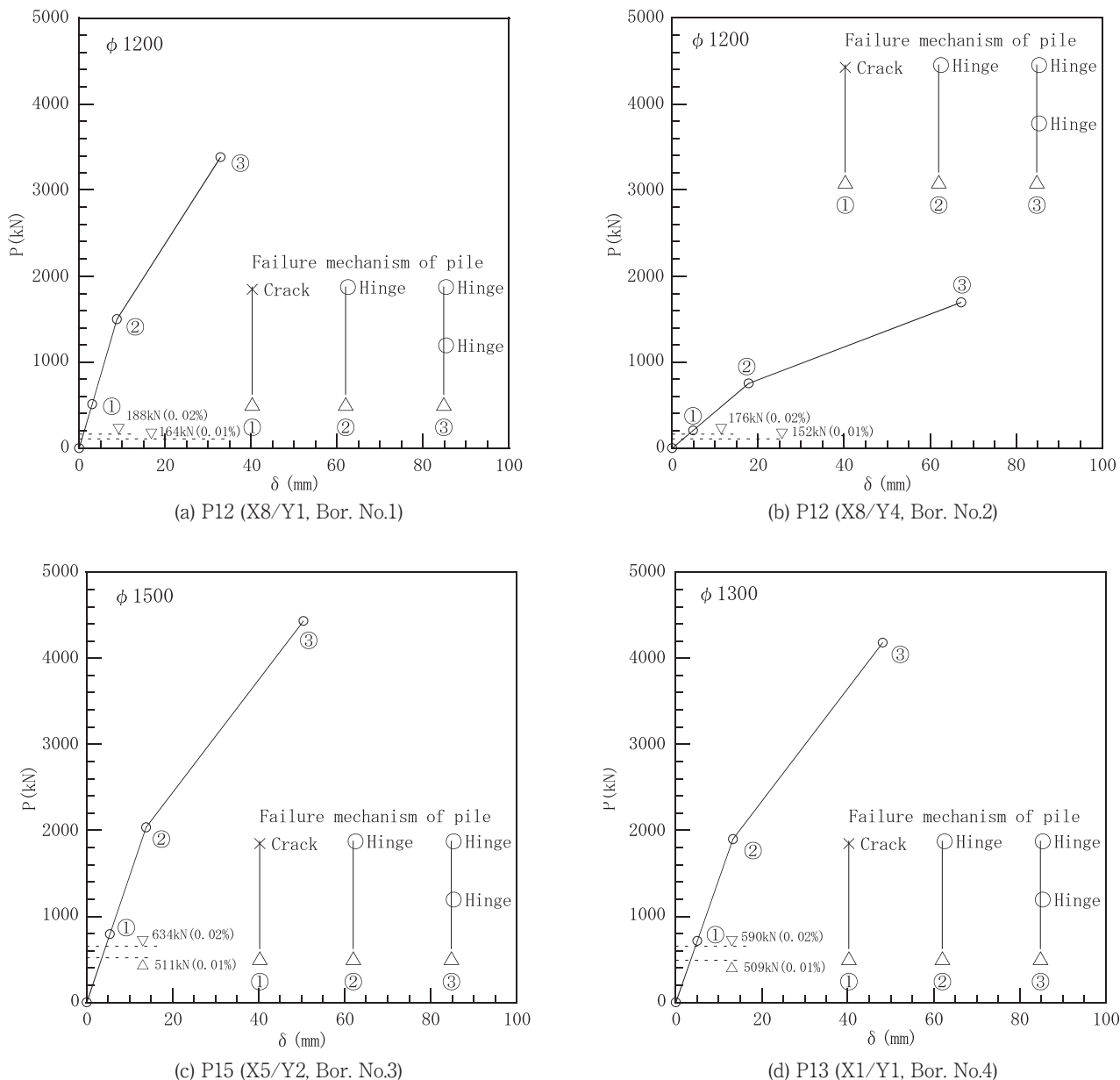


Fig. 5 Pile head load-displacement curves

至るまでの推移を示したものである。図中に示す破線は杭体の①ひび割れ発生（弾塑性時）、②一点鎖線は、杭頭部分の塑性ヒンジ発生時（弾塑性時）、③実線は水平耐力時（崩壊時）を示す。

この図から分かるように杭頭ひび割れ時の曲げモーメント分布は、杭頭部で最大となり、徐々に減少し地中部分で反曲点となる。以深では、徐々に増加し極値となり減少していることが分かる。

そして水平荷重の増分と共に、杭頭曲げモーメントが降伏曲げ耐力に達して降伏ヒンジが発生する。さらに水平荷重が増加すると地中部の曲げモーメントが卓越し始め、ひび割れが発生し、降伏曲げ耐力に達する。

図 6(a), (d)の地中部の最大曲げモーメント位置に差異が生じている。図 6(a)の Bor. No. 1 の地盤構成は、GL-4.2~7.6m まで N 値24~31砂となっている。一方、図 6(d)の Bor. No. 4 では、表層から GL-6.45m まで、N 値10~21の埋土および粘土混り砂となっていることが分かる。すなわち、図 6(a)は(d)よりも浅層部分で硬質となるため、地中部の最大曲げモーメント位置に差が生じたと考えられる。せん断力 Q, 水平変位 δ は、ひび割れ発生時から保有水平耐力に至るまで、杭頭位置で最大値となることを示した。軸力 N は、上部構造の水平耐力時の支点反力を一定として入力しており、その値を示している。隅部の柱は、地震力により軸力が変動することから、変動軸力を考慮した荷重増分解析の適用について検討が必要である。これについては、今後の研究課題とする。しかしながら、東北地震の杭被害調査^{(7), (13)}にて述べられている杭頭部分の曲げ圧縮破壊およびせん断破壊形式と同様の応力状態を概ね示している。

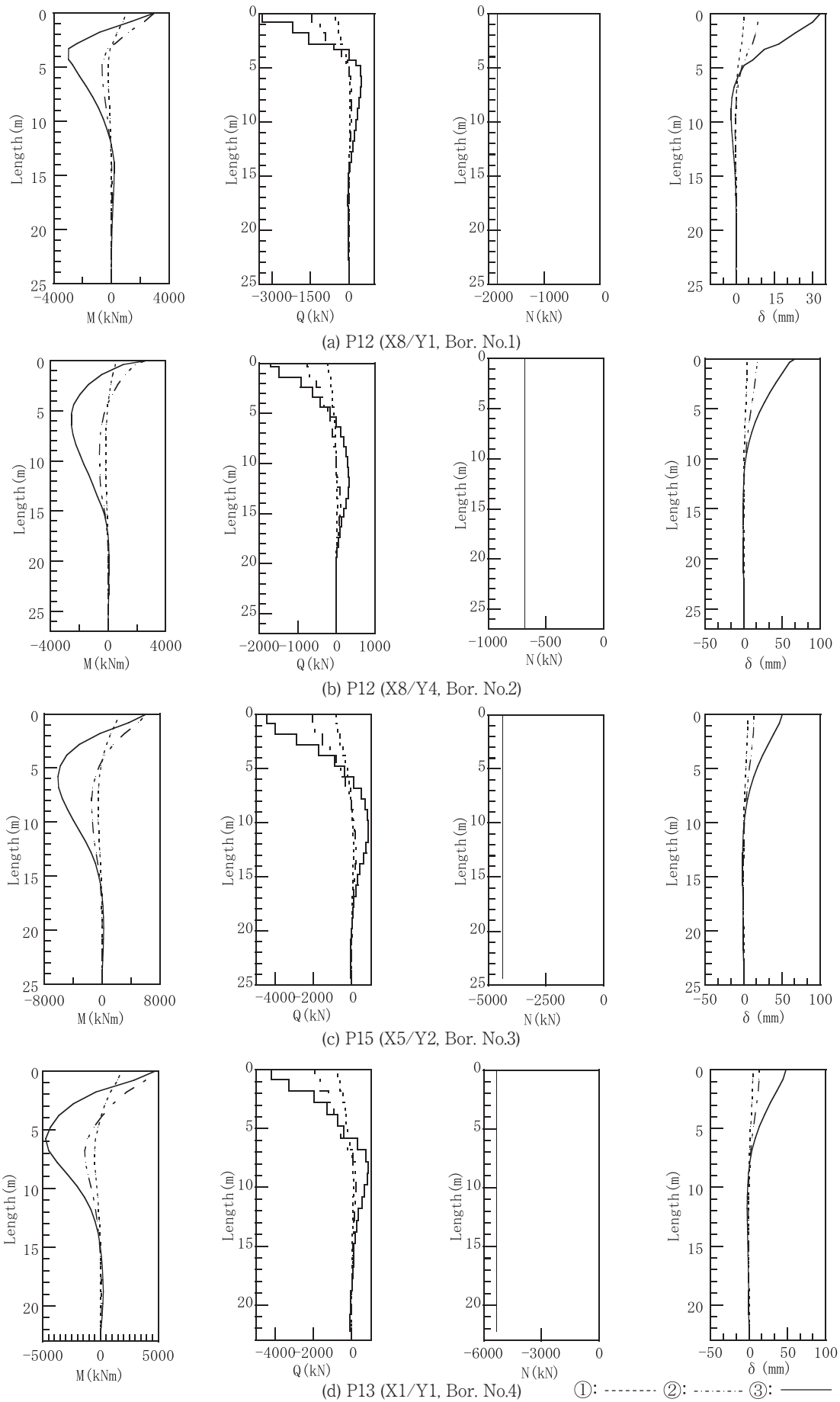


Fig. 6 Bending moment, shear force, axial force and displacement of pile

以上より、本解析モデルでは、限られた条件内の解析ではあるが、弾性状態から水平耐力に至るまでの応力および変位の推移を求めることができるものと考えられる。

4. まとめ

本論では、前報で提案した解析モデルを用いて、本学100号館に施工されている場所打ちコンクリート杭を単杭モデルとした場合の水平耐力を求めた。限られた範囲であるが、本検討により得られた結果を以下に述べる。

- (1) 杭頭部が降伏曲げ耐力に達した後、地中部分の杭体が曲げ降伏した時点で2点ヒンジの崩壊メカニズムを形成したことが確認できた。
- (2) 水平耐力時の曲げモーメント分布は、杭頭部で最大となった。深度が大きくなるにつれ減少し地中部分で反曲点となり、徐々に増加し極値となった。
- (3) 水平力時のせん断力および水平変位分布は、杭頭部で最大となった。これは既往の地震被害と同様の破壊時の応力状態とほぼ同様の結果となった。
- (4) 杭の水平耐力は、上部の水平耐力を上回っており、上部構造が崩壊メカニズムに達しても、十分な余裕があることが分かった。
- (5) 今後は、杭体の非線形特性をトリリニアモデルおよび地盤ばねに非線形性を考慮して、精度の高い水平耐力および水平変位を求めることが可能な解析モデルの開発を行う。

謝 辞

本研究は、九州大学情報基盤研究開発センターの研究用計算機システムを利用しました。また、本学100号館の設計資料および地盤報告書は、事務局の江崎由美子氏、森文子氏、武藤修次氏、岩永浩氏および株式会社テクノ大地の今村竜也氏にご提供頂きました。ここに記して謝意を表します。最後に100号館建設プロジェクトにご尽力頂きました故・吉住孝志名誉教授に感謝いたします。

参考文献

- (1)建築物の構造技術基準解説書編集委員会，2015年版建築物の構造関係技術基準解説書（2015），pp. 298，全国官報販売協同組合
- (2)国土技術政策総合研究所，建築研究所，東北地方太平洋沖地震被害調査書（2011），国土技術政策総合研究所資料第674号
- (3)日本建築学会，2016年熊本地震災害調査報告（2018），pp. 317，丸善出版
- (4)金子治，中井正一，阿部秋男，向井智久，“東北地方太平洋沖地震における杭基礎被害の要因分析に向けた検討 その3 杭基礎の強度・変形特性に関する実験”，日本建築学会大会学術講演梗概集（2014），pp. 699-700
- (5)長澤和彦，木谷好伸，後庵満丸“既製コンクリート杭の曲げ変形性能に関する研究 その1 SC杭の曲げせん断実験概要”，日本建築学会大会学術講演梗概集（2016），pp. 757-758
- (6)岸田慎司，その他9名“既製杭・RC杭を用いたト型部分架構に対する静的載荷実験 その1 実験概要”，日本建築学会大会学術講演梗概集（2015），pp. 215-216
- (7)金子治，川股紫織，中井正一，関口徹，向井智久，“東北地方太平洋沖地震における杭基礎の被害要因に関する解析的検討”，日本建築学会構造系論文集，第80巻，No. 717（2015），pp. 1699-1706.
- (8)土方勝一郎，その他5名“東北地方太平洋沖地震において杭基礎が大破した建物の被害要因分析 その4 建物杭地盤連成解析による検討”，日本建築学会大会学術講演梗概集（2015），pp. 221-222
- (9)若林博，その他8名“地震後の継続使用性を確保した新建築物の設計・耐震性能評価 その5 杭基礎の耐震設計フローと耐震性能評価方法”，日本建築学会大会学術講演梗概集（2015），pp. 53-54
- (10)伊藤裕一，その他6名“地震後の継続使用性を確保した新建築物の設計・耐震性能評価 その9 高層壁付き共同住宅の杭基礎の耐震設計・評価例”，日本建築学会大会学術講演梗概集（2016），pp. 47-48
- (11)日本建築学会，建築基礎構造設計指針（2019），pp. 16-22，丸善出版
- (12)武藤清，鉄筋コンクリート構造物の塑性設計－耐震設計シリーズ2－（1964），pp. 41-53，丸善出版
- (13)金子治，成田修英，“2016年熊本地震での杭基礎の被害とその要因に関する解析”，日本建築学会構造系論文集，第82巻，No. 737（2017），pp. 1047-1054.