

5.1 まとめ

本研究では、建築物の地震後の継続使用性を確保するために、杭基礎構造システムの構造性能に関する研究を実施した。第二編では、杭基礎部分架構試験体を用いて、「パイルキャップのせん断終局強度評価式の検証」、「既製杭を対象とした靱性のある杭頭接合面降伏の実現可能性」、「場所打ちコンクリート杭を対象としたパイルキャップ降伏破壊モードの検証」というそれぞれ三つの検討課題についての検討を実施した。それぞれの検討項目について得られた知見を以下に示す。

5.1.1 パイルキャップのせん断終局強度評価式の検証

第2章 2.1 項より

(1) パイルキャップ帯筋量 p_w による影響

- 1) 試験体 A-8, A-9 の最大耐力の決定要因はいずれもパイルキャップせん断破壊であった。しかし最大耐力後の破壊性状は、試験体 A-8 は柱脚部の圧壊、試験体 A-9 はパイルキャップせん断破壊と、異なる破壊性状を示した。これより、パイルキャップ帯筋を多く配筋することで最大耐力後のパイルキャップの損傷を抑制することができると考えられる。
- 2) パイルキャップ入力せん断力に関して、 p_w が多くなっても入力せん断力はほぼ変わらないか、もしくは若干大きくなる傾向が見られた。最大耐力は p_w が多い試験体 A-8 が正負両方向共に大きくなった。

(2) パイルキャップ内柱帯筋量 c_w による影響

- 1) パイルキャップ内柱帯筋量 c_w の異なる試験体 3 体の破壊性状に大きな違いは見られなかった。よって柱帯筋はパイルキャップ帯筋よりもパイルキャップの損傷に与える影響が小さいと考えられる。さらに、柱帯筋量 c_w を多くしても帯筋のひずみはあまり変わらないことが分かった。このことから、パイルキャップ帯筋と柱帯筋がパイルキャップのせん断抵抗に寄与している割合が異なると考えられる。
- 2) パイルキャップ入力せん断力に関して、 c_w が 0.15%より少ない範囲では c_w が多いほど入力せん断力は大きくなるが、0.15%より多い範囲では入力せん断力はほぼ一定の値となったことから、 c_w がパイルキャップのせん断強度に与える影響は、本研究の範囲内では $c_w \leq 0.15\%$ に定められる。

(3) パイルキャップ内の総帯筋量 ($p_w + c_w$) による影響

- 1) パイルキャップ内の総帯筋量 ($p_w + c_w$) がほぼ同量配筋され、 p_w と c_w のそれぞれの配筋比率が異なる試験体を比較すると、最大耐力にあまり大きな差は見られなかったことより、パイルキャップ内の総帯筋量が最大耐力に起因していると考えられる。
- 2) パイルキャップ入力せん断力に関して、正載荷側に関しては概ねパイルキャップ内の総帯筋量が多くなるほど入力せん断力が大きくなる傾向にあったが、負載荷側では総帯筋量が多くなっても入力せん断力がほぼ変わらない結果となった。

(4) 偏心による影響

- 1) , 最大耐力は正載荷側では偏心柱を有する試験体が負載荷側より大きくなり、負載荷側では偏心の無い試験体とほぼ同じ値となった。偏心によって層せん断力を算出する際の力のつり合いの影響で、最大耐力が大きく異なった。
- 2) 正載荷時に関して、パイルキャップ下面の損傷が大きくなり杭の埋込部で破壊したため、パイルキャップ内の配筋が同じでも偏心する影響で破壊性状が異なる可能性があることが

分かった。

- 3) 入力せん断力に関して、正負共にパイルキャップ入力せん断力は大きくなった。これは基礎梁主筋のパイルキャップへの埋め込み長さによる影響だと考えられる。

第2章 2.2 項より

(5) 架構形状の違いによる影響

- 1) 破壊性状は基礎梁に接続している部分と接続していない部分で異なり、最大耐力はパイルキャップのせん断破壊により決定され、最終破壊性状はパイルキャップ上部でせん断破壊、パイルキャップ下部で杭頭接合部破壊と判断した。
- 2) 杭頭接合部破壊は、杭頭面のコンクリートが圧壊し、杭が抜け出し、めり込むことで、杭頭接合部が損傷する破壊性状と考えられる。
- 3) せん断耐力実験式において、十字形も適合性があるといえるが、精度は良くない。
- (6) ト形試験体と十字形試験体の最大耐力の差異について、基礎梁のモーメントは梁が多い分、層せん断力も大きくなる。十字試験体の方がト形試験体より早く最大耐力を迎えた理由として、基礎梁のモーメントが大きくなれば、それに釣り合う杭のモーメントもト形試験体より大きくなる為、最大耐力を早く迎えたと考えられた。
- (7) 十字形試験体の基礎梁が杭頭接合面に及ぼした影響について、杭頭定着筋の鉄筋降伏状況より、北基礎梁のせん断力は、正載荷時は杭頭接合面への圧縮力として、負載荷時は引張力として作用していることが考えられた。今回の実験では正載荷時の杭頭接合面への圧縮力が大きく作用したと考えられた。

(8) パイルキャップせん断ひび割れ強度

- 1) 既往の研究によって示されたパイルキャップせん断ひび割れ強度について、アーチ機構におけるパイルキャップ有効断面を用いることで、従来の仮想断面を用いるより実験値を安全側に評価できるが、載荷方向によって実験値と計算値の評価が大きく異なるため、パイルキャップせん断ひび割れ強度の有効断面は載荷方向によって異なる可能性がある。

5.1.2 既製杭を対象とした靱性のある杭頭接合面降伏の実現可能性

第3章では、既製杭を対象とした靱性のある杭頭接合面降伏の実現可能性についての検討を行い、以下のような知見を得た。

(1) 杭頭埋込部の性状について

- 1) 試験体 D-4 の最大耐力は正載荷ではアンカー筋の降伏、負載荷では柱主筋の降伏によって決定し、最終破壊性状は正載荷では杭頭接合部破壊、負載荷では柱の曲げ圧壊と判断した。
- 2) 中子筋の量が多いほど杭頭接合部が強化され、杭の変形が抑えられると考えられる。

(2) 靱性のある杭頭接合面降伏時挙動について

- 1) 埋込長さを $1.5D$ の試験体では、負載荷時の基礎梁の曲げひび割れが顕著であり、基礎梁の曲げ破壊が生じた。その結果、負載荷時の杭部材角は他の試験体に比べ小さくなった。
- 2) 最大耐力時までの杭頭接合部底面のひび割れ、剝離、剝落は、杭頭埋込長さを $1.5D$ とした試験体 DR-2 が最も顕著であった。
- 3) 最大耐力時までの杭頭接合部底面のひび割れ、剝離、剝落は、杭頭の埋込を無しとした試験体 DR-3 ではあまり発生しなかった。埋込無しとした試験体 DR-3 では最大耐力は最も小さ

第5章 まとめ

いが、その後の耐力低下は緩やかになった。

- 4) 杭頭埋込部周辺に十分な配筋を施すことで、杭頭埋込部は高い変形性能を発揮する傾向にあった。
- 5) 既往評価式を用いて杭頭埋込部の曲げ耐力を算出した結果、設計通り杭頭埋込部の曲げ破壊が先行する結果となった。また、高圧縮軸力が作用する試験体で危険側となる結果となった。
- 6) パイルキャップ底面でのひび割れ・剝離・剝落について、ト形試験体、十字形試験体を比較した結果、概ね同様の破壊形状となった。一方で十字形試験体の方が、ひび割れが発生した範囲は大きいことが観察できた。また実験後の試験体切断観察からも、概ね同様の破壊形状をしていることがわかった。剝落した部分の深さについては、北基礎梁のせん断力の作用によって、十字形試験体の方が、損傷が深いように観察できた。

5.1.3 場所打ちコンクリート杭を対象としたパイルキャップ降伏破壊モードの検証

第4章では、場所打ちコンクリート杭を対象としたパイルキャップ降伏破壊についての検討を実施し、以下のような知見を得た。

(1) 場所打ちコンクリート杭におけるパイルキャップの性状について

- 1) 最終破壊形態については試験体 E-1 正載荷でパイルキャップせん断破壊、負載荷で柱の曲げ降伏後のパイルキャップ降伏破壊、試験体 E-2 正載荷で梁の曲げ破壊、負載荷で柱の曲げ破壊となった。
- 2) パイルキャップ袴筋にはせん断ひび割れの幅が広がることを抑制する効果がある。
- 3) 試験体 E-2 の正負載荷において、基礎梁の降伏によって最大耐力が決定したために、パイルキャップせん断耐力の計算値より最大耐力が小さくなった。なお、せん断破壊した試験体 E-1 においても、既往の実験で考察された既製杭を対象としたパイルキャップせん断耐力計算式では整合性がとれなかった。また、試験体 E-1 から試験体 E-2 のようにパイルキャップのせん断補強筋量を増やすことによって、正側では脆性的なパイルキャップのせん断破壊から基礎梁の曲げ破壊へと、負側では柱の曲げ降伏後のパイルキャップ杭頭部の曲げ破壊から柱脚の曲げ破壊へと異なることがわかった。破壊を脆性的にしないためには、パイルキャップ内せん断補強筋の配筋を増やす必要がある。

(2) 場所打ちコンクリート杭を有するパイルキャップの降伏破壊耐力について

基礎部材指針案で示された危険断面は試験体 E-2 のひび割れ性状より整合性があることがわかった。しかし、正載荷側危険断面 A-C に沿ったひび割れは確認できなかった。また、軸力によって危険断面が異なることが試験体 E-1 のひび割れ結果によって明確になった。

5.2 今後の検討課題

それぞれの検討項目について、今後の検討課題を以下に示す。

5.2.1 パイルキャップのせん断終局強度評価式の検証

十字形部分架構の実験では、パイルキャップがせん断破壊したものの、パイルキャップ下部では杭頭接合部破壊も発生した。そのため、既往の評価式では精度良くパイルキャップのせん断終局強度を評価できなかった。今後は、杭頭接合部を強化した十字形試験体を用いて、せん断終局強度式の実証実験が必要である。

5.2.2 既製杭を対象とした靱性のある杭頭接合面降伏の実現可能性

- (1) 杭のパイルキャップへの埋込深さの違いによる杭頭接合面降伏の破壊メカニズムの検討を実施する。
- (2) 試験体 DR-3 では初期のサイクルの段階から杭頭定着筋が降伏していたにもかかわらず、パイルキャップ底面部から杭の埋込部に向かって定着筋が降伏していった。杭自体は耐力が低いにも関わらず内部まで破壊されていった原因の解明が必要である。
- (3) 実験終了後に試験体の切断を行った結果、杭頭部の埋込長さを $1.5D$ にした試験体 DR-2 の切断面から、基礎梁が取り付けられている側の領域に、てこ機構によって生じた圧縮力によってひび割れが発生していたことがわかった。パイルキャップ内において、てこ機構によって生じる圧縮力と基礎梁との領域内で、どの様に力が伝達しているか解明することが必要である。
- (4) 杭頭接合面降伏時耐力の計算では支圧係数を用いてコンクリートの支圧による強度上昇を評価しているが、決まった評価式が確立されておらず今後の検討が必要である。
- (5) 杭頭埋込部の曲げ破壊を部分架構形式で設計した試験体の実験例は少ないため、今後更なる実験データの累積が必要である。また、今回は検討では1体のみ十字形試験体を用いた実験を実施したが、今後は十字形試験体においてもさらなる実験データの累積が必要である。

5.2.3 場所打ちコンクリート杭を対象としたパイルキャップ降伏破壊モードの検証

- (1) 場所打ちコンクリート杭におけるパイルキャップの実験が極端に少ない。試験体を増やし、パイルキャップの降伏破壊のメカニズムを明確にする必要がある。
- (2) パイルキャップせん断補強筋について、脆性的破壊を防ぐため補強筋の配筋量を増やす必要があるが、場所打ち杭のパイルキャップに必要な最小補強筋量など、適切な配筋方法を研究する必要がある。
- (3) 本研究より、基礎梁の破壊により架構の耐力が大きく低下することがわかった。基礎梁の降伏を先行した時に、架構としてどのように靱性能を確保できるのかさらなる検討が必要である。

5.2.4 その他

- (1) 本研究では、既往の研究に基づき試験体の破壊性状を整理した。しかし、一連の実験における試験体の破壊性状を見ると、既往の研究では整理できていない破壊や、既往の研究で定義されている破壊が複合的に発生する場合があった。このことから、今後は最大耐力時の破壊および最終変形時における破壊の性状について再整理する必要がある。例えば、パイルキャップ底面のひび割れ性状が割裂によるものでないとしたらどのようなメカニズムで発生したのか、スリップ性状のように見えるパイルキャップ基礎梁下端位置に発生した水平方向のひ

第5章 まとめ

び割れが最大耐力にどのように影響したのかなどが整理できていない。

- (2) 本研究では、杭基礎構造システムについて杭頭接合面や柱脚，基礎梁の危険断面位置を考慮した杭基礎部分架構のモデル化についての検討が十分に実施できなかった。
- (3) 今回の実験では試験装置の都合により，立体杭基礎部分架構の実験や，複数杭が取り付いた部分架構の実験を実施できなかった。今後は，立体杭基礎部分架構のように直交梁がついた場合の構造性能や，また複数杭部分架構の場合は配筋がどうなるのかなどの検討が必要である。