

論文 場所打ち杭縁端部の水平押し抜きせん断耐力評価

井上 敦雄*1・幸左 賢二*2・清水 英樹*3・白戸 真大*4

要旨: 場所打ち杭において、杭とフーチングの縁端距離を縮小することにより施工コストを削減することが可能となるが、縁端距離を縮小することで特に水平力の影響が大きい場合には水平押し抜きせん断の発生が懸念される。そこで本検討では既往の実験結果を基に杭縁端の押し抜きせん断耐力の評価を行った。その結果、水平押し抜きせん断に対し、ひび割れが発生するまではコンクリートが大きく抵抗し、ひび割れ発生以降鉄筋も有効に抵抗する。このことから、鉄筋とコンクリートのせん断耐力を合算することで実験の最大耐力を精度良く評価できることを確認した。

キーワード: 杭縁端, 押し抜きせん断, 場所打ち杭

1. はじめに

橋梁の下部構造において、杭基礎の場合には躯体各部からの荷重はフーチングを介して杭から地盤へと伝達される。それゆえ杭本体は勿論のこと、杭反力に対してフーチングも破壊しないように設計を行う必要がある。現在、道路橋示方書においては、フーチング縁端から最外周の杭までの距離（以下、縁端距離）は、場所打ち杭の場合、杭径（D）の0.5倍以上を確保する必要があると規定されている。一方、首都高速道路では独自の実験により、場所打ち杭に限り縁端距離を25cm（内、施工誤差10cmを考慮）としても良いと規定しており、フーチング寸法の縮小や土留め、掘削量の低減を目的として、縁端距離を縮小させることが行われる場合もある。例えば図-1に示す様に、一般的な橋梁において縁端距離を道示規定値（杭径の0.5倍）から首都高基準（25cm）へと縮小させることができれば、1フーチングあたり10~20%程度コンクリートの体積を削減することができる。

縁端部のフーチング破壊について様々な照査が必要であるが、水平力の影響が大きい場合、縁端距離を縮小させることで特に懸念される破壊形態は水平方向の押し抜きせん断破壊である。これに対し首都高速道路では鉄筋量、杭径、杭軸力をパラメータとした多数の実験³⁾を行い、水平押し抜きせん断破壊について、終局荷重時はコンクリートの分担はなく、底版軸方向鉄筋の降伏荷重と実験の最大荷重が概ね等しいことから、終局荷重は鉄筋の降伏に依存していると推定し、フーチング内の鉄筋の抵抗のみを考慮した独自の水平押し抜きせん断耐力式を用い照査している。

一方、道路橋示方書における水平押し抜きせん断の照査式ではフーチングコンクリートのみを抵抗要素としている。²⁾

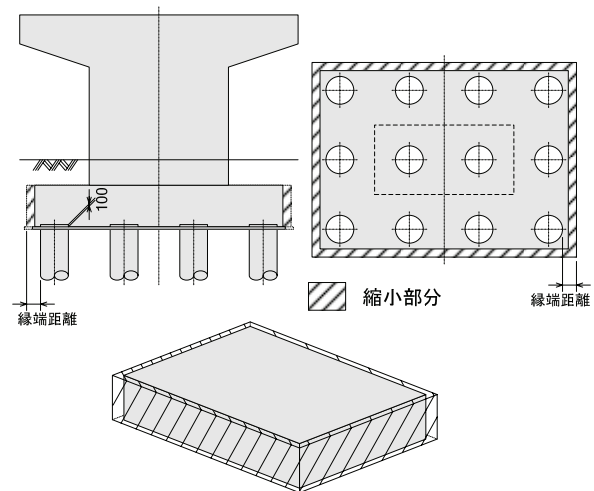


図-1 縁端距離の縮小

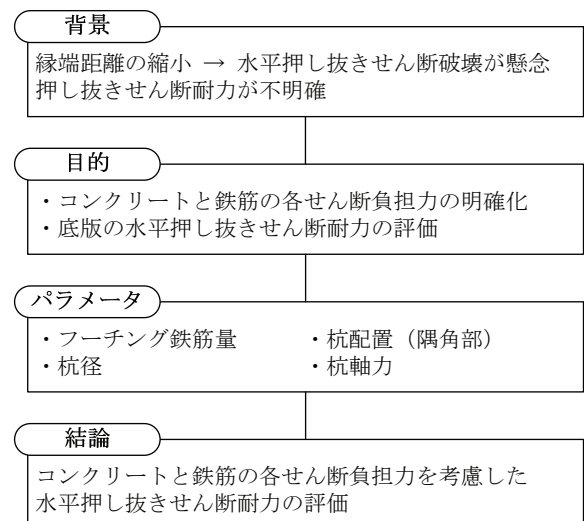


図-2 検討フロー

*1 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (正会員)

*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科教授 PH.D (正会員)

*3 九州工業大学大学院 工学研究科 建設社会工学専攻 (正会員)

*4 独立行政法人土木研究所 工博

表-1 実験供試体一覧

| Case No. | 杭径 (mm) | 縁端距離 (mm) | フーチングの下面鉄筋 | フーチング厚 (mm) | 軸力 (tf) | 備考 |
|----------|---------|-----------|------------|-------------|---------|-----------|
| H-1 | 375 | 25 ○ | D13 | 1000 | なし | 縁端距離：小 |
| H-2 | 375 | 62.5 | D13 | 1000 | | 標準 |
| H-3 | 375 | 62.5 | D16 ○ | 1000 | | 下面鉄筋：増 |
| H-4 | 375 | 125 ○ | D13 | 1000 | | 縁端距離：大 |
| H-5 | 375 | 62.5 | 無筋 ○ | 1000 | | 鉄筋なし |
| H-6 | 375 | 62.5 | 無筋 ○ | 1000 | | 鉄筋なし |
| H-7 | 300 ○ | 62.5 | D13 | 1000 | | 杭径：小 |
| H-8 | 500 ○ | 62.5 | D13 | 1000 | | 杭径：大 |
| H-9 | 375 | 62.5 | D13 | 1000 | | 隅角部 |
| H-10 | 375 | 62.5 | D13 | 1000 | | 隅角部、45°載荷 |
| H-11 | 375 | 62.5 | D13 | 1000 | | 2本同時載荷 |
| H-12 | 750 ○ | 125 ○ | D19 ○ | 1000 | | 寸法効果 |
| H-13 | 375 | 62.5 | D13 | 500 | | (NH-)との比較 |
| NH-1 | 375 | 62.5 | D13 | 500 | -10 | 引抜き |
| NH-2 | 375 | 62.5 | D13 | 500 | 45 | 押込み(常時) |
| NH-3 | 375 | 62.5 | D13 | 500 | 90 | 押込み(常時2倍) |

※○：H-2を基準とした場合の着目パラメータ
フーチング下面鉄筋は100mmピッチで配筋

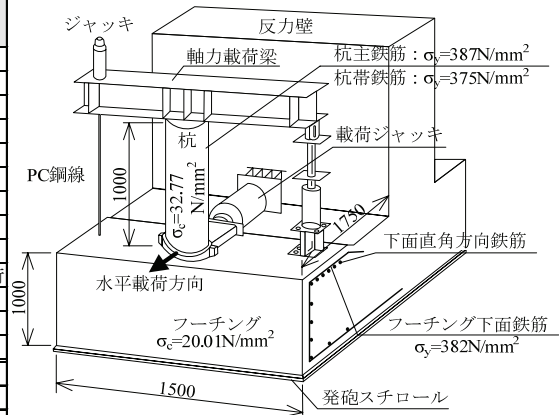


図-3 供試体載荷状況および材料特性

以上のようにフーチング端部における水平押し抜きせん断破壊の抵抗メカニズムについては不明確な点が多く、特にコンクリートのせん断負担力と、鉄筋のせん断負担力を明確に評価するには至っていない。

図-2に本検討フローを示すが、本研究では首都高道路の行った多数の実験³⁾を基に、フーチング縁端部における水平押し抜きせん断破壊の耐力について検討し、コンクリートと鉄筋の各せん断負担力を考慮した水平押し抜きせん断耐力を評価した。

2. 実験概要

2.1 供試体形状と載荷方法

表-1に実験供試体一覧を示す。水平押し抜きせん断耐力への影響が大きいと考えられる、杭径、縁端距離、フーチング下面鉄筋比、杭軸力をパラメータとし、供試体の縮尺は1/4である。フーチングと杭の鉄筋については、実構造物と同程度の鉄筋比となるように配筋されている。ここで、杭径Dは375mmを基本値としている。次に縁端距離については、道路橋示方書では0.5Dの187.5mmであるが、本実験では縁端距離を縮小し、62.5mm(実橋で250mm)を基本値としている。H-5およびH-6供試体は、コンクリートのせん断負担力を確認することを目的とし、杭の主鉄筋、帯鉄筋を除き、フーチング内には全く鉄筋を配置していない無筋供試体である。また、H-9およびH-10供試体は、杭をフーチングの隅角部に設置したケースであり、H-10ケースでは水平力の載荷方向をフーチング鉄筋軸方向に対し45°方向としている。なお、この実験ではフーチングと杭を上下逆にした状態で載荷を行っているため、フーチングの下面鉄筋とは、供試体上面の鉄筋に対応している。

載荷方法は図-3に示すように、反力壁と杭の間にジャッキをセットし、杭基部に水平力を与える。この場合、杭には曲げモーメントが作用せず、せん断力のみが作用

するため、フーチング縁端部の押し抜きせん断破壊が先行するような載荷方法となっている。水平荷重はサイクル載荷を行い、載荷時は5tf毎、除荷時は10tf毎にひずみ、変位及び目視でのひび割れの計測を行っている。

NH-1からNH-3供試体は、一定軸力を載荷させた状態で水平載荷を行ったシリーズである。杭体に導入される軸力は最大で90tfであり、コンクリート設計基準強度の14-27%となっており、実橋梁の軸力より大きく設定している。

2.2 実験結果

図-4に鉄筋のあるケースの代表としてH-2、無筋ケースの代表としてH-5の破壊形状図とひび割れの平面図及び中央断面図を示す。

破壊面については、鉄筋のある場合(H-2)フーチング下面(供試体では上面)では杭中心付近から発生したひび割れがほぼ45°方向に伸びた後フーチング端部に達することで三角形上に押し抜きせん断破壊が発生した。また、杭中央の断面図を見ると、ひび割れは杭中心よりやや後方から鉛直方向に対して約30°方向に伸びた後、杭主鉄筋に沿って伸び、杭主鉄筋が途切れる付近から後方へ伸展し、フーチング上面(供試体では下面)に達する破面形状を示した。

鉄筋なしのケース(H-5)もほぼ同様の破壊形状であったがフーチング下面では45°よりも広めの角度で伸展する傾向となる。杭中央断面では最初30°よりも鋭い角度で伸びた後、フーチング上面付近でのひび割れの後方への回り込みが大きく、鉄筋のあるケースに比べ大きな破壊面が見られた。また、ひび割れ発生とほぼ同時にフーチング前面までひび割れが伸展する脆性的な破壊であった。

図-5に各ケースの荷重-フーチング前面変位関係を示す。鉄筋のあるケースでは一般部(H-2)、隅角部(H-9, 10)ともに載荷重約200~300kNにおいて変位が生じ始め、

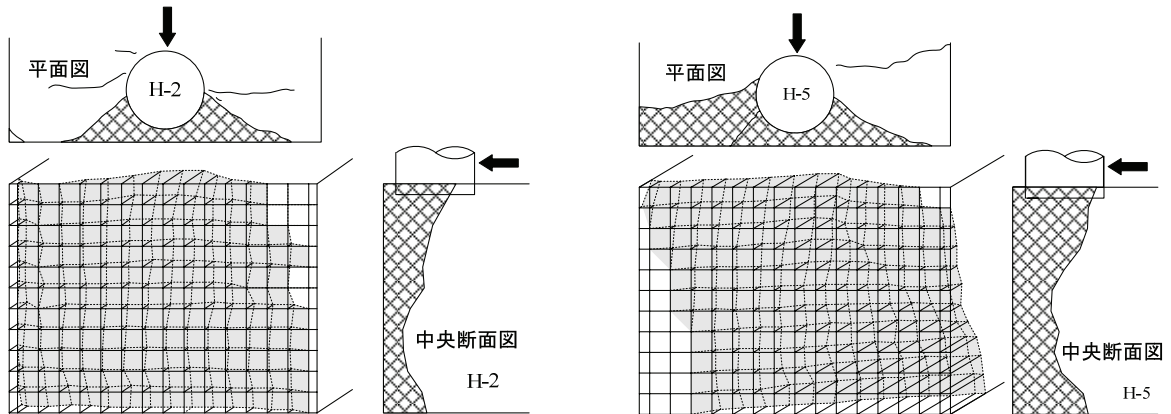


図-4 破壊形状図とひび割れ図

変位 2~5mm 程度でほぼ最大荷重に達する。その後の荷重減少は小さく、変形性能に富んだ挙動を示している。

一方、鉄筋の無いケース (H-5, 6) では載荷重 200kN 程度で目視によりひび割れが確認されてから変位が急増し始め、変位 2mm 程度で最大荷重に達した後、変位の増大と共に荷重が減少しており、脆性的な破壊性状を有する。以上のことから、フーチング内の鉄筋がひび割れ発生後の水平押し抜きせん断に対する変形性能に寄与すると考えられる。

鉄筋の抵抗を確認するため図-6 に本実験の基準ケースである H-2 供試体の荷重と各鉄筋ひずみの関係を示す。なお、図中のひび割れ発生荷重とは目視により最初にひび割れが確認されたときの荷重である。水平力載荷に伴い、まず杭主鉄筋の引張ひずみが大きくなるが、ひび割れ発生荷重まではフーチング内の鉄筋にはほとんどひずみが生じていない。荷重がひび割れ発生荷重に達した付近から下面鉄筋の引張ひずみが顕著となる。そして、フーチング中央部に配置した下面鉄筋が降伏ひずみに達する荷重段階になって初めて下面直角方向鉄筋、前面鉛直方向鉄筋、前面直角方向鉄筋に引張ひずみが生じ、荷重の増加に伴い、ひずみが急激に増加し降伏に至るといった傾向がみられる。このような傾向は縁端距離、杭径、下面鉄筋量が異なる他のケースでも同様であった。

以上より、杭に水平力を作用させた場合、フーチング内の鉄筋の抵抗機構としては、水平力の作用方向に配置された鉄筋 (ここでは下面鉄筋) が水平力を大きく負担すると考えられる。

またフーチング内の鉄筋に引張ひずみが発生するひび割れ発生荷重は、無筋のケース (H-5, 6) の最大荷重とほぼ同等であることから、水平押し抜きせん断に対する杭縁端部の抵抗メカニズムとしては、図-7 に示す様に、ひび割れ発生荷重付近までは、ほとんどコンクリートのみで抵抗するが、ひび割れ発生以降はコンクリートの抵抗が減り鉄筋が抵抗すると考えられる。

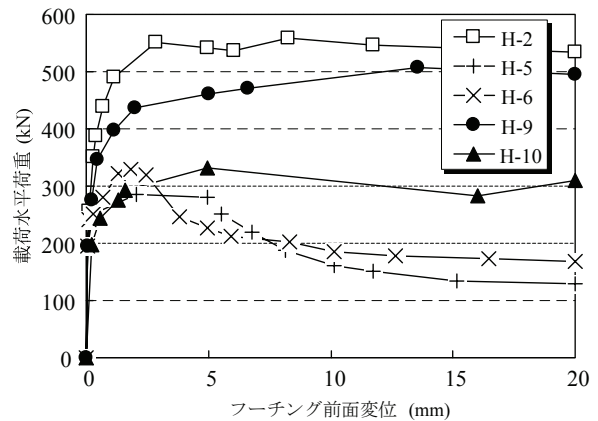


図-5 荷重-変位関係

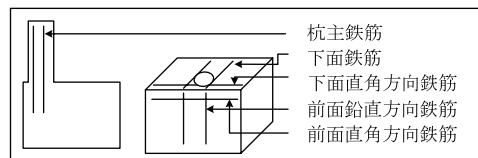
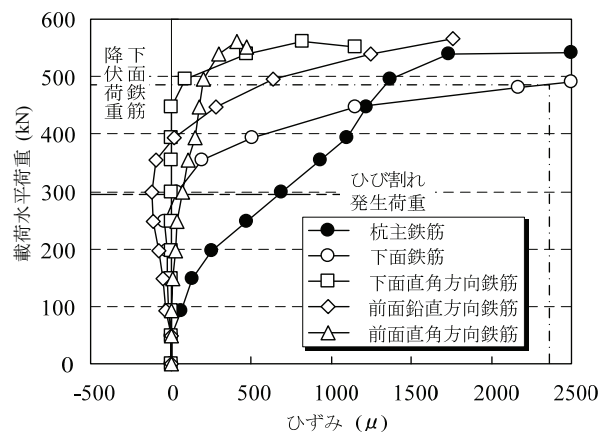


図-6 荷重-鉄筋ひずみ関係

図-8 に各供試体のひび割れ発生荷重と最大荷重の関係を示す。

縁端距離をパラメータとした H-1, 2, 4 を比較すると H-1 と H-2 の間に明確な差はみられなかったが、H-4 ではひび割れ発生荷重、最大荷重とも若干増加している。

下面鉄筋量をパラメータとした H-2, 3, 5, 6 を比較すると、まず鉄筋の有無で最大荷重が大きく異なり、鉄筋のあるケースでも鉄筋量の大きい H-3 の方が大きくなっている。また、鉄筋の無い H-5, 6 ではひび割れ発生荷重以後の荷重の増加が少なくなっている。

杭径をパラメータとした H-2, 7, 8 を比較すると、杭径の増大に伴い最大荷重が増加しており、杭径の違いが縁端部耐力に影響があることが判る。一方、ひび割れ発生荷重についても若干杭径の影響がうかがえる。

杭間隔の影響については杭中心間隔を杭径 D の 2.5 倍とし 2 本同時荷重を行った H-11 と H-2 を比較すると両者に大きな違いは見られなかった。このことより 2.5D の杭間隔では杭同士が影響を及ぼしあうことは無いと思われる。

杭位置の影響について、杭を隅角部に設置した H-9, 10 と H-2 を比較すると、ひび割れ発生荷重、最大荷重共に隅角部のほうが小さく、また隅角部のうちでも 45°方向からの荷重を行った H-10 が小さくなっている。

以上、パラメータ毎にフーチング縁端部耐力の評価を行った結果、各ケースの破壊形態に差異は見られなかったが、破壊面積に差が見られ、その大小は耐力の大小と相関があった。このことから、縁端部耐力はフーチングコンクリートの破壊面積と破壊面内の鉄筋本数に依存するものと思われる。つまり縁端距離や杭径、杭位置の影響もそれらに伴う破壊面積の増大、抵抗鉄筋本数の増加に帰着すると考えられる。

コンクリートの水平押し抜きせん断に対する抵抗としては、無筋ケース (H-5, 6) において、ひび割れ発生荷重以後、荷重がほとんど増加すること無く脆性的な破壊を示したことから、ひび割れ発生荷重まではフーチング内の鉄筋にひずみがほとんど発生していないことから、ひび割れ発生荷重付近までがコンクリートの抵抗分と考えられる。そこでコンクリートの受け持つせん断耐力について、実験で見られたフーチングコンクリートの抵抗面積とひび割れ発生荷重からコンクリートのせん断応力度 τ_c を逆算した¹⁾。図-9 に結果を示す。 τ_c の平均値は 0.35N/mm^2 で、変動係数は 15.6%であった。

3. 杭縁端の水平耐力式と破壊面の評価

3.1 水平押し抜きせん断耐力式

首都高速道路ではこの実験から水平押し抜きせん断照査式を提案しているが、この式では作用せん断力に対しフーチング内の鉄筋のみが抵抗するとされている。しかし、実験ではフーチング内に鉄筋の無いケースでも基準ケースの 1/2 程度の耐力を示しており、縁端部の水平押し抜きせん断に対して、フーチングコンクリートと鉄筋

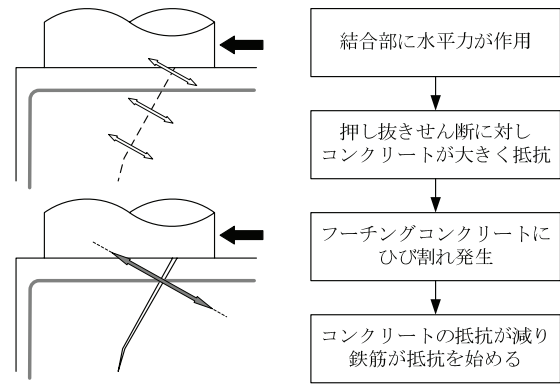


図-7 抵抗メカニズム

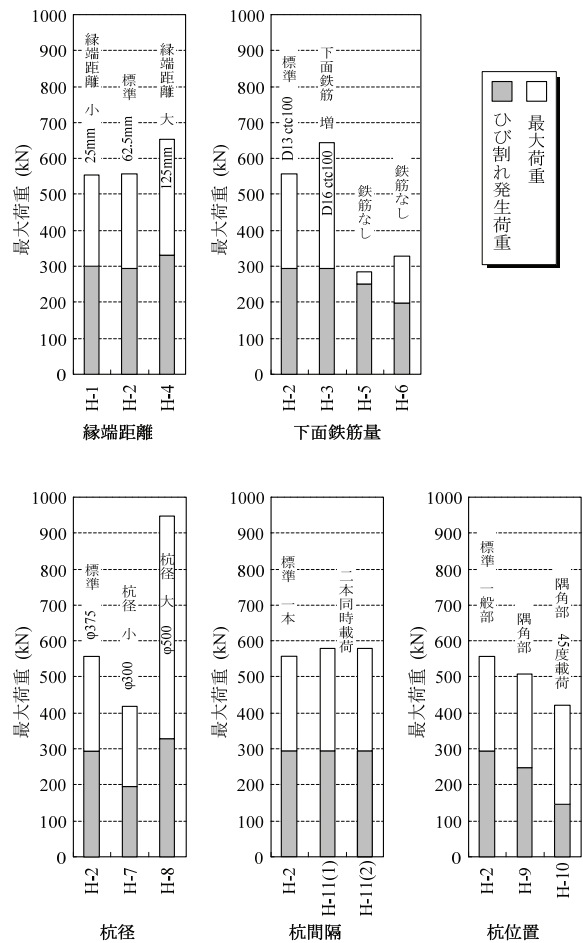


図-8 ひび割れ発生荷重と最大荷重

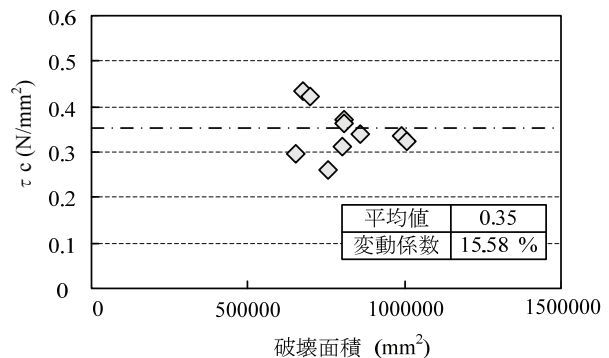


図-9 コンクリートのせん断応力

両方が抵抗していると考えられることから、フーチングコンクリートと鉄筋の各負担せん断力を考慮した水平押し抜きせん断耐力を考慮した水平押し抜きせん断耐力評価式を検討する。縁端部の耐力に影響を与える因子はフーチングコンクリートの破壊面積と破壊面積内に含まれる鉄筋量（とくに水平力の作用方向に配置された鉄筋）が考えられる。そこで式(1)を水平押し抜きせん断耐力評価式とする。

$$P_h = \tau_c A_c + n A_s \tau_{xy} \quad (1)$$

P_h : 水平押し抜きせん断耐力

τ_c : コンクリートの平均せん断応力度 (0.35N/mm²)

A_c : フーチングコンクリートの破壊面積

n : 想定破壊面を横切る鉄筋本数

A_s : 想定破壊面を横切る鉄筋 1 本あたりの断面積

τ_{xy} : 鉄筋のせん断応力度 ($\tau_{xy} = f_{yd} / \sqrt{3}$)

3.2 想定破壊面の設定

フーチングコンクリートの破壊面積 A_c について、実験では一般部において全ての供試体で三角形上の破壊面が確認されており、ここでは実際に見られた破壊面の平均を耐力式用の破壊面とする。

図-10 に基準ケース H-2 のひび割れ図を示す。(a)の平面図より、フーチング上面のひび割れはその他のケースも含め杭の中心付近から発生しており、その角度の平均は 43°であった。次に、(b)の中央断面図において、ひび割れ発生位置からひび割れ角度が急激に変わる位置までをせん断に対するコンクリートの抵抗範囲と考え、直線で結び、その角度を求めると平均値は 19.4°となった。

以上の結果より想定破壊面は平均の角度から安全を見て図-11 に示す様に上面図では杭中心より 45°、断面方向には杭中心より 20°とする。ひび割れ発生位置について、図-10 に示す様に中央断面図において実際の破壊面では杭中心より後方から発生しているが、杭端部の断面では杭中心付近からのひび割れとなることから杭中心を結んだ破壊面を想定する。断面方向のひび割れ角度は通常の 45°に比べて 20°と急なものになっているが、これは、断面でのひび割れは杭中心より発生した後、杭主鉄筋に沿って下方へ伸展するためと考えられる。

3.3 水平押し抜きせん断耐力の評価

以上の条件を用いて実験の最大耐力の評価を行う。図-12 に式(1)により算出される水平押し抜きせん断に対するコンクリートと鉄筋の負担耐力と実験値の耐力比を示す。実験値としてはコンクリート負担分はひび割れ発生荷重、鉄筋負担分は最大荷重とひび割れ発生荷重の差とする。コンクリートの耐力比の平均は 0.93 となり、差異は認められるものの概ね耐力を評価できている。一方、鉄筋の耐力比の平均は 0.79 となり実験値を安全側に評価しているが、これは式(1)では鉄筋の負担分としてフーチング下面鉄筋以外の鉄筋の抵抗を考慮していないためと

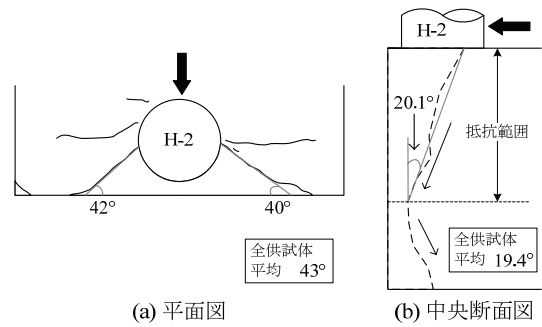


図-10 ひび割れ角度

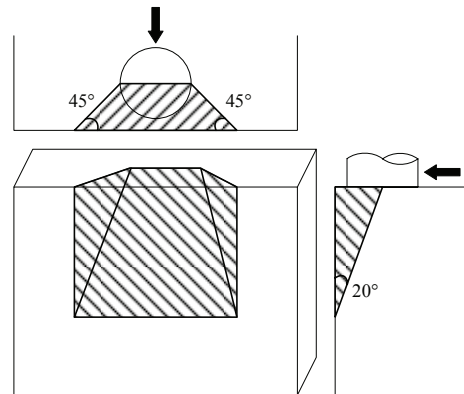


図-11 想定破壊面

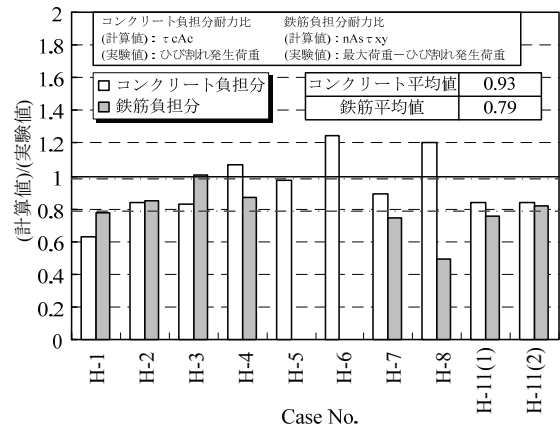


図-12 各要素の計算値と実験値の耐力比

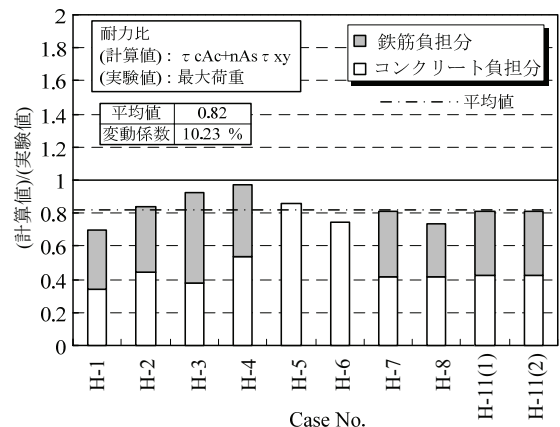


図-13 計算値と実験値の耐力比

考えられる。例えば、下面鉄筋と同様にひび割れと 45°で交わる下面直角方向鉄筋の抵抗を考慮すると耐力比は 0.98 となるが鉄筋抵抗分に占める下面直角方向鉄筋の割合は 20%と低い。また、図-6 に示す様に下面鉄筋以外の鉄筋は終局に近い状態から有効となるため、ここでは下面鉄筋のみを考慮することとする。

図-13 に式(1)によって算出される水平押し抜きせん断耐力と実験の最大荷重の耐力比を示す。図より、(計算値) / (実験値) は平均で 0.82, 変動係数 10.2%となり、コンクリートの想定破壊面と破壊面内の下面鉄筋の抵抗を考慮しただけでも実験の最大耐力を 8 割程度評価可能であることが分かる。

3.4 隅角部での検討

杭を隅角部に設置したケース (H-9, 10) について、一般部と同様に式(1)により実験の耐力を評価する。コンクリートの想定破壊面積は一般部と同様の角度を用いるが、H-10 では 45°方向から水平力の载荷を行っているため図-14 に示すような破壊面となる。この時の想定破壊面積は基準ケース H-2 に対し H-9 では約 75%, H-10 では約 40%となりコンクリートの抵抗が減少することが予想される。H-10 では実際の破壊面はひび割れが杭後方から発生しているため、想定破壊面積は実際の破壊面積よりは小さくなっている。H-9 でも H-10 ほど顕著ではないが、想定破壊面よりも大きな破壊面が見られた。

耐力を算出するに当り一般部では抵抗鉄筋として、水平力の作用方向に配筋された下面鉄筋のみを考慮していたが、H-10 ケースでは载荷方向が下面鉄筋に対して 45°方向であるため、抵抗鉄筋としては下面鉄筋に加え下面直角方向鉄筋が同様に抵抗すると考えられる。実験でも下面鉄筋と下面直角方向鉄筋は同程度のひずみが発生していることから H-10 については抵抗鉄筋として下面直角方向鉄筋を加え耐力を算出する。

式(1)と想定破壊面積を用いて耐力を算出し実験の最大荷重と比較した結果を図-15 に示す。実験との耐力比は H-9 で 0.75, H-10 で 0.76 となり他ケースと同程度の精度となった。H-10 では破壊面積が小さく、鉄筋は両方向の抵抗を考慮できるため、最大耐力に占めるコンクリート負担分の割合が一般部の 53%に比べ 35%と小さくなっている。そのため、破壊面積の差が耐力に及ぼす影響が小さくなったことが考えられる。

以上より隅角部では一般部と同様の方法で破壊面積を算出した場合、破壊面積を過小評価するものの、他ケースと同程度の精度で実験の最大耐力を評価可能である。

4. まとめ

杭径, 縁端距離, フーチング鉄筋比をパラメータとした実験を基にフーチング縁端部の押し抜きせん断耐力につ

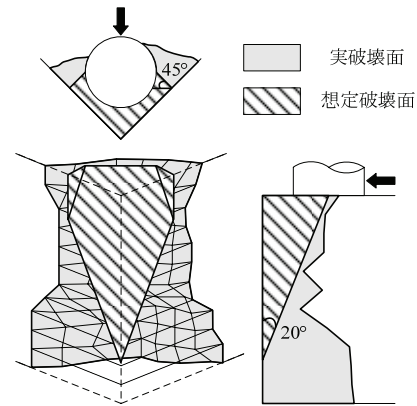


図-14 実破壊面と想定破壊面 (隅角部 H-10)

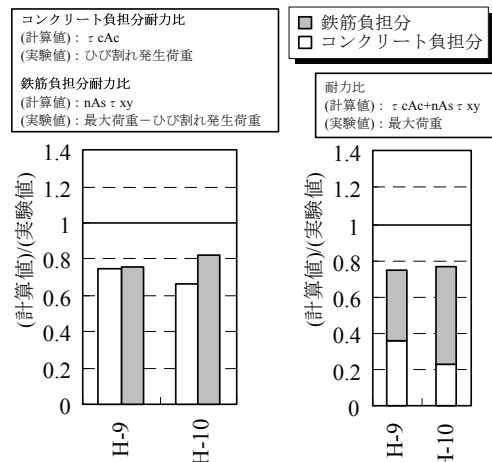


図-15 計算値と実験値の耐力比 (隅角部)

いて検討した結果以下の知見が得られた。

- (1) フーチング縁端部の水平押し抜きせん断に対して、コンクリートと鉄筋が共に抵抗しており、各耐力はコンクリートについては破壊面積, 鉄筋については破壊面内の鉄筋の総断面積によって評価できることを確認した。
- (2) 水平押し抜きせん断に対する抵抗メカニズムはひび割れ発生まではフーチングコンクリートが抵抗し、ひび割れ発生以降は鉄筋が抵抗を始める。
- (3) 押し抜きせん断評価式として式(1)と想定破壊面を使用することで一般部, 隅角部における実験の最大耐力を精度良く評価できることを確認した。

参考文献

- 1) 宮脇祐太ら：杭とフーチングの縁端距離に関する解析的検討, 第 11 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.163-168, 2008.2.
- 2) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV 下部構造編, 2002.3
- 3) 場所打ち杭とフーチングの縁端距離に関する技術資料：首都高速道路公団, 1989.