

杭とフーチングの縁端距離に関する解析的検討

宮脇 祐太¹・幸左 賢二²・白戸 真大³・野々村 佳哲⁴

¹学生会員 九州工業大学 工学部建設社会工学科（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

²正会員 Ph.D 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

³正会員 工博 独立行政法人土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

⁴正会員 独立行政法人土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

1. はじめに

道路橋示方書においては、図-1に示すように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。近年、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。しかし、フーチンへは杭頭軸力が作用し、フーチング中にも図-2に示すようなストラット・タイ状の応力伝達機構が構成されると考えられるうえ、さらに杭から水平力、曲げモーメントが伝達されるため、縁端部は極めて複雑な荷重状態になる。そこで、実験により破壊形態を確認することが重要であると考えられ、単純化荷重状態での実験が行なわれつつある¹⁾²⁾。

縁端部のフーチング破壊に対して、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懸念される破壊形態は水平方向の押抜きせん断破壊である。これに対し、例えば首都高速道路では、鉄筋径(鉄筋量)、杭径、杭軸力をパラメータとした多数の実験²⁾により、独自の水平押抜きせん断耐力式を採用している。この水平押抜きせん断耐力式では、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。

一方、類似する破壊形態として、道路橋示方書における橋座部の水平耐力算出式が挙げられる。しかし、橋座ではアンカーボルトのみによって接合されているのに対し、場所打ち杭ではRC杭自体が接合されていること等から、橋座式をフーチング縁端部における水平押抜きせん断耐力へ適用するには検討を要する。

以上のようにフーチング端部における水平押抜き

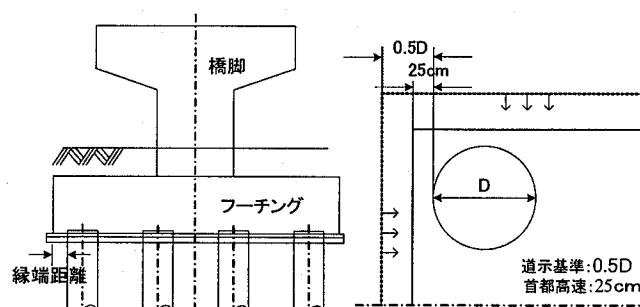


図-1 杭とフーチングの縁端距離

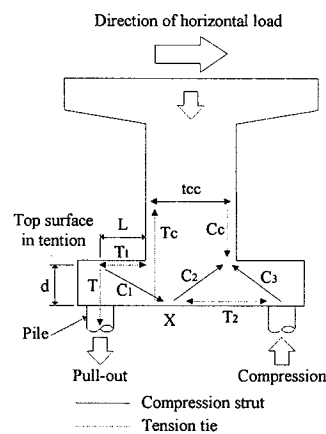


図-2 フーチングの抵抗機構

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までには至っていない。

そこで、本研究では首都高速の行った多数の実験を参考に、フーチング縁端部における水平押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明らかにする。ついで、二次元弾塑性FEM解析を用いて実験で生じた押抜きせん断破壊の破壊メカニズムについて検討した。

2. 実験概要

(1) 供試体形状と載荷方法

本検討では、池内および小笠原²⁾の行った実験を用いている。図-3に供試体形状を示す。図に示すように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。従って、フーチングの下面鉄筋とは、この実験では模型上面の鉄筋である。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。

表-1に実験供試体一覧を示す。パラメータとして、水平押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、杭軸力であり、供試体の縮尺は1/4である。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、道路橋示方書基準では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かつ杭位置の施工誤差100mmを見込む)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、フーチングには鉄筋を配置していない無筋供試体である。

載荷は、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とで行われている。この場合、杭にはせん断力のみが作用し、フーチング縁端部の押抜きせん断破壊が先行するように配慮している。さらに、NH-1からNH-3供試体は杭からの曲げモーメントは載荷しないものの、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である一方、コンクリート設計基準強度の14-27%程度であるので、実橋梁の軸力より大きく設定している。また本供試体の場合、橋脚、橋台躯体部が存在しないため、図-2に示したような杭から杭基部への荷重伝達機構は形成されない。

以上の事実は、本実験が杭基礎フーチングの縁端部の破壊形態を代表するものでない一方で、単純な荷重状態であることは、水平押抜きせん断破壊について考察するのに適した実験であると考ええる。

H-9, 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るが、ここでは隅角部以外の破壊に着目しているため、検討対象外としている。

(2) 実験結果

図-4にH-2供試体の終局時におけるひび割れ状況を示す。(a) 上面図から、水平力の載荷に伴い、杭中心部から発生したひび割れがフーチング端部に達することで、三角形に押し抜きせん断破壊が発生

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)
H-1	375	25 ○	D13	1000	なし
H-2	375	62.5	D13	1000	
H-3	375	62.5	D16 ○	1000	
H-4	375	125 ○	D13	1000	
H-5	375	62.5	無筋 ○	1000	
H-6	375	62.5	無筋 ○	1000	
H-7	300 ○	62.5	D13	1000	
H-8	500 ○	62.5	D13	1000	
H-9	375	62.5	D13	1000	
H-10	375	62.5	D13	1000	
H-11	375	62.5	D13	1000	
H-12	750 ○	125 ○	D19 ○	1000	
H-13	375	62.5	D13	500	
NH-1	375	62.5	D13	500	-10
NH-2	375	62.5	D13	500	45
NH-3	375	62.5	D13	500	90

※○：H-2を基準とした場合の着目パラメータ

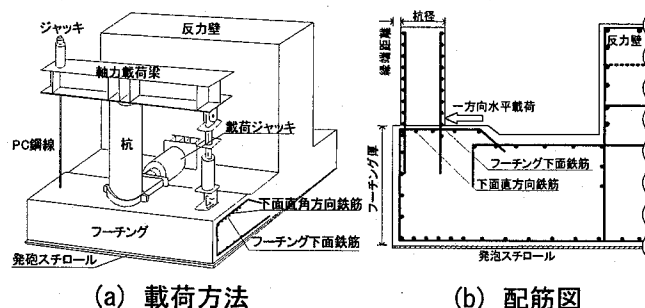


図-3 供試体形状

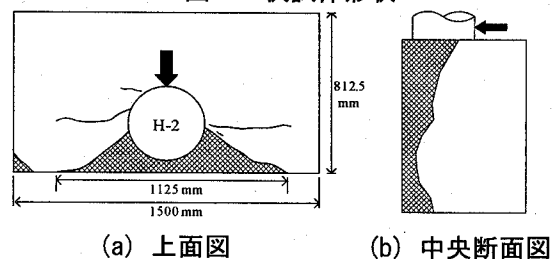


図-4 ひび割れ図 (H-2)

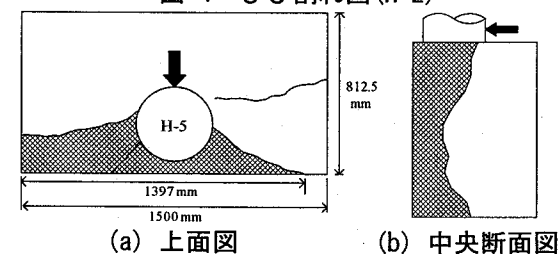


図-5 ひび割れ図 (H-5)

した。また、破壊範囲は前面で1125mmであり、これは杭径の3倍にあたる。(b)は実験終了後、フーチング中央を切断して破壊面を観察した断面図である。図より、杭中央から発生したひび割れがフーチング下面にまで達していることがわかる。

図-5に無筋供試体であるH-5供試体のひび割れ図を示す。H-2供試体と比較すると杭中心部よりやや後方からひび割れが発生し、フーチングが押し抜かれた範囲は1397mmであった。(b) 中央断面図から、H-2と同様にフーチング下部までひび割れが進展しているが、フーチング側面からより深い位置で押し

抜かれていることがわかり、H-2より大きな破壊面がみられた。これらのことから、フーチング内の鉄筋がひび割れの抑制に寄与していると考えられる。

図-6に各供試体の荷重－変位関係を示す。図より、無筋供試体(H-5, 6)以外の供試体は、荷重200kN程度から水平変位が急増し始め、変位2mmから5mm程度で最大荷重をむかえる。また、最大荷重以後の荷重減少は小さく、脆性的な破壊ではない。一方、無筋供試体のH-5, 6供試体では最大荷重以後急激に荷重が減少している。

次に、各パラメータの影響をみると、鉄筋比をパラメータとしたH-2, 3供試体では、下面鉄筋量が多いH-3の方が耐力が増加している。これらのことから、フーチングの下面鉄筋は押抜きせん断に対し、大きく寄与していると考えられる。杭径をパラメータとしたH-7, 8供試体では、杭径が大きいH-8供試体の方が耐力が大きく増加していることがわかる。これは、杭径の増大により破壊領域が拡大し、抵抗鉄筋本数が増加したためと考えられる。

3. コンクリート寄与分も考慮した押し抜きせん断照査式の検討

上述のように、首都高速道路の水平押抜き照査式では、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。一方、道路橋示方書の橋座部の水平押抜きせん断の照査では、コンクリート負担分も考慮している。そこで、本報告では、コンクリート寄与分についても考慮したせん断照査式を検討する。

コンクリートと鉄筋の各せん断負担力を考慮して、水平押抜きせん断耐力を式(1)により算出する。

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

ここに、

P_h : 水平押抜きせん断耐力

τ_c : フーチングコンクリートの許容せん断応力度
(ここでは道路橋示方書より、 0.33N/mm^2 を採用)

A_c : 首都高速道路公団が計測したフーチングの実測破壊面積で、明瞭なひび割れに沿ってコンクリートをハツリ取り、算出したもの。

n : 破壊面内のフーチング下面主鉄筋本数で、三角形形状に形成される平面ひび割れ内に含まれる鉄筋本数。

A_s : フーチング下面主鉄筋の断面積

τ_{xy} : 鉄筋のせん断応力度

鉄筋のせん断応力度 τ_{xy} について、フーチングの下面

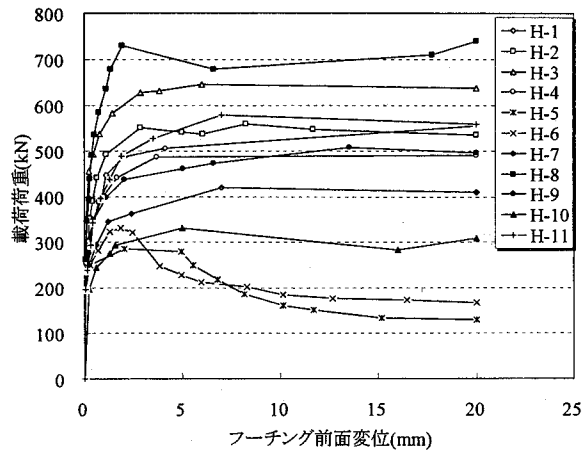


図-6 荷重－変位関係

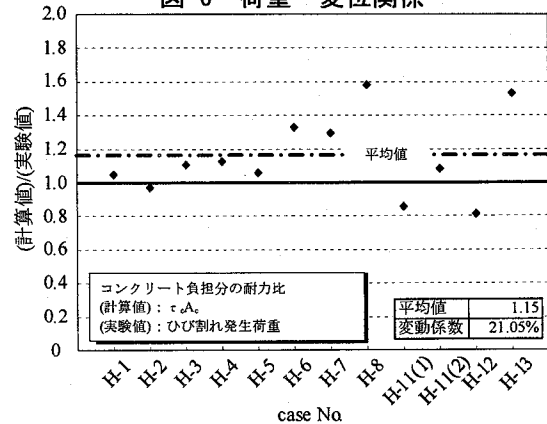


図-7 コンクリート負担分の耐力比

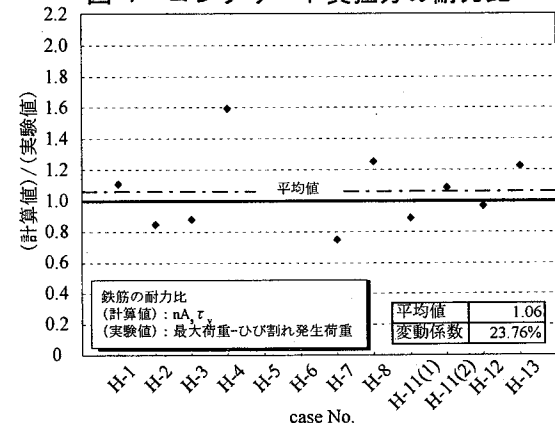


図-8 鉄筋負担分の耐力比

鉄筋はひび割れに対し鉄筋軸方向ではなく、せん断変形、抵抗しているものと考えられる。そこで、Von Misesの降伏条件から $\tau_{xy} = f_{yd}/\sqrt{3}$ とした。

図-7に実験と式(1)により算出されたコンクリート負担せん断力の耐力比を示す。ここで、実験のコンクリート負担力は、ひび割れ発生荷重と定義した。

また、計算値のコンクリート負担力は式(1)中の $\tau_c A_c$ によって算出している。図より、耐力比の平均値は1.15、変動係数21%となり、コンクリート負担分については $\tau_c A_c$ によって実験値を概ね評価可能と考えられる。

次に、鉄筋のせん断負担力を比較した。図-8に実

験と式(1)により算出された鉄筋負担せん断耐力の耐力比を示す。ここで、実験の鉄筋負担力は最大荷重からひび割れ発生荷重を除いた値とした。計算値のせん断負担力は式(1)の $nA_s\tau_{xy}$ により算出した。図より供試体によって耐力比にばらつきがみられるが、平均で1.06、変動係数24%となり、実験の鉄筋負担分を概ね評価可能と考えられる。以上より、式(1)を用いることによって、実験で生じたフーチング破壊に対する鉄筋の抵抗力を評価可能と考えられる。

図-9に式(1)によって算出される水平押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1.05、変動係数19%となり、式(1)によって実験の最大耐力を精度良く評価可能であることがわかる。また、式(1)で算出された最大荷重の内、コンクリート負担分が占める割合は、全供試体を通して平均で約54%程度であり、コンクリートおよび鉄筋共に押抜きせん断に対して大きく抵抗すると考えられる。

4. FEM 解析

(1) 解析モデル

解析対象とした実験供試体は、実験の基本ケースであるH-2供試体である。図-10に解析モデル形状を示す。実験と同様に杭基部に水平力を変位制御で水平載荷している。ここで、本解析では簡易的に2次元モデルを用いているが、実験供試体は杭とフーチングの奥行き長さが異なる。そこで、フーチングには杭に抵抗する有効幅を仮定した。杭の有効幅は実験供試体の杭径Dと同じ375mm、フーチングの有効幅は簡易的に2Dと仮定した。それに伴い、フーチングの鉄筋断面積は有効幅2D内に配置された鉄筋本数としている。境界条件は供試体下面をy方向、側面をx, y方向固定とした。

図-11にコンクリートの一軸状態での応力-ひずみモデルを示す。ひび割れモデルは固定多方向ひび割れモデルである。コンクリート圧縮側の構成則には、二軸圧縮強度を $1.16f_c$ (f_c : 一軸圧縮強度)、内部摩擦角を $\phi=10^\circ$ 、粘着力を $C = 0.42f_c$ と設定したDrucker-Pragerの条件を用いた。コンクリート引張側でのひび割れ発生には、最大主応力基準を用いた。

図-12に鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。鉄筋には埋め込み鉄筋要素を用い、要素軸方向にしか抵抗せず、鉄筋とコンクリートは完全付着とした。応力-ひずみ関係は完全弾塑性型の bi-liner モデルとした。図-13にひび割れ発生後のコンクリートのせん断伝達係数 β と、せん断ひずみの関係を示す。各荷重ステップにおける最大主ひずみに直交する方向のせ

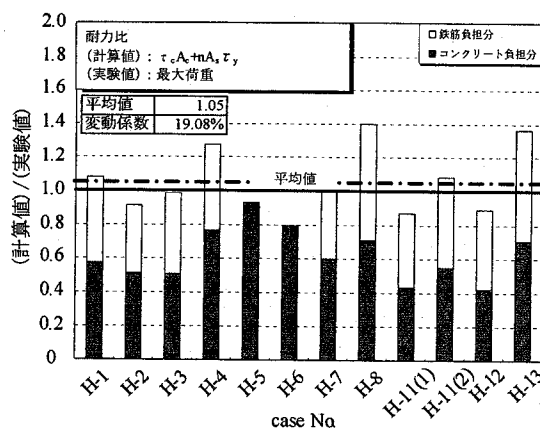


図-9 各供試体の耐力比

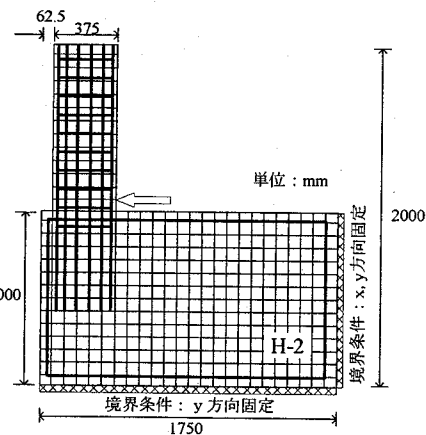


図-10 解析モデル形状

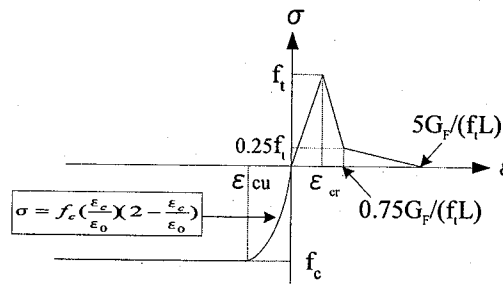


図-11 コンクリートの応力-ひずみ

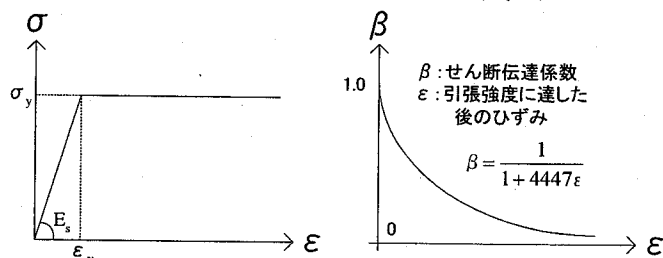


図-12 鉄筋の応力-ひずみ

図-13 せん断伝達係数

表-2 コンクリート・鉄筋の材料定数

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比
杭部	32.77	3.28	2.423×10^4	0.2
フーチング部	20.01	2.00	1.893×10^4	0.2
鉄筋	降伏点強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ(μ)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
杭主鉄筋:D16	387	2529	653	1.5×10^5
杭帯鉄筋:D10	375	2331	529	1.6×10^5
フーチング下面鉄筋:D13	382	2350	560	1.5×10^5

ん断弾性係数 G を、せん断伝達係数 β を乗じることに
より低減させている³⁾。また、各種の材料定数は表-
2に示すとおりである。

(2) 解析結果

実験供試体 H-2 と解析結果の荷重-変位関係を
図-14に示す。図より、実験では変位1.13mm時に下
面鉄筋が降伏し、その後最大荷重を迎える結果であ
った。一方、解析では変位1.42mm時に下面鉄筋が
降伏し、実験値との対応は良い。また、解析結果で
は実験結果と同様に変位4mm付近から荷重の停滞が
みられた。

図-15に各鉄筋のひずみ分布を示す。表示ステッ
プは図-14中のB点(変位1.42mm)である。(a) 下面鉄
筋では、特に杭との接合部付近でのひずみ進展が著
しく、ひび割れが発生すると推測される。一方、上
面鉄筋には僅かなひずみしか発生していない。(b)
杭の軸方向鉄筋では、フーチング面との境界面付近
で2000 μ 程度のひずみが発生しているが、鉄筋の降
伏までには至っていない。一方、フーチング側面では、
ひび割れが到達すると推測される領域でひずみの
進展がみられるが、そのひずみ量は僅かである。
これらの傾向は、B点以降においても同様であり、
下面鉄筋のひずみ進展が大きい。よって、図-14で
荷重が停滞した要因は下面鉄筋の降伏によるものと
考えられる。以上の結果から、解析で生じた破壊形
態は実験結果で生じた押抜きせん断破壊とは異なり、
杭とフーチングの接合部における引張破壊と考えら
れる。

5. 押抜きせん断破壊に関する考察

解析上のひずみおよび応力分布に着目した結果、
以下の3つの破壊パターンが生じると推定される。

- a) 下面鉄筋降伏による引張破壊
- b) 引張力による押抜きせん断破壊(I)
- c) せん断力による押抜きせん断破壊(II)

a)は、上述の解析結果から推定した破壊パターンで
ある。b)について、図-16に荷重ステップ毎の最大
主ひずみ図を示す。荷重ステップ A, B 点は図-14
の図中に示す点と対応している。(a) 図より杭基部
隅角部にひずみが集中しており、その最大値は
1110 μ であった。解析ではこの位置に初期ひび割れ
が発生するものと考えられる。(b) 隅角部からのひ
ずみが押抜きせん断方向に進展していく傾向がみら
れ、最大主ひずみの増加がみられることから、この
領域では引張力によりせん断ひび割れが進展して
いくものと考えられる。c)について、図-17にせん
断応力のコンター図を示す。表示ステップは図-14

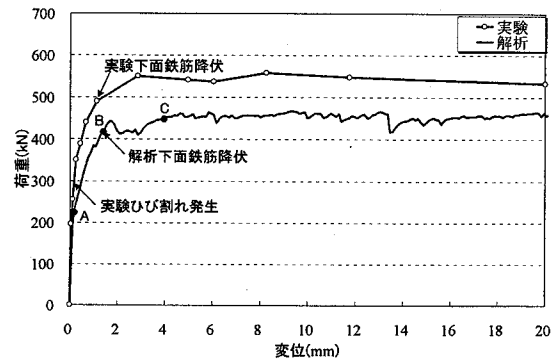
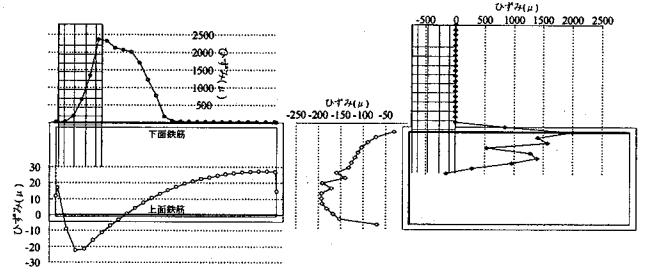
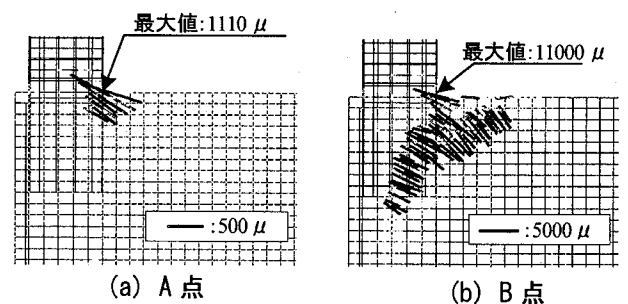


図-14 解析の水平載荷位置荷重-変位関係



(a) 下面・上面鉄筋 (b) 杭・フーチング側面鉄筋
図-15 鉄筋のひずみ分布



(a) A点 (b) B点
図-16 各荷重ステップにおける最大主ひずみ分布

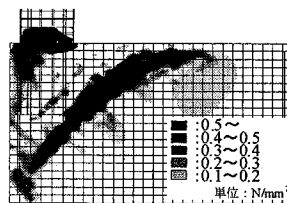


図-17 せん断応力コンター図

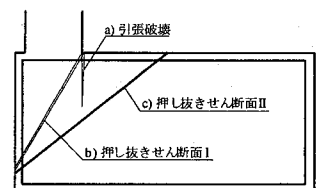
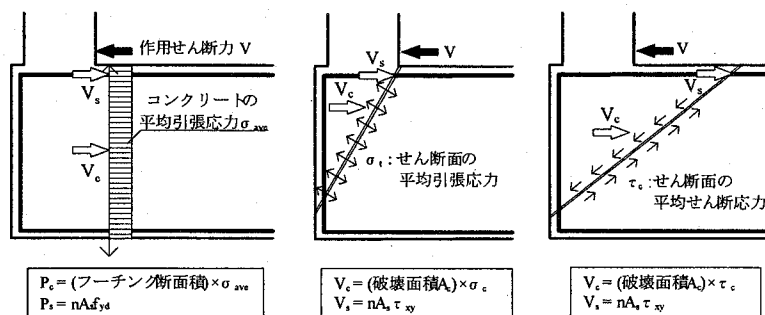


図-18 推定破壊面

中のC点(変位4mm時)である。図より、図-16でみ
られたせん断ひび割れ面より右の領域で、大きなせん
断応力の分布がみられる。よって、この領域では、
圧縮によるせん断力によって、ひび割れが発生する
ことが考えられる。以上より推定された3つの破壊
パターンの破壊面を図-18に示す。次に、各破壊パ
ターン別の耐力を解析結果を用いて算出した。

図-19に各破壊パターンの耐力算出法を示す。各
破壊パターン別に、コンクリート負担分および鉄筋
負担分のせん断力を算出した。(a) 引張破壊では、
作用せん断力に対し、コンクリートおよび鉄筋が水
平方向に抵抗すると考えられる。コンクリートの抵



(a) 引張破壊 (b) 押し抜きせん断Ⅰ (c) 押し抜きせん断Ⅱ

図-19 各破壊の耐力算出法

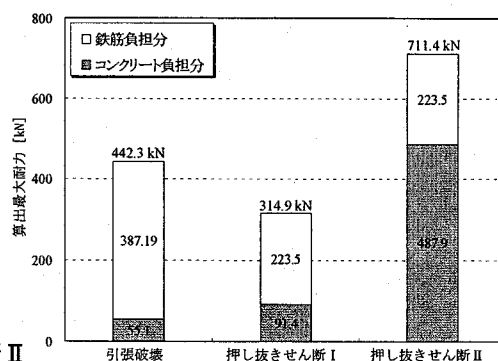


図-20 解析から推定される各破壊の耐力

抗力 V_c は、推定ひび割れ面に作用する水平方向の平均引張応力にフーチング断面積(有効幅×フーチング厚)を乗じることで算出した。(b) 押し抜きせん断破壊Ⅰでは、図-16で前述したように、引張力によりひび割れが発生すると考えられる。そこで、 V_c は推定されるせん断面に作用する平均引張応力 σ_c に破壊面積 A_c を乗じることで算出した。ここで σ_c は推定せん断面Ⅰ上の引張応力を平均したもので、破壊面積 A_c は(せん断面の長さ×有効幅)で算出している。また、鉄筋のせん断抵抗は、式(1)と同様の手法で算出した。(c) 押し抜きせん断破壊Ⅱでは、図-17で前述したように、圧縮せん断力によるひび割れが発生するものと考えられる。そこで、 V_c は推定されるせん断面に作用する平均せん断応力 τ_c に破壊面積 A_c を乗じることで算出した。ここで τ_c は推定せん断面上Ⅱのせん断応力を平均したもので、破壊面積 A_c は(b)と同様に、(せん断面の長さ×有効幅)で算出している。また、 V_s については(b)と同様である。

図-20、表-3に各破壊パターンの耐力算出結果を示す。算出に用いた荷重ステップは、図-14中のB点である。図より、算出結果は引張破壊の場合で442.3 kN、押し抜きせん断破壊Ⅰの場合で314.9 kN、押し抜きせん断破壊Ⅱの場合で711.4 kNであった。

以上のように本解析モデルにおいては、3つの破壊パターンがみられたが、今回検討を行なったケースは軸力が作用しておらず、圧縮力の影響を受けないため、引張力が支配的となり、終局状態を支配するのは(a)の引張破壊もしくは(b)の押し抜きせん断破壊Ⅰであり、実験で生じた破壊形態と類似していることがわかる。

6. まとめ

フーチング縁端部における水平押し抜きせん断耐力の破壊メカニズムに対し、首都高速道路が実施した実験およびFEM解析を用いて検討した結果、以下の知見が得られた。

表-3 各破壊の耐力一覧

想定破壊形態	作用応力 [kN/mm ²]	破壊面積 [mm ²]	V_c [kN]	V_s [kN]	$V_c + V_s$ [kN]
引張破壊	0.07 (σ_{ave})	750000	55.1	387.2	442.3
押し抜きせん断Ⅰ	0.13 (σ_c)	702909	91.4	223.5	314.9
押し抜きせん断Ⅱ	0.41 (τ_c)	786848	487.9	223.5	711.4

- (1) 全16体の供試体実験の結果、すべての供試体で押し抜きせん断破壊がみられた。また、フーチングのコンクリートおよび鉄筋共にせん断力に対して抵抗すると考えられる。
- (2) フーチング端部における水平押し抜きせん断耐力照査式(1)を提案した結果、実験結果の最大荷重を比較的精度良く評価可能であることが確認された。
- (3) FEM解析によって実験を評価した結果、杭の水平変位に伴う引張力によって、フーチングが破壊すると考えられる。
- (4) 水平力が卓越する状況に対しては本研究で得られた結論を適用することができるが、実際のフーチングが受ける終局状態は異なっている状況が多いと考えられ、今後より実際に近い荷重状態に対する耐荷機構や破壊形態についても調べる必要がある。

謝辞

最後に、貴重な技術資料を提供して頂いた首都高速道路(株)の担当者の方々に、謝意を表します。

参考文献

- 1) 野々村佳哲, 白戸真大, 中谷昌一: 杭とフーチングの縁端距離の縮小化に関する実験, 日本道路会議, vol.27, 2007.
- 2) 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
- 3) Rots J.G.: Computational modeling of concrete fracture, Dissertation Delft Univ. of Technology, 1988.