

論文 せん断スパン比が押抜きせん断耐力に及ぼす影響の検討

中越亮太*¹・幸左賢二*²・白戸真大*³・足立幸郎*⁴

要旨：フーチングの設計では，押抜きせん断の照査により部材断面が決定されることもあり，押し抜きせん断耐力を適切に推定することは設計上重要な課題であると考えられる。そこで，杭基礎フーチングをモデル化した載荷実験データを用い，道路橋示方書に示される押し抜きせん断耐力式のせん断スパン比の評価式である割増係数 C_{dc} を再評価した。さらに，FEM 解析を用いて，押し抜きせん断の破壊メカニズムを解明するとともに，実験データにより導かれた押し抜きせん断耐力式の妥当性を検討した。

キ - ワ - ド：せん断スパン比，フーチング，押抜きせん断破壊，圧縮力

1. はじめに

平成 8 年度に改訂された道路橋示方書(以下，H8 道示)による杭基礎フーチングの耐震設計では，片持ばり，単純ばり，連続ばり等のはり部材として設計することに加え，版としての挙動を考慮して設計することになった。結果として設計されたフーチングは，寸法の増大や，配筋量の増加につながっている。一方，これまでのフーチングの被災状況では，損傷を受けた事例はほとんどなく，兵庫県南部地震の際にも数基に軽微なひび割れが生じていたにすぎなかった。

また，平成 14 年に改訂された道路橋示方書(以下，H14 道示)では，せん断スパン比(以下， a/d)によるコンクリートの負担するせん断耐力の割増係数 C_{dc} において，梁としてのせん断照査には，ディープビームの実験を基に提案された式(係数)を用いているが，版としてのせん断照査には，H8 道示でディープビームの実験を基にした係数を用いている¹⁾。これは， a/d の影響や照査断面の設定に未解明な点があるからで，この点を明らかにして係数を設定する必要がある。

そこで本研究では，押し抜きせん断の破壊メカニズムを解明すると共に，様々な文献より得られた実験データ²⁾から提案した a/d によるコンクリートの負担するせん断耐力の割増係数 C_{dc} の妥当性を，二次元弾塑性解析により検証した。

2. フーチングの押し抜きせん断照査実験

本研究では，里道らの a/d 等をパラメータとした杭基礎を有するフーチングの単調載荷実験²⁾を対象とした FEM 解析を行い，フーチングにおける押し抜きせん断破壊のメカニズムの解明と a/d の影響を考慮する係数の妥当性を評価することとした。

実験供試体の構造諸元を表 - 1 に示す。No.1 ~ 5 は，引張主鉄筋比(0.54,0.61,0.85%)とコンクリート圧縮強度(26.0,42.9N/mm²)，No.3,6,7 は a/d をパラメータとした実験である。No.3 モデルの供試体形状を図 - 1 に示す。供試体は杭基礎を有するフーチングをモデル化したもので，矩形フーチングと幅 200(mm)，高さ 220(mm)の杭部を有する構造とした。支持条件は，杭部底面において鉛直方向のみを

*¹九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻 (正会員)*²九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 Ph.D (正会員)*³独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ基礎チーム (正会員)*⁴阪神高速道路公団 工務部 工務一課 (正会員)

支持した。コンクリートは普通コンクリート、鉄筋は SD-295 の異形鉄筋 D13(降伏点強度 338N/mm^2)を用いた。載荷は、荷重ステップ増加量を 50kN とし、ステップ毎に荷重を 0kN まで除荷し、ひび割れ状況を観察した。実験中の測定項目は載荷荷重、供試体変位、鉄筋ひずみ、ひび割れ状況とした。供試体は、載荷初期段階においてフーチング下面に曲げひび割れが発生し、その後側面まで達した。一般的に、曲げにより終局に至る場合には、最大荷重以降、荷重は緩やかに減少するが、今回の実験では、終局に至ると同時に急激に荷重が減少し、供試体上面では載荷板に沿ってコンクリートを押し抜いたような破壊が生じている。図 - 2 に No.3 供試体の最終状態でのひび割れの一例を示す。供試体の側面では最大荷重に達した後、載荷版端部と杭中心を結ぶ線に沿って顕著なずれを伴ったせん断ひび割れが観察され、前述した最大荷重以降の挙動も含めて、フーチングは押抜きせん断により終局に至った。なお、フーチングでは梁部材のせん断破壊とは異なり、耐力が低下した後の状態においてもある程度の耐荷性能を有していることが確認されている。

3. FEM 解析

3.1 解析手法

押抜きせん断耐力に影響を及ぼすのは破壊抵抗面積であり、図 - 3 に示すように、実験での破壊抵抗面積と二次元 FEM 解析での破壊抵抗面積が一致する。よって、本解析は二次元 FEM 解析を用いて評価を行った。図 - 4 に解析モデル(No.3)を示す。モデルは、図 - 1 に示す正面図と同じ形状に、実験と同じ長さの奥行き幅 b を設定した。要素は 1 要素を約 $20(\text{mm})$ 四方となるように分割した。また、載荷条件は、実験における載荷版設置部分に奥行き幅を $300(\text{mm})$ とした載荷版を設置し、その上縁に鉛直下向きの等分布変位を載荷した。境界条件は、杭下端を鉛直方向のみ固定

とした。また、本研究では、比較的 a/d の小さいモデルの a/d の影響に着目しているため、 a/d をパラメータとした No.3,6,7 供試体に、 $a/d = 1.0(d = 170\text{mm}, a = 170\text{mm})$ である No.8 モデルと $a/d = 0.71(d = 170\text{mm}, a = 120\text{mm})$ である No.9 モデルを加えた計 5 体を対象とした解析を行った。表 - 2 に解析を行ったモデルの諸元を示す。

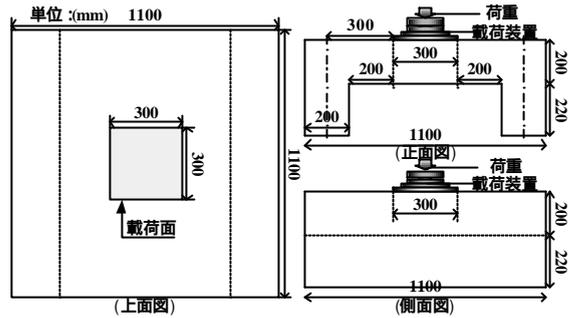


図 - 1 供試体形状(No.3)

表 - 1 実験供試体緒元

供試体名	有効高さ $d(\text{mm})$	せん断スパン $a(\text{mm})$	せん断スパン比 a/d	引張主鉄筋比 $p_t(\%)$	圧縮強度 s_{ck} (N/mm^2)	部材幅 $b(\text{mm})$	押抜きせん断耐力 $P(\text{kN})$
No.1	170	300	1.76	0.61	42.9	1100	686.0
No.2					26.0		608.6
No.3					0.54		646.8
No.4					0.85		636.9
No.5					27.8		716.4
No.6	270	1.59	0.50		1040	688.9	
No.7	235	1.38	0.54		970	768.3	

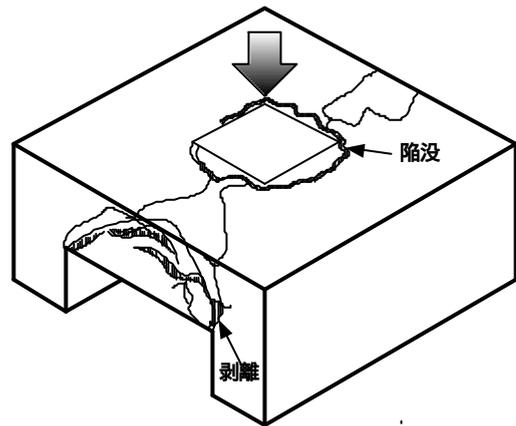
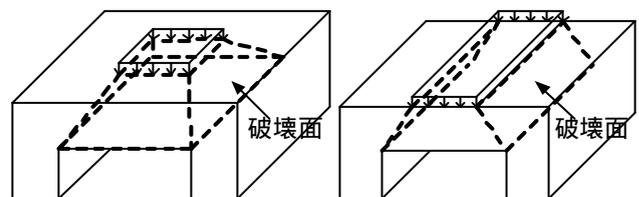


図 - 2 フーチング上面・側面の最終破壊状況



実験における破壊抵抗面積 = 二次元FEM解析における破壊抵抗面積

図 - 3 破壊抵抗面積

3.2 解析モデル

解析に用いた要素特性は、コンクリートには平面応力要素、鉄筋には線材要素を使用し、鉄筋とコンクリートは完全付着としている。表 - 3 にコンクリートおよび鉄筋の材料特性を示す。コンクリートの二軸圧縮状態における降伏および破壊基準としては、二軸圧縮強度を $1.16f'_c$ (f'_c : 一軸圧縮強度) として、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。引張-圧縮状態および二軸引張状態では、最大主応力が引張強度を超えるとひび割れが発生すると仮定し、ひび割れ発生後はせん断剛性を低減させた。

図 - 5 にコンクリートの応力 - ひずみモデルを示す。圧縮上昇域では圧縮強度までを二次放物線とし、その後は応力が直線的に減少するモデルを用いた。引張域については、引張強度 f_t までは直線的に応力が増加すると仮定した。図 - 6 にひび割れ発生後におけるせん断低減係数 λ とひび割れ発生後のひずみの関係を示す。押抜きせん断破壊は、ずれによるせん断の影響が圧縮応力による影響に比べ、ごくわずかであることと、 λ をパラメータとした予備解析では、最大荷重にほぼ影響は小さかったことから、本解析ではせん断伝達係数を 0.01 と微小なものとして検討を行った。鉄筋の応力 - ひずみモデルとしては、図 - 7 に示すように鉄筋降伏強度に達した後、降伏ひずみの 8.5 倍の降伏棚領域を設け、その後はひずみ硬化を考慮したモデルを用いている。

表 - 2 解析モデル諸元

モデル名	せん断スパン比 a/d	引張鉄筋比 ρ (%)	コンクリート圧縮強度 f_{ck} (N/mm ²)	実験
No.3	1.76	0.5	27.0	
No.6	1.59			
No.7	1.38			
No.8	1.00			
No.9	0.71			

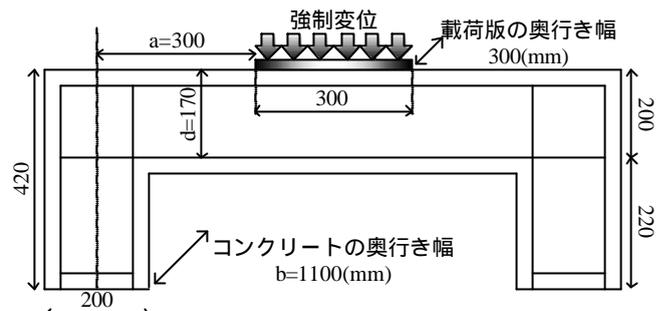


図 - 4 解析モデル(No.3)

表 - 3 コンクリートと鉄筋の材料特性

	弾性係数 E_c (N/mm ²)	圧縮強度 f_{ck} (N/mm ²)	引張強度 f_t (N/mm ²)	ポアソン比
コンクリート	22000	27.0	2.1	0.2
	弾性係数 E_s (N/mm ²)	降伏点強度 f_{sy} (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	引張強度 f_{su} (N/mm ²)
鉄筋	210000	338	1750	501

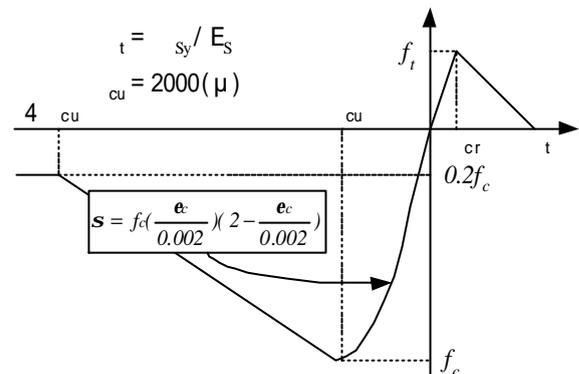


図 - 5 コンクリートの応力-ひずみモデル

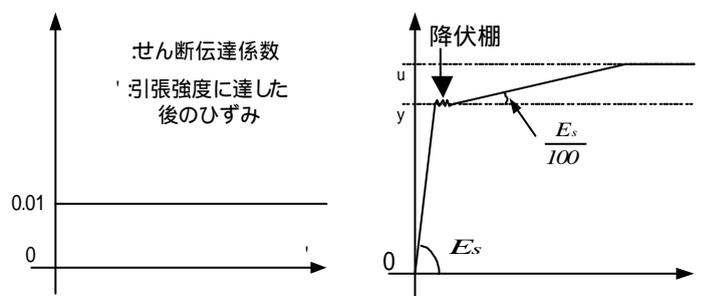


図 - 6 せん断伝達係数

図 - 7 鉄筋の応力-ひずみ

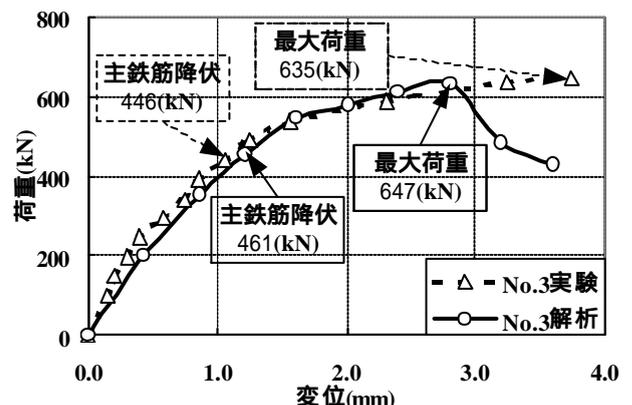


図 - 8 鉛直荷重 鉛直変位関係(No.3)

4. 解析結果

4.1 実験結果との比較(No.3 モデル)

図 - 8 に No.3 モデルでの鉛直載荷荷重 - フーチング下面中央の鉛直変位の関係を示す。解析においても主鉄筋降伏が確認され、主鉄筋降伏後は大きく鉛直変位が増加した。また、押抜きせん断破壊時の特徴である急激な荷重の低下も解析において見られ、その点を最大荷重とした。また、図 - 9 に No.3 供試体の解析での最大荷重時の最大主ひずみの矢示図によるひび割れ状況と実験での最大荷重時のひび割れ状況を示す。実験では、側面に載荷版から杭方向に大きなひび割れが発生し、このひび割れが急激に進展して終局に至った。解析においても同様の傾向が見られ、支配的なひび割れは、載荷版端部から杭隅角部を結ぶ線の付近に発生することが確認できた。

4.2 押抜きせん断破壊のメカニズム

図 - 10 に No.8 モデルの最大荷重時の最小主応力分布を示す。比較的大きな最小主応力が発生しているのは載荷版端部から杭隅角部を結ぶ部分である。これは図 - 2, 9 に示す実験での破壊面と同じ位置に当たる。最大荷重時の最小主応力及びせん断応力の値については、 a/d が小さくなるにつれて、大きな値となることが確認された。同様な結果は全モデルで得ることができた。また、図 - 10 における最小主応力分布から、押抜きせん断破壊は圧縮力の卓越により破壊に至ると考えられる。以上より、図 - 11 に示すような a/d の小さな部材における押抜きせん断の破壊メカニズムが考えられる。

5. 各パラメータによる解析

5.1 せん断伝達係数

せん断伝達係数は押抜きせん断破壊を再現するための重要な要素であるせん断応力及び最小主応力の発生に大きく影響する。よって、適切な値を設定する必要がある。せん断伝達係数は既往の研究より 0.05 ~ 0.1 が妥当と言

われる。しかし、本解析のような圧縮力が破壊の要因になると考えられる a/d の小さな部材での破壊を再現する場合、せん断伝達係数をできるだけ小さくすることで、明確に押抜きせん断破壊を再現できると考えられる。そこで、せん断伝達係数を 0.01, 0.05 として解析の比較を行った。図 - 12, 13 にそれぞれの最大荷重時の最小主応力分布を示す。せん断伝達係数を変化させることによって、最大耐力がそれぞれ 647, 634kN とほぼ差は見られないが、圧縮力の分布状況に変化が見られた。0.01 の場合、載荷版端部から杭隅角部を結ぶ線に大きな圧縮力による明確な圧縮ストラットが見られたが、0.05 の場合、圧縮力は小さく、発生方向も若干異なるため明確な圧縮ストラットは見られなかった。よって、最大耐力に影響が見られない範囲であれば、圧縮力及びせん断応力の傾向をつかむためにせん断伝達係数を 0.01 と小さな値を用いて評価できると考えられる。

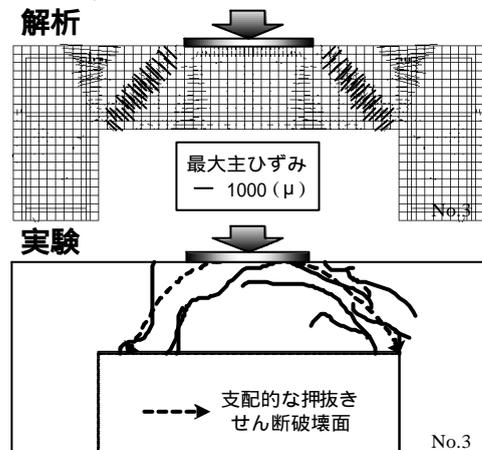


図 - 9 最大荷重時のひび割れ状況

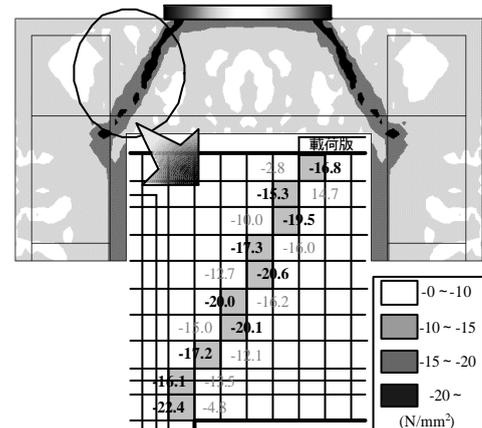


図 - 10 最小主応力分布(No.8)

5.2 引張主鉄筋比

実験では引張主鉄筋比が 0.5% であるため、曲げ先行押抜きせん断破壊となった。ここでは押抜きせん断破壊を評価するに当たり、引張主鉄筋を増し、曲げ降伏が起こらない押抜きせん断破壊との比較を行った。図 - 12, 14 に引張主鉄筋比をそれぞれ 0.5%, 2.0% とした場合の最大荷重時の最小主応力分布を示す。引張主鉄筋比 2.0% とした場合、最大耐力に至るまで主鉄筋が降伏せず、最大耐力は 0.5% の場合より 1.49 倍大きい 962kN となった。これは道示式の主鉄筋に関する項より求めた計算結果(1.57 倍)とほぼ同値であることから、曲げ降伏による耐力への影響は引張主鉄筋比の影響のみで、押抜きせん断破壊にはほぼ影響を及ぼしていないと考えられる。以上より、曲げ先行押抜きせん断破壊でも押抜きせん断破壊を評価できると判断している。

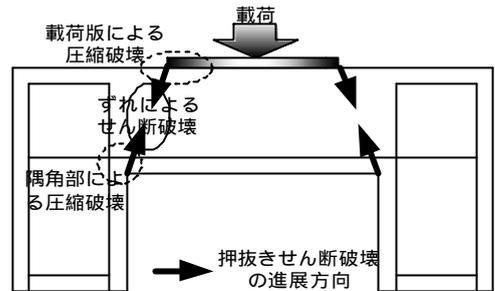


図 - 11 押抜きせん断破壊の破壊メカニズム

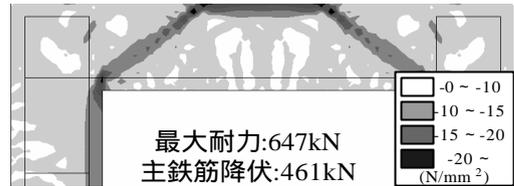


図 - 12 最小主応力分布 (No. 3)

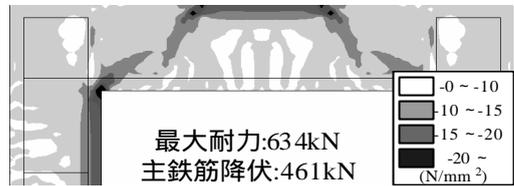


図 - 13 最小主応力分布 (せん断伝達係数 0.05)

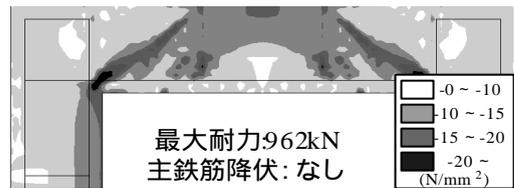


図 - 14 最小主応力分布 (主鉄筋比 2.0%)

6. 提案式の妥当性の解析的評価

6.1 最大荷重による式の妥当性の評価

式(1)に既往の研究より得られた、フーチングの押抜きせん断耐力への a/d の割増係数を、式(2)に 5% 超過式を示す。

$$C_{\alpha} = \frac{10.3}{1 + (a/d)^2} \quad (1) \quad C_{\alpha 5\%} = \frac{7.0}{1 + (a/d)^2} \quad (2)$$

FEM 解析により得られた最大荷重を用いて、既往の提案式における検討と同様に式(1), (2)の分子を A と設定し、最小 2 乗法により係数 A を求めた。既往の実験データ²⁾より得られた係数 C_{dc} と解析により得られた C_{dc} の比較を図 - 15 に示す。図 - 15 の縦軸は、FEM 解析及び実験で得られた押抜きせん断耐力をコンクリートの負担するせん断耐力 S_c で除した値である。また、図中には FEM 解析での a/d によるコンクリートの負担するせん断耐力の割増係数 C_{dc} の平均式も示した。解析結果から、係数 A は 10.6 となり、実験より算出された係数 $A = 10.3$ の値に近い結果となった。

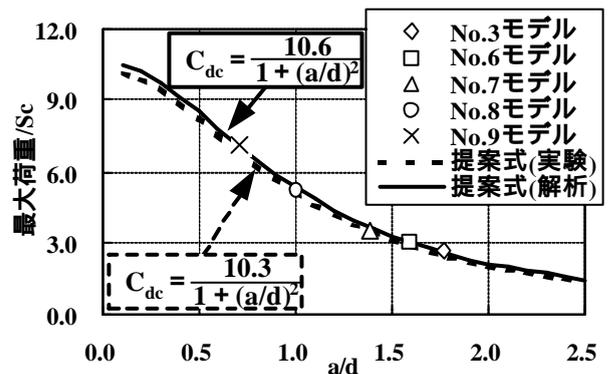


図 - 15 提案式の妥当性評価

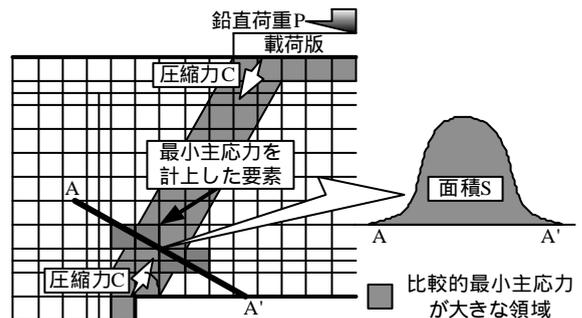


図 - 16 フーチングのタイドアーチモデル

6.2 タイドアーチによる式の妥当性

これまでの検討結果より、 a/d の小さい部材での押抜きせん断耐力には、圧縮応力の大きさとその広がりが増加すると考えられる。そこで、押抜きせん断耐力を、FEM 解析から得られた最小主応力の値から評価を行う。図 - 10 に示すような最大荷重時の最小主応力分布から、図 - 16 の様にタイドアーチモデルを描くと、以下のような式が成り立つ。

$$P_{pun} = 2C \quad (3)$$

$$C = Sbsin \quad (4)$$

ここで、 P_{pun} ：押抜きせん断耐力

C ：アーチリブに作用する圧縮力

S ：A-A' 断面に発生した応力分布の面積

b ：奥行き幅

：アーチリブと主鉄筋がなす角

よって、主鉄筋より上方にある最小主応力が比較的大きい位置で、応力の流れ方向に対して垂直に A-A' 断面を切り、図 - 16 の右図のような応力分布の断面を考える。A-A' 断面の長さは、最大荷重時で最小主応力が軟化域に入ることによって局所化が生じ応力分布が広がるため、断面上での応力の最大値の 1/10 となる点を両端とする距離とした。杭隅角部付近における応力分布を図 - 17 に示す。 a/d が小さくなるにつれて、圧縮応力分布の面積は大きくなること分かる。式 (3)、(4) による計算結果を表 - 4 に示す。圧縮応力分布の面積から求めた押抜きせん断耐力 P_{pun} は a/d が小さくなるにつれて値は大きくなり、また実験値及び提案した式より求めた計算値に近付くことが分かった。これは、 a/d が小さくなるにつれ押抜きせん断破壊が圧縮力に依存していると言え、また a/d が大きくなるにつれ圧縮力以外の要因が押抜きせん断耐力に影響を及ぼしていることを表している。

7. まとめ

フーチングの押抜きせん断破壊に対する FEM 解析より、以下に示す結論を得た。

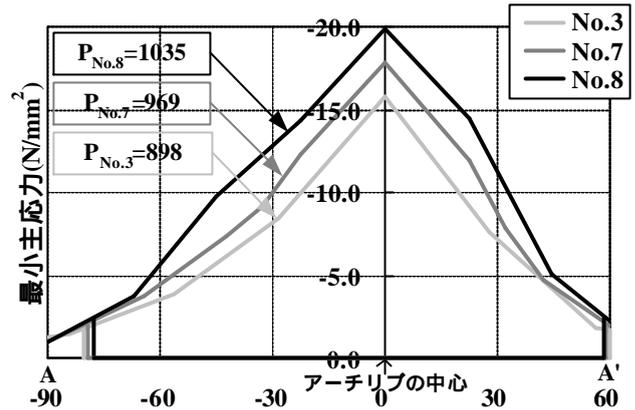


図 - 17 杭隅角部付近における応力分布

表 - 4 計算結果

No.	3	6	7	8	9
せん断スパン比 a/d	1.76	1.59	1.38	1.00	0.71
計算値 S_{ca} (kN)	611.4	678.3	770.5	985.1	1007.3
実験値 P_{pun} (kN)	646.3	688.9	768.3	-	-
解析の最大荷重 P_{ana} (kN)	635.0	680.0	744.0	972.0	1013.0
算出した A (最大荷重)	10.6				
圧縮応力分布の面積 S	898.4	935.2	968.6	1035	940.5
押抜きせん断耐力 P_{pun} (kN)	480.4	552.2	645.5	869.1	1004.4
算出した A (タイドアーチ)	12.5				

- (1) 実験における破壊面と FEM 解析における最小主応力及びせん断応力分布から、押抜きせん断破壊は、杭隅角部と載荷版端部の圧縮力卓越が要因と考えられる。
- (2) 二次元 FEM 解析より得られた押抜きせん断耐力での a/d による割増係数 C_{dc} の係数は、 $A = 10.6$ となり実験データより得られた $A = 10.3$ とほぼ同値となった。
- (3) 最小主応力分布より考えられるタイドアーチモデルから算出した押抜きせん断耐力は、 a/d が小さくなるにつれ最大荷重の値に近付くことから、 a/d が小さな部材ほど圧縮力卓越型の破壊となることが分かった。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書 下部構造編・同解説, pp.190-242, 2002.3
- 2) 里道喜義, 幸左賢二, 白戸真大, 水谷治弘：フーチングの押抜きせん断耐力式の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp1039-1044, 2001