

論文 大口径 PHC 杭のせん断強度に及ぼす軸力の影響に関する 実験研究

岸田慎司^{*1}・堀井昌博^{*2}・桑原文夫^{*3}・林静雄^{*4}

要旨：地震時にどの杭にどの程度の被害が生じるかといった、地震時の杭の必要性能に対する考慮はされていないのが現状である。本研究は、既に一部を発表済みの同じ目的で行った実験結果[4]を含めて、杭に一定軸力を導入した逆対称曲げせん断実験を行った。軸力が加わることによって大口径の遠心力高強度プレストレストコンクリート杭(以下、PHC 杭)のせん断終局強度に及ぼす各パラメータの影響、各種せん断強度の計算式の適合性について検討した。

キーワード：大口径 PHC 杭, プレストレス量, 肉厚と杭径の比, 軸方向力, せん断終局強度

1. 序および目的

阪神・淡路大震災では、数多くの杭基礎の被害が報告されているが、これらの被害をどう評価すべきであろうか。

上部構造の耐震設計は、1981 年いわゆる「新耐震」が施行されて以来、中小の地震に対しては建築物の機能を保証し、大地震に対しては人命を保証する性能評価形で行われてきている。高強度プレストレストコンクリート杭の設計では、許容応力度設計のみが行われており、終局強度に対する安全性の検討は行われていない。しかも、本来許容応力度設計とは骨組を弾性と仮定し、骨組全体の応力解析を行い全ての構造部材断面に生じる応力度が材料の許容応力度以下であるように設計しなければならないが、杭基礎の場合、全ての杭が作用せん断力を均等に受け持つという仮定のもとで、許容応力に収まるように設計されるのが一般的で、杭基礎全体の応力解析を行って各杭の負担せん断力を求めているわけではない。つまり、地震時にどの杭にどの程度の被害が生じるかといった、地震時の杭の必要性能に対する考慮は設計時にはされていないのが現状であろう。

以上のように、杭基礎の設計をする際には上部構造の設計法と整合性のとれた設計法を用い、かつ、上部構造の性能とバランスがとれた性能を確保する必要がある、そのために杭に対してどのような設計法をとるにしてもまず、杭本体の耐震性能を把握しておく必要がある。本研究は、現行 JIS 規格の PHC 杭のせん断終局性状を把握する目的で行われている一連の研究である。既報[4]では、地震時における杭のせん断破壊の発生のメカニズムを把握する上で考えられる重要なパラメータのうち、①肉厚と杭径の比、②せん断スパン比、③有効プレストレス量、④軸方向筋量が、杭のせん断終局強度に及ぼす影響について検討した。今回は、⑤外力としての軸方向力の影響について検討する。なお、軸方向力には内力としての有効プレストレス量 (σ_e) と外力としての軸方向応力度 (σ_o) があり、この二つを足し合せた $\sigma_e + \sigma_o$ を複合軸方向応力度と呼ぶこととする。

2. 実験概要

2.1 試験体 表-1 に試験体一覧を示す。試験体は JIS 規格の PHC 杭のうち、杭径が 300mm

-
- *1 東京工業大学大学院 工修
 - *2 日建設計 技師長 工博
 - *3 日本工業大学教授 工学部 建築学科 工博
 - *4 東京工業大学教授 建築物理研究センター 工博

(肉厚 $t=60\text{mm}$) $\cdot$ 600mm
($t=90\text{mm}$) $\cdot$ 1200mm ($t=150\text{mm}$)

の3種類の杭を杭径300mmに縮小し、肉厚も同じ縮小率で薄くした。それぞれの杭の細かいパラメータ(有効プレストレス量、軸方向筋、らせん筋、せん断スパン比等)は既報[4]に準じるが、軸方向力(N)については、標準的と考えられるN値50程度の支持地盤を想定し、長期許容支持力に相当する343kNを長期軸力

とした。短期軸力については、長期軸力分だけの変動があるとして687kNとした。さらに終局状態を考えて、地盤の極限支持力に相当する長期軸力の3倍の軸力(1030kN)についても計画したが、実際には実験設備の関係上、981kNでも実験した。

2.2 使用材料 杭体を使用したコンクリートは、 $\sigma_B=92.2\sim 95.0\text{ N/mm}^2$ の高強度コンクリートである。軸方向筋には異形PC鋼棒の7.1 ϕ と9.0 ϕ (降伏強度1390, 1360 N/mm²)を用い、せん断補強筋にはらせん状鉄筋の3.2 ϕ と2.9 ϕ (降伏強度589, 539 N/mm²)を用いた。

2.3 加力および測定方法 実験は、反曲点位置が明確で、反曲点断面中央を通して逆対称のひび割れ発生を許容する逆対称加力形式を採用した。図-1に載荷方法を示す。軸力の導入方法は試験体の中空部分にPC鋼棒を通し、両端部から油圧ジャッキで締め付け油圧を一定に保持している。加力は試験体に一定軸力(343kN $\cdot$ 687kN $\cdot$ 981kN)を負担させた後、逆対称曲げモーメントが加わるように、載荷能力1470kNの変位制御型加力装置を用いて一方方向に単調載荷した。なお、測定方法は既報[4]に準じる。

表-1 試験体一覧

試験体名			外径 肉厚 (mm)	有 効 ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽ量 (N mm ²)	軸方向 筋量		らせん 筋量
軸 力					本数-径	(%)	
343kN	687kN	981kN					
JP3-00-15-35	JP3-00-15-70	JP3-00-15-105	300 φ	0 種 : 1.08	10-9.0 φ	1.41	3.2 φ @ 50 0.268%
JP3-40-15-35	JP3-40-15-70	JP3-40-15-105	t=60	A 種 : 3.92	6-7.1 φ	0.53	
JP3-80-15-35	JP3-80-15-70	JP3-80-15-105	t/D=0.2	B 種 : 7.85	8-9.0 φ	1.13	
JP3-100-15-35	JP3-100-15-70	JP3-100-15-105	As=452 cm ²	C 種 : 9.81	10-9.0 φ	1.41	
	JP6-00-15-70	JP6-00-15-105	300 φ	0 種 : 1.37	10-9.0 φ	1.78	2.9 φ @ 55 0.267%
	JP6-40-15-70	JP6-40-15-105	t=45	A 種 : 3.92	6-7.1 φ	0.67	
	JP6-80-15-70	JP6-80-15-105	t/D=0.15	B 種 : 7.85	8-9.0 φ	1.42	
	JP6-100-15-70	JP6-100-15-105	As=360 cm ²	C 種 : 9.81	10-9.0 φ	1.78	
JP12-00-15-35	JP12-00-15-70	JP12-00-15-105	300 φ	0 種 : 1.57	8-9.0 φ	1.66	2.9 φ @ 45 0.391%
JP12-40-15-35	JP12-40-15-70	JP12-40-15-105	t=37.5	A 種 : 3.92	6-7.1 φ	0.78	
JP12-80-15-35	JP12-80-15-70	JP12-80-15-105	t/D=0.125	B 種 : 7.85	6-9.0 φ	1.24	
JP12-100-15-35	JP12-100-15-70	JP12-100-15-105	As=309 cm ²	C 種 : 9.81	8-9.0 φ	1.66	

注) A・B・C種はJIS規格に準じている。[4]

0種はプレストレス量を0にすることを目的として筆者等が新たに考えたものである。

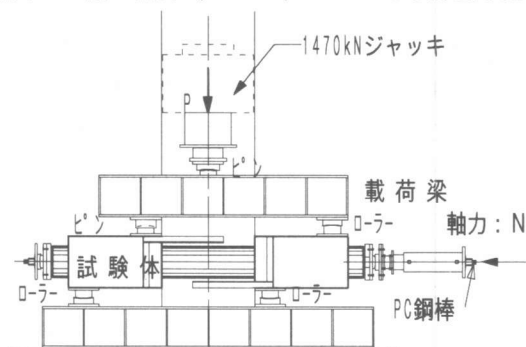


図-1 加力装置図

3. 実験結果

実験結果を表-2に示す。ここで、曲げひび割れ荷重とは荷重-変位関係より求め、最初に剛性が変わる点の荷重を指しており、剛性が急激に低下した時をせん断ひび割れが発生したとみなす。

3.1 破壊状況 A種で肉厚が一番厚く、軸力が小さいJP3-40-15-35は曲げ破壊した。肉厚が一番薄いJP12シリーズのJP12-70-15-70とJP12-100-15-105の2体は圧縮破壊した。それ以外の試験体はせん断破壊した。せん断破壊した試験体の中の8体はせん断-圧縮破壊した。

図-2に最終破壊状況の例を示す。写真-1は、地震によりせん断破壊した杭の写真である。これを見ると今回の実験では、高軸力が加わったことによってせん断破壊した杭の破壊性状を再現できたことが解る。圧縮破壊した試験体においては、軸方向筋が座屈しており、斜めせん断ひび割れが入っているものの最終的な破壊は試験区間中央部での圧壊となった。せん断破壊した試験体には、

図のように材端圧縮部を結ぶ対角線上にせん断ひび割れが生じ、そのまません断破壊した試験体と、材端圧縮部約45度にひび割れが生じるが、最終的には材端部と材端部を対角線上に結ぶひび割れで破壊した試験体(0種の試験体)がある。せん断-圧縮破壊した試験体はせん断ひび割れが入った後最終的には材端部での圧縮破壊であった。



写真-1 地震による杭のせん断破壊例

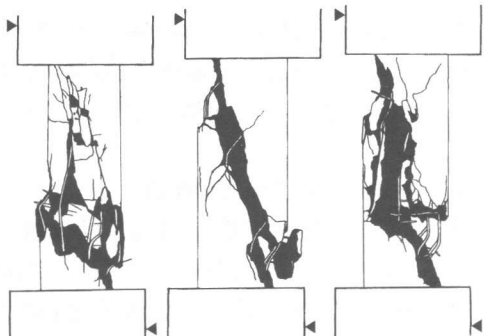


図-2 最終破壊状況

肉厚が薄くなるほど、細く短いひび割れが多数入っているのが観察できた。これは、コンクリート量に対してせん断筋量が多いこと、かぶりが薄いことなどの理由によるものである。

軸方向力が大きくプレストレス量が多い試験体は、対角線上の斜めひび割れの材軸に対する傾きが小さくなっており、材端圧縮部から45度に生じるひび割れは顕著に表れていない。

今回の実験でも、縦ひび割れが入っている試験体は何体か(JP12-40-15-35, JP12-80-15-35など)見られた。しかし、昨年度と同様に杭の縦ひび割れはせん断破壊の時に生じるせん断ひび割れに付随して起こるひび割れであって、直接杭の破壊をもたらす原因ではなかったと考えている。

3.2 荷重-変位関係

図-3に荷重-変位関係を示す。

図-3-(a)の軸力が小さく、有効プレストレス量が小さい試験体は、曲げひび割れ発生後の剛性低下が大きくなり、せん断ひび割れ発生後の最大耐力までの耐力上昇は少ないが、最大耐力時の変位量が大きくなっている。逆に図-3-(b)の軸力が大きく、有効プレストレス量が多い試験体は、曲げひび割れ荷重が大きくなり、曲げひび割れ発生後の剛性低下が小さくなっており、最大耐力に達すると同時にせん断破壊している。

表-2 実験結果一覧

No.	試験体名	実験値				計算値				実験値/計算値			破壊形式
		$Q1_{exp}$ (kN)	$Q2_{exp}$ (kN)	$Q3_{exp}$ (kN)	$Q3_{exp}/A$ (N/mm ²)	$Q1_{cal}$ (kN)	$Q2_{cal}$ (kN)	$Q3_{cal}$ (kN)	$Q3_{cal}/A$ (N/mm ²)	$Q3_{exp}/Q1_{cal}$	$Q2_{exp}/Q2_{cal}$	$Q3_{exp}/Q3_{cal}$	
1	JP3-00-15-35	83.0	169.0	198.6	4.39	301.5	98.7	181.8	4.02	0.66	1.71	1.09	S
2	JP3-40-15-35	120.2	167.2	219.1	4.85	182.3	113.2	165.5	3.66	1.20	1.48	1.32	B
3	JP3-80-15-35	155.7	240.5	250.5	5.54	265.1	128.3	212.8	4.71	0.95	1.87	1.18	S
4	JP3-100-15-35	144.9	233.1	240.8	5.33	298.0	135.3	233.5	5.17	0.81	1.72	1.03	S
5	JP3-00-15-70	150.2	219.0	239.6	5.30	358.1	129.3	226.8	5.02	0.67	1.69	1.06	S
6	JP3-40-15-70	172.5	236.2	259.4	5.74	254.8	141.7	203.0	4.49	1.02	1.67	1.28	S
7	JP3-80-15-70	199.6	251.3	251.3	5.56	323.0	153.3	255.8	5.66	0.78	1.64	0.98	S C
8	JP3-100-15-70	225.7	260.5	272.7	6.03	352.7	158.9	278.4	6.16	0.77	1.64	0.98	S C
9	JP3-00-15-105	207.2	238.1	241.1	5.33	377.2	150.6	265.3	6.01	0.64	1.58	0.91	S
10	JP3-40-15-105	189.8	290.4	300.2	6.64	314.0	162.1	234.9	5.32	0.96	1.79	1.28	S
11	JP3-80-15-105	—	247.7	276.0	6.11	367.7	172.0	292.7	6.61	0.75	1.44	0.94	S C
12	JP3-100-15-105	224.0	299.3	299.3	6.62	387.5	176.7	317.0	7.15	0.77	1.69	0.94	S C
13	JP6-00-15-70	150.2	187.3	201.8	5.61	352.2	111.9	202.9	5.64	0.57	1.67	0.99	S
14	JP6-40-15-70	172.2	209.1	228.8	6.35	255.0	120.5	178.8	4.97	0.90	1.74	1.28	S
15	JP6-80-15-70	194.5	248.1	248.1	6.89	319.1	128.7	223.9	6.22	0.78	1.93	1.11	S
16	JP6-100-15-70	162.6	186.9	211.7	5.88	341.6	132.5	243.1	6.75	0.62	1.41	0.87	S
17	JP6-00-15-105	175.1	218.6	228.6	6.35	379.0	130.8	241.9	6.90	0.60	1.67	0.94	S
18	JP6-40-15-105	—	224.2	244.9	6.80	290.4	138.8	211.3	6.02	0.84	1.61	1.16	S
19	JP6-80-15-105	—	268.0	268.0	7.44	345.5	145.6	261.2	7.43	0.78	1.84	1.03	S C
20	JP6-100-15-105	179.6	228.6	228.6	6.35	360.9	148.8	282.1	8.02	0.63	1.54	0.81	S C
21	JP12-00-15-35	66.5	120.0	160.9	5.21	265.8	77.2	142.7	4.62	0.61	1.55	1.13	S
22	JP12-40-15-35	96.8	132.6	162.3	5.25	186.1	84.7	132.7	4.30	0.87	1.57	1.22	S
23	JP12-80-15-35	142.9	171.6	187.7	6.07	229.6	93.6	159.7	5.17	0.82	1.83	1.18	S
24	JP12-100-15-35	172.4	187.0	207.0	6.70	262.1	97.6	176.5	5.71	0.79	1.92	1.17	S
25	JP12-00-15-70	126.1	160.1	191.8	6.21	315.5	102.3	188.3	6.09	0.61	1.56	1.02	S
26	JP12-40-15-70	150.3	186.9	208.7	6.75	248.4	109.0	172.5	5.58	0.84	1.71	1.21	S
27	JP12-80-15-70	—	178.7	195.4	6.32	278.2	115.6	203.0	6.57	0.70	1.55	0.96	S C
28	JP12-100-15-70	192.0	213.4	217.8	7.05	304.5	118.5	222.1	7.19	0.72	1.80	0.98	C
29	JP12-00-15-105	159.6	206.4	213.3	6.90	331.0	119.8	227.4	7.57	0.64	1.72	0.94	S
30	JP12-40-15-105	118.0	218.4	243.1	7.87	283.2	126.1	206.6	6.87	0.86	1.73	1.18	S
31	JP12-80-15-105	—	213.9	224.3	7.26	301.4	131.6	240.1	7.97	0.74	1.63	0.93	S C
32	JP12-100-15-105	—	214.3	221.2	7.16	315.9	133.9	261.2	8.66	0.70	1.60	0.85	C

注) $Q1_{exp}$: 曲げひび割れ荷重、 $Q2_{exp}$: せん断ひび割れ荷重、 $Q3_{exp}$: 最大耐力、 $Q3_{cal}$: 文献[1]のせん断終局耐力
 $Q1_{cal}$: e関数により求めた終局曲げモーメントから計算したせん断耐力、 $Q2_{cal}$: 日本建築学会の計算値
S: せん断破壊、B: 曲げ破壊、S, C: せん断-圧縮破壊、C: 圧縮破壊

また、 t/D が小さいほうがせん断ひび割れ発生後の剛性低下が大きくなっている。

せん断—圧縮破壊、圧縮破壊した試験体の中には、JP12-80-15-105 のようにせん断ひび割れ発生後、耐力は上昇せずに一定に保たれ、変位量が大きくなった後急激な破壊を生じたものがあった。

4. 実験値と計算値との比較

4.1 ひび割れ荷重 最大耐力、曲げひび割れ荷重、せん断ひび割れ荷重などは表-2 に示す。曲げひび割れ荷重、せん断ひび割れ荷重ともに、有効プレストレス量 (σ_e) に依存しており、 σ_e が大きいと荷重も大きくなる傾向にある。 t/D が小さくなると両荷重は小さくなっており、軸力が大きくなると両荷重も大きくなっている。

現在、計算式は、日本建築センター指針式（以下、センター指針式）・JIS 規格式がある（各式は既報[4] 参照）。JIS 規格式は製品の管理に用いるものであるから、外力としての軸力は考慮されていない。今回はセンター指針式とせん断ひび割れ荷重との比較を行う。昨年度データ[4]は全てせん断破壊した試験体のみを使用している。

図-4 にセンター指針式とせん断ひび割れ荷重との比較を示す。実験値が計算値を大きく上回っており、

Q_{2exp}/Q_{2cal} （せん断ひび割れ荷重/計算値）は、1.5～2.0 の範囲に位置している。軸力・有効プレストレス量・肉厚による違いは見られない。軸力がなく有効プレストレス量も小さい試験体は計算値との適合性が悪く、複合軸方向応力度が、 $3.0 \sim 4.0 \text{ N/mm}^2$ ($0.04 \sigma_B$) 以下ではひび割れ荷重をうまく表せないが、一般の杭では、一定の安全率を使用することによって、せん断ひび割れ荷重をある程度予想することが可能であり、センター指針式は許容応力度設計法に適用できると考える。

4.2 せん断終局強度 せん断終局強度式としては、現在、杭断面を長方形断面に置換して計算する柱のせん断終局強度式が報告されている[3]。図-5 に実験値との比較を示す。実験値は計算値の 0.8～1.4 の間に収まっている。しかし、全体に右下がりであり $\sigma_e + \sigma_0$ が 20 N/mm^2 以下では 1.0 を下回るものはないが、 20 N/mm^2 を越えると 1.0 を下回る試験体が増えてくる。

各パラメータのせん断終局強度に及ぼ

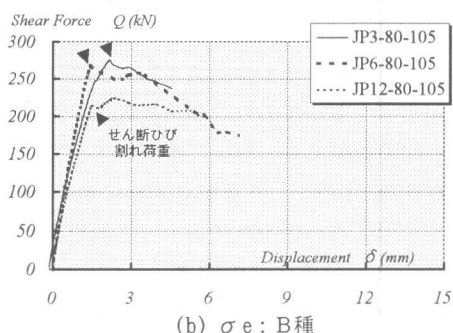
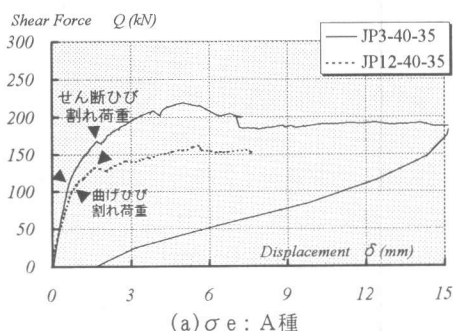


図-3 荷重と変形の関係

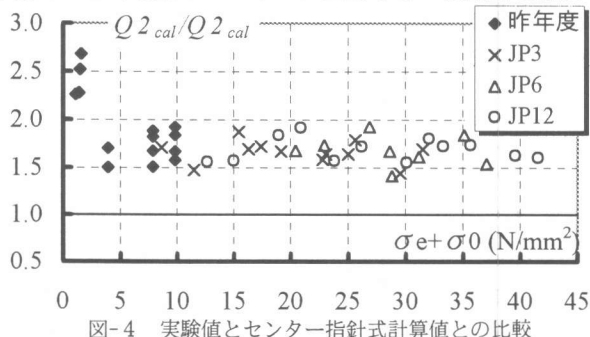


図-4 実験値とセンター指針式計算値との比較

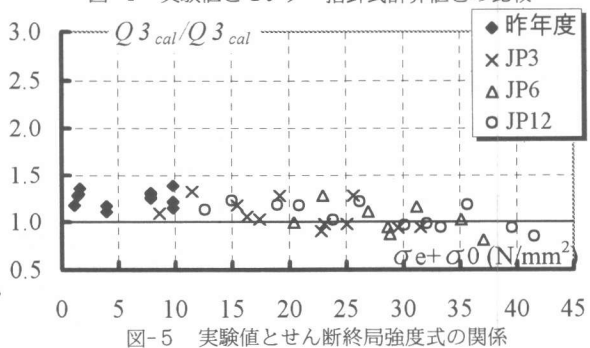


図-5 実験値とせん断終局強度式の関係

各パラメータのせん断終局強度に及ぼす影響を詳しく検討する必要がある。

5. 各種パラメータとの比較

図-6は各試験体の軸方向応力度と複合軸方向応力度との関係を示している。ここでは、昨年度の軸方向力が0の試験体も含めて、肉厚と杭径の比 (t/D)、有効プレストレス量 (σ_e)、軸方向応力度 (σ_0)、複合軸方向応力度 ($\sigma_e + \sigma_0$) がせん断終局強度にどのように影響するか考察する。

5.1 肉厚と杭径の比の影響 図-7は σ_e と σ_0 が同じで、 t/D が異なる試験体について示している。せん断終局強度の場合は t/D が大きくなると全ての τ_{max} が小さくなっており、減少率は0種が一番大きくなっている。すなわち、 t/D はせん断終局強度に影響している。ここでは示していないが、せん断ひび割れ強度に関しては、 t/D はあまり影響がなかった。

5.2 有効プレストレス量の影響 図-8は、 t/D と σ_0 が同じで σ_e のみが異なる試験体 (JP12 の場合) について示している。

σ_e が増加しても軸力が大きいと、 τ_{max} はあまり増加しない。 σ_e の大きいB・C種の試験体は軸力によるばらつきが少ないが、 σ_e の小さい0・A種の試験体はばらつきが大きくなっている。ここでは示していないが、同じような傾向がせん断ひび割れ強度にもいえる。以上より、軸力が大きい場合には σ_e は両強度に影響が小さいことがわかる。

5.3 外力としての軸方向応力度の影響 図-9は t/D と σ_e が同じで σ_0 のみが異なる試験体について示している。図-9-(a)は t/D が小さい JP12 の場合であり、図-9-(b)は t/D が大きい JP3 の場合である。

JP12、JP3 の場合ともA種の傾きだけは他の σ_e より大きくなっている。JP12 では、傾きは σ_e によって違っており、C種の傾きは0種の傾きに対して小さく、必ずしも σ_e の影響がないわけではない。JP3 では、傾きは0・C種ともほぼ同じであった。ここでは示していないが、せん断ひび割れ強度の場合でも、A種の試験体だけ傾きが異なっている。これは主筋量が少ないからであると考えられる。

5.4 複合軸方向応力度の影響 図-10は t/D が同じで、複合軸方向応力度 ($\sigma_e + \sigma_0$) が異なる試験体について示している。図-10-(a)は t/D が小さい JP12 の場合であり、図-10-(b)は t/D が大きい JP3 の場合である。ここでも、A種の試験体だけ傾きが大きくなっていた。

JP3 の場合、図-9-(b)には強度にばらつきがあったが、図-10-(b)では傾きの差が狭まって同

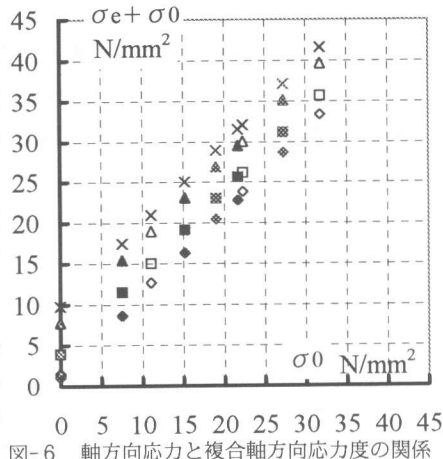


図-6 軸方向応力と複合軸方向応力度の関係

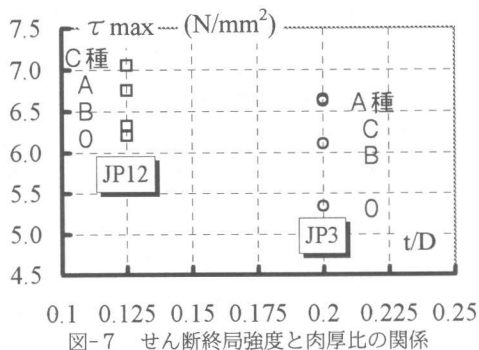


図-7 せん断終局強度と肉厚比の関係

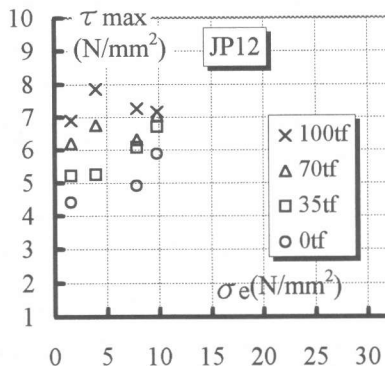


図-8 せん断終局強度と有効プレストレス量の関係

一直線になっている。JP12の場合は、 $\sigma_e + \sigma_0$ が20 N/mm^2 を越えるとA種の傾きと0・B・C種の2つの傾きに分かれてくる。この時、0～C種の差がなくなってくるとともに $\sigma_e + \sigma_0$ の影響も小さくなっていった。ここでは示していないが、同じ事がせん断ひび割れ強度に対してもいえる。

本来ならば、外力としての軸力を加えることによって軸方向筋には圧縮力が加わりプレストレス量は減る。従ってこの影響分を考慮して評価すべきだと考えており、今後の検討課題とする。

6. まとめ

今回の実験では各パラメータがせん断終局強度に及ぼす影響について以下に示すようにある程度把握することができた。これを基に力学モデルに立脚してせん断終局強度式を考えようと思う。設計者として杭に対する要求性能を確立する必要がある。

I. 地震時において高軸力が加わったことによ

てせん断破壊した杭の被害の一部を軸力を加えた実験によって再現できた。

II. 複合軸方向応力度が大きくなると最大せん断応力度が大きくなっている。

III. 肉厚と杭径の比はせん断ひび割れ強度にあまり影響しないが、せん断終局強度には影響を及ぼしており、肉厚方向に応力度が一定でない影響は無視できないと考える。

IV. センター指針式は一定の安全率を見込むことによってある程度せん断ひび割れ強度を予測できる。

【謝辞】 本研究を行うに当たり、東京理科大学の岸田英明教授、日本工業大学の白石一郎助教授に適切な御指導を賜りました。また、本研究は東京工業大学建築物物理研究センターの共同研究の一貫として行われたものであり、COPITAとの協同研究でもあります。ここに関係者各位に対しまして深く感謝の意を表します。

【参考文献】 [1]地震力に対する建築物の基礎の設計指針、日本建築センター [2]建築基礎構造設計指針、日本建築学会、1988 [3]後藤康明他、遠心力P C (P H C) 杭剪断耐力推算式、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.983～984、1985.10 [4]岸田慎司他、大口径P H C杭のせん断強度に関する実験研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.2、pp.695～700、1996.7

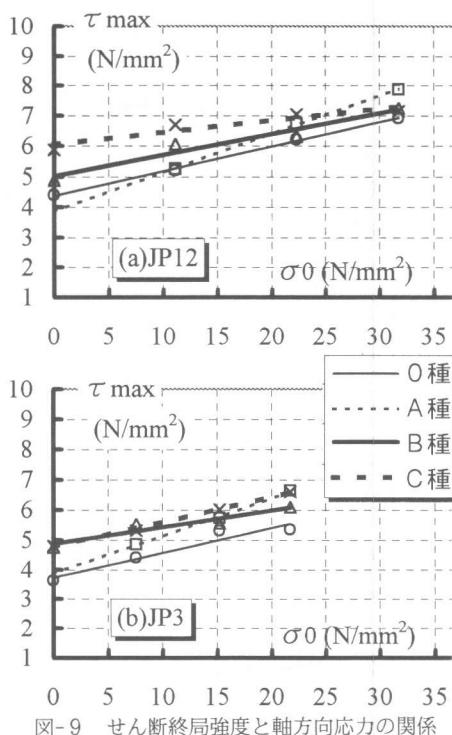


図-9 セン断終局強度と軸方向応力の関係

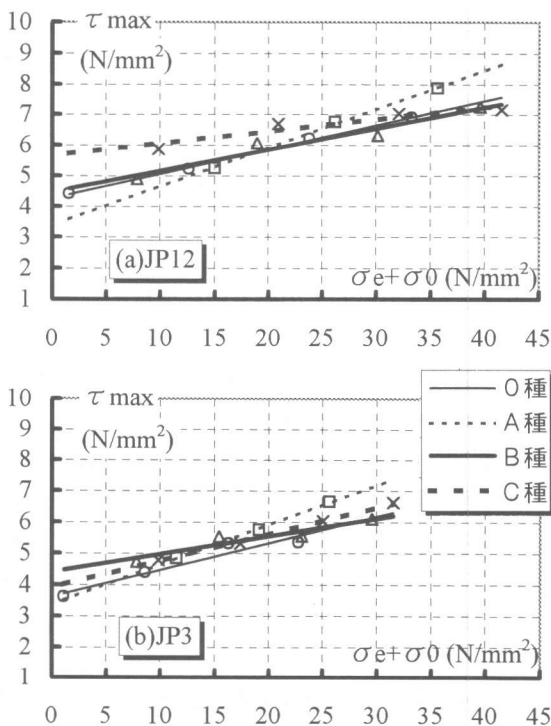


図-10 セン断終局強度と複合軸方向応力の関係