

論文 大口径 PHC 杭のせん断破壊性状に関する解析的研究

山本直孝^{*1}・岸田慎司^{*2}・香取慶一^{*3}・林静雄^{*4}

要旨: 大口径PHC杭のせん断破壊性状について詳しく検討されたものは皆無であり, 先の震災でみられた被害などから, 杭体自体の耐震性能を十分に把握することが必要不可欠である。本研究では大口径PHC杭のせん断破壊時の性状を解明するために, 3次元有限要素法解析を行い, 杭体のひび割れ発生からせん断破壊に至るまでのメカニズムを明確にするとともに, 各因子の影響について詳しく考察を行っている。

キーワード: 大口径PHC杭, せん断破壊, 有効プレストレス量, 軸方向力, 杭径と肉厚の比

1. はじめに

1995年の阪神・淡路大震災における杭基礎の被害から, 建築物の杭構造の耐震性に対する関心が高まっている。また, 近年建築物の大型化に伴い, 大口径の杭が使用されることが多くなっている。杭の大口径化によって, 大きな杭径に対して杭頭から反曲点までの長さが相対的に短くなり, いわゆるせん断スパン比が小さくなる。せん断スパン比が小さくなることでせん断破壊が先行しやすくなる。こうした中, これまで口径の比較的小さい既製杭に対する研究はある程度行われてきたが, 大口径の杭が取り上げられた例はまだ数少ないのが現状である。杭径の比較的大きな杭に対する耐震性能を十分に把握する必要がある。筆者らは, こうした大口径既製杭のせん断破壊性状を解明するために, 実験を行ってきた。^{1), 2)}本研究では, 杭体のひび割れ発生から, せん断破壊に至るまでのメカニズムについて検討を行うために, 3次元有限要素法解析を行った。特に杭体の耐震性の向上に大きな影響を与えることが考えられる有効プレストレス量 σ_0 , 杭体に外力として作用する軸方向力及び杭径に対する肉厚の比に着目し,

これら因子が, 実験では把握しにくい杭体内部のせん断, 軸方向応力の分布やせん断補強筋の応力に及ぼす影響を明らかにするとともに, せん断破壊時の性状について詳しく考察を行う。以下, 本論文では杭体の軸方向に作用する応力, つまり, 有効プレストレス量 σ_0 , 外力としての軸方向応力 σ_0 , 及びその軸力によるプレストレス量の抜け分 $\Delta\sigma_0$ の総和 $\sigma_0 + \sigma_0 - \Delta\sigma_0$ を複合軸方向応力度と呼称する。

2. 解析方法

2.1 材料のモデル化

コンクリート要素は9個の非適合モードを含むアイソパラメトリック6面体を用いている。

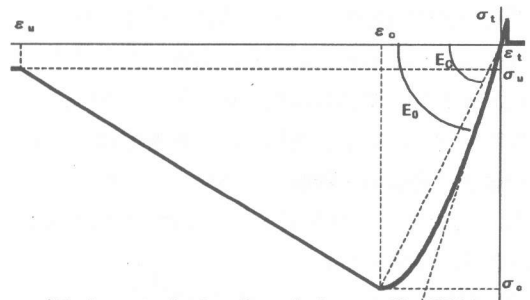


図-1 コンクリートの応力-ひずみ関係

- * 1 (株)NTTファシリティーズ 工修 (正会員)
- * 2 東京工業大学大学院 工修 (正会員)
- * 3 東京工業大学助手 建築物理研究センター 工修 (正会員)
- * 4 東京工業大学教授 建築物理研究センター 工博 (正会員)

コンクリート要素の応力-ひずみ関係を図-1 に示す。図に示すように応力-ひずみ関係は圧縮域を非線形とし、最大強度以降の軟化域、及び引張域は線形とした。ひび割れ及び圧縮破壊はコンクリートの主応力が最大強度を越えた時に発生したと判断する。異形 PC 鋼棒及びらせん筋はともに線材とし、応力-ひずみ関係は bi-linear 型とした。異形 PC 鋼棒とコンクリートの間の付着性状は、bi-linear 型の付着応力-滑り関係特性を持つボンドリンクによってモデル化する。らせん筋はコンクリート要素と完全付着とする。

2.2 解析対象試験体

本解析では、岸田らによるPHC杭試験体58体^{1),2)}の中から、すべての破壊形式が含まれるように対象とする試験体を13体選び出し、解析を行った。解析の対象とした試験体の一覧を表-1 に示す。破壊形式は実験によるものである。杭径はいずれの試験体も300mm

で、JP12が杭径1200mm、JP3が杭径300mmのJIS規格のPHC杭を肉厚と杭径の比が同等となるように縮小したものであるが、実際の肉厚は表に示すとおりいずれの試験体も目標とした肉厚より厚くなっている。解析ではこれを考慮して実測値と公称値の2種類で行った。せん断スパン比は1.5でせん断破壊するように設計してある。

試験体に用いられた材料の特性を表2に示す。

2.3 解析モデル

解析モデルの要素分割の一例を図-2、3に示す。図に示す

表-1 解析モデル一覧

モデル名	肉厚(mm)		軸力(kN)	σ_c (N/mm ²)		軸方向筋本数-径	らせん筋径-ピッチ	破壊形式
	公称	実測		公称	実測			
JP3-00-15		68.3	0	1.18	1.30	10-9.0φ		S
JP3-00-15-105		60.3	981	1.30	1.30	10-9.0φ		S
JP3-80-15-105	60	63.9	981	7.85	7.50	8-9.0φ	3.2φ-@50	SC
JP3-100-15		68.3	0		8.93	10-9.0φ		S
JP3-100-15-105		71.1	981		8.68	10-9.0φ		SC
JP12-00-15		40.2	0		1.80	8-9.0φ		S
JP12-00-15-35		43.8	343		1.67	8-9.0φ		S
JP12-00-15-70		43.9	687	1.91	1.67	8-9.0φ		S
JP12-00-15-105		45.3	981		1.63	8-9.0φ		S
JP12-80-15-105	37.5	45.8	981	7.85	6.66	6-9.0φ	2.9φ-@45	SC
JP12-100-15		43.6	0		8.63	8-9.0φ		S
JP12-100-15-35		48.5	343	9.81	7.92	8-9.0φ		S
JP12-100-15-105		51.1	981		7.60	8-9.0φ		C

破壊形式(実験) S:せん断破壊, SC:せん断圧縮破壊, C:圧縮破壊

表-2 材料特性

①鉄筋(異形PC鋼棒, らせん筋)

	初期剛性(N/mm ²)	2次剛性(N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	As(mm ²)
9.0φ	189000	9120	-1350	1350	64
3.2φ	208000	36790	-540	540	8.04
2.9φ	167000	39140	-589	589	6.61

②コンクリート

初期剛性(N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	ϵ_c	ϵ_u	σ_t (N/mm ²)	ν
38200	-93.5	-0.935	0.0032	0.0128	6.94	0.1783

③ボンドリンク

初期剛性(N/mm ²)	2次剛性(N/mm ²)	τ_y (N/mm ²)
8830	88.3	8.83

とおりのモデルの端部をピン、ローラーで支持し、加力は加力点鉛直方向に強制変位を与えることで行っている。プレストレスはボンドリンクを設けていないモデルで鉄筋要素のみに引張力、コンクリート要素に圧縮力を加え、この時の応力状態をボンドリンクが設けてある完全な杭のモデルの初期応力として与えることで表現した。

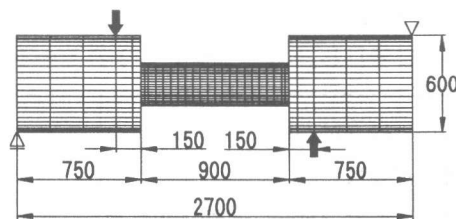


図-2 解析モデル側面図一例

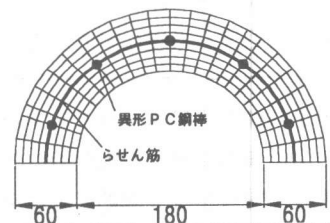


図-3 解析モデル断面図一例

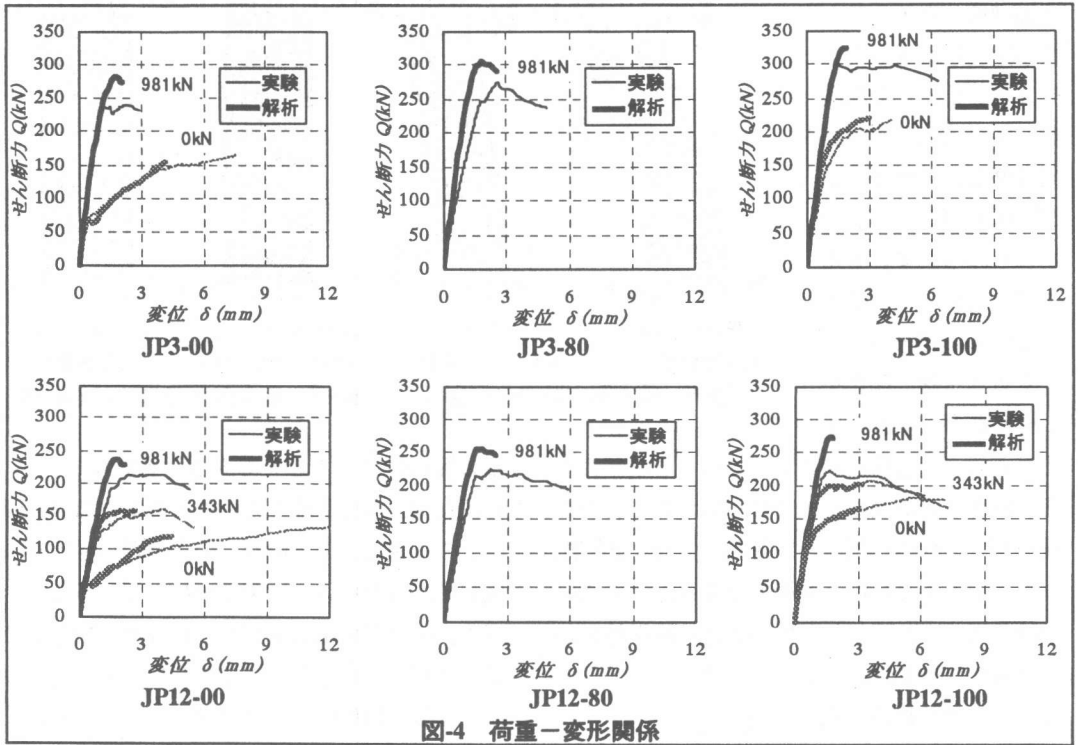


図-4 荷重-変形関係

3. 解析結果

3.1 荷重-変位関係

せん断力-変位関係の実験値と実測厚さで行った解析値の比較を図-4に示す。文献1による実験の変位測定方法をもとに、解析では実験に対応する変位を加力点鉛直変位より求めた。解析ではいずれの試験体も初期剛性からせん断ひび割れ発生までは概ね一致している。実験で大きな変形がみられたモデル(JP12-00-15等)ではせん断ひび割れ発生後の変位が実験結果にくらべて小さくなっている。これは、分布ひび割れモデルを用いたことで大きなひび割れ幅を表現できなかったためと考えられる。

3.2 最大耐力

図-5に実験値と実測厚さで行った解析値の最大耐力比と複合軸方向応力度の関係を示す。最大耐力は荷重-変位関係より求めた。最大耐力は複合軸方向応力度が 20N/mm^2 以下ではほとんど差はみられず実験値との良好な対応がみられたが、高い応力下では解析値の最大耐力が実験値にくらべ1割程度高くなっており、特に圧縮破壊したJP12-100-15-105は実験値の1.2倍程度

とかなり高い値を示した。これは圧縮域の広がりを実験よりも解析の方が狭く、この差により最大耐力が高めに出たものと思われる。

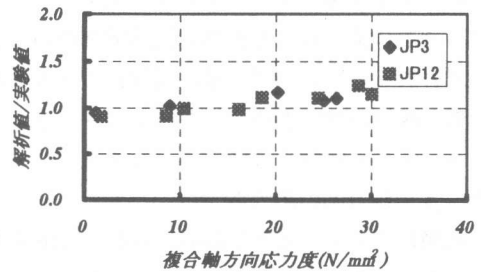


図-5 実験値と解析値との比較

3.3 破壊形式

解析上の破壊形式はひび割れ状況、変形図から判断した。図-6にせん断破壊したモデルとせん断圧縮破壊したモデルの変形図を示す。せん断破壊したモデルは試験区間の全域にわたって要素が変形しており、試験区間の形状が直線的でなくなっている。せん断圧縮破壊したモデルは試験区間端部の要素が大きく変形しているが、中央部に大きな変形は認められず、ほとんど原型をとどめている。両者を比較すると破壊形式の違いがはっきりと現れている。図-7に

圧縮破壊したモデルとせん断圧縮破壊したモデルのひび割れ分布図を示す。この図から圧縮破壊したモデルでは試験区間のひび割れがあまりみられず、せん断圧縮破壊したモデルでは圧縮破壊のモデルにくらべ試験区間中央にせん断ひび割れが多

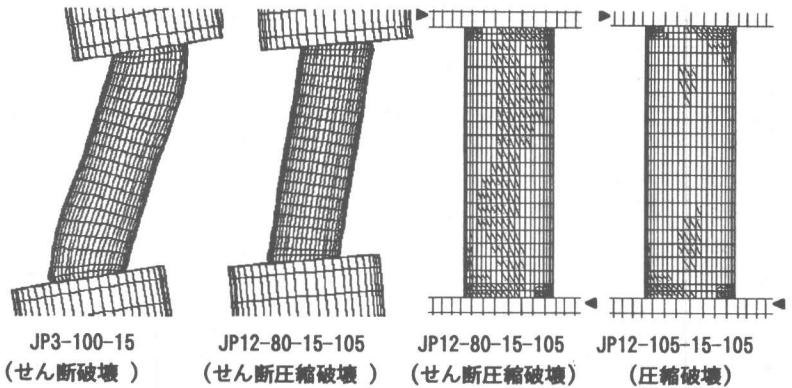


図-6 最大耐力時の変形図

図-7 最大耐力時のひび割れ図

くみられ、破壊形式が異なっていることがわかる。両者は変形図から大きな違いがみられなかったが、ひび割れ図より圧縮破壊とせん断圧縮破壊の違いがみられ、解析上からも破壊形式の判断が可能であることがわかった。解析結果から判断した破壊形式は表-3 に示す。

3.4 公称断面と実測断面

図-8 に公称断面と実測断面の解析値の最大せん断耐力の比と公称断面での複合軸方向応力度との関係を示す。この図より肉厚の違いにより最大耐力が最大で1.2倍近くまで上昇しており、肉厚の違いによる影響は無視できないものと思われる。特に肉厚の薄い JP12 の杭はその影響が肉厚の厚いものにくらべて大きくなっており、その影響を十分考慮すべきである。

3.5 軸方向の応力度

前節までの解析値と実験値の比較より解析の妥当性が示されたものとし、本節以降は実際の杭の縮小である実測値の肉厚で解析を行ったものについて結果の考察を行う。図-9 に最大耐力時のせん断力を断面積で除して算出した杭体断面の平均せん断応力度 τ_{AV} と軸方向応力度、図-10 に τ_{AV} と複合軸方向応力度との関係を示す。白抜きは圧縮、せん断圧縮破壊のモデルである。図より、軸方向応力度、複合軸方向応力が高くなるにつれ τ_{AV} が増加していることがわかる。この2つの図を比較すると、軸力の応力よりも複合軸方向応力度がより傾向が明確であり、ばらつきが少なく、軸方向応力が及ぼす影

響の評価値として適当であると判断する。 τ_{AV} と複合軸方向応力度との関係を見ると 20N/mm^2 以上の高軸応力下では τ_{AV} の上昇が小さくなり、破壊形式も変わり、次第に頭打ちになってきている。軸方向の応力度が高ければせん断耐力の向上が期待できるが、ある程度以上の応力下ではそれほど効果は期待できないといえる。

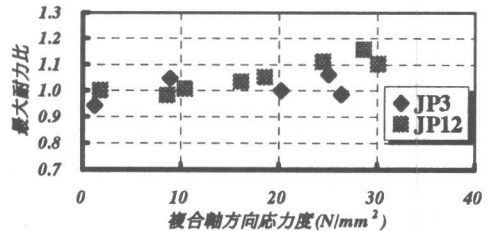


図-8 せん断耐力比-軸方向応力度

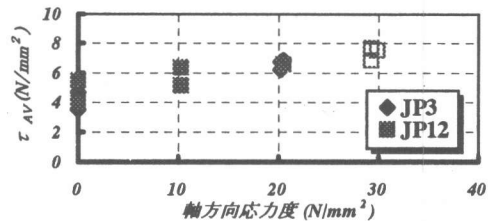


図-9 せん断応力度-軸方向応力度関係

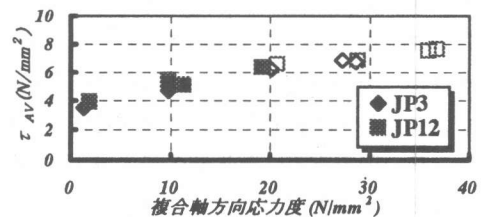


図-10 せん断応力度-複合軸方向応力度

3.6 せん断応力度

表-3 に解析から求められたせん断ひび割れ発生時と最大耐力時のそれぞれのせん断力とせん断応力度を示す。 τ_{max} は試験区間内要素の最大のせん断応力度である。 τ_{max} と τ_{AV} の比はせん断ひび割れ発生までは破壊形式に関係なく2倍程度とほぼ一定であるが、最大

表3 せん断応力度

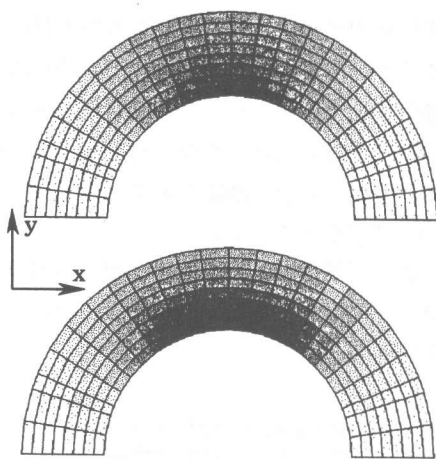
モデル名	せん断ひび割れ時				最大耐力時				破壊形式	
	せん断力 Q_1 (kN)	$Q_1/A = \tau_{AV}$ (N/mm ²)	τ_{max} (N/mm ²)	τ_{max}/τ_{AV}	せん断力 Q_2 (kN)	$Q_2/A = \tau_{AV}$ (N/mm ²)	τ_{max} (N/mm ²)	τ_{max}/τ_{AV}	解析	実験
JP3-00-15	90.63	2.01	4.71	2.35	159.70	3.53	13.15	3.72	S	S
JP3-00-15-105	255.40	5.65	13.43	2.38	281.40	6.23	15.01	2.41	SC	S
JP3-80-15-105	270.50	5.98	14.13	2.36	309.60	6.85	16.78	2.45	SC	SC
JP3-100-15	201.40	4.46	10.69	2.40	211.50	4.68	19.13	4.09	S	S
JP3-100-15-105	281.60	6.23	14.60	2.34	305.10	6.75	15.50	2.30	SC	SC
JP12-00-15	71.59	2.32	5.29	2.28	122.04	3.95	20.19	5.11	S	S
JP12-00-15-35	140.90	4.56	10.00	2.19	158.30	5.12	21.87	4.27	S	S
JP12-00-15-70	188.00	6.08	13.64	2.24	203.20	6.58	21.29	3.24	S	S
JP12-00-15-105	177.40	5.74	12.65	2.20	211.80	6.85	15.70	2.29	SC	S
JP12-80-15-105	232.00	7.51	16.19	2.16	232.90	7.54	17.17	2.28	SC	SC
JP12-100-15	135.60	4.39	9.90	2.26	168.50	5.45	20.80	3.81	S	S
JP12-100-15-35	183.80	5.95	12.85	2.16	196.20	6.35	21.20	3.34	S	S
JP12-100-15-105	238.20	7.71	16.68	2.16	236.71	7.66	17.27	2.25	C	C

耐力時、せん断破壊したモデルは、 τ_{max}/τ_{AV} が4倍程度まで大きくなり、逆に圧縮、せん断圧縮破壊したモデルはせん断ひび割れ発生時から τ_{max}/τ_{AV} にほとんど変化がない。破壊形式による違いが明確に現れた。図-11 にせん断破壊した JP3-100-15 のせん断応力度の分布図を示す。図にみられるようにせん断破壊したモデルではせん断ひび割れ発生後、せん断応力度が中央内側に集中し、高い応力を示している。表-3 の結果とあわせてせん断応力の集中が確認された。このことから、せん断破壊した杭はせん断ひび割れ発生後、せん断応力の応力集中が起こり、せん断ひび割れが進展し破壊に至るこ

とが推測される。圧縮、せん断圧縮破壊した杭は、せん断応力度の急激な増加はみられず、他の要因によって破壊に至ったものと考えられる。

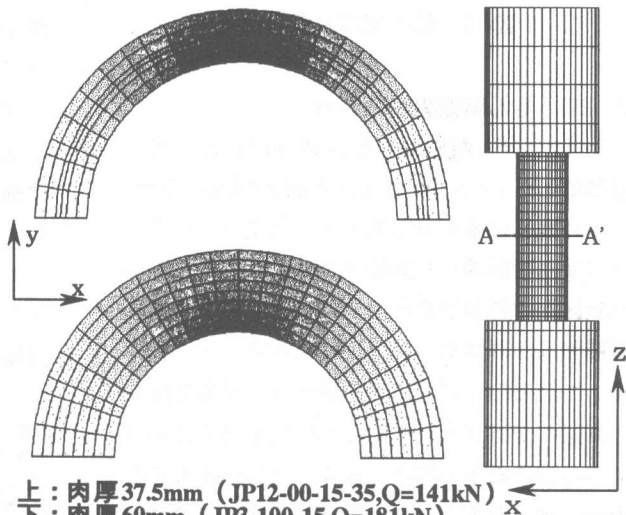
3.7 肉厚と杭径の比

図-12 にせん断破壊したモデルのうち、肉厚の異なるもののせん断応力度分布を示す。いずれもせん断ひび割れ発生前の状態で、平均のせん断応力度 τ_{AV} がほぼ同等であるときのものである。両者とも中央部のせん断応力が高くなっているが、肉厚の薄いものが肉厚の厚いものに比べ、せん断応力度の高い領域が広く、集中度合いが高くなっていることがわかる。



上：せん断ひび割れ発生前 (Q=181kN)
下：せん断ひび割れ発生後 (Q=207kN)

図-11 A-A'断面 τ_{xz} 分布



上：肉厚37.5mm (JP12-00-15-35, Q=141kN)
下：肉厚60mm (JP3-100-15, Q=181kN)

図-12 A-A'断面 τ_{xz} 分布

このことから肉厚の薄いものほどせん断応力度が中央部への集中度が高いことがわかる。肉厚と杭径の比の違いによって応力の分布に違いが生じることが明らかとなった。肉厚の厚みを増すことでせん断応力度の応力集中を緩和することができると考えられる。

3. 8 圧縮応力度

図-13に圧縮破壊したモデルとせん断圧縮したモデルの最大耐力時の最小主応力度分布を示す。図より、圧縮破壊したモデルの主応力の高い部分の領域にくらべ、せん断破壊したモデルのこの主応力の領域が小さく、全体的に応力が小さいことがわかる。せん断圧縮したモデルでも圧縮破壊時と同様の傾向がみられ、せん断圧縮、圧縮破壊した杭はこの高い圧縮応力によって破壊に至ったと考えられる。

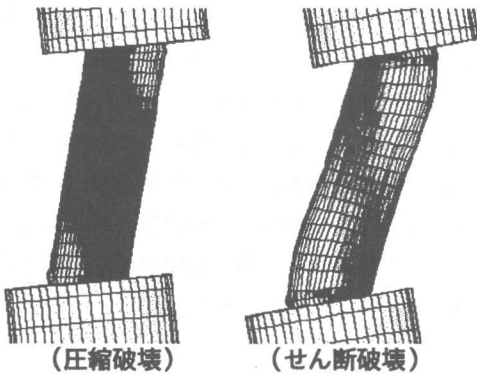


図-13 最小主応力度の分布

3. 9 せん断補強筋の応力

図-14にせん断破壊したJP12-00-15-35と圧縮破壊したJP12-100-15-105の最大耐力時のせん断補強筋の応力分布を示す。図にみられるようにせん断破壊した試験体では、最大耐力時に試験区間の材端部を除いた部分に位置するせん断補強筋が降伏あるいは降伏直前まで応力が上昇しているのに対し、せん断圧縮、圧縮破壊した試験体では最大耐力時においても応力は最大で降伏強度の1/3程度である。せん断破壊する場合、せん断耐力にせん断補強筋の強度や鉄筋量が大きく関わっているものと考えられ、せん

断補強筋の強度や鉄筋量を増やすことが耐力の上昇につながるものと思われる。

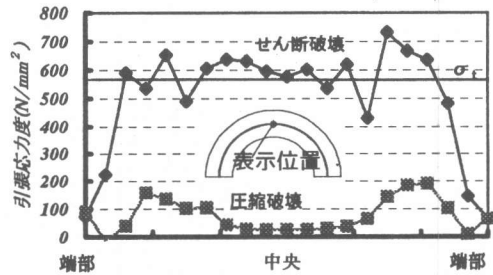


図-14 せん断補強筋の応力分布図

4. 結論

本研究ではPHC杭の3次元有限要素法解析を行い、せん断破壊した杭の解析では剛性、最大耐力ともに実験結果と良好な対応が得られた。せん断破壊したものは試験区間中央のせん断応力の上昇に伴うせん断ひび割れの進展で破壊に至り、せん断圧縮、圧縮破壊はせん断ひび割れの進展よりも先に圧縮領域が広がり、端部の圧壊領域の進行によって破壊に至ったと考えられる。今回の解析の範囲内では、

- ・複合軸方向応力度が 20N/mm^2 を越えると破壊形式が変わり、軸方向応力度の影響が小さくなることがわかった。
- ・軸方向の応力が高ければせん断耐力の上昇につながるが、高すぎるとその高い応力のために端部の圧壊で破壊に至り、せん断耐力の向上は期待できないことがわかった。
- ・肉厚の割り増しがせん断応力集中の緩和に有効であることがわかった。

せん断圧縮、圧縮破壊した杭は最大耐力が実験値より高く、広域の圧縮領域の取り扱いが今後の課題といえる。

【参考文献】1)岸田慎司他:大口径 PHC 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 2)岸田慎司他: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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No2, pp.765~770, 1997.6