

## 論文 2 本群杭で支持されたパイルキャップの鉛直載荷に対する耐震性能評価

酒井 慎二<sup>\*1</sup>・岸田 慎司<sup>\*2</sup>・小林 恒一<sup>\*3</sup>・田中 佑二郎<sup>\*3</sup>

要旨：本実験では、標準的に設計されているパイルキャップを基準として、配筋とフーチングせいによる耐力差を検討し、柱主筋とアンカー筋の効果を確認するために、パイルキャップの鉛直載荷実験を行った。実験結果により、鉛直載荷では柱主筋、アンカー筋の有無における大きな耐力差はみられないことがわかった。また、試験体のフーチングせいにおいて、せいの大小に関わらずせん断破壊することも確認できた。実験値耐力と計算値耐力の比により経済設計型の強度が十分に高く、その有効性を示すことができた。

キーワード：パイルキャップ，鉛直荷重，せん断耐力

### 1. はじめに

パイルキャップとは、上部構造物および杭からの力を相互に伝達する接合部材である。パイルキャップには、柱や杭、基礎梁といった部材が定着されていることから、地震時などに外力が作用した場合、内部に複雑な応力が発生することになる。しかし、柱と杭とを結ぶ重要な接合部でありながら、上部構造物における柱・梁の接合部に比べて、構造性能に関する研究が非常に少なく、設計法も十分に確立されていないのが現状である。

一方で、最近の既製杭を用いた埋込み工法は、杭先端地盤の拡大掘削に伴う先端支持力の増大、節杭を用いた杭周面抵抗力の増大、杭材の高強度化などにより、高支持力化が進んでおり、パイルキャップを介して伝達される応力も増加する傾向にある。したがって、この応力を十分に伝達することのできる強度と剛性を持つパイルキャップの設計が必要となる。

ここでは、2本群杭のパイルキャップの軸力と曲げおよびせん断力に対する設計の中で、最も基本となる柱からの軸力に対するパイルキャップの構造性能に着目した。柱からの軸力に対

して、一般的に、パイルキャップを2本の杭で支持される単純梁でモデル化し、パイルキャップ内に作用するせん断力は、コンクリート断面で負担させるという考え方に基づいて設計されている。しかし、杭の高支持力化が進んでいることから作用するせん断力も大きくなり、それに抵抗するため、断面も高強度化や大断面化する傾向にある。

実際のパイルキャップ内には、各種鉄筋(袴筋、ベース筋、柱主筋、杭頭補強筋など)が配筋されており、これらの効果を期待せずに、コンクリート断面のみでせん断力を負担させる設計は安全ではあるが、過剰設計となってしまうと考えられる。また、パイルキャップ内の鉄筋のせん断補強筋としての効果を設計に反映させるのであれば、その効果を明らかにし定量的な評価を行う必要がある。各種鉄筋の中で特にせん断補強筋の効果を明確にすることにより、パイルキャップの合理的な配筋仕様および設計法の提案が可能になると考えられる。

既報<sup>1)</sup>において、以下に示す3点を目的とした2本群杭パイルキャップの鉛直載荷試験結果を報告した。本報では試験の結果を詳細に検討

\*1 芝浦工業大学大学院 建設工学専攻 (正会員)

\*2 芝浦工業大学 工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 ジャパンパイル(株)

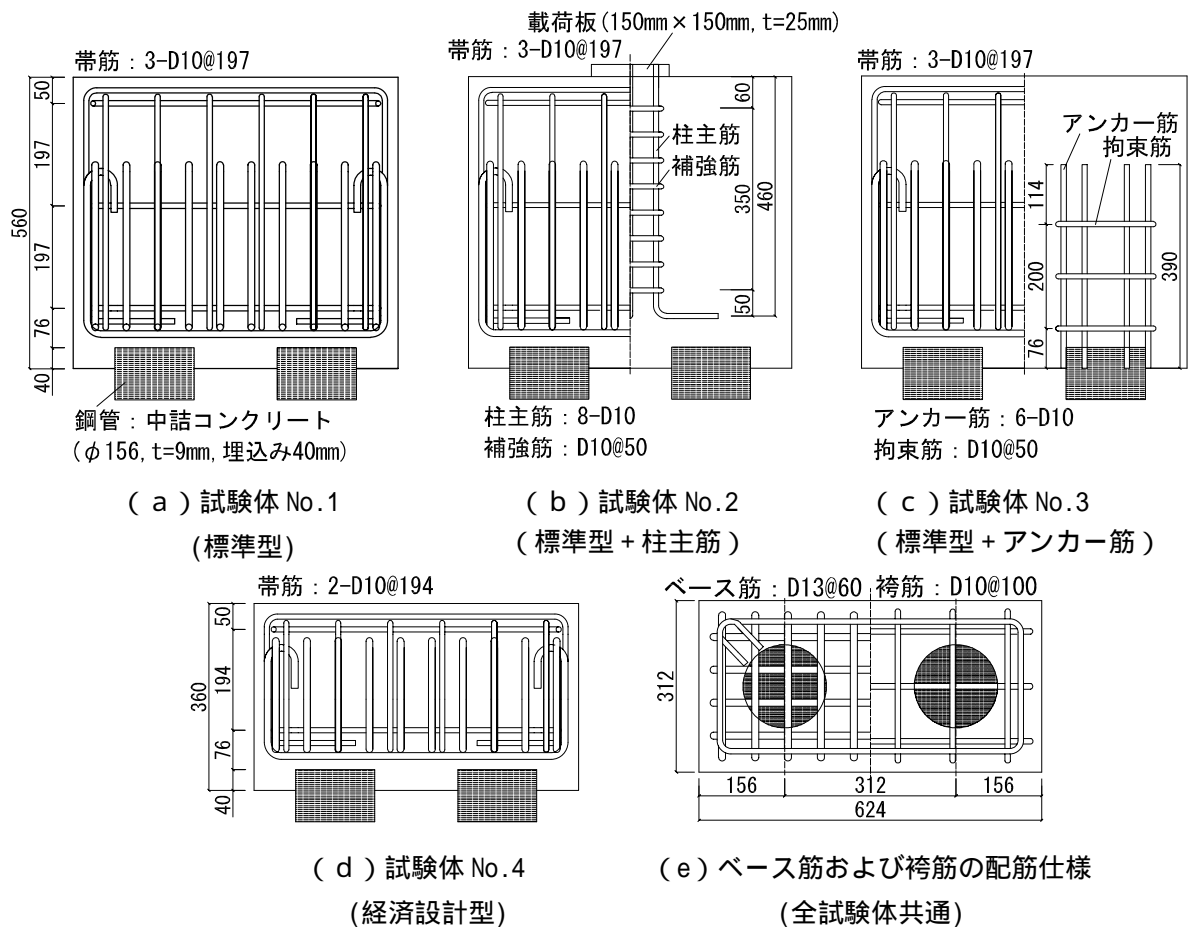


図 - 1 試験体形状

表 - 1 試験体諸元

試験体	配筋仕様					パイルキャップ フーチングせい (mm)
	ベース筋	袴筋	帯筋	柱主筋	アンカー筋	
No.1	4-D13@60	3-D10@100	3 D10@197	-	-	560
No.2				8-D10	-	
No.3			-	6-D10	-	
No.4			2 D10@194	-	-	360

表 - 2 材料特性

コンクリート	圧縮強度 (MPa)	最大荷重時ひずみ ( $\mu$ )	ヤング係数 ( $10^3 \times \text{MPa}$ )	割裂強度 (MPa)
		29.0	1900	24.0

鉄筋	降伏応力度 (MPa)	破断強度 (MPa)	降伏ひずみ ( $\mu$ )	ヤング係数 ( $10^3 \times \text{MPa}$ )
	D10(SD295)	363	488	2151
D13(SD345)	363	536	1949	191

し考察を行っている。1.標準的に設計されているパイルキャップのせん断耐力を確認する。2.袴筋およびベース筋のせん断補強効果を確認する。3.柱主筋およびアンカー筋がせん断耐力に与える影響の確認をする。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体形状および使用材料

試験体形状を図 - 1 に示す。本実験では、試験体を実際の杭径  $D=1000\text{mm}$  の 2 本群杭を用いたパイルキャップをモデルケースとして、実物

の約 1/6 スケールで 4 体製作した。杭のへりあきは 0.5D、杭芯間隔 2.0D とし、幅 312mm、奥行 624mm のフーチングとした。また、実験因子は柱主筋およびアンカー筋の有無、フーチングせいである。

試験体諸元を表 - 1 に示す。試験体 No.1 には、袴筋(D10@100)およびベース筋(D13@60)、3 段の帯筋(D10@197)を配筋している。試験体 No.1 の仕様を標準型とし、柱主筋(8-D10)を配筋したものが試験体 No.2、アンカー筋(6-D10)を加えたものが試験体 No.3 である。試験体 No.4 は、試験体 No.1 のフーチングせいを 560mm から 360mm へ下げた経済設計を目的とした試験体である。また、試験体 No.4 はせいの関係上、帯筋(D10@194)を 2 段配筋としている。

本実験に使用したコンクリートと鉄筋の材料特性値を表 - 2 に示す。また、今回は杭の性能を確認するための実験ではないため、杭には十分強度が確保できる中詰めコンクリートを施した SC 杭を用いて実験を行った。

## 2.2 載荷装置

載荷方法を図 - 2 に示す。加力は、球座および載荷板を介しての鉛直単調載荷とした。なお、試験体 No.2 は載荷板と柱主筋を一体化させた仕様となっているため、球座のみを介し載荷を行った。杭はパイルキャップ中に中詰めコンクリート鋼管を 40mm 埋め込み、支承部分をローラー・ピン支持とした。

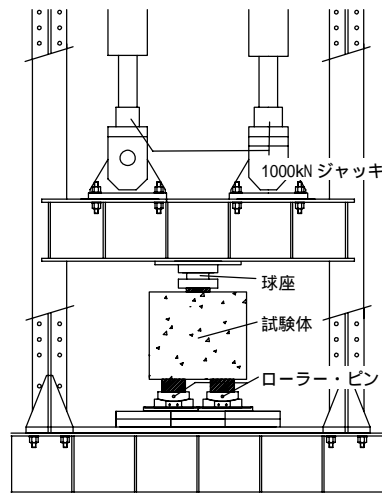


図 - 2 載荷装置

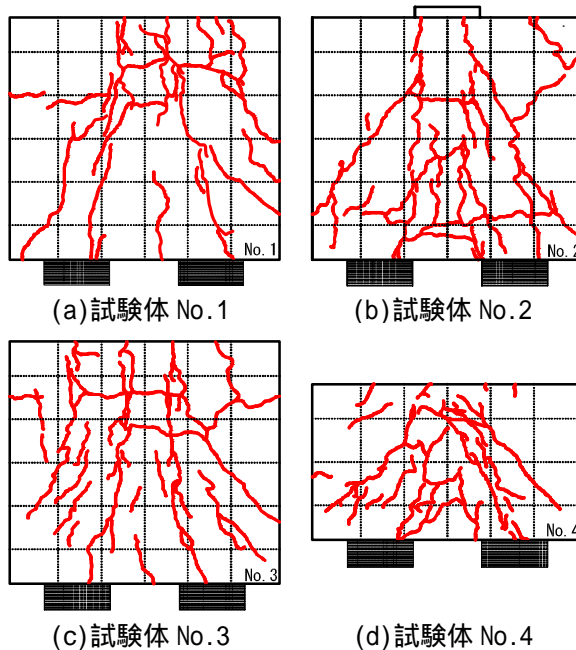


図 - 3 最終ひび割れ状況

## 3. 実験結果および検討

### 3.1 配筋仕様による影響

各試験体の実験結果を表 - 3 に、最終ひび割れ状況を図 - 3 に示す。ひび割れ発生時は試験体 No.1, 2, 3 の 3 体とも、まず試験体中央上部に縦方向においてひび割れが発生し、荷重の増加に伴い載荷位置から杭頭へ伸びる斜めひび割れが発生した。経済設計型試験体 No.4 では、左杭頭付近からひび割れが発生し、その位置から柱脚へ伸びる斜めひび割れに進展した。

標準型試験体 No.1 と比べ、試験体 No.2 は柱

表 - 3 実験結果

試験体仕様	ひび割れ発生荷重 P (kN)	最大荷重 P (kN)	最大せん断耐力 Q (kN)
No.1 (標準型)	700	1252	626
No.2 (標準型 + 柱主筋)	800	1286	643
No.3 (標準型 + アンカー筋)	600	1236	618
No.4 (経済設計型)	375	1080	540

主筋に沿った縦方向のひび割れが目立ち、最終的に試験体下部にひび割れが集中する形となった。試験体 No.3 では、ひび割れが試験体上部から広範囲に生じ、アンカー筋が配筋されている位置からのひび割れが目立つ形状となった。また、アンカー筋を配筋することによってひび割

れが分散する傾向にあるとわかった。

初期ひび割れ発生後、荷重の増加に伴い、試験体 No.1, 2, 3 とともに斜めひび割れが発生したが、ひび割れが発生した後も最大荷重時まで耐力をある程度保持することがわかった。

しかし、これらひび割れ性状における差異や、柱主筋およびアンカー筋の配筋による鉄筋量の増加に伴う見かけ上のせん断耐力増大は想定できるが、表 - 3 に示したように最大せん断耐力からは柱主筋およびアンカー筋の配筋による顕著な耐力増加は望めないという結果が得られた。今回の実験では、地震時に伴う水平力を作用させていないため、柱主筋とアンカー筋の効果がみられなかったのではないかと考えられる。

### 3.2 荷重 - せん断変形角

図 - 4 にひずみのロゼット解析によって求めたせん断変形角をもとに各試験体の荷重 - せん断変形角の関係を示す。今回の実験では、パイルキャップのせん断変形を計測するために、パイゲージ(D1~6:計6個)を試験体側面に取り付け計測を行った。

載荷荷重がひび割れ発生荷重を超える前においては、せん断変形角の変形量が微小であり、ひび割れ発生荷重を超えると試験体の変形量は増加する傾向にあることが分かった。しかし、ひび割れ発生荷重とせん断変形角が急激に変化する荷重は、必ずしも一致しないことがわかった。これは、初期ひび割れがせん断ひび割れの要素を含むとは限らないためだと考えられる。最終的に全ての試験体において、最大荷重後は荷重が急激に低下し、斜めひび割れのひび割れ幅が大きくなったために破壊型はせん断破壊とした。

### 3.3 各種鉄筋の荷重 - ひずみ

図 - 5 に試験体 No.1 の各種鉄筋の荷重 - ひずみ関係のグラフを示す。全ての試験体において

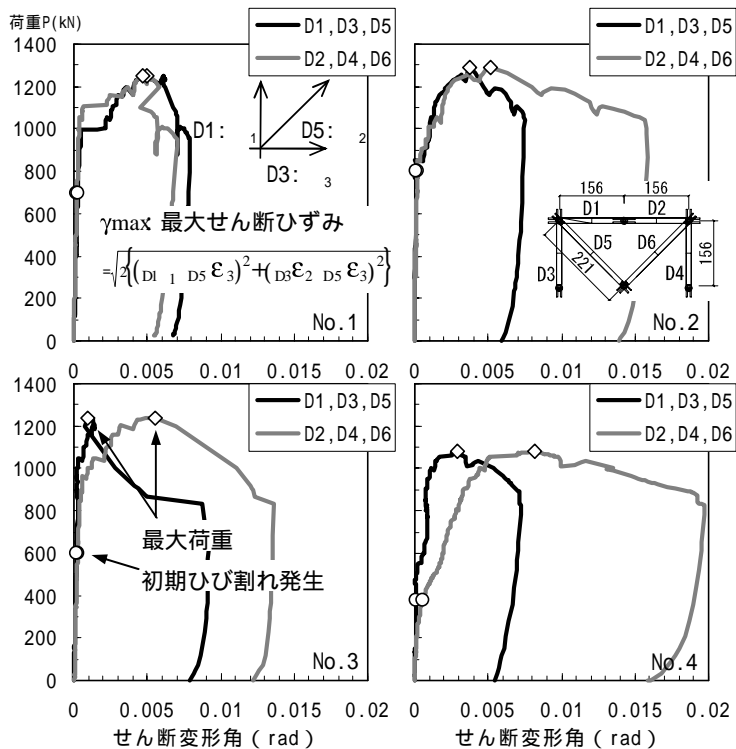


図 - 4 荷重 - せん断変形角

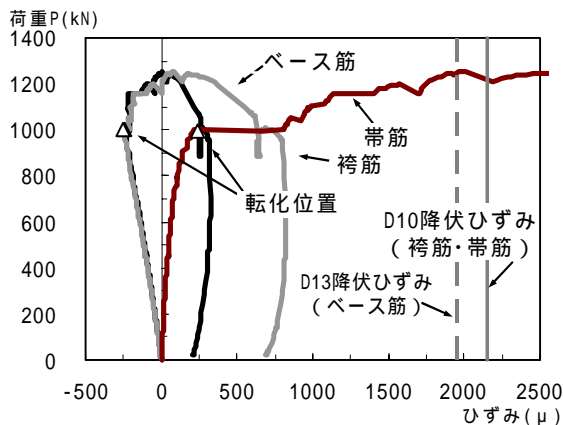


図 - 5 試験体 No.1 各種鉄筋の荷重 - ひずみ曲線

折り下げ、折り上げ配筋(以下：縦配筋)となっている袴筋とベース筋は、初期において圧縮を受ける傾向にある。標準型試験体 No.1 では荷重 1000kN 付近で各鉄筋のひずみが圧縮から引張りへ転化するという挙動があった。これは図 - 3 に示される柱脚から杭頭へ伸びる斜めひび割れが荷重 1000kN で発生したことによる影響であり、その後は最大荷重まで引張り力を受けた。斜めひび割れが発生するまで全体的に圧縮力を受け縮んでいることがわかった。全ての試験体において載荷荷重の大きさに違いがあるものの、

縦配筋された袴筋とベース筋のひずみの圧縮から引張りへの転化の挙動は共通していた。また、どの試験体においても縦配筋された袴筋とベース筋は降伏ひずみに達するものはなかったが、試験体 No.1, 2, 4 では帯筋の降伏後(降伏ひずみ 2151 $\mu$ )、荷重が頭打ちとなった。図 - 5 に示される各種鉄筋の挙動では帯筋のひずみ増加量は大きく、帯筋が降伏ひずみに達すると試験体の耐力が頭打ちになることが分かった。

### 3.4 せん断耐力算定

#### (1) 荷重伝達の検討

試験体の柱脚からパイルキャップを通じて杭へ流れる荷重伝達について考えるために、まず試験体が荷重を伝達するために要する有効断面を検討する必要がある。ここでは全試験体の基準となる、試験体 No.1 の荷重伝達を検討した。

まず、荷重をパイルキャップ断面全体で負担しているのかあるいは、柱断面で負担しているのかを判別し、コンクリートひずみと鉄筋ひずみとの比較において、パイルキャップ内部の荷重伝達についての検討を行った。コンクリートひずみは、試験体に取付けたパイゲージの縦変位 D3, D4 の値(mm)を、それぞれ計測幅(mm)で除して求めた。

コンクリートひずみによる検討を図 - 6 に示す。評価方法は実験値( $E=24\text{kN/mm}^2$ ,  $P$ : 載荷荷重)を用いてパイルキャップ断面積 ( $500\text{mm}\times 312\text{mm}$ )、柱断面積( $150\text{mm}\times 150\text{mm}$ )からひずみを計算し、パイゲージから算出したコンクリートひずみの値と比較する。荷重 - ひずみ関係の図中でパイルキャップ断面のひずみ、または柱断面のひずみの曲線に近接するひずみの値で近似できるものとし、荷重を負担している断面を決定する。試験体 No.1 では求めた値がパイルキャップ断面のひずみと 1000kN まで、ほぼ重なるためパイルキャップ断面で求められるひずみによって

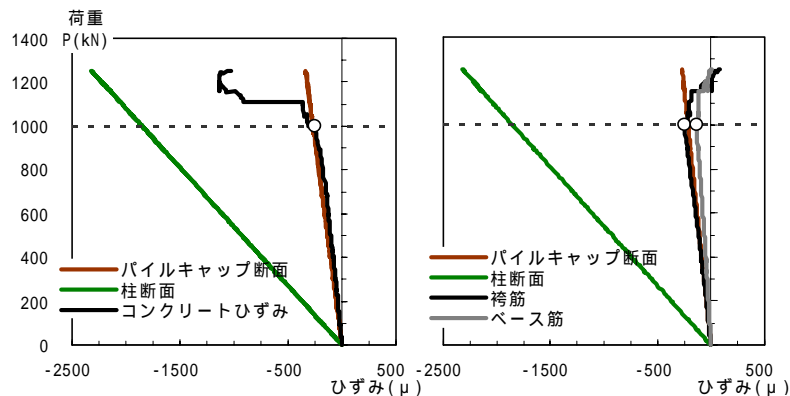


図 - 6 コンクリートひずみ

図 - 7 鉄筋ひずみ

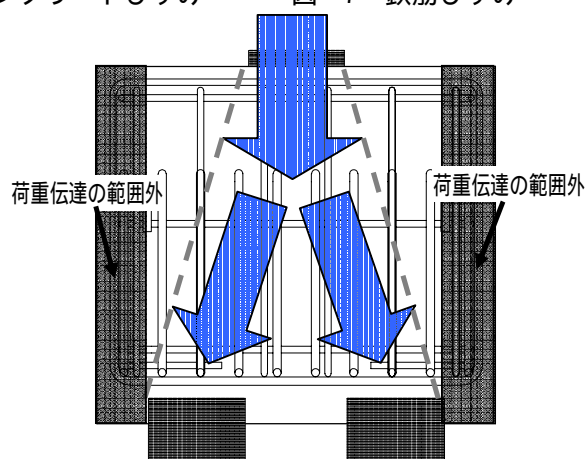


図 - 8 荷重伝達の範囲

コンクリートひずみが近似できると考えられる。図 - 7 に鉄筋ひずみによる検討を示す。鉄筋ひずみによる有効断面は、鉛直力を受ける縦配筋された袴筋とベース筋のひずみの値を用いる。図 - 7 より、袴筋およびベース筋のひずみの値に関してパイルキャップ断面で負担していると判断することができる。鉄筋ひずみは 1000kN 付近を越えた辺りでひずみの値が小さくなっているが、パイルキャップ断面より大きくなることはなく、斜めひび割れの発生に伴って鉄筋の荷重負担量が変化したことが原因ではないかと考えられる。また、試験体が荷重を負担する範囲には、反力は杭から伝わってくるため杭から外側に位置する鉄筋は柱脚から杭頭へ流れる荷重を負担しているとは考えにくい。そのため、耐力には直接寄与しないものとする。図 - 8 に荷重伝達範囲の図を示す。荷重伝達の範囲は、柱脚から杭頭をつなぐ三角形を描く範囲が基本となり、柱断面よりも広い範囲で荷重を負担し



ていることになる。

(2) 耐力算定式による検討

有効断面内において鉛直荷重によるせん断力を負担している鉄筋を算出し、式(1)に示す大野・荒川 min 式<sup>2)</sup>にせん断補強筋と仮定して耐力算定を行う。

ここで、試験体が荷重を負担していると考えられる有効断面内のせん断ひび割れ発生位置で図-9に点線によって示された断面で切断する。その断面に含まれる丸印で囲まれた鉄筋を $P_w$ (せん断補強筋比)として鉄筋を考慮しない場合、袴筋のみ考慮する場合、ベース筋のみ考慮する場合、袴筋およびベース筋、帯筋の3種を考慮する場合に関して算出した。耐力計算の結果を表-4に示す。せん断補強筋として袴筋、ベース筋、帯筋を考慮した場合としない場合とでは、実験値と計算値とに約2倍の差が生じる。考慮した場合には実験値/計算値の比が約1倍となり、せん断耐力が上昇する結果となった。また、No.4では、実験値と多少の差があり、フーチングせいの影響によって考慮しきれないのが原因であるが、全体としてせん断耐力が上昇しており、適合性は評価できると考えられる。

表-4 最大せん断力と計算値耐力の比較

試験体	せん断耐力：実験値Q(kN)	短期せん断耐力 $Q_j$ (kN)*	せん断耐力：計算値 $Q_c$ (kN)			
			考慮しない	袴筋のみ	ベース筋のみ	袴筋・ベース筋帯筋
No.1	626	263.9	(2.4)	387.45	494.65	(1.1)
No.2	643		(2.4) 263.9			(1.2)
No.3	618		(2.3)	257.75	322.05	(1.1)
No.4	540		(3.2) 168.5			(1.5)

\* 短期せん断耐力:  $Q_D = f_t \cdot b \cdot j$   
 $f_t$  = コンクリート短期応力度

( ) 内は実験値/計算値の比

$$Q_{u\min} = \left\{ \frac{0.092 \cdot k_u \cdot k_p (17.7 + \frac{b}{D})}{\frac{M}{Q \cdot d} + 0.12} + 2.7 \sqrt{\rho_w \cdot \sigma_y} + 0.1 \cdot 0 \right\} \cdot b \cdot j \quad \dots (1)$$

$Q_{u\min}$ : せん断終局強度(kN),  $D$ : 部材の全せい(mm)

$b$ : 部材幅(mm),  $j$ : 応力中心間距離(mm)

$k_u$ : 断面寸法による補正係数,  $k_p = 0.82 \rho_t^{0.23}$ : 引張鉄筋比 $\rho_t$ (%)による補正係数

$\rho_t$ : 引張鉄筋比(%),  $\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度(Mpa)

$\frac{M}{Q \cdot d}$ : せん断スパン比(1なので1.0を採用)

$\rho_w$ : せん断補強筋比,  $\sigma_y$ : せん断補強筋降伏応力度(Mpa),  $\sigma_0$ : 軸応力度(圧縮のみ, 引張は0)(Mpa)

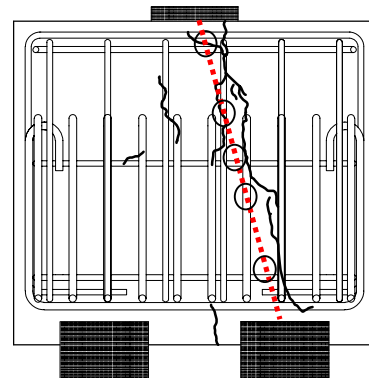


図-9 切断位置図

4. まとめ

本実験により得られた知見を以下に示す。

- 1) 標準型試験体 No.1 の最大耐力は 626kN で、帯筋が降伏したことにより破壊型はせん断破壊となった。
- 2) 大野・荒川 min 式の耐力算定ではベース筋および袴筋と帯筋をせん断補強鉄筋と仮定し耐力計算を行うと、考慮した場合には実験値と計算値とで差が少なくなり、適合性の高いことが確認できた。
- 3) フーチングせいの大小や柱主筋およびアンカー筋の配筋の有無に関わらず、パイルキャップはせん断破壊性状を示した。

謝辞

本実験に御協力いただいた林静雄先生(東京工業大学建築物理センター教授), 香取慶一先生(東洋大学工学部建築学科助教授), また関係者各位には厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田中佑二郎ほか: 2 本群杭で支持されたパイルキャップの鉛直載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.427-428, 2006.9
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 - 許容応力度設計法 -, 1999