

論文 引張・せん断の組合せ荷重を受ける頭付きスタッドの力学性状

関 彩那*1・宮内 靖昌*2・宇佐美 徹*3

要旨：引張力とせん断力の組合せ荷重を受ける頭付きスタッドの最大耐力および剛性等の力学性状を実験により検討した。組合せ荷重の割合は、0°（せん断のみ）、30°、60°、90°（引張のみ）の応力勾配として与え、4水準とした。スタッドはエンドプレートに4本打ちとし群体とした。実験の結果、組合せ荷重を受ける試験体の最大耐力計算値に対する実験値の比は0.71～0.97となった。また、長期許容耐力時の割線剛性は、せん断のみを受ける試験体より引張のみを受ける試験体の方が大きくなった。

キーワード：頭付きスタッド, 引張-せん断組合せ荷重, 最大耐力, 剛性

1. はじめに

本論文では、鉄筋コンクリート部材と鉄骨部材の間のずれを防止し、一体化を図るために多用される頭付きスタッド（以下、スタッドと略す）を対象とし、引張力とせん断力の組合せ荷重を受けるスタッドの破壊性状、最大耐力および剛性等の力学性状について実験により検討した結果について報告する。

2. 実験計画

2.1 試験体

表-1 に試験体の一覧を示す。実験変数は、引張力とせん断力の載荷荷重の応力勾配とし、0°（せん断のみ）、30°、60°、90°（引張のみ）の4水準とし、それぞれ2体ずつ加力を行った。

図-1 に試験体の形状および配筋を示す。試験体は、1300mm×1300mm×厚さ1000mmのコンクリートブロックの両面にスタッドを埋め込んだ形状とし、1体の試験体で2回の実験を行うものとした。コンクリートは、スタッドの材軸に対し直交する方向に打設した。

スタッドの径は19φとし、図-1および図-2に示すように、1枚のエンドプレートにスタッドを正方形位置

に4本打ちとした。エンドプレートは、PL-32×300×300（試験体 St-0, St-30, St-60）および PL-19×250×250（引張のみの試験体 St-90）とし、せん断力を載荷した試験体 St-0, St-30, St-60 のエンドプレートは、コンクリートによる支圧が剛性および最大耐力等に及ぼす影響を無くするためにコンクリート中には埋め込んでいない。埋め込み長さ（首下長さ）は6da（da：スタッド径）とし、引張のみの試験体 St-90 ではエンドプレートの厚さも含め（コンクリート表面から首下までの長さ）、スタッドの首下長さは6daより短い。スタッドの間隔は150mmである。

2.2 使用材料

スタッドは19φ（SS400相当）とし、表-2に4号試験片に加工して行った引張試験結果を示す。

コンクリートは設計基準強度33 N/mm²、粗骨材の最大

表-1 試験体一覧

試験体	応力勾配	スタッド径	埋め込み長さ
St-0-1 St-0-2	0° せん断のみ	19φ	6da
St-30-1 St-30-2	30°	19φ	6da
St-60-1 St-60-2	60°	19φ	6da
St-90-1 St-90-2	90° 引張のみ	19φ	6da

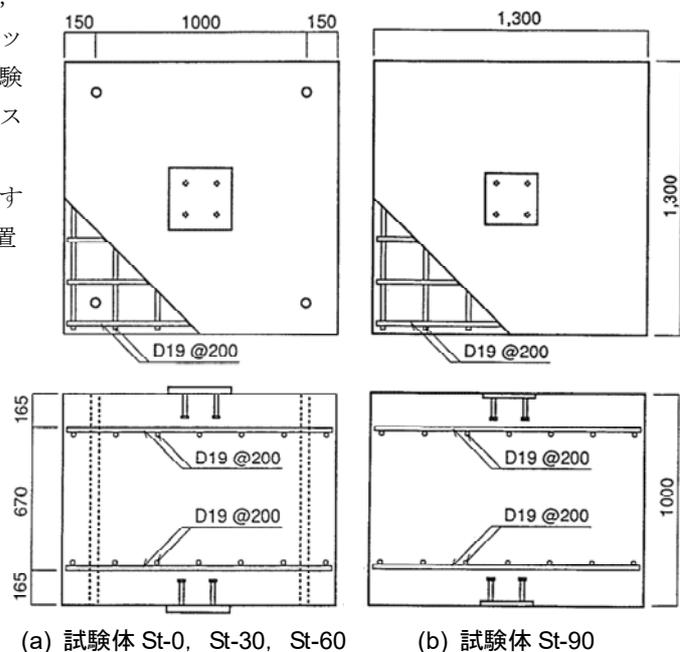


図-1 試験体の形状・配筋（単位；mm）

*1 大阪工業大学大学院 建築・都市デザイン工学専攻（学生会員）

*2 大阪工業大学 工学部建築学科 教授 博士(工学)（正会員）

*3 (株)竹中工務店 技術研究所 構造部門 主席研究員 博士(工学)

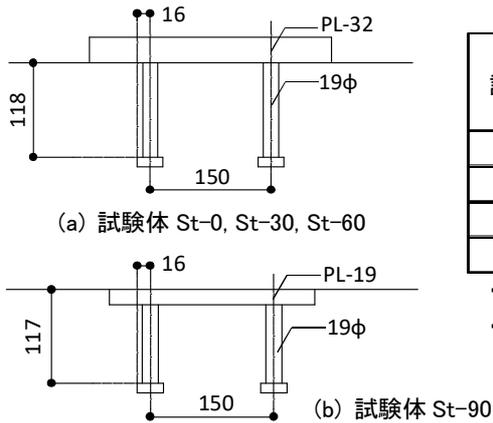


図-2 スタッドの詳細 (単位 ; mm)

寸法 20mm の普通コンクリートである。表-2 に材料試験結果を示す (現場封かん養生)。なお、加力時におけるコンクリートの材齢は、試験体 St-0, St-30, St-60 で 58 ~ 84 日、試験体 St-90 で 31 日 ~ 45 日である。

2.3 加力・計測方法

図-3 に引張・せん断組合せ加力実験の加力方法の概要を示す。試験体を反力床に固定した後、エンドプレートに L 形鉄骨加力梁を取り付けた。エンドプレート直上位置で加力梁を引き上げるにより引張力を加え、さらに試験体コンクリート上面と同一平面の延長上になる加力梁部分に水平方向の油圧ジャッキによりせん断力を載荷した。L 形鉄骨加力梁は、水平に移動するようにパンタグラフを取り付けた。加力は単調载荷とし、引張力とせん断力を計画された応力勾配を保持して徐々に行った。この際、引張力の増減に追従するようにせん断力を載荷した。試験体の側面から立ち上げた計測フレームに取り付けた変位計をエンドプレートの四隅にそれぞれ水平方向および鉛直方向に 4 台設置し、エンドプレート(ス

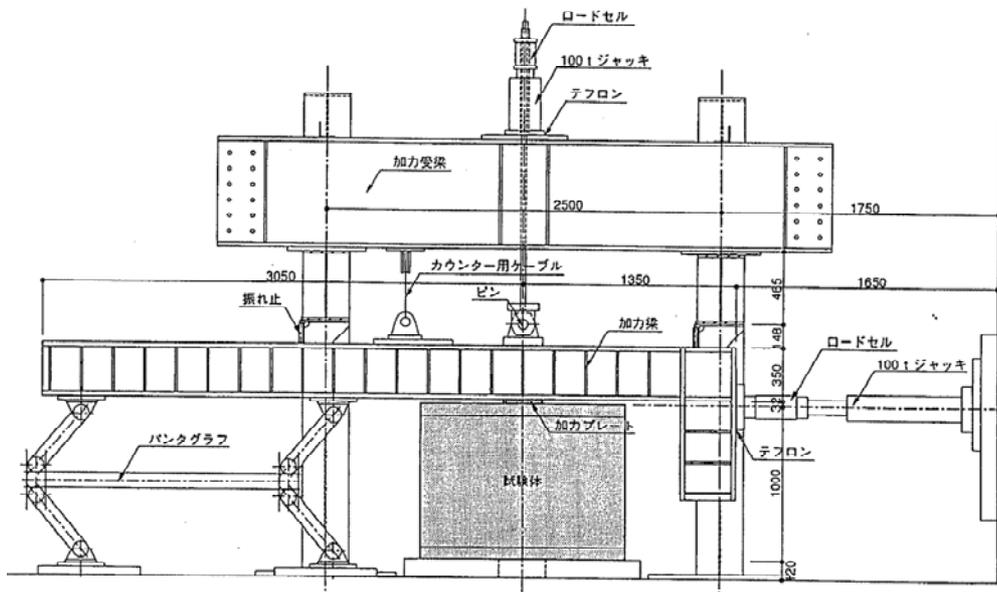


図-3 加力方法の概要 (引張・せん断組合せ加力, 試験体 St-0, St-30, St-60)

表-2 使用材料の強度

試験体	スタッド		コンクリート		
	降伏点強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
St-0	373	479	30.4	25890	2.58
St-30			30.4	23340	2.59
St-60			31.4	23930	2.50
St-90	330	447	25.5	23540	2.12

- ・それぞれ3本の試験の平均値
- ・コンクリートのヤング係数は1/3強度時の割線剛性

タッド) のせん断方向変位 δh および引張方向変位 δv を計測した。なお、計測したこの変位にはひび割れの影響を含んでいる。

図-4 に引張力のみ加力した実験の加力方法の概要を示す。試験体コンクリートブロックの四隅に反力点を持つ門型フレームを組み、油圧ジャッキでエンドプレートを介してスタッドに引張力を単調载荷した。引張・せん

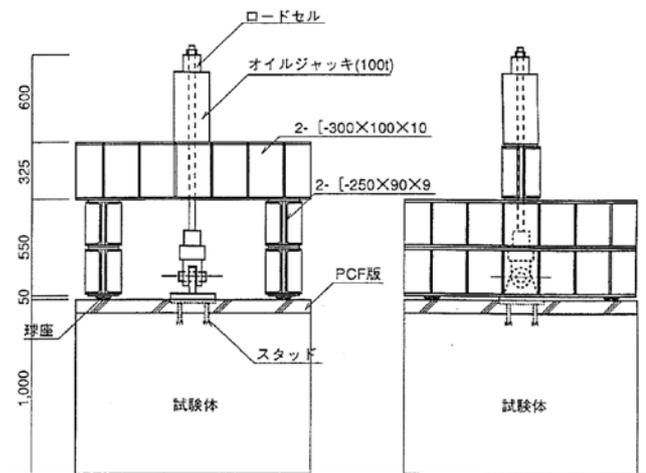


図-4 加力方法の概要 (引張加力, 試験体 St-90)

断組合せ加力実験と同様に取り付けた変位計を加力プレートの四隅に設置し、エンドプレートの引張方向変位 δv を計測した。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ発生経過および最終破壊性状

図-5 に最終破壊時のひび割れ状況の一例を示す。

応力勾配 0° (せん断力のみ加力) の試験体 St-0 は、 $Q=250$ kN 付近でせん断加力方向と直交する方向にエンドプレートからひび割れが発生し、最大荷重時には加力方向と平行する方向にもひび割れが発生した。

応力勾配 30° の試験体 St-30 の初ひび割れは、 $Q=140$ kN、 $T=80$ kN 付近でせん断力方向と直交する方向にエンドプレートから発生し、その後進展した。最終的には引張側のコンクリートでコーン状の破壊を生じた。

応力勾配 60° の試験体 St-60 も、せん断力方向と直交する方向にエンドプレートからひび割れが発生し、最大耐力に達した。引張力の影響が大きいため、最終的にはエンドプレートを囲むようにコーン状の破壊を生じた。

引張力のみ加力した試験体 St-90 は、最大耐力に達するとともに、コーン状の破壊を生じた。

3.2 荷重-変位関係

表-3 に各試験体の最大耐力実験値を、また、図-6 に各試験体の荷重-変位曲線を示す。縦軸はそれぞれせん断荷重 Q (kN) および引張荷重 T (kN) を、横軸はせん断方向変位 δh (mm) および引張方向変位 δv (mm) を示す。 δh および δv とともに、エンドプレートの 4 隅で計測した 4 台の変位計の平均値である。引張・せん断組合せ加力の試験体では、引張力・せん断力それぞれの加力の荷重-変位曲線を示す。

せん断力のみ加力した試験体 St-0 は、 $Q=250$ kN 付近で剛性が大きく低下した。これは、スタッドのせん断変形およびスタッド溶接部近傍のコンクリートの圧壊によるものと思われる。その後も若干荷重は増大し、最大耐力 $Q=420.7$ kN、 396.2 kN でスタッドが破断して荷重低下した。この

とき変位 δh は約 $12\sim 15$ mm であり、比較的大きな変形性能を示した。

試験体 St-30 ($Q=\sqrt{3}T$) は、引張力 $T=120$ kN 付近で剛性が低下した。このときせん断力は $Q=200$ kN 程度であり、せん断力に対しても剛性低下していた。その後の挙動は 2 体の試験体で異なり、試験体 St-30-2 ではその後も若干荷重が増大した。

試験体 St-60 ($T=\sqrt{3}Q$) は、それぞれ引張力 $T=171.6$ 、 168.7 kN、 $Q=99.0$ 、 97.1 kN で最大耐力に達し、その後耐力低下した。

引張のみの試験体 St-90 は、 $T=100$ kN 付近から若干剛性が低下したが、その後もさほど剛性低下せず、 $T=186.3$ 、 192.2 kN で最大耐力に達するとともにコーン状破壊し、急激に耐力低下した。

応力勾配の違いにより荷重-変位関係を比較すると、せん断力のみ加力した試験体 St-0 は、スタッドのせん断破

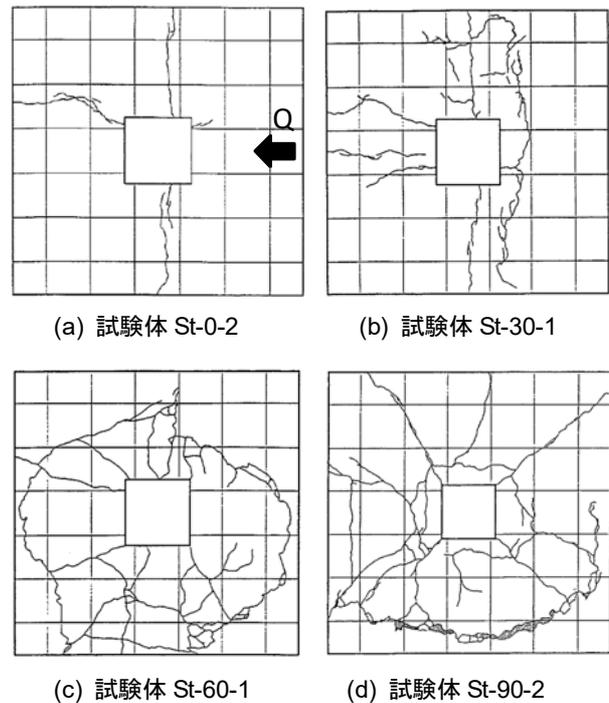


図-5 最終破壊時のひび割れ状況

表-3 最大耐力の実験値と計算値の比較

試験体	最大耐力実験値		最大せん断耐力計算値				最大引張耐力計算値			
	せん断力 Q_{max} (kN)	引張力 T_{max} (kN)	せん断強度 $qa1$ (kN)	支圧強度 $qa2$ (kN)	せん断耐力 aQu (kN)	実験値 計算値	降伏強度 $ta1$ (kN)	コーン状強度 $ta2$ (kN)	引張耐力 aTu (kN)	実験値 計算値
St-0-1	420.7	—	296.1	503.1	296.1	1.42	—	—	—	—
St-0-2	396.2	—	—	—	—	1.34	—	—	—	—
St-30-1	202.0	122.6	—	—	247.8	0.82	—	—	143.0	0.86
St-30-2	239.3	139.3	—	—	—	0.97	—	—	—	0.97
St-60-1	99.0	171.6	—	—	136.1	0.73	—	—	235.7	0.73
St-60-2	97.1	168.7	—	—	—	0.71	—	—	—	0.72
St-90-1	—	186.3	—	—	—	—	374.3	236.9	236.9	0.79
St-90-2	—	192.2	—	—	—	—	—	—	—	0.81

・最大耐力の計算において、St-30は $Q=\sqrt{3}\cdot T$ 、St-60は $T=\sqrt{3}\cdot Q$ の関係を用いて計算した。

断により耐力が決まったが、最大耐力に達する前に大きな剛性低下が見られ、他の試験体に比べて比較の変形性能に富む荷重-変位関係となった。これに対し、引張力のみ加力した試験体 St-90 ではコーン状破壊となり、剛性低下はあまり見られず、脆性的な荷重-変位関係となった。

応力勾配 30° の試験体 St-30 では St-0 に近い、応力勾配 60° の試験体 St-60 では St-90 近い荷重-変位関係となったが、引張力の大小にかかわらず、引張力によるコーン状破壊の影響が見られた。

4. 実験結果の考察

4.1 最大耐力の実験値と計算値の比較

表-3 に各試験体の最大耐力実験値を、また、図-7 に最大耐力実験値のせん断力と引張力の相関を示す。応力勾配 30° および 60° の試験体の最大耐力は、所定の応力勾配を保持していたことがわかる。

最大耐力の計算値は、日本建築学会の各種合成構造設計指針りに準じて下式で計算した。

・せん断耐力 aQ_u (kN)

$$aQ_u = n_a \cdot \min(q_{a1}, q_{a2}) \quad (1)$$

$$q_{a1} = \phi_1 \cdot 0.7 \cdot s \cdot \sigma_y \cdot s_c \cdot a \quad (2)$$

$$q_{a2} = \phi_2 \cdot 0.5 \sqrt{F_c \cdot E_c} \cdot s_c \cdot a \quad (3)$$

・引張耐力 aT_u (kN)

$$aT_u = n_a \cdot \min(t_{a1}, t_{a2}) \quad (4)$$

$$t_{a1} = \phi_1 \cdot s \cdot \sigma_y \cdot s_c \cdot a \quad (5)$$

$$t_{a2} = \phi_2 \cdot 0.31 \sqrt{F_c} \cdot A_c \quad (6)$$

・引張・せん断の組合せ荷重を受ける場合の耐力

$$\left(\frac{Q}{aQ_u}\right)^2 + \left(\frac{T}{aT_u}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

ここで、

q_{a1} : スタッドのせん断強度により決まる耐力

q_{a2} : コンクリートの支圧強度により決まる耐力

t_{a1} : スタッドの引張降伏により決まる耐力

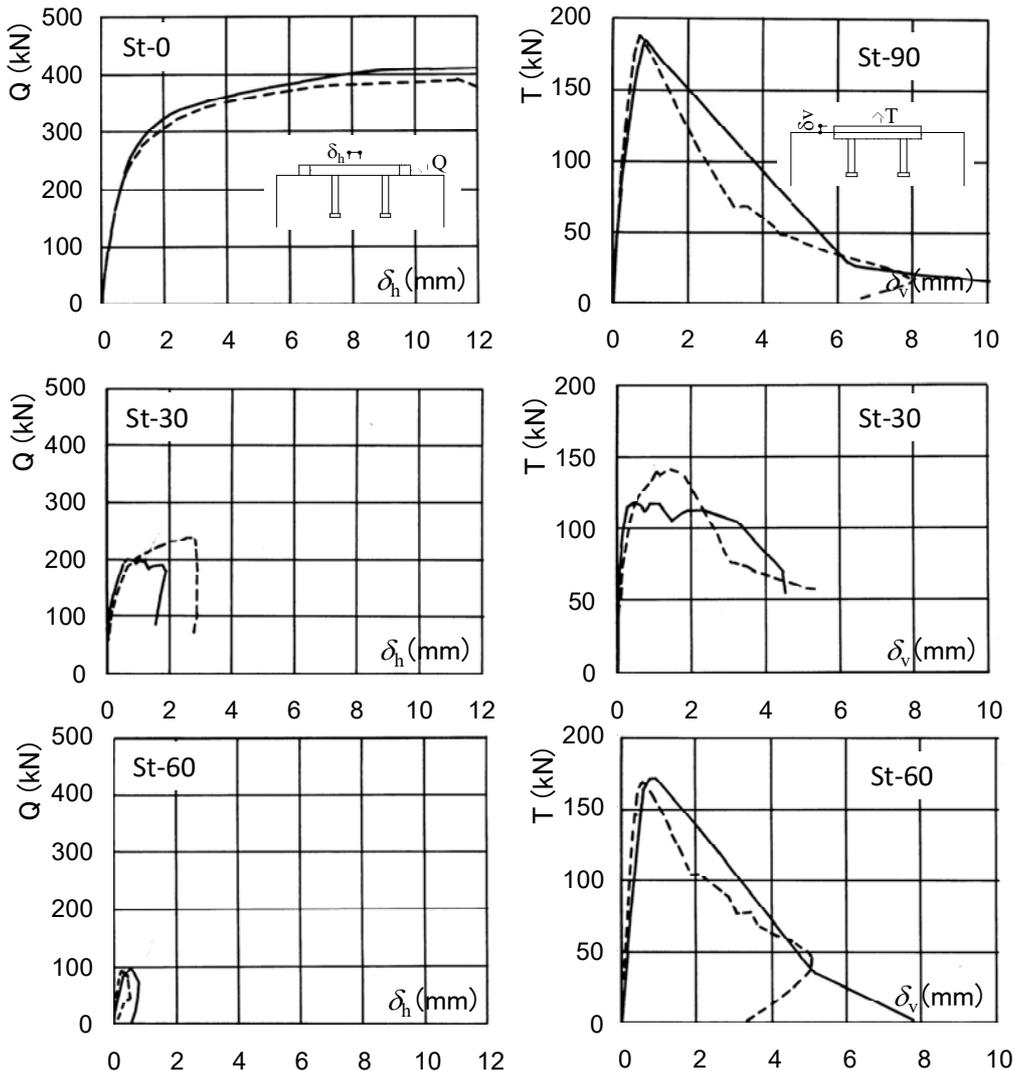


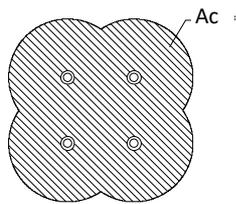
図-6 荷重-変位曲線

t_{a2} : コンクリートのコーン状破壊により決まる耐力

n_a : スタッドの本数

ϕ_1, ϕ_2 : 低減係数

	ϕ_1	ϕ_2
長期荷重用	2/3	1/3
短期荷重用	1.0	2/3
終局用	1.0	1.0



A_c : コーン状破壊面の有効水平投影面積 (mm^2) で、
上図に示すように 4 本のスタッドの群効果を考慮した

sca : スタッドの軸部断面積 (mm^2)

F_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

E_c : コンクリートのヤング係数 (N/mm^2)

$s\sigma_y$: スタッドの降伏点強度 (N/mm^2)

表-3 および図-8 に最大耐力の実験値と計算値を比較して示す。図表より以下のことがわかった。

- (1) せん断力のみ載荷した試験体 St-0 は、スタッドのせん断強度で決まる耐力 q_{a1} , およびコンクリートの支圧強度 (いわゆる Fisher 式) で決まる耐力 q_{a2} のうち, q_{a1} で決まった。計算値に対する実験値の比(実/計)は 1.42, 1.34 となり, 実験値の方が大きくなった。
- (2) これに対して, 引張力のみ載荷した試験体 ST-90 は, スタッドの引張降伏で決まる耐力 t_{a1} , およびコンクリートのコーン状破壊で決まる耐力 t_{a2} のうち, t_{a2} で決まった。実/計の比は 0.79, 0.81 となり, 計算値の方が大きくなった。本実験のスタッドは 4 本の群体としており, コーン状破壊耐力の計算では水平投影面積 A_c に群体の影響を考慮しているが, さらに検討の必要性

が示唆される。

(3) 引張とせん断の組合せ荷重を受けるスタッドの耐

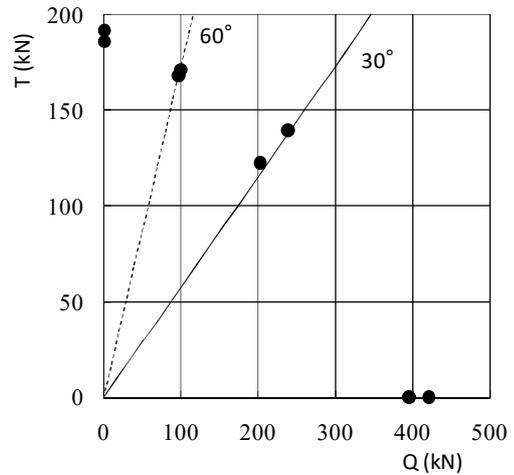


図-7 最大耐力実験値の Q-T 相関

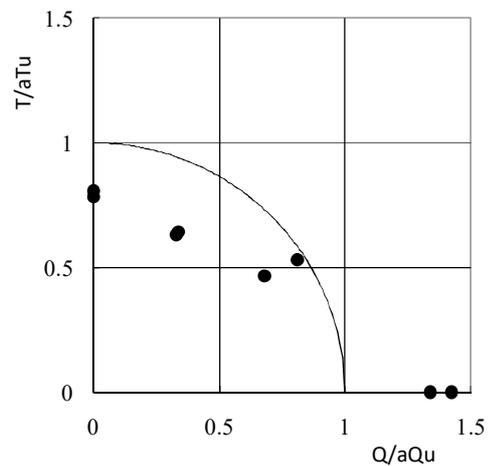
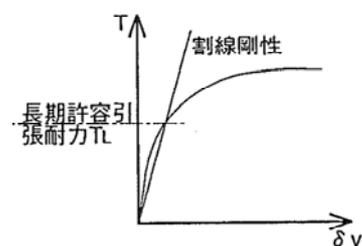
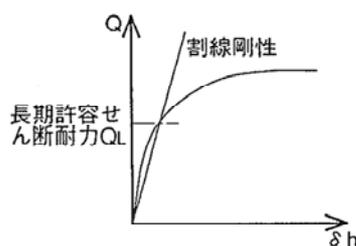
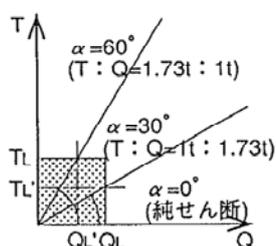


図-8 最大耐力実験値と計算値の比較

表-4 長期許容耐力時の割線剛性

試験体	長期許容せん断耐力 Q_a (kN)	せん断方向割線剛性		長期許容引張耐力 T_a (kN)	引張方向割線剛性	
		割線剛性 k_{qa} (kN/mm)	平均値 K_{qa} (kN/mm)		割線剛性 k_{ta} (kN/mm)	平均値 K_{ta} (kN/mm)
St-0-1	167.7	519.3	493.0	—	—	—
St-0-2		466.8		—	—	
St-30-1	109.5	692.7	597.4	63.2	843.2	677.7
St-30-2		502.1			512.1	
St-60-1	48.8	696.3	540.5	84.5	709.1	542.7
St-60-2		384.7			376.3	
St-90-1	—	—	—	79.0	776.8	776.8
St-90-2	—	—	—		776.8	



力は、(7)式に示すように、引張とせん断の相関により計算した。応力勾配 30° の試験体 St-30 では、 $Q=\sqrt{3}\cdot T$ の関係式を、 60° の試験体 St-60 では、 $T=\sqrt{3}\cdot Q$ の関係式を(7)式に入れて計算した。試験体 St-30、St-60 のせん断耐力および引張耐力ともに実/計の比が $0.71\sim 0.97$ となり、計算値が大きくなった。引張耐力の実験値が計算値より小さくなっている影響と思われる。

4.2 長期許容耐力時割線剛性の検討

表-4 に長期許容耐力時における割線剛性を示す。各試験体において長期許容耐力計算値の時の変位を荷重-変位曲線から読み取り算定した。組合せ荷重の試験体 St-30、St-60 では、(7)式を長期許容耐力の計算にも適用し、最大耐力計算値から長期許容耐力を求め、表-4 の下図に示すように、その長期許容耐力時の変位から割線剛性を計算した。

せん断力のみ試験体 St-0 と引張力のみ試験体 St-90 のそれぞれの方向の割線剛性を比較すると、St-90 の方が大きくなった。このことより、例えば、図-9 のような構法でスタッドを使用した場合の引張力 T_b の水平成分力は、せん断を受けるスタッド A より引張を受けるスタッド B の方が剛性は高いため、スタッド B の引張抵抗による負担の方が大きいことが示唆される。

また、せん断力のみ載荷した試験体 St-0 に対し、組合せ荷重の試験体 St-30、St-60 の長期許容せん断耐力は、引張力の影響で小さくなり、その時のせん断方向割線剛性は試験体 St-0 より大きくなった。

一方、引張力のみ載荷した試験体 St-90 に対し、組合せ荷重の試験体 St-30、St-60 の長期許容引張耐力も、せん断力の影響で小さくなり (St-60 と St-90 はコンクリート強度の影響で長期許容引張耐力は St-60 の方が大きくなった)、その時の引張方向割線剛性は試験体 St-90 より小さくなった。

図-9 におけるスタッド A および B それぞれの負担力は剛性に応じて求められるものであるが、本実験ではばらつきが大きく、また応力勾配に対する線形性も明確ではない結果となっており、引き続き実験データの蓄積・検討が必要であると考えられる。

5. まとめ

引張・せん断の組合せ荷重を受ける頭付きスタッドの破壊性状、最大耐力および剛性等を検討した結果、以下のことがわかった。

(1) せん断力のみ加力した試験体 St-0 は、スタッドのせん断破断により耐力が決まったが、他の試験体に比べて比較的変形性能に富む荷重-変位関係となった。これに対し、引張力のみ加力した試験体 St-90 ではコーン状

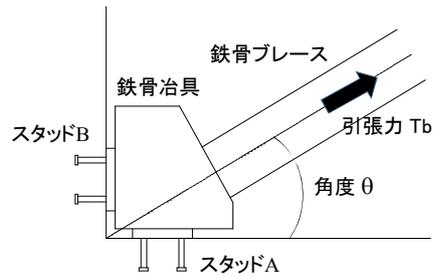


図-9 スタッドの使用例

破壊となり、剛性低下はあまり見られず、脆性的な荷重-変位関係となった。応力勾配 30° の試験体 St-30 では St-0 に近い、応力勾配 60° の試験体 St-60 では St-90 近い荷重-変位関係となったが、引張力の大小にかかわらず、引張力によるコーン状破壊の影響が見られた。

- (2) せん断力のみ加力した試験体 St-0 の最大耐力実験値は計算値より大きくなった。これに対し、引張力のみ加力した試験体 St-90 では計算値が大きくなり、群体の影響についてさらに検討が必要である。組合せ荷重を受ける試験体の実/計の比は $0.71\sim 0.97$ となった。
- (3) 長期許容耐力時の割線剛性は、せん断力のみを載荷した試験体より引張力のみを載荷した試験体の方が大きくなった。組合せ荷重を受けると、応力勾配に応じてそれぞれの方向の長期許容耐力は異なり、割線剛性も変化する。組合せ荷重を受けるスタッドの剛性については引き続き検討が必要である。

6. 謝辞

本論文は、東京電力(株)、東電設計(株)、鹿島建設(株)、清水建設(株)、(株)竹中工務店、(株)東芝、(株)日立製作所の共同研究において発表された文献²⁾の一部の試験体に対して追加検討したものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，pp.236-246，2014.10
- 2) 田中幸一郎，石村紀久雄，鈴木 茂，毛井崇博，高橋敏夫，赤田喜央：原子力発電所建屋のプレキャストコンクリート型枠工法における埋込金物支持耐力に関する研究（その 1）引張実験，日本建築学会大会，構造 C，pp.1055-1056，1996.9
- 3) 岩田昌之，中村和行，田中伸幸，西村元宏，宇佐美徹：原子力発電所建屋のプレキャストコンクリート型枠工法における埋込金物支持耐力に関する研究（その 2）引張・せん断組合せ実験，日本建築学会大会，構造 C，pp.1057-1058，1996.9