

論文 場所打ちコンクリート杭のせん断挙動に及ぼす寸法効果に関する実験的研究

本庄正樹*1・長江拓也*2・柳瀬高仁*3・林静雄*4

要旨:軟弱地盤に数多くの高層建築物が建つようになり,今後もますます大口径の場所打ちコンクリート杭の需要が多くなると予測される。本研究では,普通強度せん断補強筋,高強度せん断補強筋および二重鉄筋籠によってせん断補強した場所打ちコンクリート杭を対象として寸法の異なる試験体のせん断実験を行い,これらの補強方法の違いを考慮した上でせん断性状に及ぼす寸法の影響を考察した。

キーワード:場所打ちコンクリート杭,寸法効果,せん断挙動,二重鉄筋籠,せん断ひび割れ幅

1. はじめに

軟弱地盤に数多くの高層建築物が建つようになり,今後もますます大口径の場所打ちコンクリート杭の需要が多くなると予測される。しかし,実物の規模は大きく既往の研究で扱っている寸法の試験体で,その性能を直接評価できるのか疑問である。本研究では,普通強度せん断補強筋,高強度せん断補強筋および二重鉄筋籠によってせん断補強した場所打ちコンクリート杭

を対象としてこれらの補強方法の違いを考慮した上で,試験体の寸法がせん断ひび割れ幅などのせん断性状に及ぼす影響を考察した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体を図-1に,試験体諸元一覧を表-1に示す。本実験では拡底杭の杭頭におけるせん断破壊を対象としており,試験体は地震時におけ

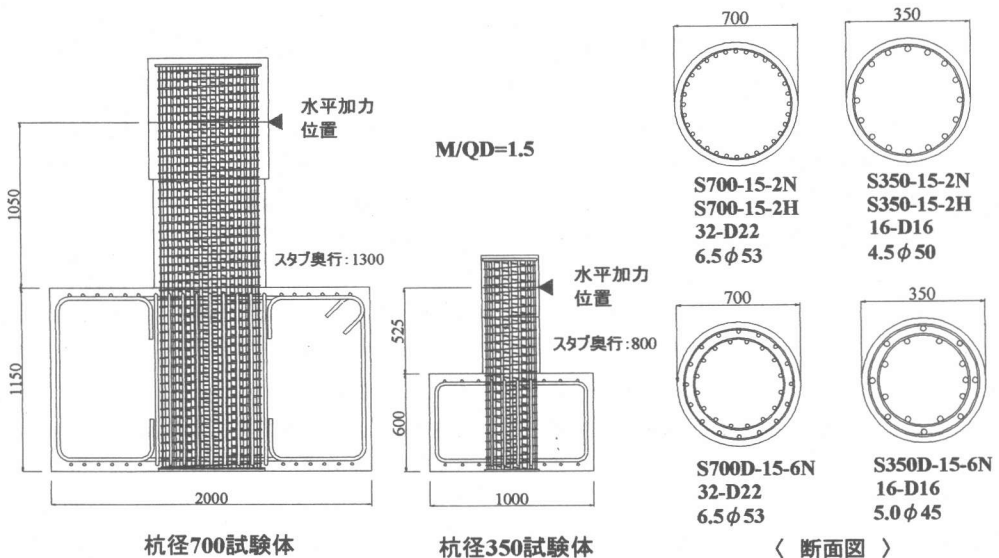


図-1 試験体 (単位: mm)

*1 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻 修士(工学)(正会員)

*2 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境物理工学専攻 修士(工学)(正会員)

*3 (株)佐藤工業 技術研究所 修士(工学)

*4 東京工業大学教授 建築物理研究センター 工博(正会員)

表-1 試験体諸元

試験体	D (mm)	M/QD	主筋	P _g (%)	せん断 補強筋	P _w (%)	w _{σy} (MPa)	P _w ・w _{σy} (MPa)	N (kN)	σ ₀ (MPa)	σ ₀ /σ _B
S350-15-2N	350	1.5	16-D16	3.3	φ4.5@50	0.2	390	0.78	500	3.8	0.16
S350-15-2H					φ4.5@50	0.2	1288	2.58			
S350D-15-6N*			16-D16 千鳥状		φ5.0@45 二重	0.56	333	1.86			
S700-15-2N	700	1.5	32-D22	3.22	φ6.5@53	0.2	376	0.75	2001	3.8	0.16
S700-15-2H					φ6.5@53	0.2	1265	2.53			
S700D-15-6N*			32-D22 千鳥状		φ7.5@50 二重	0.57	377	2.15			

D:杭径, M/QD:せん断スパン比, P_g:全主筋比(A_s/A_c), A_s:主筋全断面積, A_c:杭体全断面積, P_w:せん断補強筋のピッチを変えず等価断面積の正方形に置換した場合のせん断補強筋比, w_{σy}:補強筋降伏強度, N:軸力, σ₀:軸応力(N/A_c), σ₀/σ_B:軸力比, σ_B:コンクリート圧縮強度, *:鉄筋籠を二重に配した試験体でありP_wは内籠と外籠の和で評価した。

■ 試験体名

S350D-15-6N

① ② ③

① S350D: Sはせん断破壊型試験体、Dは鉄筋籠を二重に配した試験体を表す。

350は杭径(350φ)を表す。700は杭径(700φ)を表す。

② 15:せん断スパン比=1.5

③ 6N:Nは普通強度せん断補強筋、Hは高強度せん断補強筋を表す。

6はせん断補強筋比(0.6%)を表す。2はせん断補強筋比(0.2%)を表す。

る拡底杭の杭頭部をモデル化したものである。

試験体の総数は6体で、杭径D=350mmを3体、D=700mmを3体製作し、いずれの試験体もせん断破壊先行型を意図した。

2.1.1 試験体形状

試験体は加力スタブを有する片持ち梁形式とした。杭径D=350mmとD=700mmの試験体を製作し、せん断破壊を先行させるため、試験体のせん断スパン比M/QD=1.5を採用した。

2.1.2 使用材料

試験体に使用した鋼材およびコンクリートの材料特性を表-2に示す。

主筋にはD16,D22を使用し、全主筋比P_g=3.3%ではほぼ統一している。せん断破壊を先行させるため主筋を全て焼き入れし800MPa以上に降伏強度を高めた。主筋の一端は加力用スタブ内で、他端は剛な基礎スタブ内でプレートに溶接した。

普通強度せん断補強筋は300MPa程度におさえて焼きなまし高強度せん断補強筋は1300MPa程度にまで焼き入れをした鉄線を用いた。せん断補強筋は全てスパイラルとし、試験体内での継手箇所は存在しない。せん断補強筋比P_wについては二重鉄筋籠の試験体は0.57%とし、それ以外の試験体は0.2%で統一した。補強筋間隔に

ついても、
ほぼ50mm間

隔で統一し

た。せん断補

強筋に対す

るかぶり厚

さは、杭径

D=350mmに

ついては

17.5mm、

D=700mmに

ついては

35mmとし、

試験体寸法

に比例させた。

表-2 材料特性

鋼材

種別	σ _y (MPa)	σ _t (MPa)	Es (GPa)
D16	806	815	186
D22	767	864	192
H-φ4.5*	1288	1332	217
H-φ6.5*	1265	1401	220
N-φ4.5*	390	454	214
N-φ5.0*	333	395	225
N-φ6.5*	376	454	224
N-φ7.5*	377	425	229

H:高強度

N:普通強度

σ_y:降伏強度

*0.2%オフセット

σ_t:引張強度

Es:ヤング係数

コンクリート

σ _B (MPa)	Ec (GPa)
32.3	23.4

σ_B:圧縮強度

Ec:ヤング係数

杭体及び加力用スタブに使用したコンクリートは設計基準強度F_c=24MPaとし、粗骨材の最大寸法を13mmとして等しくした。今回の試験体において13mmの小さな粗骨材を用いたのは、実際の杭径と粗骨材の比を極力再現するようにしたためである。6体の試験体は全て同バッチのコンクリートで打設した。実験日における各試験体のコンクリート強度を材料試験により管理し、平均値の±2%以内であることを確認した。

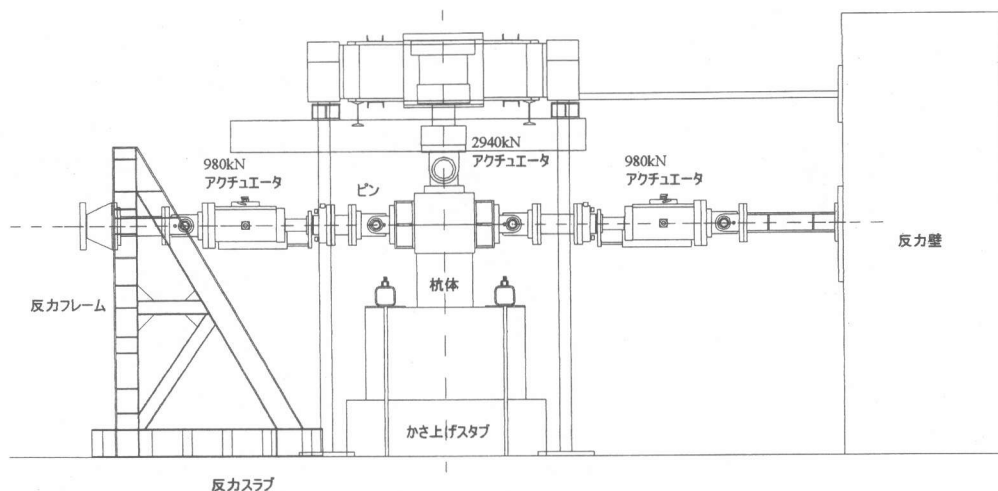


図-2 杭径 D=700mm 試験体 加力装置

2.2 加力方法

杭径D=700mm試験体加力装置を図-2に示す。

片持ち梁形式の加力装置によって、正負交替繰り返し载荷を行った。軸力は水平加力中一定になるように制御した。水平力は図に示すように両端ピン支持の水平ジャッキにより左右から1/2づつ加えた。固定端から加力点位置までの高さLを $M/QD=L/D$ となるように決めており、加力点位置の水平変位をLで除した値を部材角Rとする。加力は短期許容せん断力 $Qa^{(1)}$ の2倍、2.5倍、3倍のせん断力で正負一回づつ繰り返し、その後部材角による変形制御とし $R=\pm 1/100$ 、 $\pm 1/67$ 、 $\pm 1/50$ 、 $\pm 1/33$ 、 $\pm 1/25$ で各2回繰り返すことを目標とした。杭径D=350mm試験体の加力方法も同じ原理である。

2.3 せん断ひび割れ幅

各サイクルのピーク時及び除荷時にせん断ひ

び割れ幅の測定を行った。試験体表面に想定した測定範囲(図-3の網掛け部分)内に生じたせん断ひび割れをひび割れに沿って杭径D=350mmの試験体においては30mm、D=700mmの試験体においては60mm間隔で測定した。ひび割れ幅はひび割れに対して直交方向に測定した値であり、曲げひび割れから斜めに進展したひび割れも測定範囲内においてはせん断ひび割れとみなして検討の対象とした。測定にはマイクロスコープ(最小目盛:0.02mm)を用いた。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

実験結果一覧を表-3に示す。せん断力-部材角関係、およびひび割れ状況をそれぞれ図-4、図-5に示す。

表-3 実験結果

試験体	cQsu (kN)	cQb (kN)	eQbc (kN)	eQsc (kN)	eQmax (kN)	eQmax/cQsue	eQmax/cQb
S350-15-2N	231	550	69	200	436	1.89	0.79
S350-15-2H	276	550	73	194	484	1.74	0.87
S350D-15-6N	261	501	75	221	480	1.85	0.97
S700-15-2N	916	2128	314	668	1617	1.77	0.76
S700-15-2H	1099	2128	323	770	1831	1.67	0.86
S700D-15-6N	1067	1949	321	756	1759	1.65	0.90

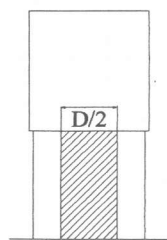


図-3 ひび割れ幅
測定範囲
(試験体正面図)

cQsu:等価断面の正方形に置換して修正荒川式を用いたせん断強度計算値 cQb:e関数法を用いた曲げ解析による曲げ耐力計算値 eQbc:曲げひび割れ荷重実験値 eQsc:せん断ひび割れ荷重実験値 eQmax:最大耐力実験値

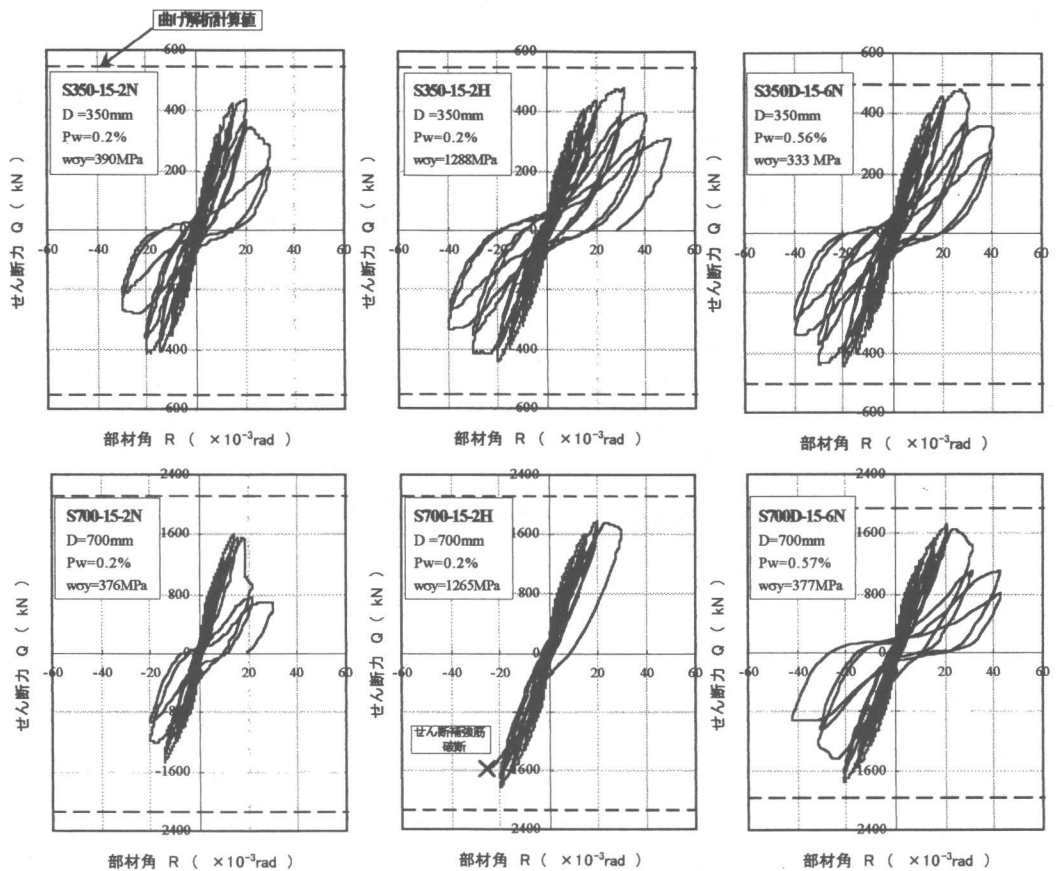


図-4 せん断力-部材角関係

全ての試験体が曲げ耐力計算値に達する前にせん断破壊に至った。杭径 $D=700\text{mm}$ 高強度せん断補強筋の試験体S700-15-2Hは部材角 $R=1/33$ に向かう途中で、せん断補強筋の破断により急激な耐力低下に至った。それ以外の試験体は、腹部に発生したせん断ひび割れが開口してせん断破壊に至った。

図-5は代表的な試験体である普通強度せん断補強筋（一重鉄筋籠）の試験体S350-15-2HとS700-15-2Hのひび割れ状況である。せん断力 $3 \times Q_a$ 及び部材角 $R=1/67$ の一回目の変形を経験した後の除荷時を対象としている。ひび割れ性状は、杭径 $D=350\text{mm}$ と杭径 $D=700\text{mm}$ の試験体を比較した場合、大きな違いは見られなかった。

3.2 せん断補強筋の歪分布

図-6にそれぞれせん断補強筋に普通強度と高強度を用いた一重鉄筋籠の試験体($P_w=0.2\%$)におけるせん断力 $3 \times Q_a$ 時と部材角 $R=1/67$ 時の

試験体名	S350-15-2H (杭径 $D=350\text{mm}$)	S700-15-2H (杭径 $D=700\text{mm}$)
3 Q_a (除荷時)		
$R=1/67$ (除荷時)		

図-5 ひび割れ状況

せん断補強筋歪分布を示す。図で扱うせん断補強筋歪はせん断補強筋の外周側と内周側に貼付した歪ゲージの平均値である。いずれの試験体においても、杭径による大きな違いは見られない。

また本実験では二重鉄筋籠のせん断補強筋比 P_w を内籠と外籠の総和として計算しているが、内籠のせん断補強筋も外籠と同様に機能していることが実験結果より確認することができた。

3.3 せん断ひび割れ幅

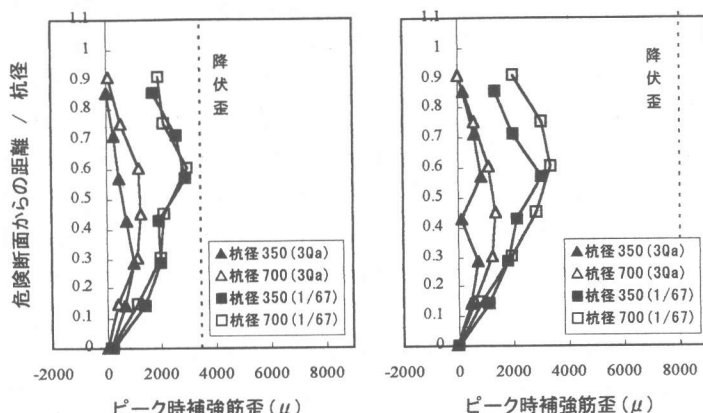
図-7 に除荷時最大ひび割れ幅 W_{max} とせん断補強筋比 P_w の関係を示す。図-7 は $3 \times Q_a$ のせん断力を経験した直後の除荷時せん断ひび割れ幅最大値 W_{max} を対象としている。せん断ひび割れは概ねせん断力 $2 \times Q_a$ から $2.5 \times Q_a$ の間に発生したので、 $3 \times Q_a$ のせん断力で比較する。図-7 から同じ種類の試験体を比較すると、杭径 $D=700\text{mm}$ の試験体の W_{max} は杭径 $D=350\text{mm}$ の2

倍程度開いていることがわかる。また一重鉄筋籠の試験体 ($P_w=0.2\%$) に対して、二重鉄筋籠を用いて $P_w=0.57\%$ に増やした試験体の W_{max} は小さく抑えられることが確認できた。

3.4 せん断ひび割れ強度・せん断終局強度

図-8 にせん断ひび割れ発生時平均せん断応力度及びせん断終局強度と杭径の関係を示す。いずれの種類の試験体においても、せん断ひび割れ強度及びせん断終局強度に関しては杭径 $D=700\text{mm}$ の試験体が杭径 $D=350\text{mm}$ の試験体に対して低下していることがわかる。

現行の土木学会コンクリート標準仕方書²⁾のせん断強度式にも取り入れられているが、せん断補強筋の無い梁の場合、有効せい (d) の $1/4$



(1) 普通強度せん断補強筋 (2) 高強度せん断補強筋
図-6 補強筋歪分布

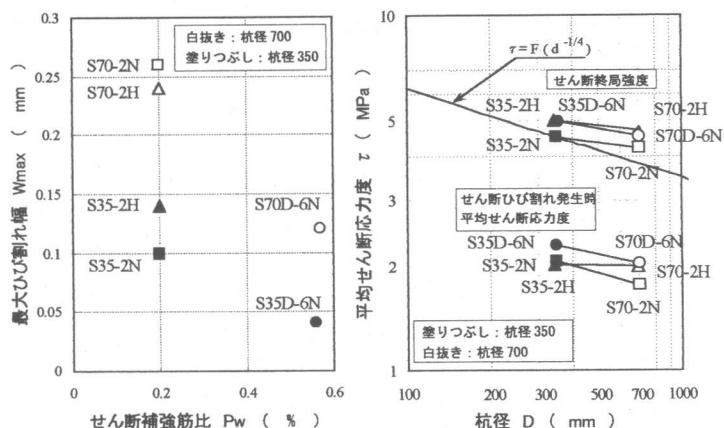


図-7 除荷時最大ひび割れ幅- P_w 関係 図-8 せん断強度ひび割れ発生時平均せん断応力度及びせん断終局強度-杭径 D 関係

乗に反比例してせん断終局強度が低下すると評価されている。図-8 には今回行った杭径 $D=350\text{mm}$ 普通強度せん断補強筋の試験体 $S350-15-2N$ のせん断終局強度実験結果に $1/4$ 乗則を適用したものを併記したが、この場合杭径 $D=700\text{mm}$ の試験体のせん断終局強度低下の割合は 0.84 倍となる。本実験のせん断補強筋を有する試験体の寸法による強度低下の割合はせん断ひび割れ強度で $0.85 \sim 0.95$ 倍、せん断終局強度では $0.92 \sim 0.95$ 倍の間にある。特にせん断終局強度ではせん断補強筋の量、強度、その配筋方法に関わらずいずれの種類の試験体の場合にも、低下する割合が緩和されていることがわかる。これは試験体のひび割れ性状に特に局所化

が見られなかったことから、せん断補強筋を有することによってせん断終局強度における寸法効果の要因といえるひび割れの局所化が抑えられひび割れが分散したためであると考えられる。ただし、せん断終局強度低下の割合に関しての P_w または w_{sy} による影響については今回の実験結果からは判断できなかった。

また、せん断終局強度の寸法効果の原因については

- ① $3 \times Q_a$ のせん断力除荷時の W_{max} が2倍程度に開いていること
- ② せん断ひび割れ性状やせん断補強筋の歪に試験体の寸法による影響が見られないこと
- ③ 寸法の異なる試験体のコンクリートに用いた粗骨材の最大寸法を13mmで統一したこと

以上のことから骨材のかみ合いなどがせん断強度における寸法効果に影響したと思われる。つまり、試験体寸法と粗骨材最大寸法の比が大きくなり、ひび割れ面が相対的に滑らかになっていくため、せん断終局強度が低下したと考えられる。

表-3より今回行った試験体の最大耐力実験値は、二重鉄筋籠を用いた試験体を含めて円形断面を等価断面の正方形に置換した修正荒川式によるせん断終局強度計算値の1.64~1.89倍の間にあることが確認できる。ただし、引張主筋量は全主筋断面の1/4とした。

4. まとめ

- 1) Q_a の3倍のせん断力を経験した杭径 $D=700\text{mm}$ の試験体と杭径 $D=350\text{mm}$ の試験体を比較した結果、試験体のせん断ひび割れ性状及びせん断補強筋歪において寸法による顕著な違いは確認できなかった。
- 2) Q_a の3倍のせん断力を経験した杭径 $D=700\text{mm}$ の試験体の残留ひび割れ幅最大値は、杭径 $D=350\text{mm}$ に対して2倍程度開くことを確認した。また二重鉄筋籠を用いて P_w を増やした場合、せん断ひび割れ幅の抑制に効果があるという結果が得られた。
- 3) 本実験の杭径 $D=700\text{mm}$ と杭径 $D=350\text{mm}$ の試験体を比較した結果、せん断ひび割れ強

度及びせん断終局強度において寸法による影響があることが認められた。

せん断終局強度については、試験体寸法と粗骨材最大寸法の比が大きくなり、ひび割れ面が相対的に滑らかになっていくため、せん断終局強度が低下したと考えられる。

- 4) せん断補強筋を有する杭の試験体の寸法によるせん断終局強度低下の割合は、せん断補強筋の無い梁の場合と比較して緩和されていることが認められた。これはせん断補強筋を有することによりひび割れの局所化が抑えられたためであると考えられる。

謝辞

本研究は、東京工業大学建築物理研究センター全国共同研究の一貫として行なわれたものであります。

本研究に際して多大なご協力を賜った高周波熱錬株式会社に深謝致します。試験体の製作および実験にあたりご指導、ご協力を賜った株式会社佐藤工業技術研究所 長縄裕行氏、小林恒一氏に厚く御礼申しあげます。また、実験に際して多大なご協力を賜った株式会社銭高組技術研究所 森本敏幸氏、駿河良司氏、黒澤俊也氏に心からお礼申しあげます。ここに関係者各位に対して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築センター:地震力に対する建築物の基礎の設計指針 pp.24-31, 1984

付録

上記センター指針から以下のように短期許容せん断力 Q_a を定義した。ただし、短期許容せん断応力度 f_s はRC規準に準じた。

$$Q_a = f_s \cdot A_s / k$$

$$k: \text{せん断応力度分布係数} = 4/3$$

A_s : 杭の断面積

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度

$$f_s = 1.5 \cdot (0.5 + F_c / 100)$$

単位: F_c (MPa), A_s (mm^2)

- 2) 土木学会:コンクリート構造の限界状態設計法指針(案),コンクリートライブラリー,第52号,1983年12月