論文　鋼管に拘束された鉄塔脚の定着に関する研究

齋藤　修一*1・田邉　成*2・末永　貴志*3・三島　徹也*4

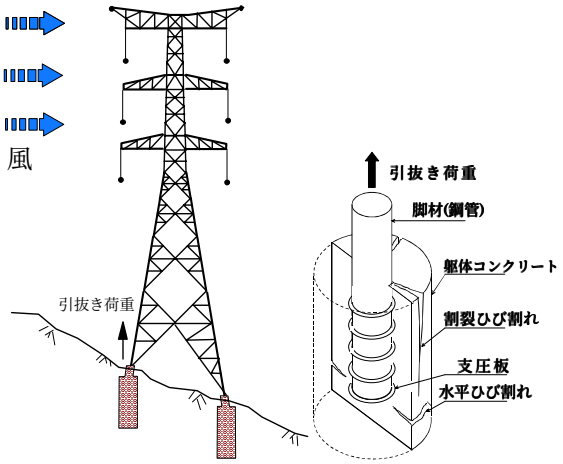
要旨：鋼管内にコンクリートを充填し，鉄塔脚を模した鋼管あるいは山形材に支圧板を取り付けた脚材をその中に埋め込んだ定着方式の引抜載荷試験を実施した。試験体のパラメータはコンクリート強度，鋼管径，定着長およびコンクリートの種類とした。その結果，第一支圧板から上部にコーン状の引抜きせん断面が生じ，さらに支圧板の先端を結んだコンクリートに破壊面が生じて脚材が抜け出す破壊モードであった。模型実験から求めた破壊モードにおける付着強度は，コンクリート標準示方書から求めた付着強度に比べ，鋼管の拘束効果により大きな値を取ることがわかった。

キーワード：鋼管拘束，引抜き試験，定着耐力

1.　はじめに

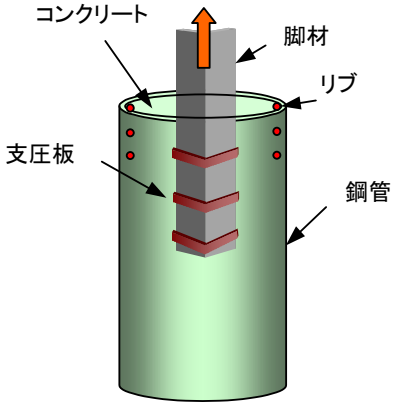
送電用鉄塔の基礎への定着方式は**図－1**に示すように鉄塔脚（鋼材）の先端に支圧板と呼ぶリブを取り付け，コンクリート中に埋め込む方式を適用している。このような定着方式の場合，躯体コンクリート径が小さい場合や荷重が大きい時，基礎への定着長を長くする必要が生じた。しかし，地下水位が高い平野部では，定着長が長いと施工性が非常に悪いため，定着長を短くして掘削深さを浅くすることが求められている。鋼管杭にコンクリートを介して定着させる方式も考慮し，**図－2**に示すような鋼管に拘束されたコンクリートの中に鉄塔脚を埋め込む方式の適用について検討を行った。

本研究は，鋼管に拘束されたコンクリート中に定着した鉄塔脚の定着耐力を求めるために鋼管が内圧によって破壊しないように比較的厚い鋼管を用いた場合の破壊モード，定着耐力を求めることを目的に模型実験を実施した。実験は，コンクリート強度，鋼管径，定着長をパラメータとし，鉄塔脚に引抜き荷重を加え，鉄塔脚の付着強度を定量的に求めた。



(a)送電用鉄塔　　(b)支圧板方式と破壊形態

図－1　支圧板方式による基礎への定着



図－2　鋼管拘束型定着方式

*1 東電設計㈱　送変電土木部　工修　(正会員)
*2 東京電力㈱　送変電建設部土木建築グループ　工博　(正会員)
*3 東京電力㈱　送変電建設部送変電建設センター　(正会員)
*4 前田建設㈱　技術研究所　工博(正会員)

表－1　試験体一覧

試験番号	試験体記号	山形材径 L(mm)	脚材径 φ(mm)	定着長 Le(mm)	最上端 Ls(mm)	支圧板数	支圧板厚 Ts(mm)	載荷周長 U(mm)	鋼管径 D(mm)	鋼管厚 t(mm)	リブの数	ｺﾝｸﾘｰﾄ強度f'c (N/mm²)	D/φ	Le/φ	備考
1	KS-5	75	60	150	100	2	16	420	300	6	3	32.2	5.0	2.5	
2	KS-6	75	60	150	100	2	16	420	300	3.2	3	33.6	5.0	2.5	
3	KS-8	75	60	150	100	3	6	420	318.5	10.3	3	19.6	5.3	2.5	
4	KS-9	75	60	300	100	5	6	420	318.5	10.3	3	18.3	5.3	5.0	
5	KS-12	75	60	300	250	5	6	420	609.6	9.5	3	22.7	10.2	5.0	
6	KS-13	--	120	240	40	4	6	440	241.8	10	3	40.1	2.0	2.0	HPC
7	KS-14	--	120	240	40	4	6	440	241.8	10	3	33.7	2.0	2.0	MOR

注)HPC：高流動コンクリート、MOR：モルタル

2.　模型実験

2.1　試験体

本実験で行った試験体の一覧を**表－1**に示す。試験体の一例を**図－3**に示す。**図－3**は鋼管内に鋼管とコンクリート部のずれ止めのためのリブとして D10 の鉄筋を鋼管全周にわたり３段溶接した KS-8 のものである。コンクリート上面から最上端支圧板位置までの距離を Ls, 最上端支圧板から最下端支圧板の距離を定着長 Le と定義した。鋼管の厚さは，t=3.2mm～10mm のものを用いた。コンクリート圧縮強度 f'c=30N/mm², 躯体径と脚材径の比 D/φ=5.0, 定着長と脚材径の比 Le/φ=2.5 を基本試験体 KS-5，6 とした。実用上の適用を考慮して，コンクリート強度の小さい KS-8，9，躯体径の大きい KS-12 および躯体径が小さくコンクリート種類の異なる KS-13，14 の実験を行った。

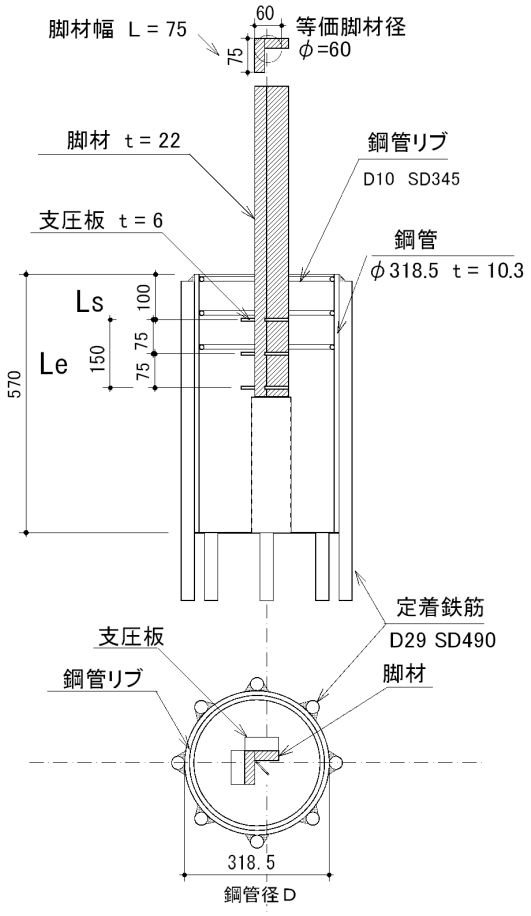
2.2　パラメータ

(1)　コンクリート強度および種類

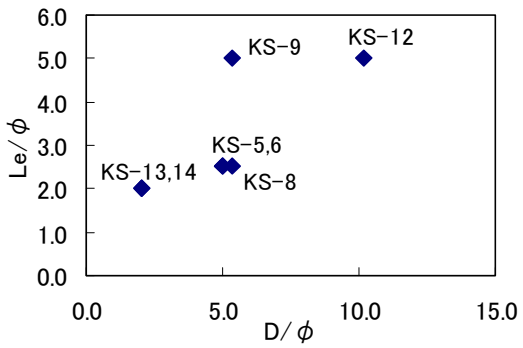
普通ポルトランドセメントを適用した試験体を基本とし, 目標とする試験体の強度を KS-5, 6 では f'c=30N/mm²，KS-8，9，12 では f'c=20N/mm² とした。KS-13 は高流動コンクリートを使用し，試験時の目標強度を f'c=40N/mm², KS-14 はモルタルを使用し，目標強度を f'c=30N/mm² とした。

(2)　形状

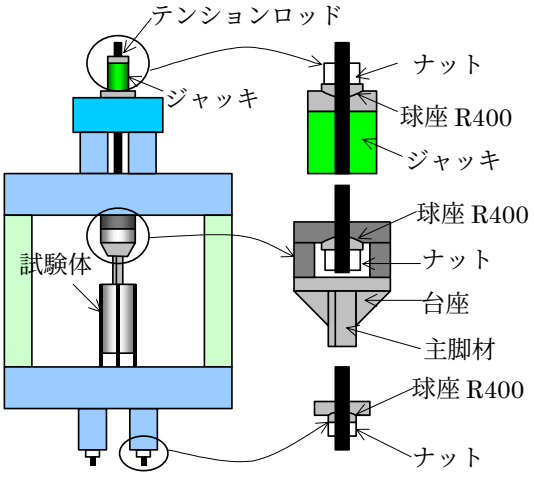
拘束する鋼管径Ｄと脚材径φの比 D/φを 2～10，定着長 Le との比 Le/φ=2～5 とした。D/φと Le/φの関係を**図－4**に示す。形状パラメ



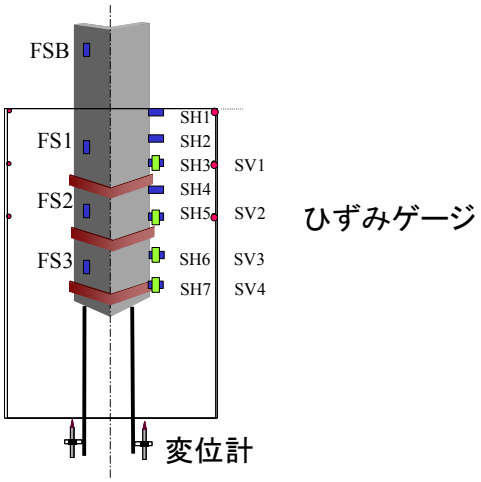
図－3　試験体例(KS-8)



図－4　D/φと Le/φの関係



図－５　載荷装置



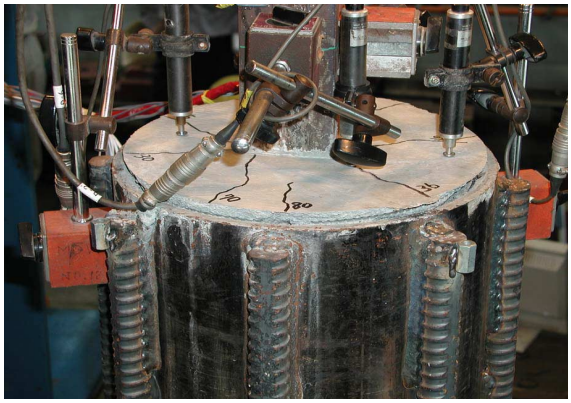
図－６　計測位置

ータの組み合わせは D/φ=2，Le/φ=2 から D/φ=5，Le/φ=10.2 である。脚材が山形材である場合の等価脚材径φは，山形材の先端を結ぶ三角形の面積と等価な面積を有する円の径と定義した。

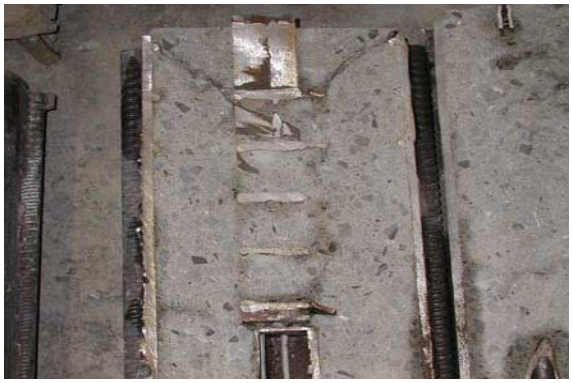
2.3　載荷装置および計測

載荷装置および載荷状況を**図－５**に示す。鋼管の外側に軸方向に鉄筋を取り付けて載荷装置の下部に固定した。試験体に埋め込んだ脚材と上部の載荷ロッドの接合部は球座を配置し，回転拘束されないようにした。ロッドはセンターホール型油圧ジャッキを通し，球座を介して梁の上部に固定した。

計測の配置図を**図－６**に示す。油圧ジャッキおよび脚材上部のひずみ FSB により荷重の確認を行う。図に示したように脚材の抜出量は脚材下部の変位量とした。鋼管は軸方向と周方向のひずみ(SV,SH)を計測した。脚材は支圧板の間にひずみゲージ(FS)を取り付け，ひずみの差分によって各支圧板からコンクリート躯体に伝達する荷重を求めた。



(a)上面



(b)切断面（中央）

写真－１　ひび割れ状況(KS-9)

3.　実験結果

3.1　実験結果および破壊形式

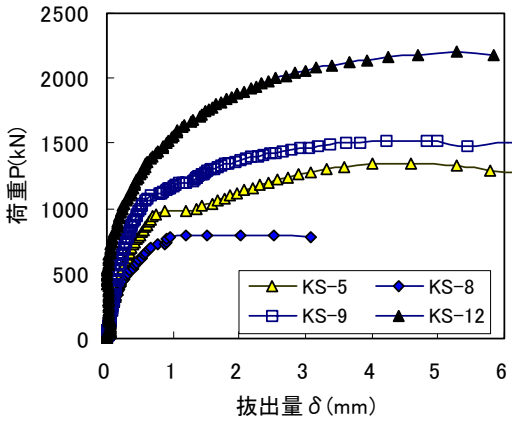
ひび割れ状況の例として KS-9 の上面からのひび割れおよび試験体を中央で切断した断面のひび割れを**写真－１**に示す。**写真－１(a)**に見られるように荷重を加えると試験体中央に配置された脚材から放射状にひび割れが生じ，荷重の増加とともにひび割れは進展する。この割裂ひび割れでは破壊せず，**写真－１(b)**の切断面に見られるような最上端支圧板からのコーン状ひび割れと支圧板を結ぶ支圧板周囲のひび割れから

表－２　実験結果一覧

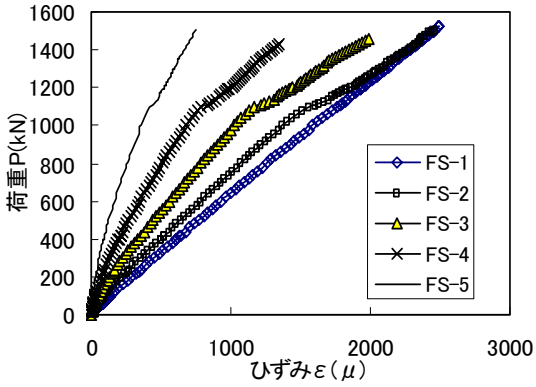
試験番号	試験体記号	実験結果									破壊モード
		ｺﾝｸﾘｰﾄ圧縮強度 f'c (N/mm^2)	最大荷重 Pu (kN)	P_{shear} (kN)	せん断面積 A_{shaer} (mm^2)	せん断強度 τ_{shear} N/mm^2	P_b (kN)	P_{bond} =Pu-P_b kN	せん断面積 A_{bond} mm^2	せん断強度 τ_{bond} N/mm^2	
1	KS-5	32.2	1344	367	70686	5.2	112	1232	63000	20	A
2	KS-6	33.6	1179	149	70686	2.1	36	1143	63000	18	A
3	KS-8	19.6	785	207	79673	2.6	26	759	63000	12	A
4	KS-9	18.3	1524	130	79673	1.6	0	1524	126000	12	A
5	KS-12	20.7	2199	693	291864	2.4	693	1506	126000	12	A
6	KS-13	40.1	2679	158	45920	3.4	158	2521	105558	24	A
7	KS-14	33.7	1280	92	45920	2.0	82	1198	105558	11	A

注）破壊モード　　A：支圧板周囲の付着

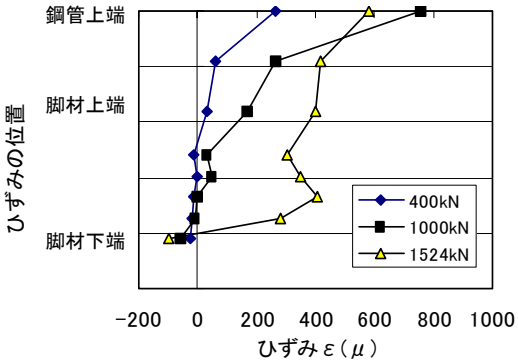
写真－２　ひび割れ(KS-12)



図－７　荷重－抜出量関係(KS-5,8,9,12)



図－８　脚材のひずみと荷重(KS-9)



図－９　鋼管の周方向ひずみ分布(KS-9)

なる破壊面で最大耐力が決定した。**写真－２**に KS-12 の切断したひび割れ面を示す。本試験体はコンクリート部の相対ずれを観察するために赤色のコンクリートブロックを配置した。本試験体も最上端支圧板からのコーン状ひび割れと支圧板の周りの鉛直ひび割れを確認でき，付着破壊したことがわかる。

3.2　荷重－抜け出し量

荷重と抜出量の関係を**図－７**に示す。KS-5, 8, 9, 12 の 4 体を一例として示した。図に見られるように，どの試験体も最大荷重以降荷重は急激には低下せず，じん性のある破壊モードであることがわかる。

3.3　ひずみ計測結果

(1)　脚材のひずみ

計測の一例として KS-9 の荷重と脚材のひずみ関係を**図－８**に示す。**図－６**にひずみの位置を示す。ひずみの差分が各支圧板からコンクリートの伝達する荷重である。図に見られるように荷重 1000kN を越えるとひずみ FS-2 が FS-1 に近づいているので 1 枚目の支圧板からコーン状のひび割れが発生したと判断できる。

(2)　鋼管のひずみ

鋼管の周方向のひずみ分布の一例として KS-9 を**図－９**に示す。荷重が小さい時は，鋼管の上部のひずみが大きく，その傾向は荷重が大きくなっても同様である。最大荷重時には下部の鋼管のひずみも大きくなっており，鋼管全体で抵抗している。最大荷重時のひずみは 800μ程度であり鋼管は降伏していない。同様に，すべての試験体で鋼管は降伏しなかった。

4.　各因子について

4.1　コンクリート強度

試験体の切断面の状況やひずみゲージから本試験体の耐荷力は，破壊モードを考慮して，**図－１０**に示すような第一支圧板から鋼管の端部に向かうコーン状の引抜きせん断耐力 P_{shear} と支圧板周囲のコンクリート付着耐力 P_{bond} の足し合わせで表せる。1 枚目の支圧板からの伝達荷重 P_1 を式(1)から求め，**図－１１**に示した。

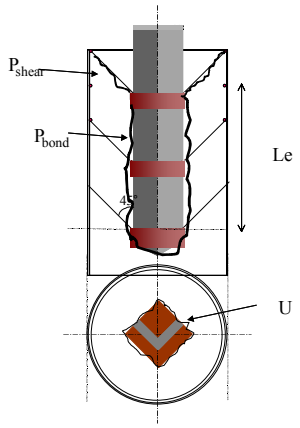
$$P_1 = Es \cdot As \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \qquad (1)$$

ここで，Es：脚材の弾性係数，As：脚材の断面積，ε_1：ひずみ FS-1，ε_2：ひずみ FS-2

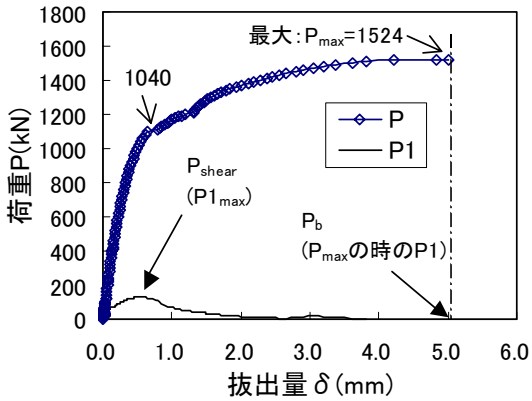
P_1 はコーン状ひび割れが貫通した時が最大と考えられ，この値を P_{shear} とする。P_{shear} を用いて各試験体のコーン状せん断面のせん断強度を式(2)から求め，**図－１２**にコンクリート強度との関係を示す。式(3)に示すコンクリート標準示方書 [2]による押抜きせん断強度との比較を示す。

$$\tau_{shear} = \frac{P_{shear}}{Ac} \qquad (2)$$

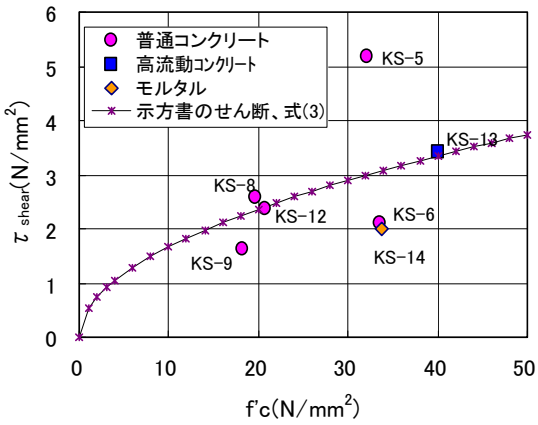
ここで，Ac：コンクリートの等価せん断面積(=π/4×D²)，D は鋼管径



図－１０　破壊モード



図－１１　支圧板の荷重分担(KS-9)



図－１２　f'c と τ shear の関係

$$\tau = 0.2 \cdot \beta_p \cdot \beta_d \cdot \beta_r \cdot \sqrt{f'c} \qquad (3)$$

ここで，β_p：主鉄筋がないので 1.0 とした。β_d，β_r は d=100mm として計算した。

モルタル試験体 KS-14 を除き，コンクリート試験体のみの本実験で求められたせん断強度と式(3)の比の平均値は 0.96，変動係数 40%とな

り，ばらつきは大きいものの一致した傾向を示した。

次に，**図－１０**のうち，支圧板間の付着耐力 P_{bond} について検討する。P_{bond} は式(4)から求められる。

$$P_{bond} = P - P_1 \tag{4}$$

ここで，P：載荷荷重

式(4)で $P=P_u$ の時，$P_1=P_b$ となる。

支圧板間の付着強度 τ_{bond} は式(5)から求めた。

$$\tau_{bond} = \frac{P_{bond}}{A_{bond}} \tag{5}$$

ここで，A_{bond}：付着面積(=U×Le)，U：載荷周長，Le：定着長

破壊モードから本付着強度は異形鉄筋の引抜挙動に近似できるため式(6)に示した異形鉄筋の付着強度[2)]と比較した。

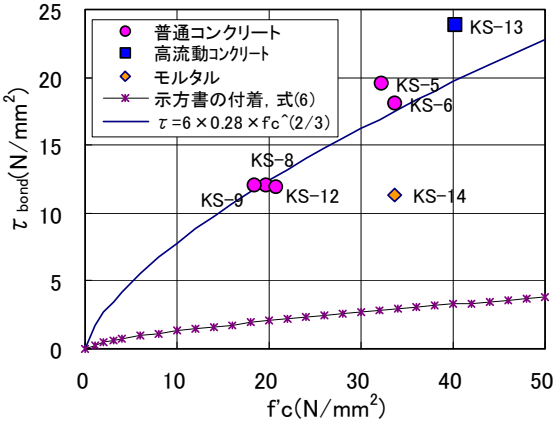
$$\tau = 0.28 \cdot f'c^{2/3} \tag{6}$$

図に示すようにコンクリート圧縮強度 f'c が大きくなると付着強度が大きくなる。図に式(6)の 6 倍の関係となる線を併記した。実験結果は示方書の値に比べて約 6 倍の付着強度となっており，鋼管によって拘束された効果が見られる。

普通コンクリート試験体(KS-13，KS-14 を除く)の実験値と式(6)を 6 倍した値の比の平均値は 1.03，変動係数 14%となった。

4.4　コンクリート種類

付着強度はモルタルを用いると普通コンクリートに比べて約 60%に低下した。高流動コンクリートは，試験装置の制限から最大値を得ることができなかった。実験での最大荷重から付着強度を求めると普通コンクリートに比べて 24%程度大きくなった。この原因として，モルタルと違い，コンクリートは鋼管による拘束のために骨材同士のかみあいが大きくなることがあげられる。さらに，高流動コンクリートはブリージングが少ないために，付着強度が大きくなったと考えられる。



図－１３　コンクリート圧縮強度と付着強度

5.　まとめ

本研究では鋼管により拘束されたコンクリート内の鉄塔脚の引き抜き載荷実験を行い，以下の事項が明らかとなった。

(1) コーン状のせん断強度はコンクリート標準示方書の押し抜きせん断強度と同等である。

(2) 支圧板間に生じた付着強度はコンクリート標準示方書の異形鉄筋の付着強度の約 6 倍と大きく鋼管による拘束効果がみられた。

(3) 本実験範囲において支圧板間の付着強度は躯体径，定着長による違いは見られず，圧縮強度との関係で求められることがわかった。

謝辞

本研究を遂行するにあたって，東京大学教授　前川宏一博士，香川大学教授　松島学博士，精華大学教授　安雪暉博士から有益なご指導を賜りました。ここに記して，深く感謝申し上げます。

参考文献

1) 吉井幸雄，飯島政義，齋藤修一，松島学；送電用鉄塔基礎の支圧板方式による脚材定着手法に関する実験的研究，土木学会論文集，No.606/V-41，pp.129-140，1998.11

2) コンクリート標準示方書平成８年版設計編，土木学会