

# 論文 4 本杭に支持された鋼管単柱鉄塔基礎へのアンカーボルト定着に関する模型実験

齋藤 修一\*1・北島 俊宏\*2・紙本 齊士\*3・湯井 孝一\*4

**要旨：**アンカー方式によって鋼管単柱鉄塔を鉄筋コンクリート床板に接続させた形式の定着耐力は明らかになっていない。そこで、4本の杭で支持した鉄筋コンクリート床板に鋼管単柱を定着させた模型試験体を作製し荷重試験を行った。その結果、床板上面のアンカーボルト設置位置から荷重方向に直交する曲げひび割れが生じた。上端筋は一部降伏したものの全鉄筋は降伏せず、アンカーフレームから引張側に生じたせん断ひび割れ面が形成されて最大荷重になったと考えられた。本方式の定着耐力は既往の引揚荷重を対象とした耐力算定計算値に較べて約2倍となった。

**キーワード：**鋼管単柱, アンカーボルト, モーメント荷重, せん断破壊, 模型実験

## 1. はじめに

一般的な送電用鉄塔は図-1(a)に示すようにトラス構造からなっており、風により各鉄塔脚には圧縮力や引揚力が支配的な荷重となっている。このような鉛直荷重に対する基礎への定着方法は、主にいかり材定着方式が適用されており、せん断耐力の実験式が提案されている<sup>1),2),3)</sup>。しかし、都心部などに建設する場合、広い鉄塔用の敷地を確保できないことがあり、図-1(b)に示すような鋼管単柱からなる鉄塔を採用することがある。鋼管単柱の基礎への定着は図-2に示すようなアンカーボルトとアンカーフレームによるアンカー方式が適用されることが多い。アンカー方式による定着耐力は鉛直荷重に対しては模型実験<sup>4),5)</sup>が実施されており、いかり材定着方式と同様の破壊モードであることが明らかとなっている。

しかし、鋼管単柱鉄塔の場合、風によって基礎部に作用する支配的な荷重はモーメント荷重となる。モーメント荷重が作用するアンカー方式の定着耐力に関しては風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>6)</sup>のベデスタルの構造計算において設計方法が提案されているが数値解析による検討であり、実験による検証例は示されていない。

そこで、モーメント荷重が作用する鋼管単柱を4本杭に支持された床板にアンカー方式により定着した形式の破壊モードおよび定着耐力を明らかにするために模型実験を実施した。また、引揚が支配的ないかり材の設計方法をモーメント荷重に置き換えた簡易算定式と風力発電設備の耐力算定計算値との比較を行った。

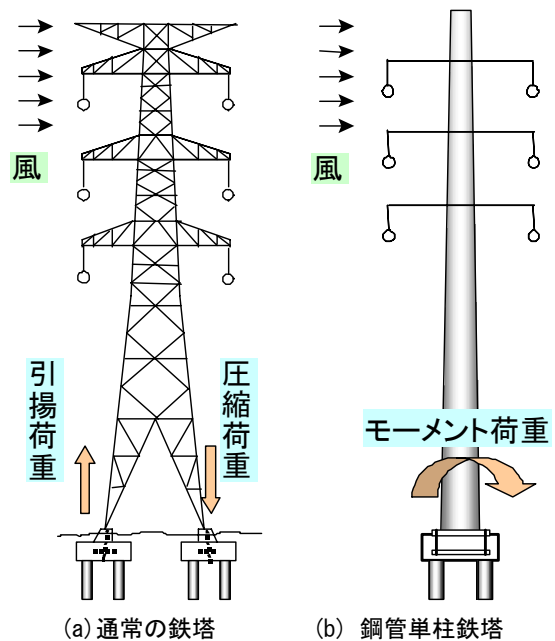


図-1 送電用鉄塔

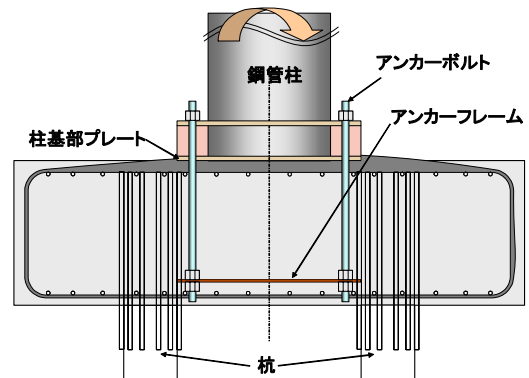


図-2 アンカー方式

\*1 東電設計 (株) 送変電土木部 工修 (正会員)

\*2 東電設計 (株) 送変電土木部

\*3 東京電力 (株) 電力流通本部工務部

\*4 東京電力 (株) 電力流通本部工務部

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

#### (1) 試験体

床板は4本の杭によって支持された構造とした。載荷設備・装置の能力から試験体は実構造物の1/3縮尺とした。試験体を図-3に示す。図に見られるように円形床板に格子配筋し、鋼管柱をアンカーボルトとアンカーフレームにより床板に定着した。アンカーボルトは付着力をコンクリートに期待するためにねじ切り構造としている。床板主鉄筋は上下ともD13(SD390) ctc140とした。杭の定着鉄筋として、各杭にD19(SD345)を6本ずつ配置した。杭定着鉄筋の降伏で試験が終了しないように、想定せん断面に干渉しない位置に補強用にフック付きの定着鉄筋D19(SD390)を6本追加した。せん断補強筋は杭の間に各4本ずつ端部を定着具に加工したD13(SD345)を配置した。また、鋼管柱は基礎の想定耐力を上回るようにコンクリートを充填し座屈を防止した。なお、鋼管柱自重は3485kgとなっている。

#### (2) 使用材料と配合

試験時のコンクリート強度は $f'c=29.5N/mm^2$ である。鋼材の材料強度を表-1に示す。降伏強度のうち、鉄筋は引張試験結果、鋼板はミルシートの値を示した。

### 2.2 載荷状況

写真-1および図-4に示すように試験体は杭部を反力台に固定し、反力台はPC鋼棒で反力床に接続した。コンクリート床板上面から5m上部の鋼管に水平荷重を500kNアクチュエータにより加えた。アクチュエータの両端にヒンジを設けて鋼管柱の回転を拘束しない構造とした。また、滑車およびウエイトを用いアクチュエータの自重を取り除いた。荷重制御で加力を行い、最大荷重を超えた時点で変位制御に切り替えた。

### 2.3 計測

変位は載荷点水平、柱鋼管基部回転、アンカーフレームの抜出し、ひずみは床板部主鉄筋、せん断補強筋、杭定着鉄筋を測定した。

表-1 鋼材の降伏強度

種別	サイズ	材質	降伏強度 $f_{sy}(N/mm^2)$	使用箇所
鋼板	t=19	横方向	422.0	柱鋼管
		縦方向	447.0	
	t=55	STKM13A	315.0	杭鋼管
	t=9,12,19,22	590相当材	450以上	柱基部プレート
鉄筋	D10	SD345	368.7	用心筋
	D13	SD345	357.5	せん断補強筋
	D13	SD390	451.2	床板主鉄筋
	D19	SD345	385.7	杭鉄筋
PC鋼棒	$\phi 32$	C種1号	1168	アンカーボルト

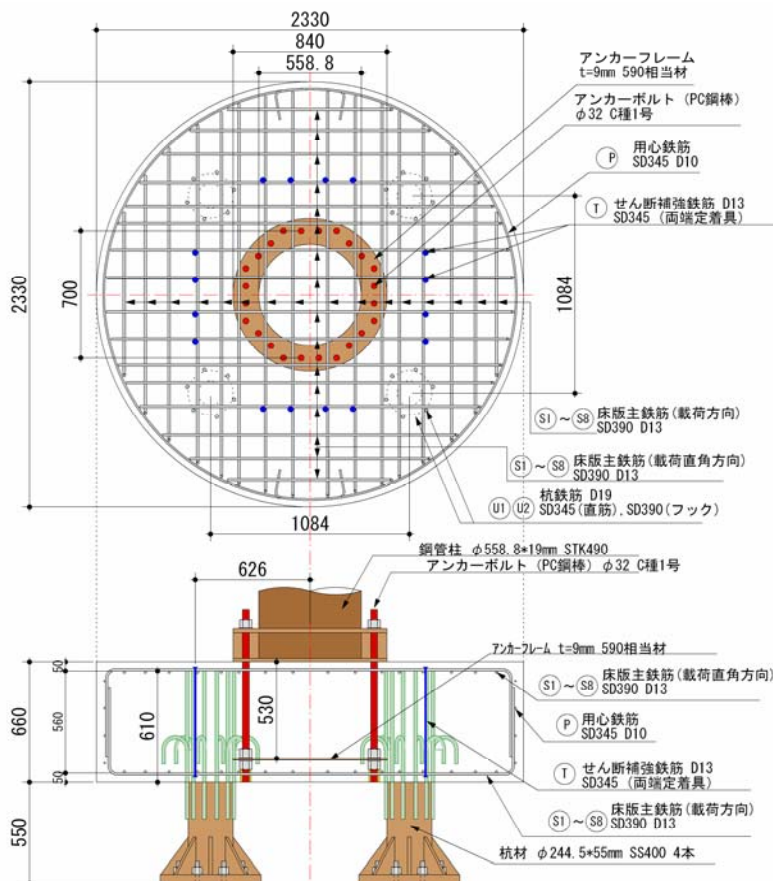


図-3 試験体



写真-1 載荷状況

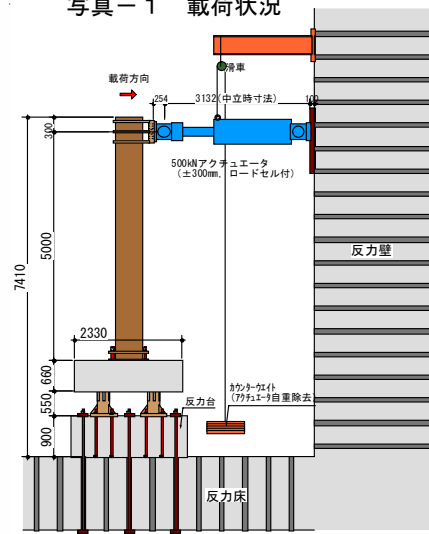


図-4 載荷装置

### 3. 実験結果

#### 3.1 ひび割れ観察

##### (1) 表面のひび割れ

図-5に示したひび割れは最大荷重まで黒、最大荷重以降を赤で示した。主なひび割れは色分けして記号を付けた。上面は荷重160kNで載荷軸方向のA点側にアンカーボルトから放射状に割裂ひび割れが生じた。荷重210kNでは載荷軸に対する直角(南北)方向にもひび割れが生じた。上面ひび割れ観察より引張側アンカーボルトから放射状に生じたひび割れA

(青線)と載荷軸直角方向ひび割れB(緑線)の幅が大きいことが確認された。下面は圧縮側杭中央部に曲げひび割れと思われる放射状のひび割れ、引張側杭とアンカーボルトを結ぶひび割れが生じていた。

##### (2) 切断面のひび割れ

載荷軸方向に切断したひび割れを①断面、引張側杭部を上面から200mmの位置で水平に切断したひび割れを③断面として図-6に示す。①断面のひび割れは引張側アンカーボルトから内側方向に水平のひび割れC(緑線)が生じ、外側方向には斜め方向にせん断ひび割れD(赤線)が生じており、これらのひび割れ幅が最も大きかった。アンカーボルト中間ねじ部から生じたコーン状ひび割れE(青線)のひび割れ幅は小さい。③断面は杭部定着鉄筋の内側に鉄筋を避けるように同心円状のひび割れが生じている。

##### (3) 想定破壊面

表面ひび割れ、切断面ひび割れから破壊面を想定すると図-7に示すような概念図で表すことができる。せん断面は基本的にはコーン状であるが杭部定着鉄筋を避けるように上面に方向を変え、せん断面が形成されたと考えられる。

#### 3.2 荷重変位関係

水平荷重とアンカーフレームの拔出し変位の関係を図-8に示す。最大荷重  $P_u$  は 375kN の時である。モーメントに換算すると、 $M_u=5 \times P_u=1875\text{kN}\cdot\text{m}$  となる。荷重200kNで変位の増加が見られるが、後述する主鉄筋ひずみやせん断補強筋などのひずみから床板上面に放射状の割裂ひび割れの発生とアンカーフレームから生じた水平ひび割れがほぼ同時に生じた荷重と考えられる。最大荷重以降、急激な荷重低下は見られず、変位が徐々に増加しており、ぜい性的な破壊にはならなかった。

#### 3.3 主鉄筋ひずみ

##### (1) ひび割れとひずみの関係

上端筋、下端筋は同位置にゲージ添付し、ひずみゲージ記号はUSが上端筋、LSが下端筋である。図-9にひ

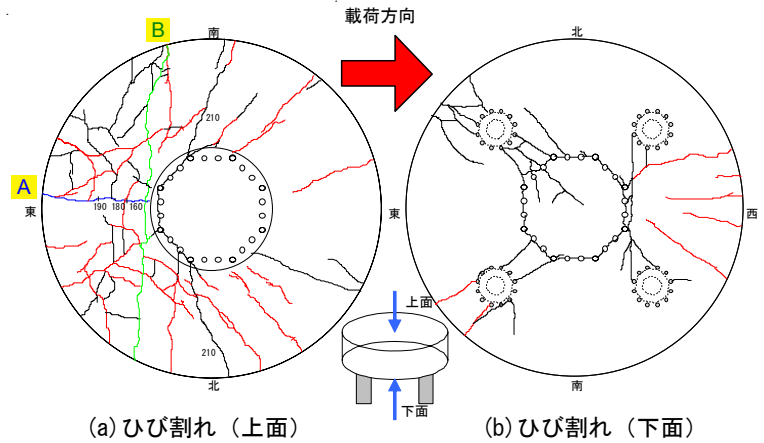


図-5 表面のひび割れ

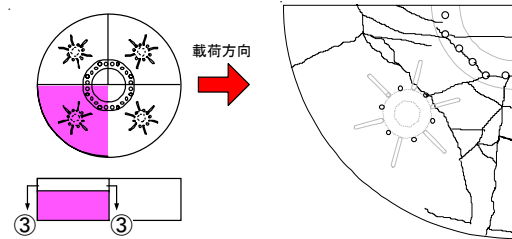
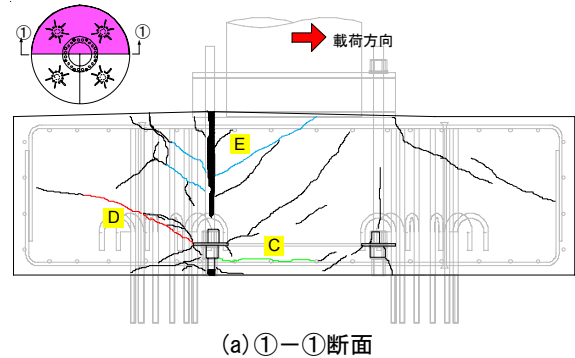


図-6 切断面のひび割れ

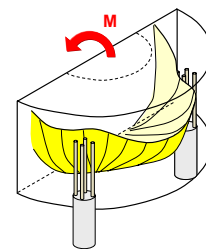


図-7 破壊面の概念図

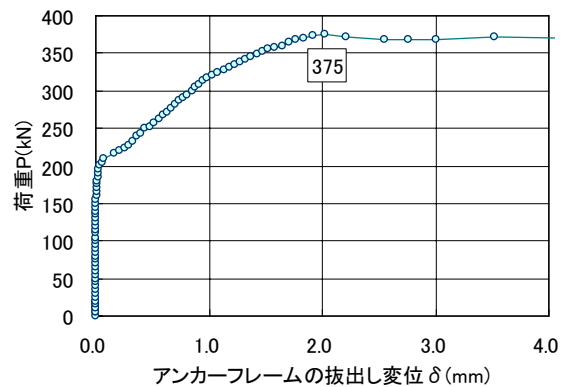


図-8 荷重-変位関係

び割れとひずみの関係を示す。上面は上端筋の降伏ひずみ  $2460\mu$  を超えた荷重段階を色分けしてひずみゲージの部分に図示した。300kN で軸方向引張側の放射状ひび割れに沿った鉄筋の降伏が見られたが外側には広がっていない。最大荷重 375kN 時に引張側アンカーボルトに近い主鉄筋が降伏し、最大荷重以降、軸直交方向のひび割れの進展に伴って外側に配置された鉄筋の降伏が見られた。下端筋は降伏しなかったので、 $1000\mu$  を超える荷重を図示した。最大荷重までは圧縮側杭中央部の曲げひび割れに対応したひずみが大きい。

(2) 荷重と主鉄筋ひずみの関係

ひずみゲージ記号と位置の関係を図-10(a)に示す。図-9に示した分析から曲げに寄与している主鉄筋として、A,B位置のひずみと荷重の関係を図-10(b)(c)に示す。放射状ひび割れが生じた位置Cと位置Dのひずみを図-10(d)に示す。荷重 200kN で上端筋ひずみ(US)が増加し始めた。US-18,20,22は軸方向(C), US1,3,5,12,14は軸直交方向(A,B)でほぼ同時にひび割れが生じた影響と考えられる。材料試験から得られた主鉄筋の降伏ひずみ  $2460\mu$  を縦線で示した。

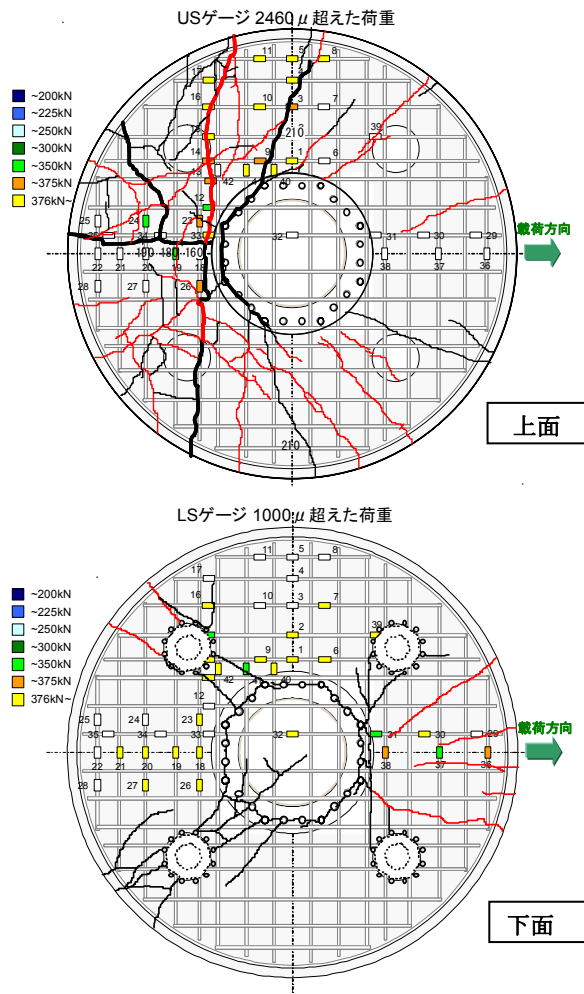
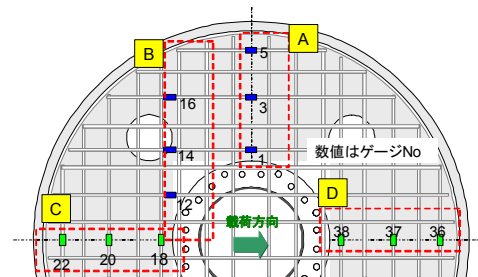


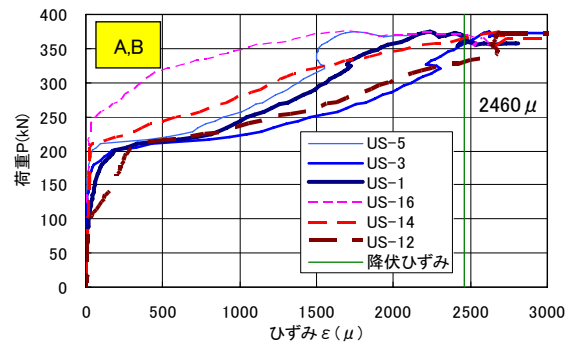
図-9 ひび割れと主鉄筋ひずみの関係

A, B のひずみのうち中央に近い鉄筋は最大荷重で降伏ひずみを超え、最大荷重以降外側の鉄筋も降伏した。C のひずみは、降伏付近まで到達しているが最大荷重を超えてもひずみの増加が見られなかった。

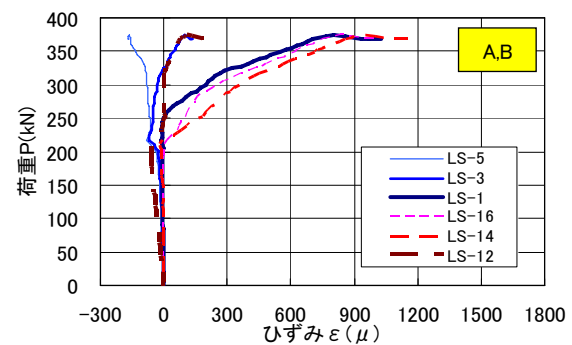
A,B位置の下端筋ひずみは荷重 200kN まで圧縮ひずみであるが、200kN 以降引張ひずみになったことからアンカーフレーム付近に生じた水平ひび割れによる影響と考えられる。また、下端筋の降伏は確認できなかった。



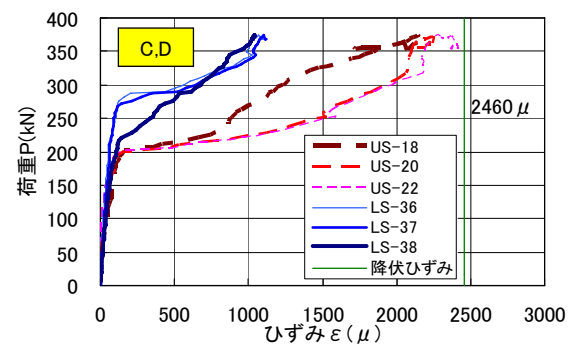
(a) ひずみゲージ位置



(b) 軸直交方向上端筋ひずみ



(c) 軸直交方向下端筋ひずみ



(d) 軸方向下端筋ひずみ

図-10 主鉄筋ひずみ

### 3.4 せん断補強筋ひずみ

せん断補強筋のひずみを図-11に示す。計測位置とゲージ記号を図-12に示す。せん断補強筋ひずみは図に示す6本、各鉄筋あたり3断面計測しており、グラフは各せん断補強筋3断面のうち最大ひずみを示した。

引張側に配置したせん断補強筋 PS1,4 は降伏し、最大荷重以降ひずみの増加が見られた。側面に配置したせん断補強筋ひずみは引張側から順にひずみが大きく、中央から引張領域に配置された鉄筋 (PS-8,10) が降伏した。圧縮側はひずみが小さく最大荷重以降アンカーフレームの拔出に伴ってせん断補強筋が抵抗したことがわかる。ここには示していないが、圧縮側のせん断補強筋は最大荷重までひずみがゼロであった。

以上より、引張側の定着が十分なせん断補強筋が降伏したせん断破壊であったと考えられる。

### 3.5 杭主鉄筋ひずみ

引張側杭定着鉄筋のひずみを図-13に示す。杭の外側に配置された定着鉄筋 (P-10) を除き、降伏ひずみを超えるあるいは降伏に近くなっている。しかし、最大荷重以降せん断補強筋の様なひずみの増加が見られておらず、ひび割れ面観察と整合するとせん断面が杭鉄筋の内側に生じた影響と考えられる。

### 3.6 分担荷重の推移

図-14にせん断補強筋(PS)および杭定着鉄筋(P)の分担荷重とアンカーフレーム拔出し変位の関係を示す。せん断補強筋は中央から引張側断面で計測した4本(PS-1,4,8,10)を対象とし、杭定着鉄筋は内側に配置した3本(P-1,4,16)を対象とし、計測したひずみにEA(断面剛性)を乗じて分担荷重を求めた。最大荷重時の変位を超えるとせん断補強筋は、全ての鉄筋の降伏荷重に収束した。杭定着鉄筋は最大荷重時まで分担荷重が増加するが、急激に分担荷重の低下が見られた。杭定着鉄筋の内側にせん断面が形成されたため、鉄筋の分担が減少したと考えられる。せん断補強筋は端部を定着具に加工したため定着力が十分であったが杭定着鉄筋の端部は直筋であったため、定着力が足りないため鉄筋の内側にせん断面が生じたと考えられる。

### 3.7 破壊モードの分析

上端筋は最大荷重以降軸直角方向のひび割れ進展に伴って主鉄筋降伏が見られた。降伏領域は軸直角方向全幅であるが外側鉄筋のひずみは降伏ひずみ以降急激な増加は見られなかった。以上より、主鉄筋の降伏による曲げ破壊モードとも考えられたが、せん断補強筋ひずみの急激な上昇と杭定着鉄筋の分担荷重の低下から杭定着鉄筋の内側にせん断面が形成されたせん断破壊モードが卓越したと想定される。したがって、以降、引抜きせん断耐力に関する算定式との比較を行うこととした。

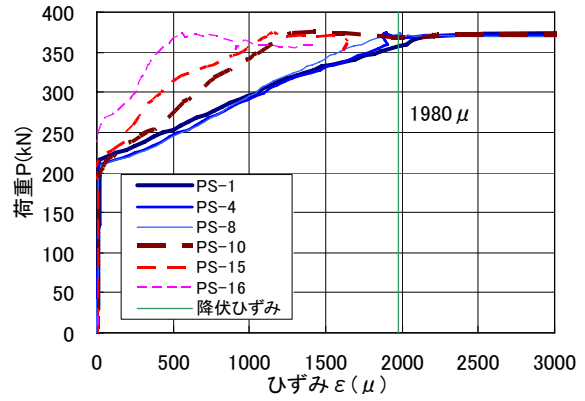


図-11 せん断補強筋ひずみ

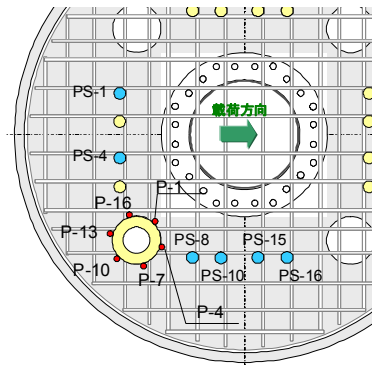


図-12 ひずみゲージ記号

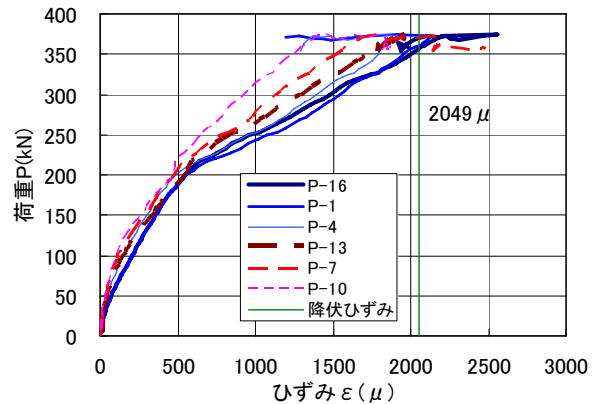


図-13 杭定着鉄筋ひずみ

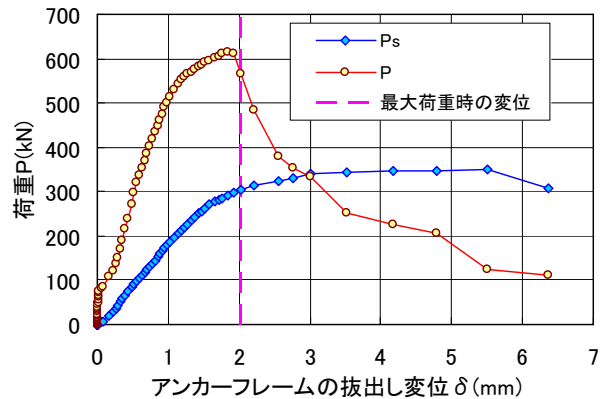


図-14 分担荷重の推移

#### 4. 耐力算定式との比較

##### 4.1 送電用鉄塔基礎の引抜きせん断耐力算定式

送電用鉄塔基礎の引抜きせん断耐力算定式は引揚荷重を対象に求められ式(1)が提案されている<sup>1)</sup>。鋼管単柱鉄塔の場合はモーメント荷重が卓越するため、コンクリートに引張領域と圧縮領域が混在する。ここでは、図-15に示したように最も引張力が大きい1/8の領域に対して式(1)で求めたせん断耐力が抵抗すると考えた。ここで求めたせん断耐力が引張力と釣り合うように基部に作用する抵抗モーメント  $M_u$  を式(4)で求めた。

$$P_u = P_{cu} + P_{su} \quad (1)$$

$$P_{cu} = 0.2 \cdot \beta_p \cdot \beta_d \cdot \beta_r \cdot \sqrt{f'_c} \cdot U_p \cdot d_{at} \quad (2)$$

$$P_{su} = A_s \cdot f_s \quad (3)$$

$$M_u = P_u \cdot Z \cdot n \quad (4)$$

ここで、 $P_u$ ：1/8面あたりのせん断耐力、 $P_{cu}$ ：コンクリートの分担荷重、 $P_{su}$ ：せん断補強筋の分担荷重、 $\beta_p$ 、 $\beta_d$ 、 $\beta_r$ ：鉄筋比、寸法効果、載荷周長に関する係数、 $A_s$ 、 $f_s$ ：せん断補強筋の断面積、降伏強度、 $Z$ ：アンカーボルト群の断面係数、 $n$ ：1/8断面あたりのボルト本数

##### 4.2 風力発電に関する算定式

風力発電設備のペDESTALの構造計算<sup>6)</sup>による設計評価式を参考に安全係数で除する前の算定式により抵抗モーメントを求めた。式(6)はコンクリートの分担力、式(7)は外周主筋及びせん断補強筋の分担力である。式(4)で求めた円周単位長さあたりの引張力を基部に作用する抵抗モーメントに換算して式(8)で求めた。

$$P_{al} = P_{alc} + P_{als} \quad (5)$$

$$P_{alc} = 0.53 \cdot \beta_{ab} \cdot \beta_n \cdot \beta_d \cdot \sqrt{f'_c} \cdot Dc \quad (6)$$

$$P_{als} = 0.45 \cdot A_{sm} \cdot f_s + 0.9 \cdot A_{ss} \cdot f_s \quad (7)$$

$$M_u = \frac{P_{al}}{t'} \cdot Z' \quad (8)$$

ここで、 $P_{al}$ ：単位長さあたりのせん断耐力、 $P_{alc}$ ：コンクリートの分担荷重、 $P_{als}$ ：せん断補強筋の分担荷重、 $\beta_{ab}$ 、 $\beta_n$ 、 $\beta_d$ ：寸法比、初期軸力、寸法効果に関する係数、 $A_{sm}$ 、 $A_{ss}$ 、 $f_s$ ：外周主筋断面積、せん断補強筋断面積、降伏強度、 $Z'$ ：鋼管柱の断面係数、 $t'$ ：鋼管柱の厚さ

##### 4.3 耐力算定式との比較

表-2に式(4)、(8)によって求めた計算値と実験値を比較して示す。実験値は最大荷重時のモーメント  $M_u$  である。実験値はそれぞれの計算値の2.12~2.36倍となった。今回対象とした算定式は最も引張力が大きくなる部位での照査であり、安全側の計算値になることがわかった。

#### 5. まとめ

本研究は、鋼管単柱鉄塔基礎のアンカー方式の定着を

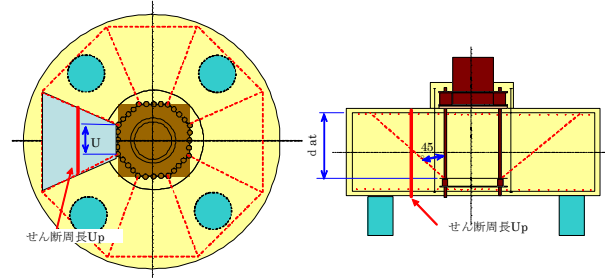


図-15 引抜きせん断耐力算定式のモデル

表-2 実験値と計算値の比較

項目	記号	抵抗モーメント Mu(kN.m)	実験値との比 Mu/Mc
実験値	Mu	1,875	—
4.1節の計算値	Mc1	794	2.36
4.2節の計算値	Mc2	886	2.12

対象として模型実験を行った。本研究から得られたことは次の通りである。

- (1) 本定着方式の破壊モードはアンカーフレームからのせん断破壊である。
- (2) 実験値は各耐力算定式の2倍程度の耐力を有しており、比較した耐力算定式は安全側の計算値となった。
- (3) 床板上端筋は降伏しているものが多数あることから、最大荷重は曲げ耐力にも近かったと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 吉井幸雄, 田邊成, 松島学, 三島徹也: 送電用鉄塔基礎のいかり材定着方式による脚材定着手法に関する研究, 土木学会論文集, No.606/V-41, pp.111-128, 1998.11
- 2) 田邊成, 小宮山茂樹, 齋藤修一, 三島徹也: 送電用鉄塔基礎の1本杭支持床板におけるいかり材定着手法に関する研究, 土木学会論文集, No.732/V-59, pp.47-62, 2003.5
- 3) 田邊成, 齋藤修一, 三島徹也, 安雪暉: 送電用鉄塔基礎の4本杭支持および直接支持床板における引抜きせん断耐力に関する研究, 土木学会論文集, No.739/V-60, pp.1-13, 2003.8
- 4) 大浦篤, 小宮山茂樹, 齋藤修一, 三島徹也, 松島学: 床板にアンカーボルト定着した送電用鉄塔脚の模型引抜き載荷実験, 土木学会第55回年次学術講演会, pp.1138-1139, 2000.9
- 5) 齋藤修一, 大浦篤, 小宮山茂樹, 三島徹也, 松島学: コンクリート杭にアンカーボルト定着した送電用鉄塔脚の模型引抜き載荷実験, 土木学会第55回年次学術講演会, pp.1136-1137, 2000.9
- 6) 土木学会: 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説, 2007.11