

論文 1 本杭フーチングに埋め込まれた鉄塔脚の定着手法に関する研究

齋藤 修一^{*1}・小宮山 茂樹^{*2}・安 雪暉^{*3}・松島 学^{*4}

要旨：1 本杭に支持されたフーチングに送電用鉄塔脚を定着し、模型実験を実施した。パラメータをフーチングの上端主鉄筋とし、鉄筋比 $p=0.1, 0.4\%$ の2種類の試験体を作成し、引抜载荷を行った。その結果、 $p=0.4\%$ の試験体はせん断破壊モード¹⁾であったのに対し、 $p=0.1\%$ の試験体は曲げ破壊モードであった。その結果を基に、各鉄筋比における耐力算定式を提案し、実験結果との比較を行った。

キーワード：せん断破壊、曲げ破壊、脚材定着、模型実験、送電用鉄塔基礎、引抜荷重

1. はじめに

平野部に建設される送電用鉄塔基礎は図-1に示すように鉄塔脚をフーチングに定着させ、杭によって支持される構造物が多く用いられる。図-1(b)に定着部の詳細を示す。図に示したように鉄塔脚の先端に円形の支圧型アンカーを取り付けてフーチングに埋め込み、定着する。従来、杭4本でフーチングを支持していたが、杭1本の支持力で十分である場合を想定し、1本杭上にフーチングを配置し、フーチングに鉄塔脚を定着する方式を実験により検討した。フーチン

グは上下に主鉄筋を格子状に配筋し、杭をフーチングに定着するための杭鉄筋をフーチングの上端筋までのばし、杭鉄筋の中にアンカーを取り付けた鉄塔脚を配置した。風の方向により鉄塔脚には大きな引抜荷重を受けることが送電用鉄塔の特徴である。

本研究は、1本杭フーチング定着の試験体を作成し、引抜き载荷実験を実施した。その結果から破壊モードおよび耐力の評価を行い、耐力算定式の提案を行った。

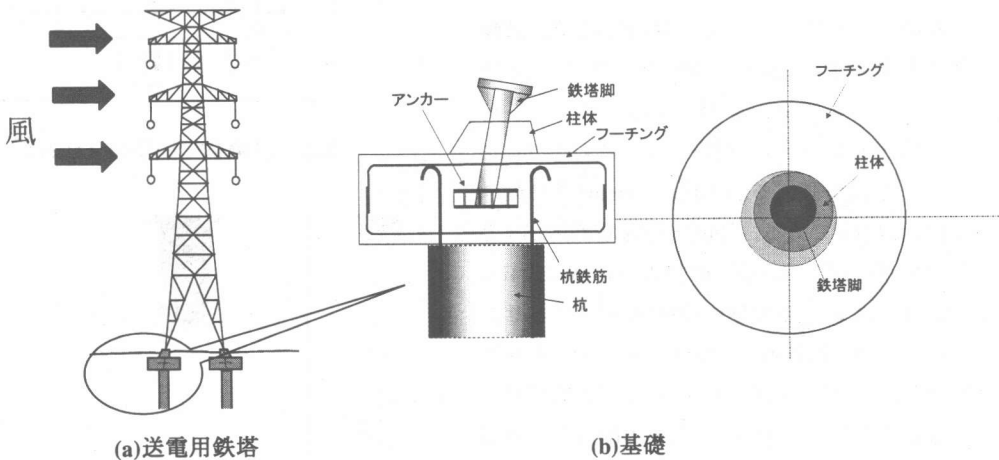


図-1 送電用鉄塔と基礎

- *1 東電設計 送変電土木部 工修 (正会員)
- *2 東京電力 建設部 土木建築センター
- *3 東京大学助教授 工学研究科社会基盤専攻 工博
- *4 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 工博 (正会員)

2. 試験体

図-1 に示したような実規模構造物を参考に図-2 に示すような配筋状況のほぼ実物大の試験体を作製した。

試験体はフーチングの主鉄筋量を調整することで2つの破壊モードを仮定した。鉄塔脚に引抜荷重が作用した場合、フーチングに鉄塔脚から放射状に割裂ひびわれが生じる。Case1-3 は、フーチングが曲げられ、上端主鉄筋が降伏し、破壊するような上端主鉄筋量の少ない試験体である。Case1-1 は、アンカーからのせん断ひびわれ形成後、せん断断面内のせん断補強筋が全て降伏することにより終局耐力が決定される上端主鉄筋量の多い試験体である。このように、前者は曲げ破壊が卓越するように、後者はせん断破壊が卓越するように設定した試験体である。

試験体形状および配筋状況の代表としてCase1-3 を図-2 に示す。フーチングの主鉄筋量以外は両試験体とも全ての形状、配筋である。杭を模した鋼管に杭鉄筋を取り付け、上端主鉄筋位置まで伸ばすことで杭とフーチングの定着を行った。杭鋼管の下部を固定し、鉄塔脚を模擬した鋼管を上部に引抜荷重した。試験体の大きさは実構造物の80%の大きさとし、フーチングの厚さ56cm、径160cm、場所打ち杭の直径80cm(場所打ち杭の鉄筋位置の径56cm)とした。鉄塔脚はφ120mm(t=18mm)で材質はWELTEN780である。鉄塔脚先端にアンカーとして取り付けたものは、直径40cm、高さ11cmの大きさにWELTEN590の鋼材を組み合わせたものである。杭鉄筋は、D19 (SD390)を9本配置し、その間に杭鉄筋が降伏して実験が終了しないようにD25 (SD490)を9本配置し、補強した。コンクリート強度は表-1 に示すように $f'c=30N/mm^2$ を目標強度とした。

3. 実験結果と考察

試験体毎にひびわれ、せん断補強筋および主鉄筋のひずみから破壊モードの特定を行った。

表-1 試験体のパラメータ

試験体番号	$f'c$ N/mm ²	主鉄筋 配筋	主鉄筋比 p(%)
Case1-1	32	D16ctc100	0.43
Case1-3	29	D10ctc130	0.11

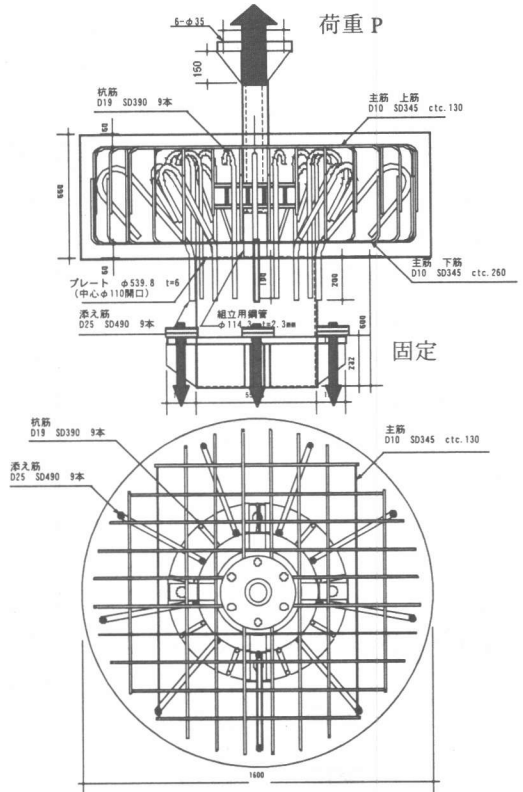


図-2 試験体の配筋図 (Case1-3)

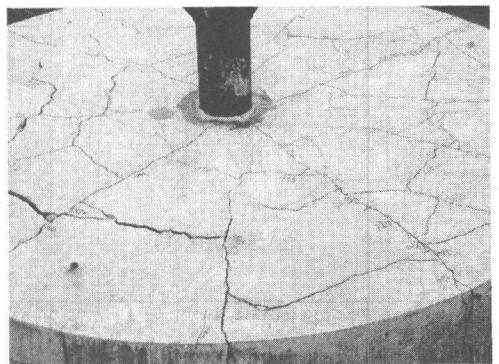


写真-1 ひびわれ状況(Case1-1)

3. 1 破壊モード

(1)Case1-1試験体

上面から観察したひびわれ状況を写真-1, 図-3に示す。図中にはひびわれを確認した荷重を示した。図に見られるように1030KNで鉄塔脚から放射状にひびわれが発生しはじめ、1200KNでフーチングの端部まで進展した。放射状のひびわれは荷重が増加するにつれて、ひびわれの本数は増加した。同心円状のひびわれが1950KNで確認でき、最大荷重2150KNで同心円状につながった。ひびわれの性状から本ひびわれをアンカー部材端から発生したせん断ひびわれと判断できる。この同心円状のせん断ひびわれは2重に形成されており、アンカー部上端から発生したせん断ひびわれとアンカー部下端から発生したせん断ひびわれから形成されていると考えられる。荷重と杭鉄筋のひずみの関係を図-4に示す。荷重2000KNまではPS3のひずみが最も大きく、最大で1500 μ 程度となっており、この位置でせん断面が形成されている様子がわかる。最終的にはPS1のひずみが急激に増加し、せん断ひびわれ形成後、変形が大きくなり、折り曲げ鉄筋の付着力が低下したこともわかる。図-3に示したひびわれ状況の内、外側の同心円状ひびわれはPS3のゲージ位置に、内側のひびわれがPS1の位置に相当し、内側のひびわれが卓越し、せん断面の杭鉄筋が降伏し、破壊に至ったと考えられる。

上端主鉄筋のひずみ分布を図-5に示す。図-6は計測位置図である。鉄塔脚に近い部分で凸型のひずみ分布となっており、曲げ的な挙動であることがわかる。最大荷重時の2150KNでの主鉄筋最大ひずみは1600 μ であり、主鉄筋はどの部分も降伏していないことがわかる。したがって、曲げ破壊していないと判断できる。

以上のことから、本試験体はせん断ひび割れが発生し、杭鉄筋の降伏後、引抜きせん断により破壊したと判断した。

(2)Case1-3試験体

上面から観察したひびわれ状況を写真-2, 図-

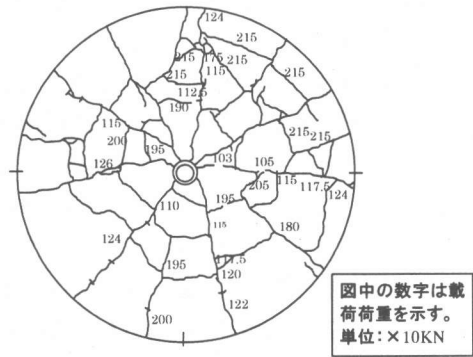


図-3 ひびわれ図 (Case1-1)

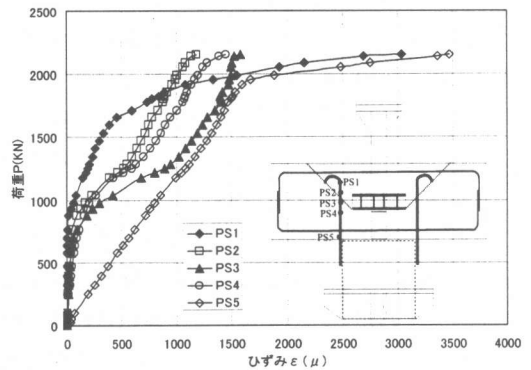


図-4 荷重と杭鉄筋のひずみ関係

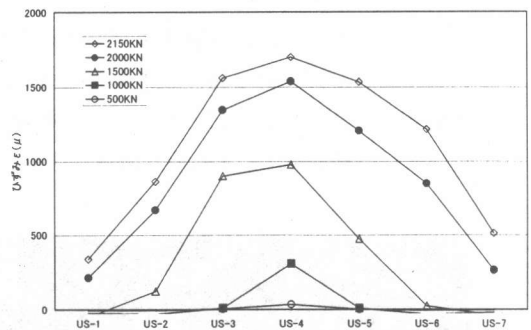


図-5 上端鉄筋のひずみ分布

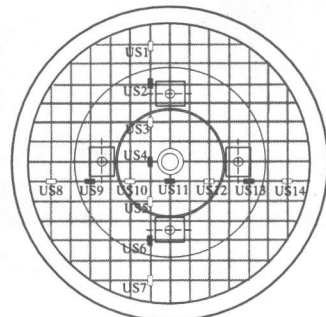


図-6 主鉄筋の計測位置

7に示す。図に見られるように500KNで放射状にひびわれが発生しはじめた。800KNで、そのひびわれはフーチングの端部まで進展した。同心円状のひびわれも観察されているが、最大荷重1250KNで発生したものである。荷重と杭鉄筋のひずみの関係を図-8に示す。ひびわれ状況から推測するとアンカー下端からせん断面が発生していると考えられる。本ケースではPS3のひずみが最も大きく、せん断ひびわれが貫通した位置である。最大荷重時にPS3のひずみは最大でも2000 μ 程度であり、杭鉄筋は全て降伏しなかった。

上端主鉄筋のひずみの分布を図-9に示す。計測位置は図-10の位置図に示すとおりである。鉄塔脚に近い部分が凸のひずみ分布となっている。最大荷重時にUS5,US4ともに最大ひずみは3000 μ 以上であり、主鉄筋は降伏したことがわかる。最大荷重時の1200KNでは最も外側の鉄筋US10も2000 μ 程度であり、降伏に近かったことがわかる。ひずみ計測位置は放射状のひびわれとは一致しておらず、ひびわれ位置では計測されたひずみよりも大きく、全ての鉄筋が降伏していると推測される。

以上のことから、本試験体は同心円状のせん断ひびわれが最終的に発生しているものの、杭鉄筋が降伏していないことから、せん断破壊ではなく、主鉄筋降伏による曲げ破壊と判断した。

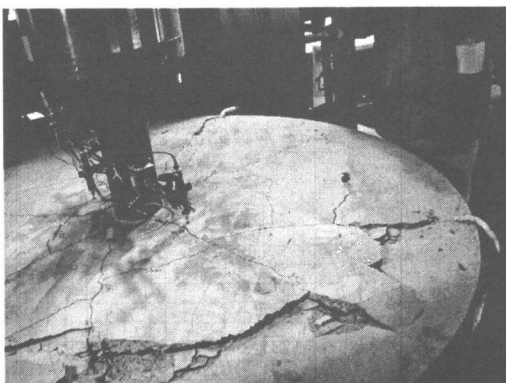


写真-2 ひびわれ状況 (Case1-3)

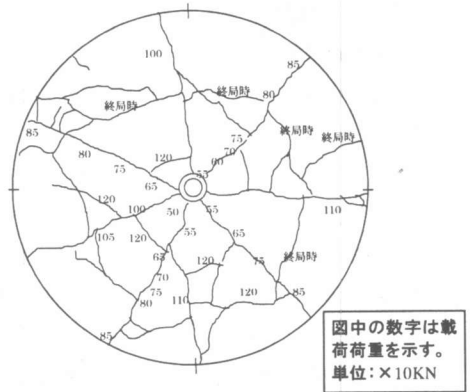


図-7 ひびわれ図 (Case1-3)

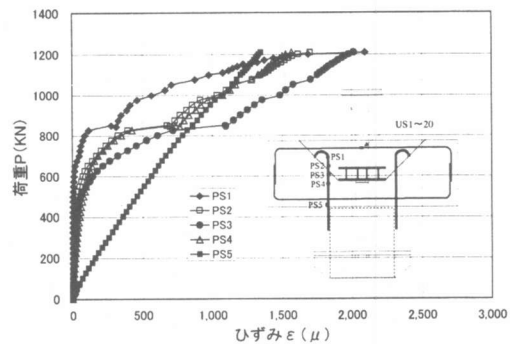


図-8 荷重と杭鉄筋のひずみ関係

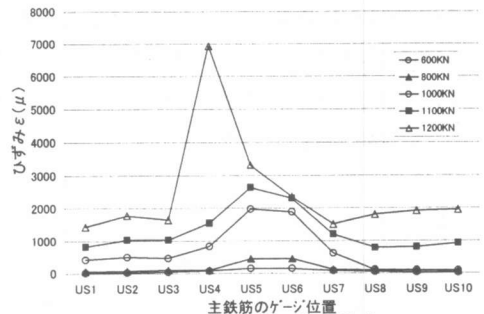


図-9 主鉄筋のひずみ分布

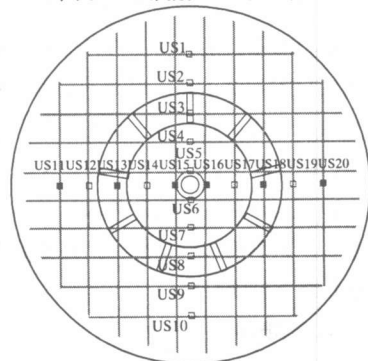


図-10 主鉄筋の計測位置

3. 2 耐力

各ケースの荷重と鉄塔脚の拔出量の関係を図-11,12に示す。拔出量は図に示すように鉄塔脚の下端とコンクリート下部の相対変位量とした。両試験体ともに、放射状の曲げひびわれが発生し、そのひびわれが側面へ到達し、最終的に引抜せん断面が形成され、破壊に至ったことがわかる。試験体毎に各ひびわれ段階モードの荷重を表-2に示す。表に示したようにCase1-1では同心円状のせん断ひびわれを目視で確認できたが、Case1-3では放射状のひびわれのみ目視で確認できた。

4. 耐力算定式の提案

4. 1 せん断耐力

図-13に示すように、Case1-1はアンカーの下端からせん断ひびわれが発生し、せん断面に配置された杭鉄筋が降伏し、せん断破壊した。したがって、コンクリート部が分担するせん断耐力と杭鉄筋が分担するせん断耐力の足合せて耐力が表現できると考えた。本考え方を基に田邊ら²⁾は式(1)を提案している。ただし、本試験体は、杭鉄筋をせん断補強筋として評価した。

$$P_u = P_c + P_s \quad (1)$$

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

$$P_s = A_s \cdot f_{sy} \quad (3)$$

ここで、 U_p ：載荷断面の周長、 d_{at} ：有効高さ、 A_s ：杭鉄筋をせん断補強筋とした鉄筋断面積。

4. 2 曲げ耐力

本耐力算定式はフーチング上端主鉄筋が降伏するような破壊モードを仮定したので、曲げ耐力と呼称する。鉄塔脚に引抜荷重が作用すると、荷重は鉄塔脚からアンカーを介してコンクリートに伝達される。図-14に示すようにアンカー部からの反力方向を実験のひびわれを参考に水平面から45度と仮定した。アンカー部からの反力により、コンクリート部に荷重が伝達される。荷重の水平分力がコンクリートを押し広げようとするため、割裂ひびわれが生じると考えた。

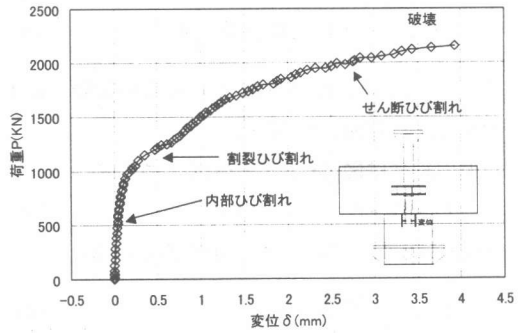


図-11 荷重と脚材拔出し量の関係(case1-1)

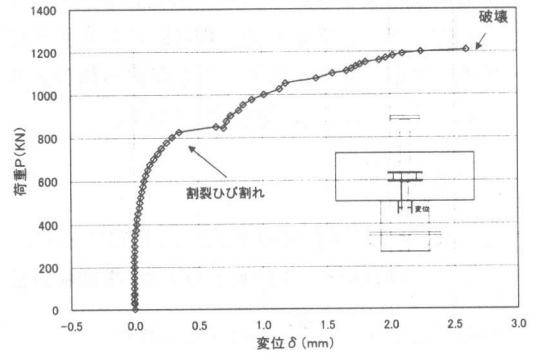


図-12 荷重と脚材拔出し量の関係(case1-3)

表-2 各モードの荷重

試験体番号	放射ひび割れ発生	放射ひび割れ側面到達	せん断ひび割れ	最大荷重
Case1-1	1030	1220	1800	2152
Case1-3	426	850	---	1207

単位:KN

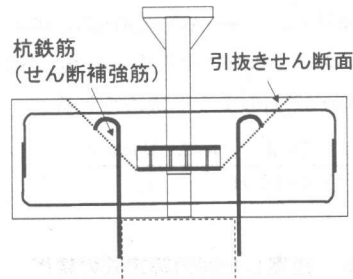


図-13 せん断面の考え方

図-14に仮定した水平分力による力の釣合を示す。内圧 P_u の作用位置はアンカー下端位置と上端筋の中央位置に合力があると仮定した。図に示した P_s 、 P_u および P_c の中立軸周りにおけるモーメントの釣合から式(4)が求められる。

$$P_s \cdot j = P_u \cdot \left(j - \frac{1}{2} H \right) - P_c \frac{2}{3} d' \quad (4)$$

ここで、H:アンカー下端と上端筋の距離、d:有効高さ、 $j=7/8d$ 、 $d'=d-j$ 。

力の釣合は図-14より式(5)で表される。

$$P_s = P_u + P_c \quad (5)$$

式(4),(5)を整理すると式(6)が求められる。

$$P_u = \frac{23 \cdot d}{23 \cdot d - 12 \cdot H} P_s \quad (6)$$

鉄筋はじん性のある材料なので応力の再配分が可能であると考え、全ての主鉄筋は均等に応力分担できると仮定した。図-15に示すように周方向の応力分布が均等とした薄肉円筒シェルと仮定することから式(7)が得られる。

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot r_i}{t} \quad (7)$$

ここで、 r_i :円筒内側の半径、 t :円筒の厚さ。

内圧 p_i は脚材からの水平分力 P_s を脚材断面

積で除して $p_i = \frac{P_s}{\pi \cdot \phi_1 \cdot H}$ と求められる。

ここで、 ϕ_1 :主鉄筋の中心から一番近い鉄筋同士の距離

薄肉円筒として仮定した場合、発生応力 σ_t は、実際に配筋されている鉄筋の断面積を鉄筋が配筋されている幅に均等になるように換算するため、鉄筋断面積を薄肉に仮定した断面積で除して換算し、 $\sigma_t = n \cdot A_s \cdot \sigma_{0t} / (t \cdot H)$ と求められる。 $\sigma_{0t} = f_{sy}$ とおき、式(7)に代入すると P_s が得られ、曲げ耐力が式(8)のように求められる。

$$P_u = \frac{23 \cdot d}{23 \cdot d - 12 \cdot H} \frac{n \cdot A_s \cdot f_{sy} \cdot \pi \cdot \phi_1}{r_i} \quad (8)$$

4. 3 提案した耐力算定式の精度

せん断耐力算定式と提案した曲げ耐力算定式で求められた計算値と実験値の比較を表-3に示す。破壊モードを考慮して、Case1-1はせん断耐力算定式、Case1-3は曲げ耐力算定式から求めた計算値 P_c を実験値と計算値の比率に用いた。Case1-1は P_u/P_c が1.0、Case1-3は P_u/P_c が0.94であり、ほぼ一致した。

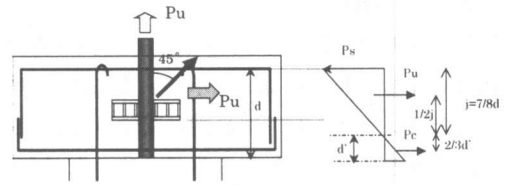


図-14 力の釣り合いの仮定

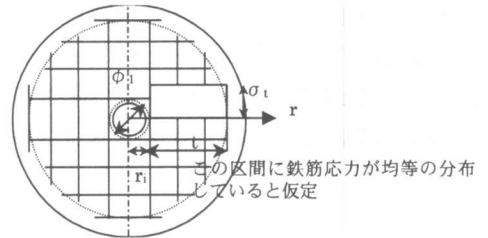


図-15 主鉄筋の仮定

表-3 耐力算定式の精度

試験体 番号	実験値 Pu	計算値 せん断	Pc 曲げ	比率 Pu/Pc
Case1-1	2152	2151	3970	1.00
Case1-3	1207	1800	1290	0.94

5. まとめ

本研究は、破壊モードが異なる2つの模型実験を行い、設計手法を提案した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1)破壊モードは、上端主鉄筋が少ないと曲げ破壊のモードとなり、上端主鉄筋が多いとせん断破壊のモードとなる。せん断破壊した試験体は杭の鉄筋をせん断補強筋として考慮することができる。
- (2)破壊モードを整理し、せん断耐力算定式と曲げ耐力算定式を提案した。本提案式による計算値と実験値は一致した傾向にあった。

参考文献

- 1)齋藤修一、松島学、小宮山茂樹、大浦篤、三島徹也：1本杭に支持されたフーチングの引抜き荷重実験、第54回土木学会年次学術講演会、第5部、pp540-541、1999
- 2)田邊成、吉井幸雄、松島学、三島徹也：4本杭に支持されたフーチングの引抜き・押抜き模型実験におけるせん断補強筋の効果、コンクリート工学年次論文報告集、vol18、No.2、pp707-712、1996