

送電線鉄塔基礎における実規模試験と設計

Real scale experiments and designs of footings for power transmission towers

吉井幸雄 田邊 成

Yukio Yoshii and Shigeru Tanabe

1.はじめに

東京電力（株）の大型送電線は山岳地を通過することが多いことから、その基礎について軟岩を主対象とした実規模の破壊試験を実施してきている。これは、試験室内での模型実験や、フィールドにおける小規模の実験における傾向が、必ずしも実規模において同等とは言えないことによる。スケールの影響が、地盤においてどのようなものか、現状では不明な点も多いが、地盤の変形特性や、コンクリートのせん断耐力・引張耐力等については積極的にスケールの影響を設計に取り入れている。本報では、当社が進めてきた実規模試験の概要と、設計での考え方を簡単に報告する。

2.斜面上の深礎基礎の水平支持力に対する実験

送電鉄塔基礎は図-1に示すような引揚、圧縮、水平の3方向の荷重を受ける。また、山岳地に立脚することが多く、荷重に対する抵抗性能、施工性、経済性等から深礎基礎を用いることが多い。しかし、斜面における水平支持力については必ずしも明確な設計法が無かったことから、当社では、深礎基礎の水平支持力について独自の検討を実施し、独自の設計法を適用している。図-2に実規模試験の概要を示す。図-2の上に示した試験は今市市において行った試験であり、粘土と風化した軟岩（Soft Rock）からなる地層において実施した。主たる試験体はほぼ破壊に至ったのは右側の躯体径3mの試験体である。また、図-2の下に示した試験体は長岡市において実施したものであり、砂およびシルト混じり砂（Sandy Soil）からなる地層において実施している。両者は、後述するように変形性能、極限耐力において大きな差異があるが、同じ設計法によってほぼシミュレートできる。

図-3に地表面に生じたクラックの状態を示す。クラックは試験体近傍、地表面付近で明確、試験体から離れ、地中に進むに従って不明確となっているが、このクラックから破壊面を図-4上図に示すようなくさび型のすべり破壊面が形成されているものと考えている。さらにこれを図-5に示すような単純化したすべり面を仮定し、図-6下図に示すようなバイリニア型の非線形弾性支承上の梁として計算をすると、図-6上図に示したような試験結果に整合した結果が得られる。ここでは、地盤の強度定数は三軸試験の結果から求め、変形係数は平板載荷試験結果から得られた結果に、躯体の投影断面積の平方根と平板の直径の比率の $3/4$ 乗に比例するものとして計算している。また、別途中部電力（株）において径1m、長さ4mの深礎基礎模型において、強風化岩盤で同様の実験・解析を実施しているが、整合のとれた結果が得られている。

3.深礎基礎の鉛直支持力に対する

3.1深礎基礎の鉛直押し上げ試験

送電鉄塔基礎は前述したように、引揚力も受ける。全圧縮荷重の70%程度相当する引揚荷重が加わるために、水平同様、この引揚力に対する支持力をえるために基礎体が大きくなることも非常に多い。そこで、引揚に対する耐力についても実規模に近いスケールで実験を行っている。図-7は当社設計における深礎基

*非会員 東京電力（株）送変電建設本部

*正会員 東京電力（株）送変電建設本部

礎の引揚耐力の設計法について示したものである。図-8は風化軟岩において躯体径2.5m、躯体長8.0m、躯体天端の土被りを5mとした実規模試験体における地盤計測から推定したせん断面ひずみの集中した箇所を示した。土被りが小さい場合は図-9の(b)や(c)のようなせん断すべりが生ずるが、土被りが大きくなると(a)のようなせん断法によるすべり面が实际的であると筆者らは考えている。また、設計においては、三軸試験の結果から地盤の強度定数を求めると同時に、既往の実験の結果から、せん断強度の上限値をN値等から別途設定している現状にある。

3.2 地盤補強型深礎基礎の鉛直押し上げ試験

軟岩において形状の異なる基礎について比較した実験として地盤補強型深礎基礎の実験がある。試験体の形状は図-10に示す通りである。地盤補強型深礎基礎は先に述べた深礎基礎のせん断力に棒状の補強材による補強効果を加算したもので、地盤の補強効果の考え方を図-11に示す。この場合補強効果は中規模(径1.5m、長さ6m)の試験体と実規模(径2.5m、長さ8m、土被り5m)の試験体とはほぼ同様の傾向を示しているが、小規模の試験体(径40cm、長さ1.2m)においては図-12示すような地盤のせん断面が大きくなる効果が見られる為に補強効果が大きくなっている。これは土被りの大きさに主に起因しているものと考えている。設計では、通常の深礎基礎同様三軸試験より必要な強度定数を求めて設計している。

4. 深礎基礎の鉄塔主脚材の定着に対する実験

地盤の問題を離れて、鉄筋コンクリート構造物について述べる。送電鉄塔の杭基礎では図-13のいかり材によって定着する。いかり材の定着においては、図-14に示すようなコーン状のせん断破壊が最も脆性的な破壊を示す。そこで、当社においてはこのせん断破壊メカニズムについて検討を進めてきており、その中でスケールの効果を設計で取り入れるようにしてきた。図-15はそのスケール効果を示したものである。縦軸は実験結果をスケール効果を考慮せずに設計耐力で除したもので、横軸はいかり材が埋め込まれる、フーチングの高さの $1/2$ を示す。フーチングの高さの $1/4$ 乗に比例して、単位面積当たりのせん断耐力が低下していると考えられる。

深礎基礎では図-16のリング状の支圧板によって定着する。支圧板定着においては同図に示すような割裂破壊が最も脆性的な破壊モードとなる。これは定着部が引き抜かれよう(もしくは押し抜かれよう)とする際に鋼材の中心から外側へ向かって内圧が生じ、この内圧によって深礎基礎の躯体が割裂破壊(引張破壊)を起こすものがある。このとき躯体径が大きくなると単位面積当たりの引張強度が低下することが実験的に分かっており、解析的にもこの現象を検討することが可能となりつつある。筆者らはこの点について破壊エネルギーの概念を用いて解析的に検討している。図-17は破壊エネルギーを用いた解析の概念図であり、図-18は解析におけるスケール効果を示した。縦軸は実験耐力をスケールの効果を見殺した設計耐力で除したものである。解析結果は実験結果と調和的であり、現状では躯体径が大きくなるに従い、解析結果よりやや大きめの $1/3$ 乗に比例して引張強度が低下するとして設計している。

5. おわりに

当社の送電鉄塔基礎に関連して、実規模実験の取り組みと、設計での考え方について簡単に報告した。このような機会であらためてスケール効果について考えると、未だ分からないことが多くことに気づく。これを解決するには、実規模に近い精度のよい試験を増やすと同時に、解析的な検討が不可欠と思われる。これは如何に実験を実規模で行っていても、実際の構造物通りに試験体を作ること、実際の荷重と同じような載荷が困難な場合が多いこと、実規模の試験は非常にコストを要するために大きな建設プロジェクトが無いと試

験を実施することが難しいこと、また試験体の数にも限られること等による。実際の地盤は非常に不均質でしかも地盤の傾斜、形状も様々であるが、試験ではシンプルな地層、傾斜、形状を選んで実施している。この点を補うためには精度が良くしかも容易にできる試験法と、その試験結果を用いた精度の良い解析手法の開発が必要と考えている。

6.参考文献

- 1) Yukio Yoshii : UHV pylon foundation design for mountainous areas—Establishment of design methods based on full scale tests,Rock Foundation proceedings of the international workshop on rock foundation tokyo/japan/30 Sep.1995,pp.47-56
- 2) 福島啓介,飯島政義,関野英男:深礎基礎の実規模引揚載荷実験,土木学会第50回年次学術講演会,1995.9,Ⅲ-418,pp.962-963
- 3) 片野正三,福島啓介,田邊成:地盤補強型基礎の開発,土木学会第49回年次学術講演会,1994.9,Ⅲ-518,pp.1026-1027
- 4) 桑原洋,田邊成,江黒充和,中谷登:実規模引揚載荷実験における地盤補強型基礎の挙動,土木学会第50回年次学術講演会,1995.9,Ⅲ-778,pp.1556-1557
- 5) Y.Sonobe,S.tanabe,K.Yokozawa,T.Mishima:Experimental Study on Size Effect in pull-out Shear using Full Size Footings,Size Effect in Concrete Structures E&FN SPON 1994 pp.105-116
- 6) 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,Vol.18,No.2,1996.7,pp.707-712
- 7) 飯島政義,吉井幸雄,広中了,松島学:支圧板付き鋼管の深礎基礎への定着に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.18,No.2,1996.7,pp.569-574
- 8) 齊藤修一,飯島政義,三島徹也:支圧板付き鋼管の深礎基礎への定着に関する数値解析,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.18,No.2,1996.7,pp.455-460

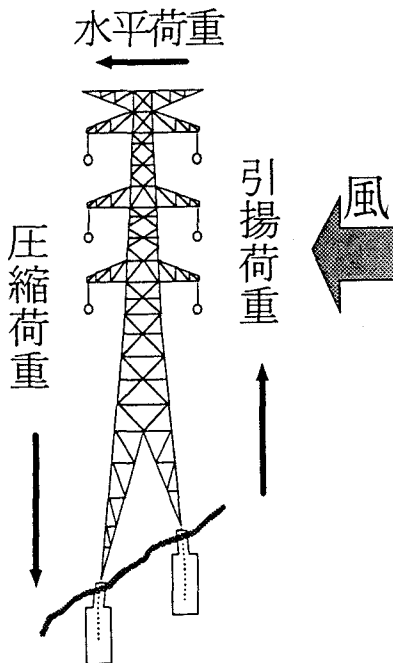


図-1 鉄塔に加わる荷重

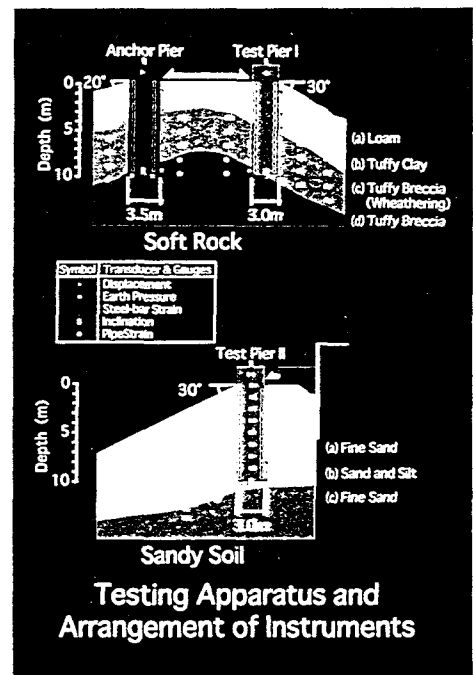


図-2 水平方向実規模載荷

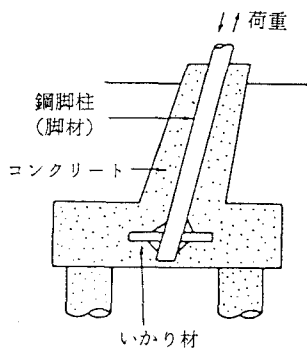


図-13 いかり材定着

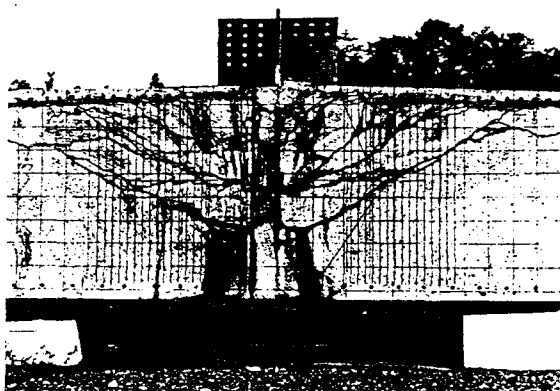


図-14 実規模引き抜き試験の破壊形状

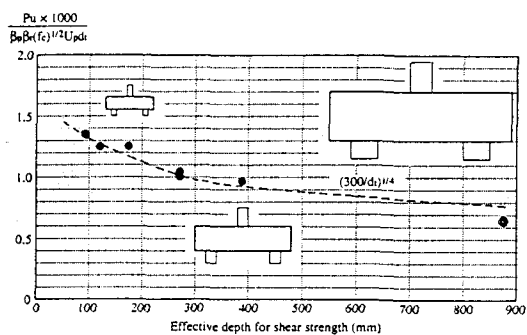


図-15 いかり材定着におけるスケール効果

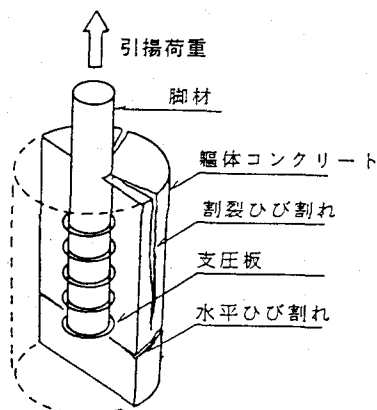


図-16 支圧板定着と割裂破壊

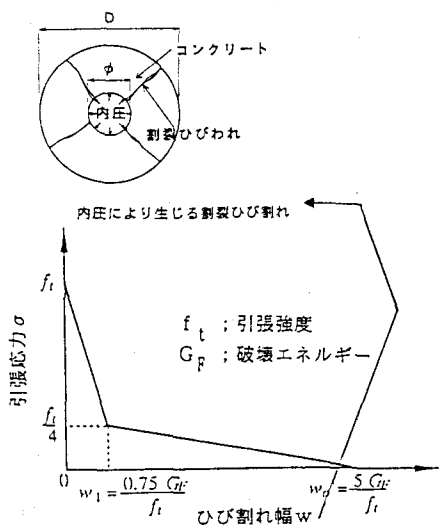


図-17 破壊エネルギーを考慮した解析法

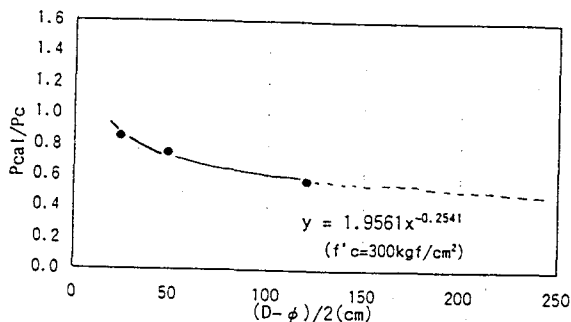


図-18 支圧板定着におけるスケール効果

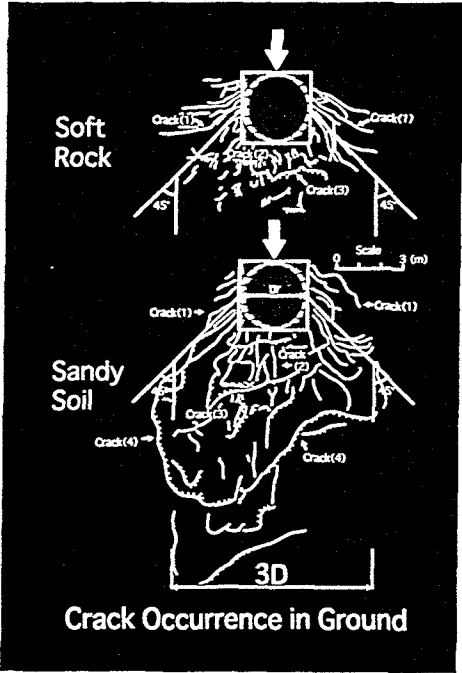


図-3 地表面のひび割れ状態

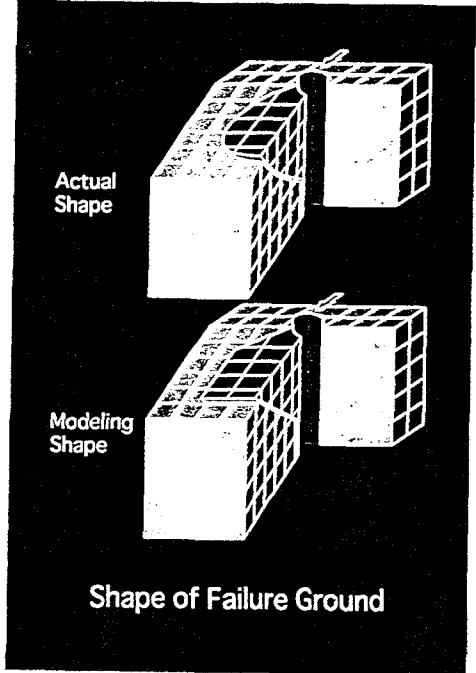


図-4 すべり面の想定とモデル化

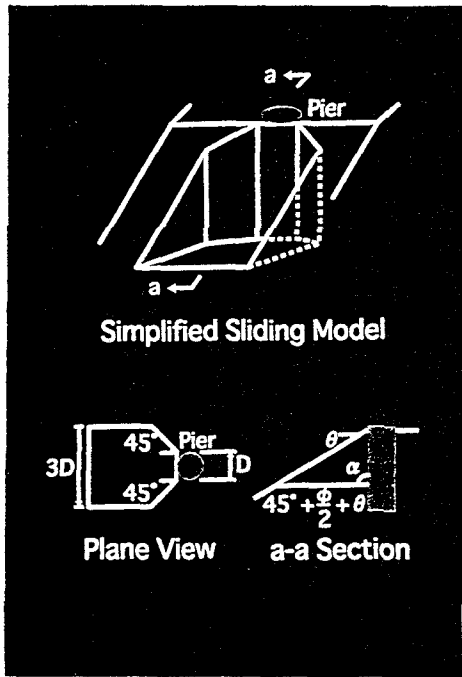


図-5 設計に用いるすべり面

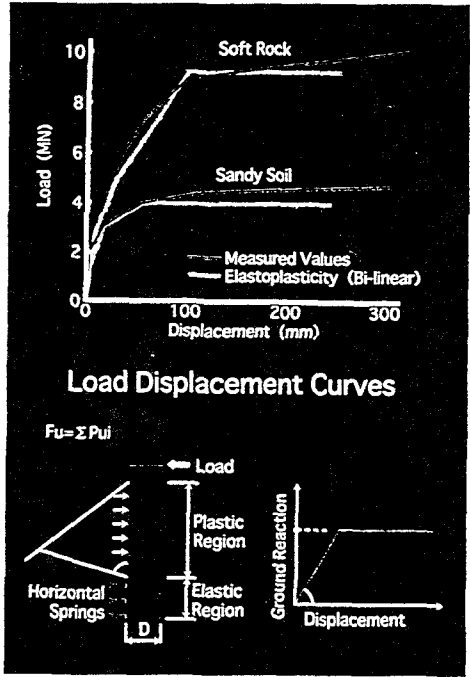


図-6 モデル化と計算結果

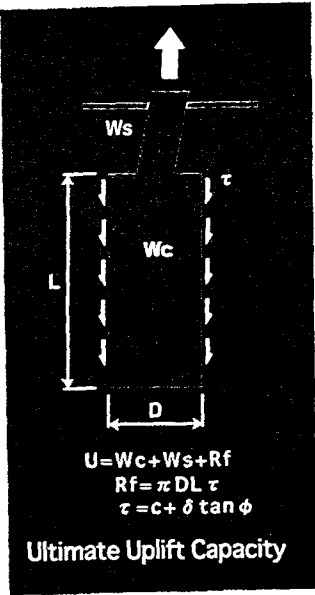


図-7 引き揚げ時の設計法

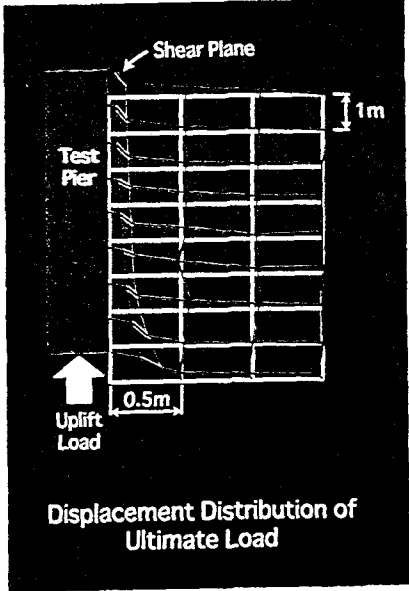


図-8 実規模試験結果のせん断面

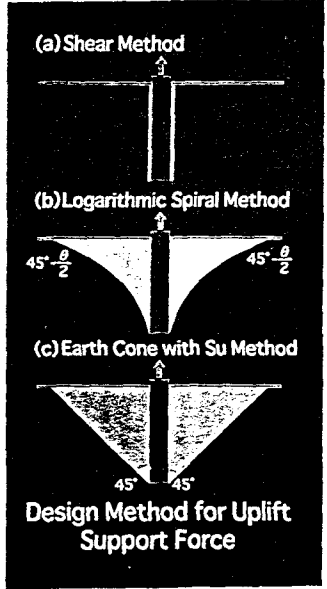


図-9 すべり面の考え方

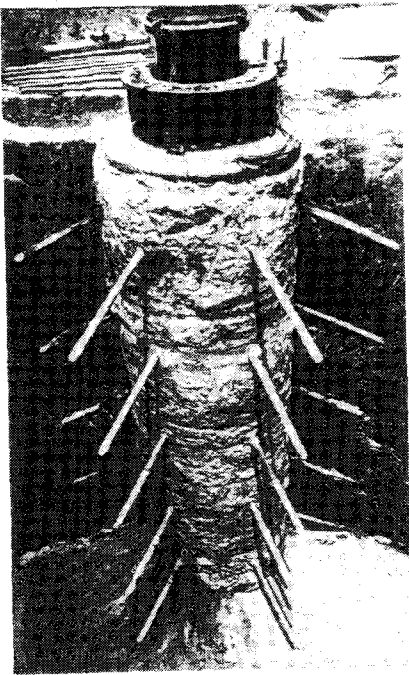


図-10 地盤補強型深礎試験体形状

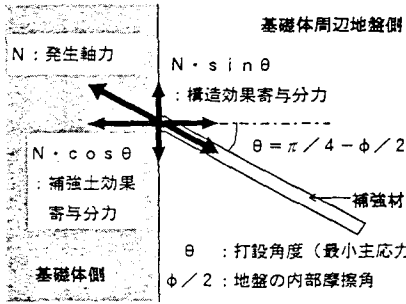


図-11 地盤補強型深礎の補強効果

全補強効果 ΔP_c は次式で与える。
 $\Delta P_c = \Delta P_r + \Delta P_s$

ΔP_r : 補強土効果による荷重増分

$$\Delta P_r = \sum N \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi$$

N : 補強材 1 本当たりの軸力

θ : 補強材打設角度

ϕ : 周辺地盤の内部摩擦角

ΔP_s : 構造効果による荷重増分

$$\Delta P_s = \sum N \cdot \sin \theta$$

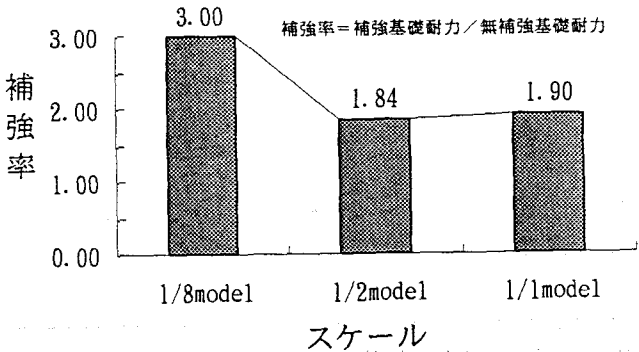


図-12 スケールと補強効果