

論文 支圧板付き鋼管の深礎基礎への定着に関する数値解析

齊藤修一*¹・飯島政義*²・三島徹也*³

要旨：山岳地の送電用鉄塔基礎には深礎基礎が多く用いられている。送電用鉄塔基礎は一般の土木構造物と異なり引揚荷重が作用する特徴を有している。鉄塔脚の深礎基礎への定着方法は、支圧板と呼ぶリング状プレートを節状に取り付けた鉄塔材（以下主脚材という）を埋め込むもので、既往の模型実験の結果、主脚材を中心とした放射状の割裂破壊を起こすことがわかっている。本研究は、破壊力学に基づき、コンクリートのひびわれ幅と引張応力の関係を割裂ひびわれに用いて、引揚力を受ける深礎基礎の定着耐力を数値解析により評価したものである。

キーワード：定着耐力、割裂破壊、破壊力学、軸対称モデル、引張強度

1. はじめに

送電用鉄塔基礎の深礎基礎への定着方法は、支圧板と呼ぶリング状プレートを節状に取り付けた主脚材を埋め込むものである。深礎基礎は、軸方向に主筋を配置しており、円周方向には主筋を取り囲むように帯鉄筋を配置しているが、その鉄筋量は少ない。主脚材に引揚荷重が作用した場合、破壊モードは図-1に示す割裂破壊であることが明らかにされている。本研究は、破壊力学に基づいたコンクリートのひびわれ幅と引張応力の関係を割裂ひびわれに用いて、引揚力を受ける深礎基礎の定着耐力を数値解析により評価したものである。

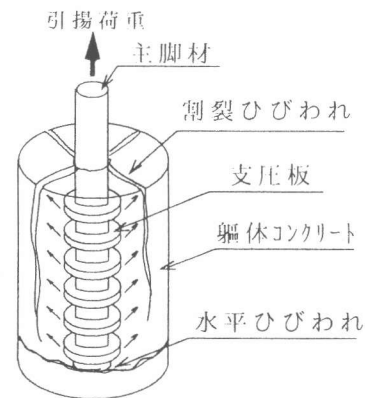


図-1 破壊モード

2. 数値解析手法

2. 1 解析方法

支圧板定着方式による脚材の引き抜き試験結果[1,2]は、軸方向に数本の割裂ひびわれが発生するため、円周方向に一樣なひずみ状態を仮定した軸対称解析は適用できず、3次元解析が必要となる。しかしながら、躯体周方向に割裂ひびわれを考慮して平均化した応力-ひずみ関係の構成則を導入すれば、軸対称解析を利用して引揚力によって生じる割裂ひびわれによる3次元現象を擬似的に表現することが可能である。本研究では、既往の実験結果から割裂ひびわれを4本とし、躯体周方向の応力-ひずみ関係に破壊力学に基づいたコンクリートの引張軟化曲線を利用した軸対称モデルを採用した。

2. 2 躯体周方向の構成則の求め方[4,5]

躯体周方向の応力が一樣であると仮定すると、平均応力-ひずみ関係は次のように求めること

*¹ 東電設計(株)送変電土木部主任（正会員）

*² 東京電力(株)送変電建設本部主任、工修（正会員）

*³ 前田建設工業(株)技術研究所主任研究員、工博（正会員）

ができる。仮想ひびわれの応力-ひびわれ関係を $\sigma_n=f(W)$ とすると、図-2(a)のように半径方向 r の位置に躯体周方向応力 σ_n が作用している時の全変形量 δ は、ひびわれ本数分のひびわれ幅とひびわれのないコンクリート部の変形量の和からなる式(1)で与えられる。

$$\delta = nW + \frac{\sigma_n}{E} 2\pi r = ng(\sigma_n) + \frac{\sigma_n}{E} 2\pi r \quad (1)$$

ここに、 n :ひびわれ本数、 E :コンクリートのヤング係数、 W :ひびわれ幅で躯体周方向応力 σ_n の逆関数 $W=g(\sigma_n)$ で表される。したがって、平均ひずみ $\bar{\epsilon}$ は、式(2)で示される。

$$\bar{\epsilon} = \frac{\delta}{2\pi r} = \frac{ng(\sigma_n) + \frac{\sigma_n}{E} 2\pi r}{2\pi r} \quad (2)$$

式(2)を σ_n について解くことによって、躯体周方向の応力-ひずみ関係を求めることができる。具体的には、応力-ひびわれ幅関係はひびわれ発生前とひびわれ発生後の図-2(c)に示す2直線の集合で与えられるので、それらの内の1本の直線を $\sigma_n=aw+b$ (a, b は材料定数)とおけば、式(3)になる。

$$\sigma_n = \frac{1}{\frac{n}{2\pi ar} + \frac{1}{E}} \left(\bar{\epsilon} + \frac{nb}{2\pi ar} \right) \quad (3)$$

上述の手順で軟化特性を構成する3直線全てに適用すると、それに対応する平均ひずみ-応力関係が得られる。結局、解析で用いる平均応力-平均ひずみの関係は、図-2(d)に示す3直線でモデル化される。

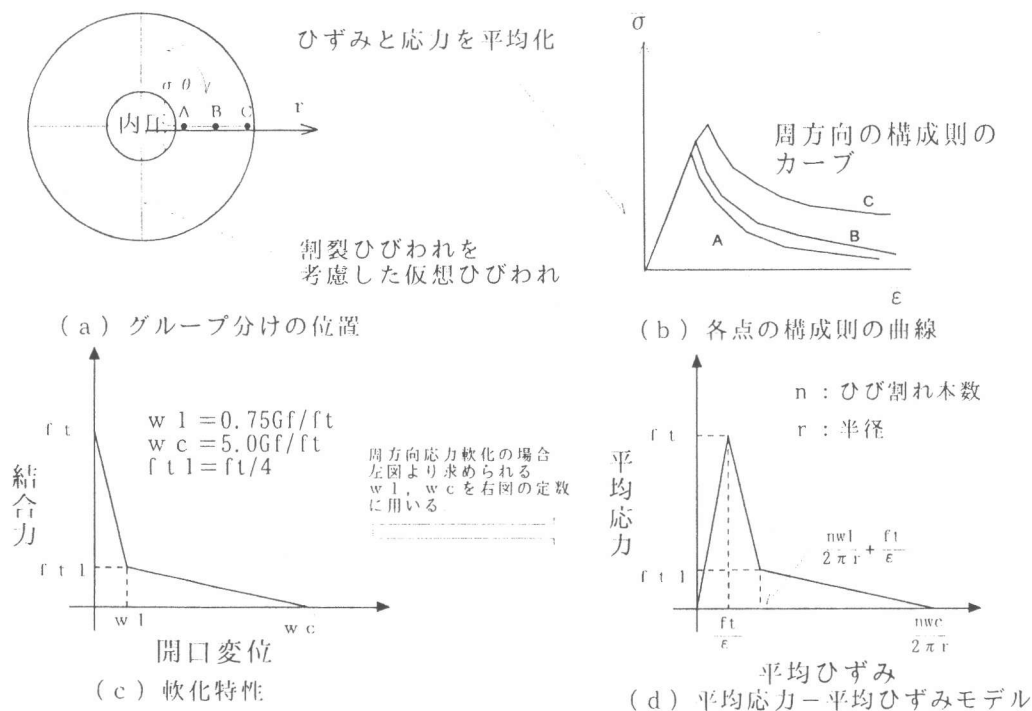


図-2 モデル化の方法

2. 3 モデル化の方法

解析にあたり、主脚材、支圧板、軀体コンクリート部を図-3に示のようにモデル化した。解析モデルは図-4に示すように軀体コンクリート部、主脚材部、支圧板部は4節点のアイソパラメトリック要素を用い、鉄筋はトラス要素を用いてモデル化した。主脚材および支圧板とコンクリート界面および鉄筋とコンクリートの界面には4節点アイソパラメトリック接合要素を設け、相対すべりを考慮した。引揚载荷は軸方向鉄筋の底部を鉛直方向に拘束し、主脚材頂部に強制変位を与えることによって解析を行った。以降に各モデル化について言及する。

(1) 主脚材部

主脚材部と支圧板部は支圧板の塑性変形を考慮できるよう、Von-Misesの応力-ひずみ関係の降伏条件[6]に基づいた弾塑性モデルを用いた。ただし、解析の安定性を高めるため、曲げ剛性と降伏モーメントが同一になるように剛性と降伏強度を調整して、要素分割は支圧板の厚みを実際より大きく設定した。

(2) 軀体コンクリート部

軀体コンクリート部の周方向の関係は、割裂ひびわれの3次元効果の考慮するために、図-2に示したように軀体周方向の応力-ひずみ関係は周方向に平均化したものを用いる。コンクリートの面内方向の構成則は、Drucker-Pragerの弾塑性モデルを適用し、応力ひずみの関係が土木学会のコンクリート標準示方書に示された関係と一致するように設定[7]した。内部ひびわれは分散ひびわれモデルで表現するものとした。ひびわれ発生後の軟化特性は図-2(c)に示す2直線型のモデル化を行った。

(3) 軀体コンクリート部と主脚材および支圧板の界面

支圧板と軀体コンクリート部の相対ズレ(摩擦作用)が考慮できるよう、支圧板及び主脚材とコンクリートの間には接合要素を図-5に示すように配した。接合要素の材料モデルはクーロンの摩擦モデルを用いた。実験では主脚材にグリースを塗布し摩擦を切っているので解析モデルもこれに準じた。主脚材とコンクリート間の接合要素は、摩擦ゼロを表現するために、数値計算上ゼロに見なせる小さいせん断剛性を有する要素を用いてモデル化した。鉄筋とコンクリートの間の接合要素には、付着要素を用いてモデル化を行った。

2. 4 軸対称構成モデル

ひびわれ発生前は弾性体と考える。面内方向にひびわれが入った場合のひびわれと直交する方向の材料特性は、要素内に1本のひびわれを仮定した場合の応力軟化特性に従うとした。なお、このように仮定した場合、要素寸法が解析結果に影響を及ぼす恐れがあるが、破壊モードから判断して終局と密接に関連しているのは面外ひびわれであり、面内ひびわれのモデル化の影響は比較

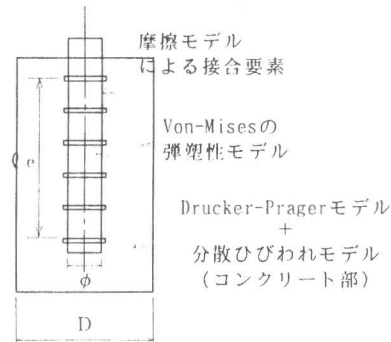


図-3 モデル化図

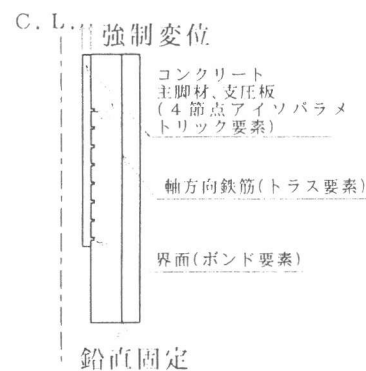


図-4 解析モデル

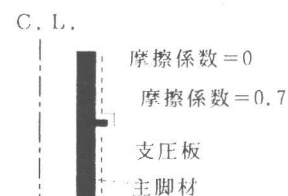


図-5 摩擦のモデル

的少ないと考えられる。面外方向（ θ 方向）にひびわれ(割裂ひびわれ)が入った場合は、躯体周方向に平均化して求めた応力-ひずみ関係に従うとした。また、両方向（面内、面外）にひびわれが生じた場合の両ひびわれの直交方向の特性は、それぞれ独立に、上記の応力-ひずみ関係に従うこととした。なお、せん断剛性については、ひびわれ発生前の1/10に低下するものと仮定した。

2. 5 材料定数[4]

ひびわれの入ったコンクリートの材料定数を表-1に示す。躯体周方向のモデルは図-2(a)(b)に示すように半径方向にA, B, Cと3等分割して設定した。

表-1 コンクリートひびわれ発生後のモデル

ケース	fc (kgf/cm ²)	ft (kgf/cm ²)	E (kgf/cm ²)	GF (kgf/cm)
case1, 2	300	26.1	278000	0.1

注)：表内の記号は図-2参照

3. 既往の実験結果との比較

3. 1 既往の実験

既往の実験[2]のうち解析を行ったものは、表-2に示すように主脚材の定着長 l_e を因子としたものである。実験では、定着長が長くなると躯体上部からひびわれが進展し、逐次破壊の様子が見受けられる。この現象を本数値解析によりシミュレートできるか計算を行った。

表-2 既往の実験結果と数値解析結果の比較

ケース	脚材径 ϕ (cm)	躯体径 D (cm)	脚材定着長 l_e (cm)	ひびわれ 荷重Per (tf)	コンクリート強度 (kgf/cm ²)		最大耐力 (tf)			Pue*/Pua
					解析値fc'a	実験値fc'e	解析値Pua	実験値Pue	補正:Pue*	
case1	12	60	96	77.5	300	265	171	160	174	1.02
case2	12	60	192	75	300	290	320	307.5	315	0.98

ここで、補正:Pue*=(fc'a/fc'e)^{2/3}×Pue

3. 2 解析結果

実験値は、表-2に示すようにコンクリート強度が正確に設定できなかったため、解析のコンクリート強度 $f'c=300\text{kgf/cm}^2$ に合わせるように最大耐力の補正[3]を行った。実験による最大耐力と解析による最大耐力の比は0.98~1.02となっており、最大耐力はシミュレートできていることがわかる。

次に荷重と変位の関係を図-6に示す。

図には基本ケースであるcase1と定着長の長いcase2の引揚荷重と主脚材の躯体

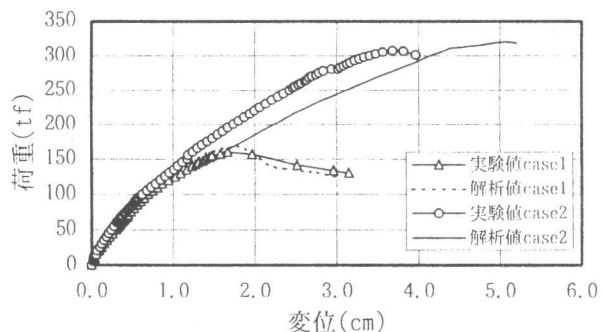


図-6 荷重-変位関係

コンクリートからの抜け出し量の関係を示した。ひびわれ発生前のコンクリートが弾性状態と考えられる荷重75tf程度まではいずれのケースも解析値と実験値は一致している。定着長の短いcase1は最大荷重以降も実験値と解析値の荷重と変位は一致しているが、case2はひびわれ発生後に解析値の方が多少変位量が大きくなっているものの、概ね一致していることがわかる。図-7にcase1の最大荷重時の面内の内部ひびわれを示す。図中の実線は試験体を切断して内部のひびわれを観察し、ひびわれ方向を記入したものであり、解析でひびわれた要素に'- '印を表示した。実験でのひびわれ角度と解析から得られたひびわれの要素を連ねた角度は45度前後となっており、支圧

板から躯体コンクリート部へ伝達される合力の作用方向は実験値も解析もほぼ同じである。図-8はcase1の躯体周方向の割裂ひびわれ進行状況の解析値を示したものである。格子状('+'印)を表示した部分は面外方向にひびわれた要素である。図中の荷重50tfは実験の割裂ひびわれ確認前の割裂ひびわれ状況であり、171tfは最大荷重時であり、100tfはその間の状態である。割裂ひびわれは上部から下部へ進展していることがわかる。図-9はcase1の実験での割裂ひびわれの進展状況を載荷荷重毎に示したものと、解析から求めた割裂ひびわれの進行状況を比較したものである。数値解析による結果と実験でのひびわれ進展荷重はほぼ一致している。

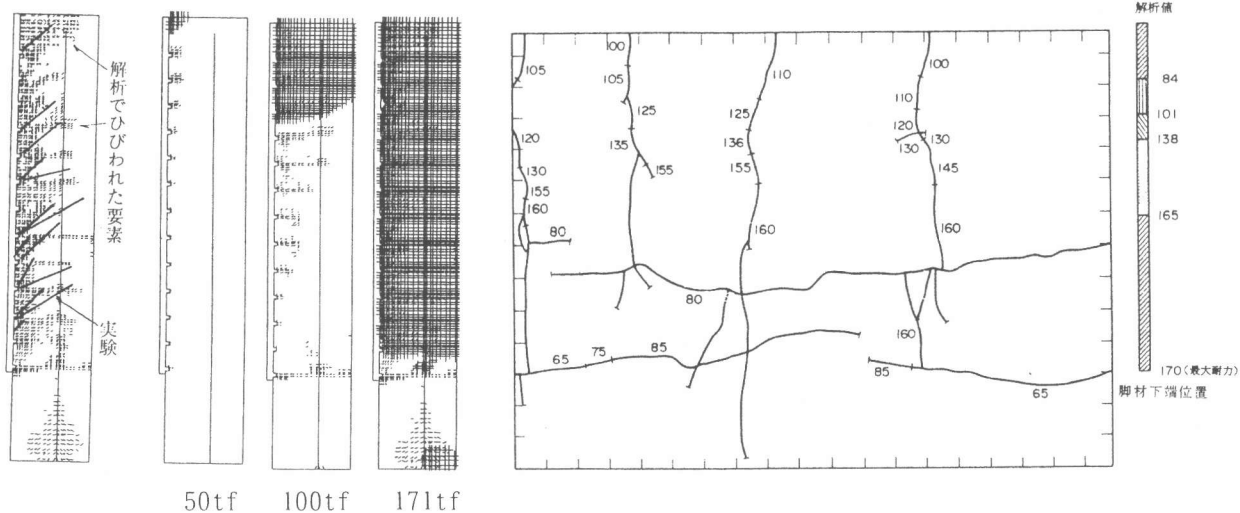


図-7 内部ひびわれ (case1-実験, 解析)
 図-8 躯体周方向の割裂ひびわれ (case1-解析)

図-9 割裂ひびわれの進展 (case1-実験, 解析)

主脚材のひずみ分布を図-10に示す。実験は図-1に示した支圧板の間にひずみゲージを配置し、このひずみ分布の勾配から各支圧板が分担している荷重を求めている。図からcase1でもcase2もほぼ同じような分布形状になっており、支圧板の荷重分担をシミュレートできている。特に、case2はひずみ分布の形状が上部ではほとんど勾配がなく荷重を分担していない状態、言い換えると逐次破壊を生じているが、この傾向を解析でも表現することができている。軸方向鉄筋のひずみ分布を図-11に示す。荷重は脚材から支圧板、コンクリートを介して軸方向鉄筋に伝達されるので最上部は荷重が伝達されないためゼロになる。また、各支圧板から順次荷重を伝達しているため下部になるほどひずみは大きくなる。この結果は、実験とも一致している。最大荷重の軸方向鉄筋のひずみ分布状況を見ると、分布に凹凸が見られるが、これは、図-1に示した水平ひびわれがこの位置に発生しているため、軸方向鉄筋のひずみが一様になっていないことを示している。

4. まとめ

コンクリートの引張軟化特性を考慮して、深礎基礎に主脚材を取り付けたときの破壊モードである割裂破壊の数値解析を行った。本構造物は帯筋の量が少ないことから無筋コンクリートと考えられる。無筋コンクリートを定量的に評価する引張軟化を考慮した数値解析を行い、割裂耐力を求めることができた。

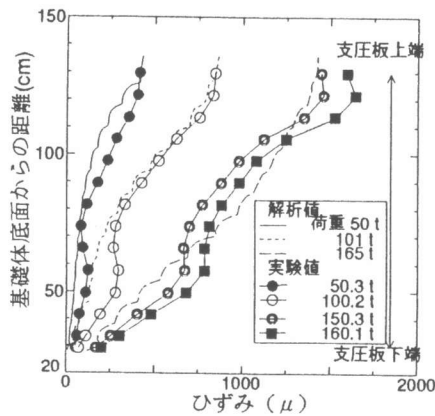
本研究で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 本数値解析手法により、既往の実験結果の荷重と変位関係をシミュレートすることができた。

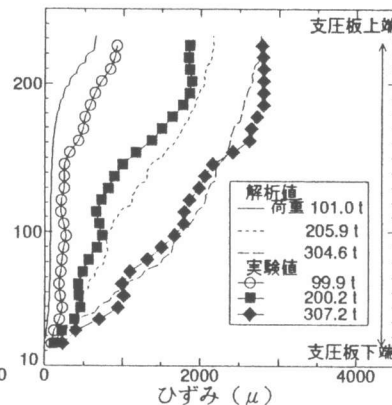
特に、最大荷重時には主脚材の上部はひずみ分布勾配がなく、支圧板が荷重分担していない現象が一致した。

(2)荷重が大きくなるにつれて割裂ひびわれが上部から進展していく逐次破壊の状況をシミュレートできた。さらに、躯体長が長い場合でもシミュレートすることができた。

以上のように、コンクリートの割裂ひびわれを引張軟化関係を用い、周方向に応力-ひずみ関係を平均化したモデルを用いた疑似3次元モデル解析で表現できることがわかった。今後、その他の実験で得られているコンクリート強度と最大耐力の関係、躯体径と最大耐力の関係等を数値解析から解明し、耐力算定式へ反映することを考えている。

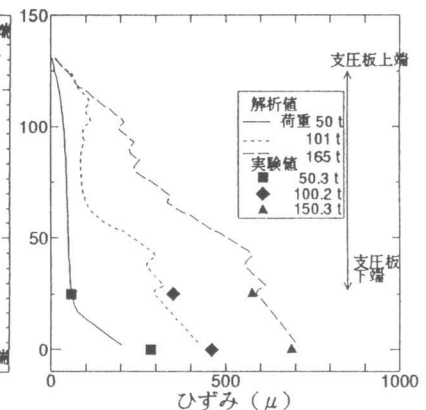


(a) case1



(b) case2

図-10 脚材のひずみ分布



(a) case1

図-11 軸方向鉄筋のひずみ分布

[謝辞]本解析において随時適切な指導をしていただいた東京大学前川宏一助教授に厚く感謝いたします。

参考文献

- [1]奥山一夫, 吉井幸雄, 松島学, 横沢和夫:送電用鉄塔深礎基礎における鋼脚柱定着設計法について、土木学会第41回年次学術講演会第5部、pp. 269~270.、1986. 11
- [2]広中了, 田邊成, 三島徹也:支圧板付き鋼管の定着耐力に関する実験、土木学会第50回年次学術講演会第5部、pp. 798~799.、1995. 9
- [3]斉藤修一, 吉井幸雄, 飯島政義:支圧板付き鋼管の定着耐力算定方法に関する検討、土木学会第50回年次学術講演会第5部、pp. 800~801.、1995. 9
- [4]内田裕市, 六郷恵哲, 小柳洽:コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討、土木学会論文集、No. 442/V-16, pp. 101-107、1992. 2
- [5]二羽淳一郎, Nasra ZAREN, 田辺忠顕:破壊力学に基づくコンクリートはりのせん断強度寸法効果解析、土木学会論文集、No. 508/V-26, pp. 45-53、1995. 2
- [6]山口柏樹:弾・塑性力学、森北出版、pp. 201-202、1975
- [7]宮下丘, 速水由紀夫:塑性論より導いたコンクリートの応力-ひずみ関係、RC構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集、pp. 19-22、1984. 12