

論文 深礎基礎に埋め込まれたアンカーに関する数値解析

石垣 洋*1・齋藤 修一*2・松島 学*3・関 博*4

要旨：山岳地の送電用鉄塔では、多くは深礎基礎を適用している。現在までに、深礎基礎にアンカーを取り付けた定着の適用性を検討するため、鉄塔基礎を模した円筒コンクリート躯体に埋め込まれた脚材の引き抜き試験を行ってきた。本研究では、構造体の耐力および内部挙動を破壊力学に基づいた擬似 3 次元非線形有限要素により解析し、既往の実験をシミュレーションし、その解析モデルの妥当性を検証したものである。

キーワード：アンカー、割裂破壊、破壊力学、数値解析

1. はじめに

山岳地の送電用鉄塔は、主に深礎基礎が多く適用されている。深礎基礎への鉄塔脚材の定着は図-1(a)に示すように支圧板と呼ぶリング状プレートを節状に取り付ける方法を適用している¹⁾。一方、脚材を杭基礎等のフーチングに定着する場合は図-1(b)に示すように脚材の先端に十字型に配したアンカーを取り付ける方法を適用している²⁾。しかしながら十分な現場調査が困難な場合、基礎のタイプを施工時に変更できることが望まれている。このような場合、脚材の定着の考え方が統一されている方が望ましい。上記の観点から脚材定着に整合性を持たせることを考え、深礎基礎へのアンカー材による定着手法への適用性について検討を行った。

筆者らは、今までに深礎基礎にアンカー材を取り付けた定着方式の模型実験を行い、その破壊形態は、図-1(a)のような支圧板方式での割裂破壊と同様であることを示している³⁾⁴⁾⁵⁾。

本研究は、アンカー材による定着方式の数値解析を行い、本解析手法の妥当性を推査したものである。数値解析は軸対称解析を用いること

とし、コンクリートのひび割れ幅と引張応力の関係を用いた構成則を周方向引張応力により発生する割裂ひび割れに適用した。

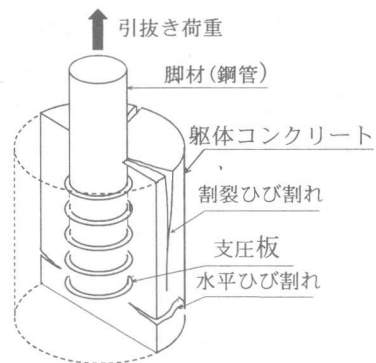


図-1(a) 支圧板方式による定着

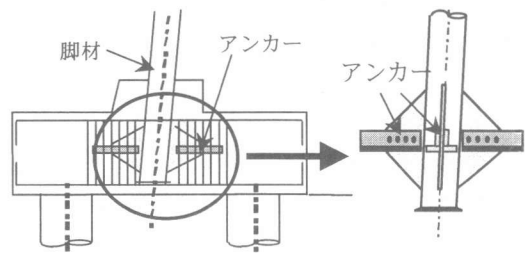


図-1(b) アンカーによるフーチングへの定着

*1 住友金属工業 (株) 工修 (正会員)

*2 東電設計 (株) 送変電土木部 工修 (正会員)

*3 東電設計 (株) 技術開発本部次長 工博 (正会員)

*4 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

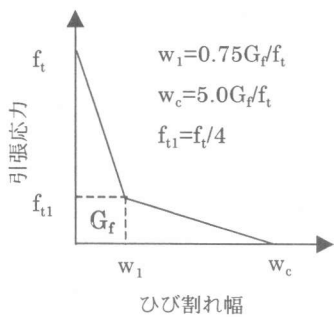


図-2 コンクリートの引張領域の構成則

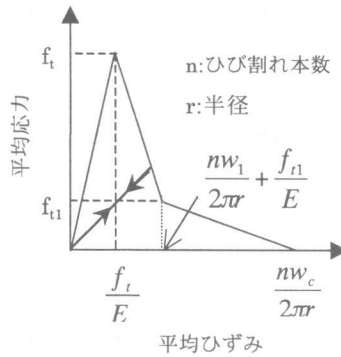


図-3 周方向の応力-ひずみ関係

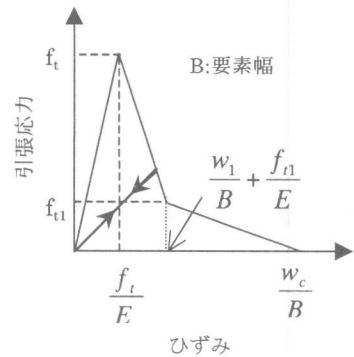


図-4 面内の応力-ひずみ関係

2. 数値解析手法

2.1 解析手法

アンカー方式により定着された脚材の引抜き試験結果³⁾⁴⁾⁵⁾は、図-1(a)に示したように数本の割裂ひびわれが発生する。破壊に至る挙動を数値解析で確認するには、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、厳密には3次元解析が必要となる。既往の支圧板定着方式による解析⁶⁾では、周方向に割裂ひび割れの発生を考慮した軸対称擬似3次元有限要素解析を用いて良好な結果を得ている。本研究でも破壊形態および耐力支配要因が同一であると判断し、支圧板定着方式と同様の軸対称解析を採用した。

本研究では、ひび割れ幅と引張応力の関係に、図-2に示すような2直線で表される引張軟化モデル⁶⁾を適用し、コンクリートの引張軟化特性を表現した。

2.2 割裂ひびわれに対する構成式

脚材の引抜きにより、躯体コンクリートには周方向に引張応力が発生する。各要素の周方向応力が引張強度を超えると割裂ひび割れが発生すると考えられる。割裂ひび割れ発生前の引張領域の応力-ひずみ関係は弾性とした。割裂ひび割れ発生後は周方向の応力が一樣であると仮定すれば、割裂ひび割れを含めた周方向の平均応力-ひずみ関係は、次のように求めることができる。

割裂ひび割れ発生以降、半径方向における座標 r の位置に応力 σ が作用している時の周方向変形量 δ は、ひび割れ本数分の割裂ひび割れ幅とひび割れないコンクリート躯体部の弾性変形量の和として与えられる。平均ひずみ ε は、変形量を r の位置での周長で除すことにより得られる。これより平均応力-ひずみ関係を式(1)で求めることができる。

$$\varepsilon = \frac{\delta}{2\pi r} = \frac{nw + \frac{\sigma}{E} 2\pi r}{2\pi r} \quad (1)$$

ここに、 n ：ひび割れ本数

w ：ひび割れ幅(mm)

E ：コンクリートの弾性係数(N/mm²)

図-2より、応力-ひびわれ幅関係は2直線で与えられるので、折れ点の応力と式(1)の関係から平均応力-平均ひずみ関係を求めることができ、それは図-3に示す3直線で表される。式(1)から周方向の平均応力と平均ひずみの関係は、半径 r に応じて与えられることがわかる。本解析では、躯体コンクリートを半径方向に複数のゾーンに分割し、各ゾーンの重心位置を r として平均応力と平均ひずみの関係を表した。

既往の実験⁶⁾によれば全試験体でひび割れの本数は2~4本であり、最も多い4本を解析のひび割れ本数に用いた。除荷時の応力-ひずみ関係は、図-3に示したように、原点に向かうものとした。

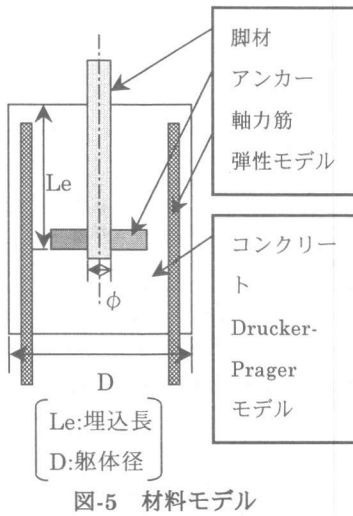


図-5 材料モデル

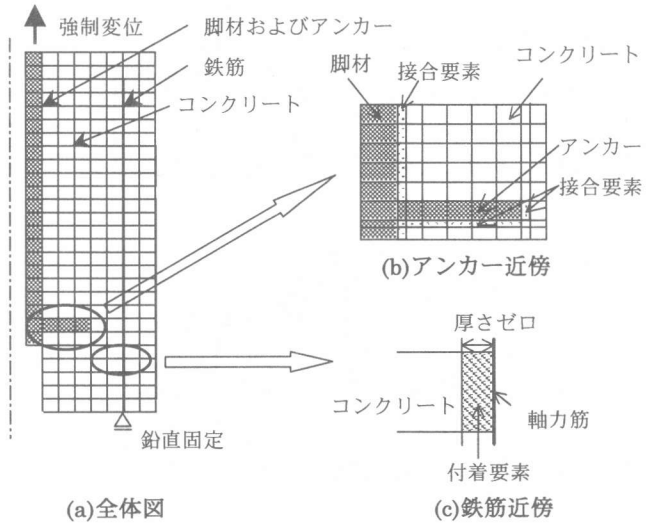
2.3 せん断ひび割れに対する構成式

面内の引張応力-ひずみ関係は、ひび割れが発生する前は弾性とした。せん断ひび割れ発生条件は、各要素の面内の主応力がコンクリートの引張強度に達した時とした。ひび割れが生じた場合、ひび割れと直交する方向の構成式は、図-2 に示したひび割れ幅を要素幅で除し、ひずみに換算することで得られる。その際、要素寸法が解析結果に影響を及ぼす恐れがあるが、模型実験の破壊形態^{3),4),5)}から、面外の割裂ひびわれが終局耐力に対して支配的であると判断できる。従って、面内ひび割れのモデル化の影響は比較的少ないと考え、ひび割れ幅をひずみに換算するための要素幅 B は、図-6 に示したコンクリート要素の平均的な値を用いた。面内の引張応力-ひずみ関係を図-4 に示す。除荷時の応力-ひずみ関係は、割裂ひび割れと同様に原点に向かって移動するものとした。ひび割れ発生後のせん断剛性については、ひび割れ発生前の $1/10$ に低下すると仮定した。

2.4 解析モデル

脚材、支圧板、軸力筋および躯体コンクリート部は図-5 に示すような材料モデルを用いた。

模型実験に用いた試験体は、図のように深礎基礎を模擬した円筒形コンクリート中にアン



(a)全体図

(b)アンカー近傍

(c)鉄筋近傍

図-6 要素分割と境界条件

カーを取り付けた脚材を埋め込み、軸力筋として躯体円周上に鉄筋を 16 本等間隔に配置した。実験はすべての軸力筋の先端を試験装置下部に固定し、脚材を上部に引き抜くように载荷した。

躯体コンクリート部、脚材部、アンカー部は 4 節点アイソパラメトリック要素を用い、軸力筋はトラス要素を用いた。脚材およびアンカーとコンクリートの界面および軸力筋とコンクリートの界面は相対すべりを考慮した。

要素分割を図-6 に示す。解析における引抜き载荷は、軸力筋の底部を鉛直方向に拘束し、脚材頂部に強制変位を与えることによって行った。収束計算には、修正 Newton-Raphson 法を用いた。各モデル化について詳細を以下に示す。

(1)脚材・アンカー部および軸力筋

脚材部とアンカー部は、破壊しないような形状にしたので弾性体とした。ただし、アンカーの形状は軸対称解析のため円形となることから、実際の形状のアンカーが等価な曲げ剛性を持つように弾性係数を調整した。

軸力筋は、模型実験で降伏していないことから弾性モデルを用いた。

表-1 コンクリートの材料定数

解析ケース	圧縮強度	引張強度	弾性係数	破壊エネルギー
	$f_c(N/mm^2)$	$f_t(N/mm^2)$		
Case1	20.3	2.00	17.3	0.1
Case2	20.7	2.03	17.6	0.1
Case3	21.0	2.05	17.9	0.1

表-2 解析結果

解析 ケース	試験体因子		終局耐力		P_{ue}/P_{ua}
	躯体径 D (mm)	埋込長 Le (mm)	実験結果	解析結果	
			P_{ue} (kN)	P_{ua} (kN)	
Case1	300	200	179	180	0.99
Case2	300	400	390	385	1.01
Case3	400	200	193	217	0.89

(2) 躯体コンクリート部

躯体コンクリートひびわれ発生後の軟化特性は前述の通り、図-2 に示す 2 直線型でモデル化した。圧縮領域の構成則は、Drucker-Prager の弾塑性モデルを適用し、応力-ひずみの関係は土木学会のコンクリート標準示方書に示された関係を用いた。面内ひび割れは、分布ひび割れモデルを用いた。

(3) 躯体コンクリート部と脚材・アンカーおよび軸力筋の界面

躯体コンクリートと脚材・アンカーの間には、図-6(b)に示したように、相対すべりを表現できるように数値計算上ゼロに見なせる小さなせん断剛性(=5N/mm²)を有する接合要素を用いた。躯体コンクリートと軸力筋の間には、付着要素を用いた。

2.5 材料定数および躯体のゾーン分割

コンクリートの材料定数を表-1 に示す。周方向構成式は、図-3 に示したように躯体コンクリートの各ゾーンの重心位置である代表半径 r で与えられるものとした。本解析では各ゾーンの幅がほぼ等間隔になるように、Case1、Case2 では 4 分割、Case3 では 6 分割とした。

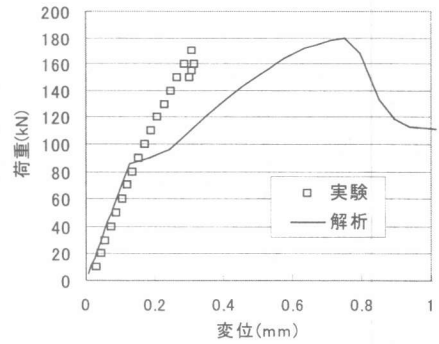


図-7(a) Case1：荷重変位関係

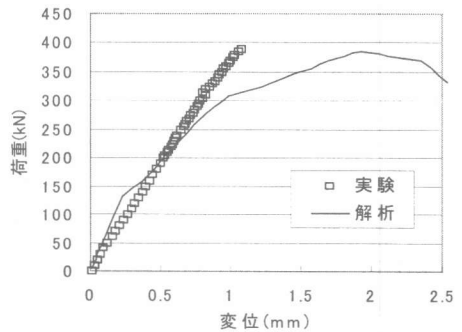


図-7(b) Case2：荷重変位関係

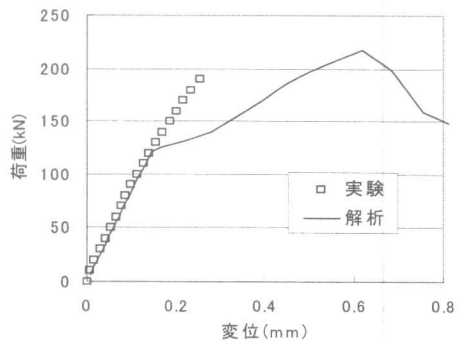


図-7(c) Case3：荷重変位関係

3. 解析結果および模型実験結果との比較

3.1 解析因子

既往の模型実験では、躯体径とアンカーの埋込長を定着耐力に影響を及ぼす因子としている³⁾⁴⁾⁵⁾。解析は、この 2 因子の影響を本研究内で網羅できるように 3 体の試験体を選択した。表-2 に選択した因子および解析結果を示す。

3.2 荷重-変位関係

各ケースにおける荷重-変位関係の解析結果と実験結果の比較を図-7(a)~(c)に示す。いずれのケースにおいても、解析から得られた終局耐力値は実験値と一致した。しかし、解析では途中で剛性の変化が見られるが、実験では認められない。この原因は、実験では脚材頂部と躯体上面間の相対変位を計測しているが、解析では脚材の抜け出し量の絶対値を求めているためと考えられる。実験は、躯体にひび割れが発生すると躯体コンクリートの伸びが大きくなるので、相対変位は大きくなり、途中で両方の結果の整合性が得られなくなったものと判断される。既往の脚材引抜実験によっても、脚材上部の変位測定では大きな剛性変化が見られたが、ひび割れの影響を受けない脚材最下部では確認されなかった。このことを考慮すると、解析結果は実験結果をよく説明していると言える。

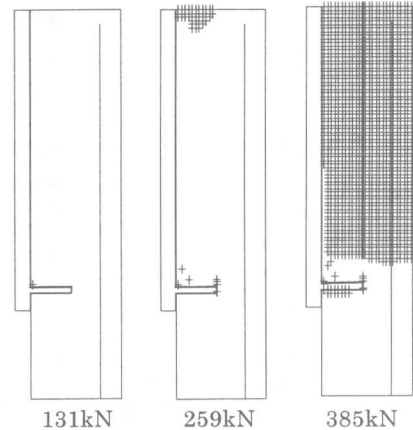
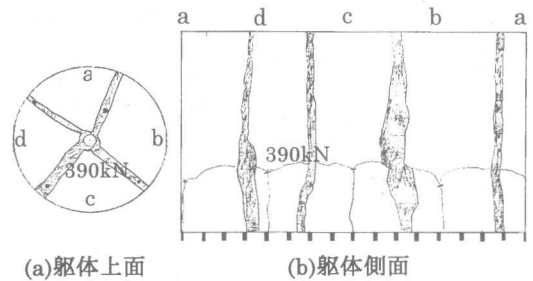


図-8 Case2：割裂ひび割れ進展状況



(a) 躯体上面 (b) 躯体側面

図-9 Case2：模型実験ひび割れ状況

3.3 割裂ひび割れ

図-8にCase2の解析における各荷重段階での割裂ひび割れの進展状況を示す。模型実験で観察されたCase2の躯体コンクリートの割裂ひび割れ発生状況を図-9(a),(b)に示す。両図から終局状態での破壊モードは、ともに割裂破壊であることがわかる。図-9(b)に見られるように、模型実験では割裂ひび割れが躯体コンクリート下部まで進展しているが、解析においても最大荷重以降では躯体下部まで割裂ひび割れが進展する結果となった。

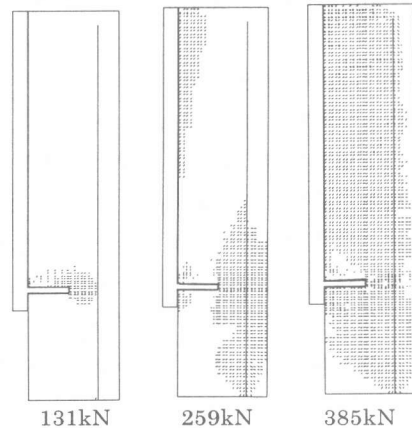


図-10 Case2：せん断ひび割れ進展状況

3.4 せん断ひび割れ

図-10にCase2の解析における各荷重段階でのせん断ひび割れの発生状況を示す。図に示すように、せん断ひび割れはアンカー周辺から発生し始め、次第に躯体上下部に向かって広がりながら進展している。模型実験で観察

されたCase2の躯体コンクリート側面のひび割れ発生状況を図-9(b)に示す。図に示すように、ほぼアンカー位置の躯体側面にひび割れが水平に生じている。解析によるせん断ひび割れの進展は、この結果を説明していると考えられる。

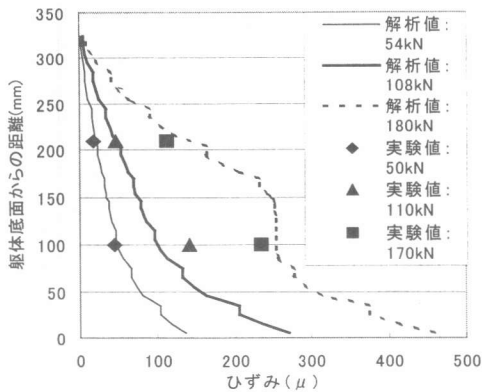


図-11(a) Case1: 軸力筋のひずみ分布

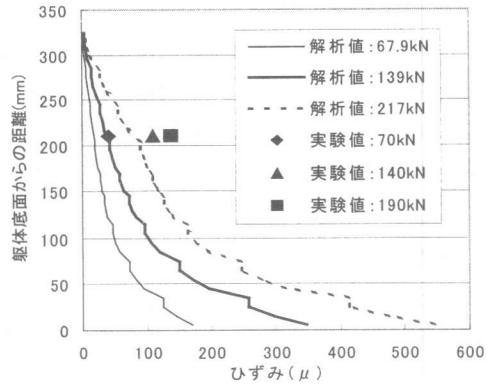


図-11(c) Case3: 軸力筋のひずみ分布

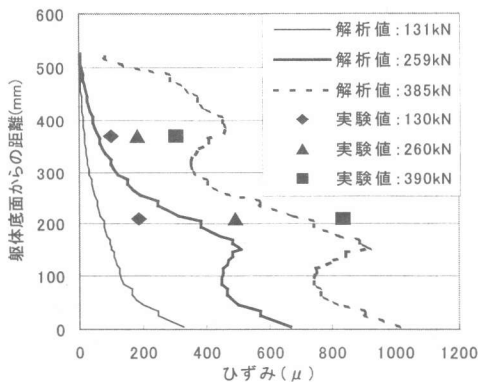


図-11(b) Case2: 軸力筋のひずみ分布

3.5 軸力筋のひずみ分布

軸力筋のひずみ分布を図-11(a)~(c)に示す。軸力筋の下部を固定しているのので、脚材に引き抜き荷重を載荷すると躯体コンクリート最下部に載荷荷重相当の力が生じる。その力が徐々に軸力筋を介してコンクリートへ伝達され、軸力筋上部に近づくほどひずみは小さくなる。実験と解析の両方で、この傾向が見られる。

4. 結論

アンカー定着方式による深礎基礎の引き抜き挙動を検証するために、破壊力学に基づいて擬似 3 次元有限要素解析を行った。本研究から得られた知見は以下の通りである。

(1)本数値解析手法によって既往の模型実験の荷重-変位関係をほぼシミュレートし、終局

耐力を予測することができた。

(2)破壊時に瞬時に割裂ひび割れが生じる脆性破壊が見られ、これは実験結果と一致した。

参考文献

- 1)吉井幸雄・飯島政義・斉藤修一・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，V-41，pp.129-140，1998.11
- 2)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方式による脚材定着手法に関する研究，土木学会論文集，V-41，pp.111-128，1998.11
- 3)石垣洋・斎藤修一・関博：深礎基礎に埋め込まれたアンカーの定着に関する実験，第 51 回セメント技術大会，pp.276-277，1997
- 4)高橋健一・石垣洋・斎藤修一・関博：深礎基礎に埋め込まれたアンカーの定着に関する研究，土木学会関東支部
- 5)斎藤修一・石垣洋・関博・松島学：深礎基礎に埋め込まれたアンカーの定着耐力に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol20，No.3，pp187-192，1998
- 6)吉井幸雄・飯島政義・斉藤修一・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解析的研究，土木学会論文集，V-41，pp.141-149，1998.11