## 地中送電用の推進洞道の耐力評価

竹中 聡1・阿南 健一2・吉本 正浩3

<sup>1</sup>非正会員 東京電力パワーグリッド㈱ 送変電建設センター (〒108-0023 東京都港区芝浦四丁目19-1) E-mail: satoshi.takenaka@tepco.co.jp

<sup>2</sup>正会員 東電設計株式会社 土木本部 技術開発部 (〒135-0062 東京都江東区東雲一丁目7-12) E-mail: jana@tepsco.co.jp

<sup>3</sup>正会員 東京電力パワーグリッド㈱ 工務部 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町一丁目1-3) E-mail: yoshimoto.m@tepco.co.jp

東京電力パワーグリッド株式会社における地中送電用洞道(トンネル設備)の多くは経年30年を迎えて おり、今後ますます老朽化が進行していくことが予想される.地中送電用洞道の維持管理では、補強の要 否判定を亀裂等による変状の評価を耐荷性能に基づき実施する方針としている.本報告は、推進洞道(コ ンクリート製推進管)を対象とし、耐力評価基準を設定することを目標とし、推進管の材料特性試験、載 荷試験などを行い、推進洞道の耐力評価方法について検討したものである.

Key Words : underground structure, jacking pipe, Jacking method, maintenance

## 1. はじめに

東京電力パワーグリッドの地中送電用洞道は,全体亘 長が約420kmあり,シールド洞道や開削洞道等の洞道種 別ごとに設定した判定基準に基づき点検を実施している <sup>10</sup>. 推進洞道は,主に(公社)日本下水道協会で規格化 されているプレキャスト鉄筋コンクリート管<sup>3)</sup>を用いて, 推進工法により構築した洞道であり,設備亘長は13.3km で,地中送電用洞道の設備量としては約3%程度に留ま るが,経年30年以上の設備や荷重増加によるものと思わ れるひびわれが発生している設備も確認されている.

地中送電用洞道は、供用期間を通して要求される機能 を維持する必要があり、そのため構造物の変状を早期に 発見し、変状の拡大および二次的な損傷を防ぎ、変状の 軽微な段階で補修等の必要な処置を講ずることにより延 命を図ることが重要である.

当社では精度良く推進洞道の耐力評価を行うことを目 標に材料特性試験や載荷試験などを行い,耐力評価のた めの構造計算モデルについて検討したので本稿にて報告 する.

## 2. 検討方法

## (1) 耐力評価にあたっての課題

推進洞道の構造計算による耐力評価を検討するにあた って、次のような課題が抽出された.

#### a) 材料特性

通常,コンクリートの物性試験に用いるコア供試体は 推進管とは異なり遠心成形は行なわれず,推進管のコン クリートと物性が異なることが考えられる.

推進管の鉄筋として用いられている鉄線は、応カーひ ずみ関係に明確な降伏点が見られない材料で、降伏応力 度も規格化されていないことから、鉄筋と異なる挙動と なっていることが考えられる.また、鉄線は表面に凹凸 がなく、丸鋼と同様に付着力が期待できないと考えられ る.付着力の差異から、丸鋼と異形鉄筋の鉄筋コンクリ ート構造は耐荷性能が大きく異なる傾向にあり、推進管 についても付着力の影響について検討する必要がある.

## b) 膨張剤の影響

主に推進管のⅡ種管では、ひびわれ耐力などの向上 を目的として膨張材が用いられている.膨張材によ るコンクリートの膨張力が軸力として作用すること でひびわれ耐力の向上を期待していると考えられる. しかし、膨張材による軸力の程度が定量的に評価で きず、ひびわれ荷重などの推定精度が確認できてい ない.

#### c) 構造計算および耐荷性能の評価方法

構造計算により試験を評価するための条件として, 前述した材料特性や膨張材の影響,コンクリートや鉄筋 のひずみの状態などが得られる載荷試験を行い,構造計 算や耐荷性能の評価の方法について確認することが必要 である.

## (2) 試験項目

課題を踏まえ,室内試験項目を立案した.

a) 材料特性試験

材料試験一覧について,表-1に示す.

コンクリートの材料特性試験については、遠心成形に よる影響把握のため、円柱供試体と推進管のコア抜き供 試体の試験を行い差異について検討した.鉄筋の材料特 性は、引張り試験により鉄線の材料特性について検討し た.

コンクリートと鉄筋の付着特性は,推進管と同様の条件となるように製作した両引き試験の供試体による付着 特性試験により確認した.付着力が推進管の耐荷性能な どに与える影響は,推進管の載荷試験および付着特性を モデル化した解析により検討した.

## b) 膨張剤の影響

後述する応力解放試験や推進管の載荷試験のひびわれ 発生荷重やコンクリートのひずみ,鉄筋ひずみの挙動な



図-1 推進管の載荷試験の方法

どから膨張材の影響を評価することとした.

## c) 推進管の載荷試験

載荷試験は図-1のように,推進管の製品検査として行われている方法と同様に,上部からの載荷により確認することとした.供試体は当社の推進洞道の実績を踏まえ,使用する推進管の仕様を設定した.

載荷荷重は,一般的に実施されている推進管の載荷 試験を基本として,耐力評価が目的であるため,推 進管の破壊荷重以上の載荷等を追加し,実施した.

計測は図-2のように,推進管の軸方向に3断面を設定 し,応力度(ひずみ)が大きくなる天端,下端,左右ス プリングラインの変形や鉄筋およびコンクリートのひず みを計測した.また,ひびわれ幅を計測するため,ひ びわれ発生後の除荷時にひびわれ位置にパイ型変位計を 設置した.

#### d) 推進管の応力解放試験

既設推進管の健全性評価の調査方法として、応力解放 法の適用性を載荷試験により確認することを目的として 実施した.応力解放法は、構造物に作用しているひずみ を計測し、構造計算により応力状態を推定するために用 いられる<sup>9</sup>.



<b>衣-1</b> 杓杆砂栗一見										
		推進管		コンクリート物性		鉄筋物性試験用		付着試験		
				試験用円柱供試体		鉄線供試体		供試体		
		I 種管	Ⅱ種管	I 種管	Ⅱ種管	φ6mm	φ7mm	I 種管	Ⅱ種管	
			P1	P2	Plt	P2t	S6	S7	(q6mm)	(q7mm)
製造する供試体数		1体	1体	9体	9体	3体	3体	2体	2体	
材料	コンクリート	圧縮強度	コア3体	コア3体	3体	3体	_	—	_	_
特性		ポアソン比	_	—	3体	3体	—	_	—	_
試験		引張強度	コア3体	コア3体	3体	3体	—		_	
	鉄筋試験	引張強度	_	—	_	_	3体	3体	—	_
付着性能試験			_	—	—	_	—	_	2体	2体

## 表-1 材料試験一覧

試験は、載荷試験前に載荷により圧縮力が作用する推 進管のスプリングライン内面に3軸のひずみゲージを設 置し、3軸ひずみゲージの周囲を内径 φ 54mmのコアカッ ター(乾式)で切削し、深さ5mm単位で、切削とひずみ の計測を繰り返し実施した.

切削は、切削深さに伴い3軸ひずみゲージの変動がほ とんど見られなくなった時点で終了とした.

#### (3) 構造計算方法

試験の結果について,材料特性試験の結果などを反映 した構造計算および耐力計算を行うこととした.

付着特性を詳細に分析するため,鉄筋の付着すべりを 考慮した詳細なひびわれ解析として,平面ひずみ要素を 用いた2次元モデルによる解析を行った.

また上記モデルによる解析は、多数の条件で鉄筋の付 着を考慮した計算を行う場合には煩雑で時間を要するこ とを考慮し、骨組みモデルによる解析を実施し、両者の 評価方法の精度について検討した.

## 3. 室内試験結果の整理,分析

#### (1) 材料特性試験結果

### a) コンクリート,鉄筋の材料特性試験結果

コンクリートの材料特性試験結果について表-2に示す. 遠心成形の推進管から採取したコア供試体は、製品管理 として行われる円柱供試体に比べ、圧縮強度、引張強度 ともに高い強度となる.また、ヤング係数についても同 様にコア供試体のほうが大きい.

鉄筋の引張り強さは、JISの規格(390~830N/mm<sup>2</sup>)を 満足した.ただし、φ7は製造工場の受け入れ基準の下 限値(540N/mm<sup>2</sup>)より若干大きい程度であった.

φ6とφ7は材料の入手先が異なっており、試験の状況 からも材質が異なっていたと考えられる.また、降伏応 力度は規格化されていないが、引張強さとの比とすると、 I種管が0.92、Ⅱ種管が0.84となっている.

#### b) コンクリートと鉄筋の付着特性試験結果

供試体中央から左右のひずみなどの分布がほぼ対称と なり、精度良く実施することが出来た.ひずみゲージ間 について、ひずみ量の差よりすべり量(s)と付着応力 (r)で整理した結果を図-3に示す.

表-2 コンクリート,鉄筋の材料特性試験結果

		I利	重管	Ⅱ種管		
		円柱供試体	コア供試体	円柱供試体	コア供試体	
コンクリートの材料特性試験	圧縮強度(N/mm2)	60.1	87.8	64.4	99.9	
	引張強度(N/mm2)	3.48	5.29	4.67	5.85	
	ヤング係数(kN/mm2)	34.9	45.0	35.6	47.0	
鉄筋の材料特性試験	引張強さ(N/mm2)	614.1		556.1		
	降伏強度(N/mm2)	566.2		466.4		





I種管については、載荷により付着応力が増加し、 2N/mm<sup>2</sup>付近で最大値を示し、その後低下する.付着応 力が2N/mm<sup>2</sup>程度ですべりが発生していると考えられる.

Ⅱ種管については、載荷により付着応力が増加するが、 Ⅰ種管と異なり、付着応力が低下する状況は見られない. ただし、載荷荷重を維持することで、すべりが徐々に中 央に伝達されることを確認した.このため、荷重が長期 に作用すると、I種管と同様にすべりが発生すると考え られる.

#### (2) 推進管の載荷試験結果

## a) 載荷荷重について

試験時のひび割れおよび最大載荷荷重を表-3に示す. ここで、ひびわれ発生は目視確認された荷重である.ひ びわれ発生の荷重,最大荷重ともに規格値を満足してい た. I種管とⅡ種管のひびわれ発生荷重は同程度であり、 膨張剤による影響は見られなかった.

## b) ひびわれ発生状況について

ひびわれ状況について、I種管を例に図4に示す.ひ びわれ状況はI種管、Ⅱ種管ともに同様であった.天端 の内面側のひびわれは、3本のひびわれが円周方向に約 300mmの範囲に発生していた.スプリングライン外面側 は、1.5m程度の範囲に6~8本程度(ひびわれ間隔180~ 250mm程度)のひびわれが発生していた.

### c) 鉄筋ひずみと載荷荷重の関係

鉄筋ひずみと載荷荷重の関係について、鉄筋ひずみの 勾配が変化する荷重は、I種管とII種管ともに約300kN で差違がなく、膨張材の影響は見られなかった.

## d) ひびわれ幅と鉄筋ひずみの関係

ひびわれ幅と鉄筋ひずみとの関係で整理すると、おお むね線形関係にあることが確認できた(図-5). これに より、鉄筋のひずみ(応力)が精度良く評価できれば、 ひびわれ幅の評価も可能と考えられる.

<b>火</b> り 日本自じ 戦時に低い 時重						
		I種	管	Ⅱ種管		
		規格値	実験値	規格値	実験値	
		kN	kN	kN	kN	
ひびわれ荷重	天端	150	287	301	330	
	スプリング ライン	_	315		370	
最大荷重	362	540	452	683		

表-3 推進管の載荷試験の荷重



I種管:スプリングライン外面側

#### 図4 載荷試験のひびわれ状況(I種管)



ひび割れ幅(mm)

#### 図-5 ひびわれ幅と鉄筋ひずみの関係(試験結果, I種管)

## e) ひずみの分布について

コンクリートと鉄筋(外面,内面)は、部材厚さ方向 に一次式の関係が見られた.そこで I 種管、II 種管それ ぞれにおいて、一次近似を行い、中立軸位置を算定した 結果を図-6、図-7、部材の曲率を算定した結果について 図-8、図-9に示す.

ひびわれによる中立軸位置の変動は、 I 種管が 300kN付近で大きく変動している.一方、Ⅱ種管は同 じく300kN付近で変動しはじめるが、変動は緩やかで ある.



これは、I種管とⅡ種管の鉄筋量(鉄筋比)の違いなどが原因と考えられる.

曲率は、I種管がひびわれにより剛性が大きく低下している状況が確認できる.また、載荷荷重が500kN付近で剛性がさらに低下しているように見えるのは、鉄筋の降伏によるものと考えられる.一方、II種管は、ひびわれによる剛性低下の変動がI種管より小さい.



## (3) 推進管の応力解放試験結果

I種管の試験結果を図-10, Ⅱ種管の試験結果を図-11 に示す. I種管は、円周方向ひずみが、ほぼ0となり、 載荷開始時の状態となった. Ⅱ種管は、変換した円周方 向ひずみが載荷時相当にはならない. この原因として、 膨張材の影響などが考えられる.

また、応力解放法の試験から測定されたひずみから推進管の荷重状態を後述する構造計算により推定した場合の差違について比較を行った結果を表-4に示す.

この結果,II種管では実際の荷重に対し,精度良く推定することが出来た.一方,I種管は、実際の荷重に対し1.61倍と大きく評価する結果となった.精度が低くなっているのは、図-10の応力試験近傍のひずみの挙動からわかるように、応力解放法を実施した箇所が、他の箇所よりひずみが低下していたことが原因と考えられる.

図中の試験同断面SL位置(応力解放試験の対角線上 の位置)で実施していれば,解放されるひずみ量が200 ~300 µ 前後となり,荷重の推定精度が高くなったと考 えられる.このため,応力解放法による調査を行う場合 は,同一の推進管の軸方向に複数箇所(例:管の中央と 端部付近やスプリングラインの左右など)で実施し,精 度を向上させる必要がある.

表4 推応力解放法の結果から推定される荷重

			I 種管	Ⅱ種管
応力解放法	載荷荷重	kN 277		433
の試験結果	ひずみ	μ	-492	-321
荷重の推定値	構造計算結果	kN	444	447
			(1.61)	(1.03)
※荷重の推定値の( )内は、試験開始時の荷重に対する				

※何里の推定値の() 内は、試験開始時の何里に対する 比



図-10 応力解放法の検証試験時のひずみや載荷荷重の確認(試験結果, I 種管)



図-11 応力解放法の検証試験時のひずみや載荷荷重の確認(試験結果,Ⅱ種管)

## 4. 構造計算による再現性の確認

#### (1) 平面ひずみ要素を用いた2次元モデル

## a) モデル化と解析条件

物性条件は室内試験結果などを用い,コンクリートの 材料特性は遠心成形の影響を考慮し、コア供試体による 結果とした. 付着特性は,付着特性試験結果に沿った挙 動を示すものとして設定した.

構造解析モデルについて、要素特性を表-5、解析モデ ル図を図-12に示す.鉄筋の付着すべりを模擬するため、 鉄筋とコンクリートの間に付着試験結果で得られた付着 特性のリンク要素を配置した。なお、軸方向鉄筋が配置 されている箇所の要素(15°ピッチ)に関しては、軸方 向鉄筋の影響を考慮し、せん断強度を異形鉄筋の値とし た、荷重条件は管頂部に配置した加圧板に対して節点荷 重として、1STEPに2kN相当の力を作用させた(300~ 350STEP). 支承条件は,管頂部は水平方向を拘束し, 管側部は鉛直方向を拘束することとした.

#### b) 構造計算結果

I種管, Ⅱ種管共に載荷試験と計算は変位, ひずみ共 に良好な一致が見られた.

また、Ⅱ種管については膨張材の影響を考慮しないこ とで試験結果と良好な一致が見られたことから、膨張材 による影響はないと考えられる.

#### c) 付着特性の分析

推進管の鉄筋の付着特性を確認するため、円周方向の 鉄筋位置と鉄筋のすべり量の関係で整理した結果を図-13に示す.

鉄筋のすべりが軸方向鉄筋位置で拘束されるような挙 動が見られる.また、付着性能試験により得られた付着 力の大小による傾向の違いは、付着力が小さい I 種管と 大きいⅡ種管との間で見られない.

以上より、推進管の鉄筋の付着力は小さいが軸方向鉄 筋が配置されていることなどから、鉄筋は大きなすべり を生じないため、耐荷性能の評価に考慮する必要はない と考えられる.

表-5 解析モデルの要素特性						
構造名称		要素 モデル	構成 モデル	備考		
推進管	コン クリ ート	平 面 ひ ず み 要 素	非線形			
	開口部	リンク 要素	非線形	<ul> <li>・コンクリートとコンク リート間の離散ひびわれ</li> <li>を表現するクラックリン</li> <li>クとし、ひびわれ開口部</li> <li>をモデル化した</li> </ul>		
	鉄筋	トラス 要素	非線形			
	付着	リンク 要素	非線形	<ul> <li>・コンクリートと鉄筋間</li> <li>の付着を表現するボンド</li> <li>リンクとした</li> </ul>		



軸方向鉄筋の拘束と見られる箇所





## (2) 骨組み解析モデル

## a) モデル化と解析条件

物性条件は室内試験結果などを用い、コンクリートの 材料特性は遠心成形の影響を考慮し、コア供試体による 結果とした.

構造計算は図-14のように、横断面方向に192分割とし、 試験と同様に載荷および支点の幅を15cmとして設定した.部材は、図-15のようなM-φモデルとし、主断面の ひびわれ、鉄筋降伏、終局耐力のトリリニアモデルとし た. なお,終局耐力の算定にあたっては,鉄筋の降伏点 が明確でない材料で,降伏後も剛性が0とならないこと が考えられたため,鉄筋の引張強さを用いることとした.

## b) 構造計算結果

曲げモーメント

試験結果と計算結果の比較について,鉛直方向と水平 方向の内空変位量を図-16に示す.試験結果と計算結果 は良好な一致が見られた.



ばね支持(幅15cm)(鉛直方向∞相当,水平方向0相当)

図-14 構造計算モデル図

図-15 推進管の主断面の M-φモデルの設定イメージ

ひびわれ

終局耐力

▶ 曲率∅

鉄筋降伏



図-16 試験結果と計算結果の比較:内空変位量



図-17 試験結果と計算結果の比較:ひびわれ幅

次に,ひびわれ幅の比較を図-17に示す.載荷試験時 に計測したひびわれ幅と構造計算結果で求めたひびわれ 幅は良好な一致が見られた.

## 5. 結論

#### (1) 推進管の材料特性

遠心成形の推進管から採取したコア供試体は、製品管 理として行われる円柱供試体に比べ、高い強度となる.

コンクリートと鉄線の付着力は異形鉄筋などに比べ非 常に小さく,丸鋼と同等程度となっている.一方,推進 管は,軸方向鉄筋と円周方向の鉄線が溶接により配置さ れ,円周方向の抜け出しを拘束し,付着特性の影響が見 られず,構造計算や耐力評価のモデル化に考慮する必要 はない.

#### (2) 膨張剤の影響

応力解放法の検証試験において、Ⅱ種管の応力解法試 験で推進管内面に膨張材の影響が見られた.しかし、載 荷試験のひびわれ発生荷重、Ⅰ種管とⅡ種管の差違など から評価した場合、明確な傾向は得られず、部材全体で 評価すると、本検討からは膨張材の効果を認めることが できなかった.

今後の膨張材の影響の評価方法として、応力解放法を 推進管の内面や外面で実施することや、鉄筋にひずみゲ ージを設置しコンクリートと同様に前後を切断すること などで、推進管の表面と内面のひずみの影響を評価する 方法が考えられる.

## (3) 構造計算および耐荷性能の評価方法

材料特性試験の結果を用いた構造計算の結果,載荷試 験の内空変位量,コンクリートや鉄筋のひずみ,部材の 曲率など,試験全体の挙動を良好に再現することができ た.

降伏点などが明確でない鉄線は引張り強さを用いるこ とで、主断面の部材剛性や耐荷性能を評価することで載 荷試験の結果と整合することを確認した.

本研究の結果,内空変位やひびわれ幅などの変状状況 から,本検討の方法により推進洞道の健全度を評価する ことが可能となった.

#### (4) 応力解放試験の検証について

応力解放法による応力度推定は,直径を50mm 程度と すれば,鉄筋位置までの切削で,良好に実施できると考 えられる.

## (5) 耐力評価事例について

本検討の方法を用いて、ひびわれの発生している推進 洞道2箇所について、耐力評価を実施している.

#### 参考文献

- 1) 中島陽,高橋晃,和田好史:地中送電用洞道の維持管理 の現状,基礎工,2014.7
- 砂原宏介,桑原弘昌,小椋明仁:地中送電用洞道の維持 管理事例,基礎工,2014.7
- 日本下水道協会規格:下水道推進工法用鉄筋コンクリー ト管 (JSWAS A-2), 1999.
- 佐藤裕明,吉本正浩,信岡卓:応力解放法による既 設洞道の健全度評価,電力土木,2006.3

(2016.8.5受付)

# THE STRENGTH EVALUATION FOR JACKING PIPE TUNNELS WHICH ARE USED AS UNDERGROUND TRANSMISSION LINE

## Satoshi TAKENAKA, Kenichi ANAN and Masahiro YOSHIMOTO

Many of tunnels, which belong to Tokyo Electric Power Grid Co. Ltd and are used as transmission line equipment, were constructed over 30 years ago. Therefore, it is worried that their deterioration should escalate day by day. On the other hand, the necessity of reinforcement is determined with the result of assessment about deterioration and strength at the maintenance of these tunnels.

In this paper, the strength evaluation standard is discussed about one kind of these tunnels, jacking pipe type. In the discussion, we studied how to evaluate the result of material property tests, loading tests for jacking pipes, and examined the strength evaluation method.