

# 管路布設電力ケーブルの波乗り移動解析手法の開発

## Development of Analytical Method for Power Cable Creepage Phenomenon in Duct

嘉代航己 \*1  
Koki Kashiro

岩村克己 \*1  
Katsumi Iwamura

上林知紀 \*2  
Tomonori Kamibayashi

長山忠則 \*2  
Tadanori Nagayama

西久保裕康 \*3  
Hiroyasu Nishikubo

### 〈概要〉

地中線ケーブルの布設方式である管路式において、ケーブル波乗り移動現象と呼ばれる管路内のケーブルが車の進行方向に移動する現象が発生する可能性がある。この現象が過度に進行すると接続部付近において、重大な損傷を引き起こす懸念がある。この対策のためにはケーブルの移動力を正確に把握する必要があるが、従来は実験式での検討が主に採用されており、実態との乖離が見られていた。

このため、本研究では車が通過することで、管路がたわんだ際の水平方向の変位に着目し、その際のケーブルと管路の変位差の挙動を用いた新たな理論を考案し、加えてこの理論を用いた波乗り移動力の解析システムを構築した。また、本理論の妥当性確認のため、実規模実験を実施し、実験値と理論値を比較して、両者の整合性があることを実証した。

### 1. はじめに

日本の地中線ケーブルは管路内への布設が多く採用されており、この布設形態では図1に示すような波乗り移動現象という管路内のケーブルが車の進行方向に移動する現象が発生することが懸念されている。この現象は軟弱地盤で、管路の埋設深さが浅く、交通量の多い条件において発生する傾向がある。発生した場合、マンホール内のケーブルの長手方向の線形が変化し

接続部付近で、ケーブルの応力が集中し重大な損傷を引き起こす可能性があるため、この現象は問題視されている。

この現象に対する対策方法として、主にマンホール内にてケーブルを拘束する手法がとられることから、ケーブルに発生する移動力を正確に把握する必要がある。しかし従来の移動力の計算は一般的に、実験に基づく式<sup>1)</sup>に依っており、実態と乖離することが課題となっていた。

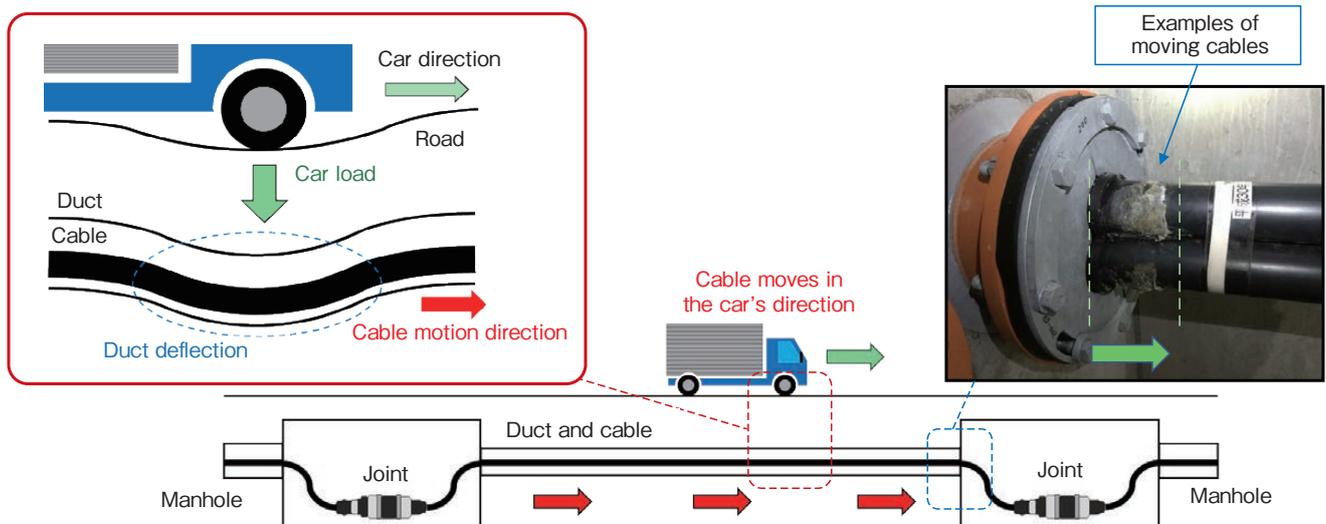


図1 ケーブル波乗り移動現象の発生挙動  
Schematic diagram of cable creepage behavior.

\*1 古河電気工業(株) 電力事業部門 電力エンジニアリング部

\*2 東北電力ネットワーク(株) 送変電建設センター

\*3 FITEC(株) ビジネスソリューション事業部

従来、報告されている研究では、管路のたわみの垂直成分が重要な役割を果たすという理論が主流である。

1937年にTimmis<sup>2)</sup>が提案したSurf-riding理論では「ケーブルは、通過する車の車輪の前後で管路の垂直方向のたわみが不均等になり、ケーブルとの接触長が後ろ側の方が長くなる。このため、サーフライダーが波打ち際を滑って進むように、ケーブルを前に押し出すような水平成分の推力が発生する。」と報告されている。しかしながらこの報告では、管路のたわみが不均等になる理由は説明されておらず、Surf-riding理論に基づくケーブル伸び量の計算値は、実測値よりはるかに小さいと報告された<sup>3)</sup>。

また1999年のKimらの論文<sup>4)</sup>では、「管路の局所的な長手方向(水平方向)の速度は、車の通過時において、車の進行方向である前進領域(正方向)と後進領域(負方向)の2領域が現れて、ケーブルには管路との長手方向の摩擦力が作用する。一方、車荷重による管路の垂直方向の沈み込み量は、後進領域が前進領域より大きくなる。このためケーブルの横弾性により、後進領域における管路とケーブルとの接触圧力が低下する。このため後進領域における両者の静摩擦力が低下してスリップが生じて、ケーブルは前進方向に移動する。」と報告された。しかしながら、Kimらの論文<sup>4)</sup>で説明されている負領域の管路とケーブルの接触圧力を、日本の設備条件にて有限要素法(FEM)解析した結果、大きく低下しない結果となった。したがって著者らは、管路の垂直成分のたわみによる接触圧力の低下は、日本の設備においては、ケーブル波乗り移動現象の主要因ではないと結論づけた。

上記の理由より著者らは、ケーブルが車の波乗り移動の発生メカニズムをアモントン・クーロンの摩擦法則によって説明する新たな理論を考案した。アモントン・クーロンの摩擦法則<sup>5)</sup>は、動摩擦力は滑り速度に依存しないとする経験則である。すなわち、ケーブル移動の駆動力の原因は、Kimらと同様に、車両通過によって発生する管路の局所的な長手方向の2つの前進の速度領域と後進の速度領域と考え、この2領域に、アモントン・クーロンの摩擦法則を適用した。これによりケーブルに作用する動摩擦力の大きさは同一になり、作用長さは、前進領域が後進領域より長くなる。このため、前進方向の動摩擦力の作用量が、後進方向より大きくなり、ケーブルの移動が顕著になると考えた。

本報告では、新たに考案した理論、ケーブル移動力・移動量を通常のPCにて容易に解析できる波乗り移動現象解析システムの開発、さらに実規模実験による理論の妥当性の検証<sup>6)</sup>、加えて、開発した解析システムを用いて、波乗り移動現象の発生傾向の考察について報告する。

## 2. 新規波乗り移動現象理論の構築

動摩擦力が波乗り移動現象の駆動力ということ考えるにあたり、この動摩擦力が発生するメカニズムは、下記のとおりと考えた。

- ① 管路埋設されている道路上に車両の荷重が加わることで、管路がたわみ、水平方向への変位が生じる。
- ② 車両が移動することで管路の水平方向の変位に速度が生じる。

- ③ ケーブルは管路の変位とともに、弾性変形する。
- ④ ケーブルの変位が管路の変位に追従できないことで両者において変位差が生じ、この変位差は車両の移動とともに移動する。
- ⑤ この変位差の移動によりケーブルと管路の変位差において滑り速度が発生する。
- ⑥ アモントン・クーロンの法則に基づき、上記の滑り速度の発生により一定の動摩擦力が生じる。

本章にて各ステップに関して詳しく説明する。

### 2.1 地盤(管路)の変位解析

FEMソフト(汎用非線形構造解析ソルバー)を用いて、地表に自動車荷重を加えたときの地盤の変位を解析した。解析条件は、4章で記載した実規模実験と同様の条件を用いている。図2に解析条件を示す。地盤は3層構成とし各層はヤング率とポアソン比が異なる弾性体として扱った。図2では、1.2 mの深さに管路を図示しているが、FEM解析では地盤と一緒に変位すると仮定して管路はモデル化していない。車荷重は20 tfの集中荷重として、管路の上1.2 mを、長手方向に-4.8 m(荷重位置A)から4.8 m(荷重位置E)に移動するとし、地盤変位の解析点は荷重位置Cの直下に設定した。下図は、上図の解析点における地盤変位のFEM解析結果である。A→B→C→D→Eと車荷重位置が変化するに従って、解析点の地盤は垂直、長手方向に変位する。最大の長手方向の変位量は16 μm、最大の垂直方向の変位量は90 μmとなった。なお、均質な半無限弾性体の表面に集中荷重を加えた場合の弾性体内部の変位量は、Boussinesqの式<sup>7)</sup>によって計算でき、このFEM解析による解析結果とこの式が近似することを確認している。

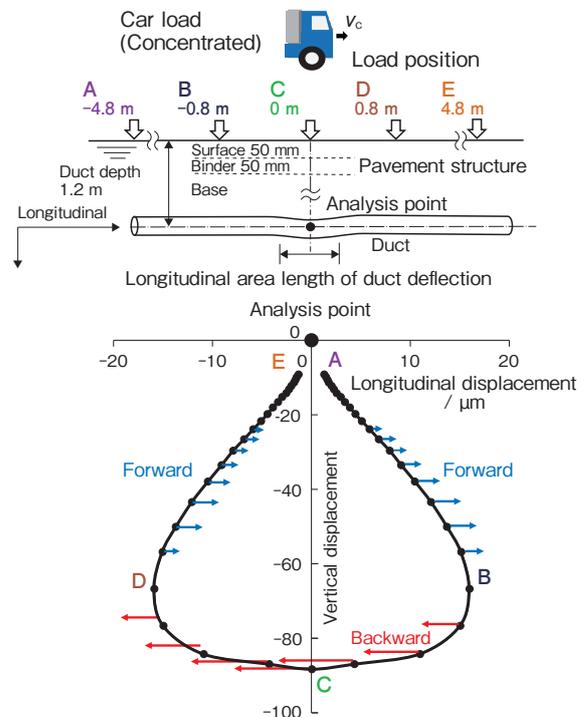


図2 地盤変位に関する解析条件および車荷重ごとの地盤変位(FEM解析)  
Analytical conditions for ground displacement and ground displacement for each car load position (FEM analysis).

図3, 図4はそれぞれ, 図2に示した地盤変位の垂直成分, 水平(長手)成分をグラフ化したものである。これらの図の横軸は管路の長手方向の位置を示しており, 車の進行方向をx軸の増加方向とし, 車荷重が原点上(図2 荷重位置C)に作用している状態である。またこの際の管路のたわみ状況の模式図を図5に記載した。図5記載のベクトルのように管路は車の荷重によってたわむことによって, 管路の水平方向に変位している状態となる。図3に示した変位の垂直成分は荷重位置を中心に沈み込み, 図4に示した変位の長手方向成分は放射状にのびる。たわみ量は, 荷重位置近傍では急峻となり, 荷重位置から離れるに従って車荷重の影響が低下してたわみ量は緩やかに減少する。

2.2 地盤(管路)変位の長手方向の速度について

車がx方向に速度 $v_c$ で移動するとき, 地面のたわみも同じ速度で移動する。図4の地盤(管路)変位の長手方向の変位分布を $D_l(x)$ と表すと, 時刻tにおけるx軸方向への伝搬は $D_l(x-v_c t)$ と

表される。これを時間で微分すると $V_l$ が求められ, 式(1)にて表される。

$$V_l(x - v_c t) = \frac{\partial D_l(x - v_c t)}{\partial t} = -v_c \frac{\partial D_l(x - v_c t)}{\partial x} \quad (1)$$

図6は, 車が速度 $v_c=40$  km/hにて荷重位置C ( $x = 0$ ) を通過時において, 式(1)にて計算した $V_l$ のx軸分布である。 $V_l$ は,  $x = 0$ 近傍の前進方向(車の動きと同じ方向(forward area))と, 周辺の後進方向(車の動きと反対方向(backward area))の領域が現れる。これら2領域を比較すると, 速度の大きさは, 変位の変化が急峻な $x = 0$ 近傍の後進方向領域が大きく, 領域区間長は, 変位量が緩やかに低下する前進方向領域において長くなる。速度の大きさと領域長さの積は, 図6に示した通りの同一になり, 車が通過し終わると管路の長手方向の変位は元の位置に戻る。

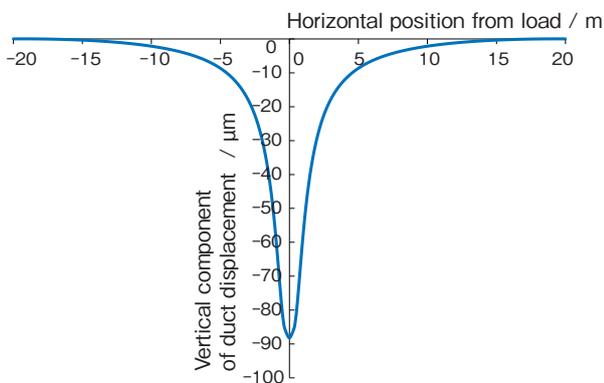


図3 地盤(管路)変位の垂直成分の長手方向分布  
Longitudinal distribution of the vertical component of ground (duct) displacement.

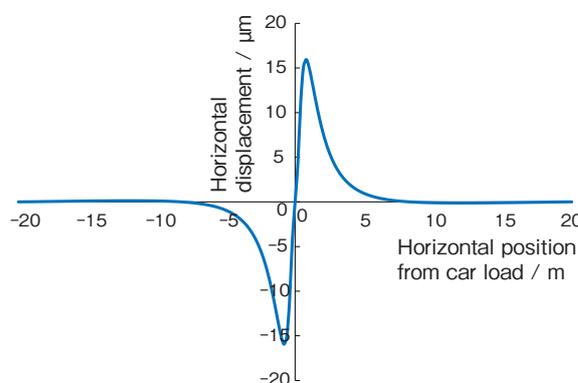


図4 地盤(管路)変位の管路の長手成分の長手方向分布  
Longitudinal distribution of the longitudinal component of ground (duct) displacement.

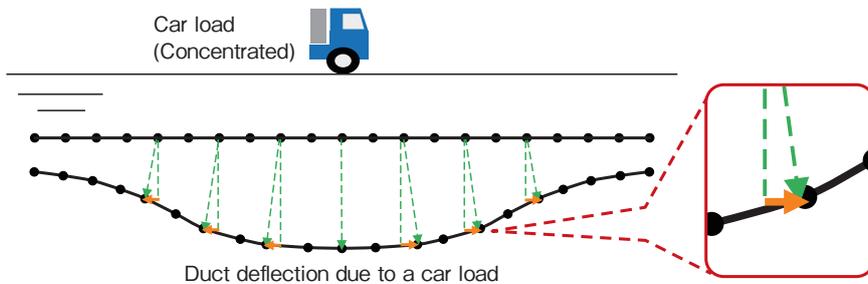


図5 車の通行に伴う地盤の長手方向のたわみ分布  
Longitudinal component distribution of ground (duct) displacement caused by car load.

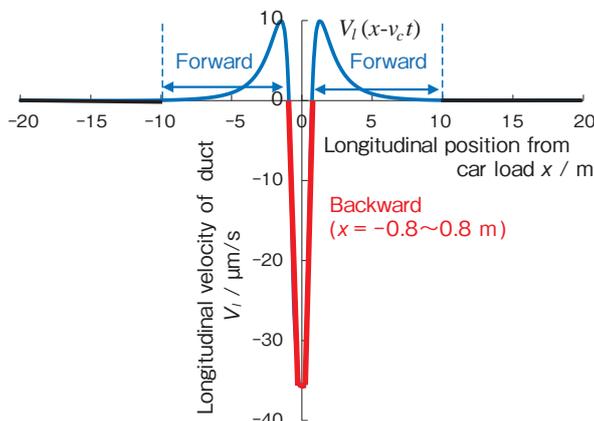


図6 地盤(管路)の長手方向速度 $V_l$ の長手方向分布  
Longitudinal distribution of longitudinal velocity  $V_l$  of the ground (duct).

2.3 波乗り移動現象の発生メカニズムに関する新規理論

図6の管路の動きに伴って、ケーブルは静摩擦力によって弾性変位し追従する。このケーブル弾性変位量が管路変位量より小さいと、両者に変位差が発生する。この変位差が車の速度で進行すると両者間に滑り速度が生じる。この滑り速度は車の進行方向と同じ前進方向と逆方向の後進方向から成る。動摩擦力の大きさは、滑り速度に依存しないとするアモントン・クーロンの摩擦法則に基づく、図7のように、前進方向と後進方向の向きの変化に従い、一定の値で動摩擦力がかかる状態となる。両領域を比較すると、動摩擦力の絶対値は同じであるが、領域長さは前進の方が大きくなる。動摩擦力の大きさと領域長さの積は、前進の方が後進より大きくなる。以上より、下に示す関係性が得られることから、波乗り移動現象は発生すると本理論では考えた。

- 最大動摩擦力の絶対値 : (前進) = (後進)
- 動摩擦力の領域長さ : (前進) > (後進)
- (絶対値) × (領域長さ) : (前進) - (後進) > 0

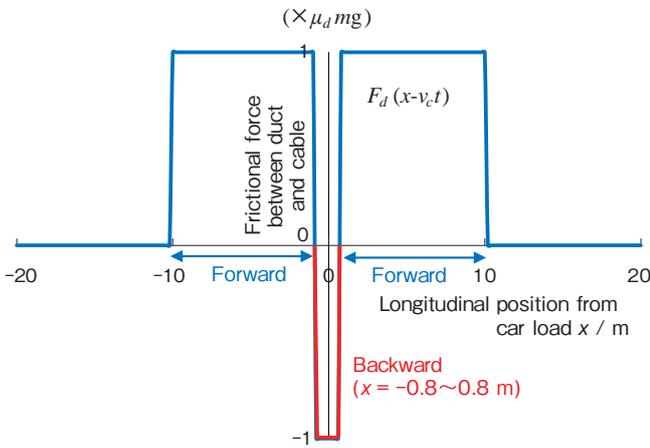


図7 長手方向に働く管路とケーブル間の動摩擦力分布  
Longitudinal distribution of dynamic frictional force between duct and cable.

また上記の理論に伴う静摩擦力と動摩擦力がケーブルに与える作用を、図8にて説明する。管路の水平方向変位に伴い、ケーブルは長手方向に静摩擦力が働き、管路と共に追従する。管路の長手方向の変位量を $\Delta D$ とした場合、この時、 $\Delta D_l - \Delta C_l = 0$ となる。一方でケーブルと管路の変位差は $\Delta D_l - \Delta C_l > 0$ となった時に発生する。

この管路とケーブルの変位差が、車の速度 $v_c$ にて $x$ 方向に伝搬すると、ケーブルに動摩擦力 $F_d(x-v_c t)$ が作用する。動摩擦力の分布は図8と同様に、大きさの絶対値が同一、領域長さは前進方向が長くなる。このため、ケーブル $\Delta X$ 区間に動摩擦力 $F_d(x-v_c t)$ が伝搬し終えると、 $\Delta X$ 区間において、ケーブルは管路より前進方向に変位した状態になる。動摩擦力によって発生したケーブルの弾性伸びは、管路とケーブル間の静摩擦力によって保持、蓄積される。

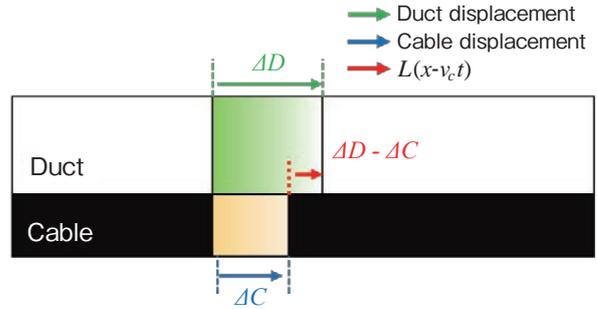


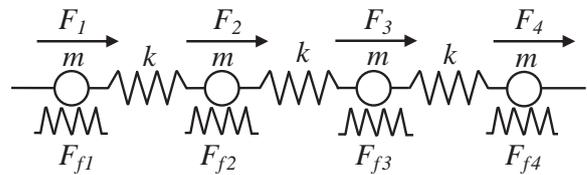
図8 管路とケーブル間の変位差の発生状況  
The image of horizontal displacement between cable and duct.

3. 波乗り移動現象解析の新規解析モデルの構築と解析システム開発

2章にて示した新規の波乗り移動現象に関する理論に基づき、移動力を求めるため、解析モデルを考案し、解析システムを構築した。

3.1 ケーブル波乗り移動現象の新規解析モデル

図4、図6に示す管路の長手方向変位、速度は、ケーブル全体長に対して局所的であることから、この解析のために図9に示すように、ケーブルを一定長さ $\Delta x$ 毎に離散化して、質量 $m$ と縦弾性係数 $k$ の結合格子としてモデル化した。



$$F_f = - \left( \frac{2}{1 + e^{b(v_l \Delta t - u(t))}} - 1 \right) \mu_d mg \quad (2)$$

$m$ : ケーブル要素の質量 (質量点),  $F_f$ : 質量点に作用する動摩擦力 (N),  
 $g$ : 重力加速度 ( $m/s^2$ ),  $\mu_d$ : 動摩擦係数,  $\Delta t$ : 微小時間間隔 (s),  
 $v_l$ : 質量点と管路の相対速度 (m/s),  $u(t)$ :  $\Delta t$ 間の質量点の変位量 (m),  
 $b$ : 形状係数

図9 ケーブル波乗り移動現象解析のための離散要素モデル  
Discrete element model for cable creepage analysis.

ケーブルの離散長 $\Delta x$ 毎に、動摩擦力の大きさ $F_f$ を、滑り速度に依存しない一定値として式(2)にて計算して、各質量点に与える。式(2)は微分可能なシグモイド関数であり数値計算の安定化が可能になる。形状係数 $b$ は、ケーブルシースのせん断変形を考慮した定数であり<sup>8)</sup>、シグモイド関数を用いることで図10に示したようなケーブルと管路とのズレの発生によるケーブルシースのせん断変形を考慮した挙動が反映される。

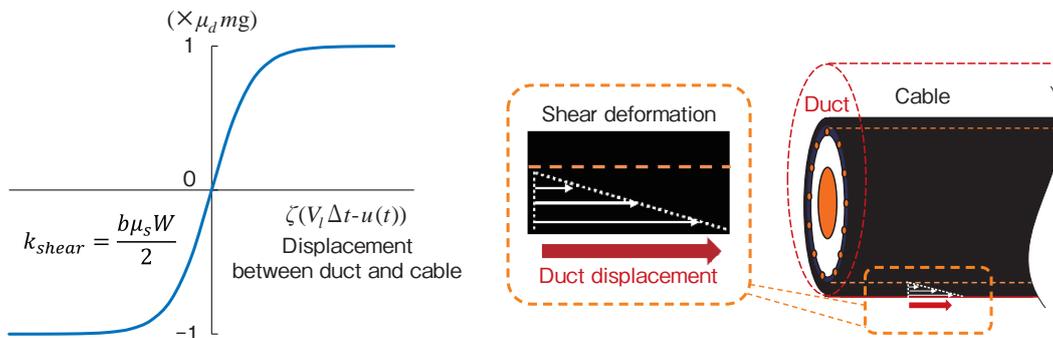


図10 シグモイド関数を用いた形状係数  $b$  について  
Shape factor  $b$  using sigmoidal function.

図9に示したケーブルの質量点毎に、動摩擦力  $F_f$  を与える。式 (3) のケーブル弾性力と慣性力による平衡条件から、ケーブルの波乗り移動力 (ケーブルの内部応力)  $F$  と質量点の変位  $U$  (ケーブルの弾性伸縮) を計算する。この計算を微小時間毎に繰り返すことで波乗り移動力の算出する。

$$[k] \vec{U} + [m] \vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_f \tag{3}$$

- $\vec{F}$ : ケーブル波乗り移動力ベクトル (ケーブル内部応力) ( $N$ ),
- $\vec{U}$ : 質量点の変位ベクトル (ケーブルの弾性伸縮) ( $m$ ),
- $\vec{a}$ : 質量点の加速度ベクトル ( $m/s^2$ ),  $[k]$ : 剛性マトリクス ( $k=EA/\Delta L$ ),
- $[m]$ : ケーブル質量マトリクス ( $N$ ),
- $\vec{F}_f$ : 質量点に作用する動摩擦力ベクトル ( $N$ )

上記のようにして、新規に考案した理論を解析システムに反映した。

### 3.2 波乗り移動力解析システムの開発

ケーブル設計やメンテナンスに容易に活用するために、通常スペックのPCで動作する波乗り移動力解析システムを開発した。地盤変位は、中心軸が道路に垂直な円筒座標系の軸対称要素FEMにて解析した。車を集中荷重とし、管路を地盤と一緒に変位する近似によって、解析次元を、円筒座標系で円周方向に変化しない2次元に減らして、計算時間を大幅に短縮した。地盤は弾性体として扱い、日本の標準的な道路構造を近似できるように、5層の異なる弾性特性を設定できるようにした。ケーブルの解析は、図9に示したように、長手方向の1次元の離散要素法を用いて行った。ケーブル端の境界条件は、拘束もしくは解放とし、さらに、波乗り移動現象の対策を検討するために、バネによる拘束条件を可能とした。

## 4. 波乗り移動現象に関する実規模実験

### 4.1 実規模実験の概要

波乗り移動現象に関する新規理論の妥当性の検証を目的として、実規模実験を行い、波乗り移動力と解析値と実験地の比較を実施した。実験条件を図11と表1に示した。ケーブル(管路)の長さは30 mで、実際の設備の10分の1程度にした。管路には PFP (強化プラスチック複合管) を使用した。深さ1.2 mに2本の管路を埋設した。1本の管路には、単心ケーブルを1孔3条にて敷設した。もう一方の管路には、加速度センサを1 mおきに6個設置し、管路の垂直方向の加速度を測定した。本報告では、波乗り移動現象は、管路の長手方向の変位が原因となると結論づけているが、この実験では管路の垂直方向の変位も測定している。これは、管路の垂直方向変位量は、長手方向の変位量に対して約6倍になるため、変位量を精度良く測定できるためである。地表は簡易舗装としており、20トンのトラックを時速20, 30, 40 km/hにて、一方向から繰り返し走行させた。トラックの進入側のケーブル端(上流端)は解放条件にした。トラックの出口側のケーブル端(下流端)では、ロードセルを用いて各ケーブルの圧縮力を測定した。管路の垂直方向のたわみは、実測した加速度から90~140  $\mu m$ と算出された。管路のたわみ長手方向の領域長は7~11 mであった。これら測定値の幅は、トラックの速度に依存してはならず、実験上のばらつきである。

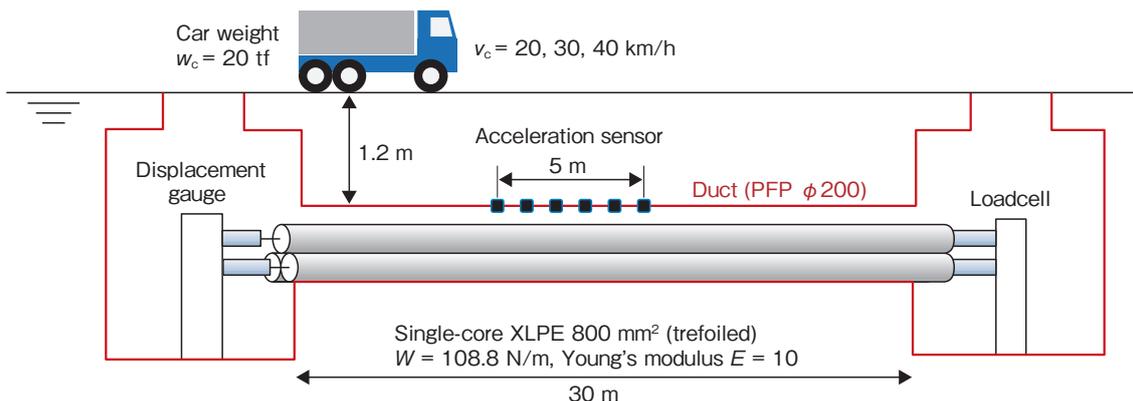


図11 実規模実験の概要図  
Overview of the full-scale experiment.

表1 波乗り移動力測定実規模実験の測定条件  
The conditions full-scale experiment for cable creepage.

項目	測定条件			
ケーブル	単心ケーブル XLPE 800 mm <sup>2</sup> (W=108.8 N/m, ヤング率 E=10), 1孔3条布設			
管路	PFP φ 200, 深さ d = 1.2 m, ケーブル (管路) 長 L = 30 m			
車	車の重量 W <sub>c</sub> = 20 tf, 車のスピード V <sub>c</sub> = 20, 30, 40 km/h			
道路	舗装の層	厚さ mm	ヤング率 MPa	ポアソン比
	表層	50	4,000	0.35
	基層	50	800	0.35
	路盤・路床	これより深層	800	0.4
管路のたわみ (測定値)	鉛直方向の変位 : 90 - 140 μm, たわみの長手方向の領域長さ : 7 - 11 m			

4.2 波乗り移動現象に関する実験結果と解析値の比較

図12は、実験結果と、実験条件の元での解析結果の比較である。丸と四角のプロットは実験値、実線と破線は解析値であり、それぞれ下相側と上相のケーブルの値を表している。解析条件では、上相ケーブルの重量が、2本の下相ケーブルに均等にかかると仮定して、2本の下相ケーブル重量を1.5倍に設定した。管路とケーブル間の動摩擦係数は  $\mu_d = 0.27$  とした。上相ケーブルに作用する下相ケーブルシースとの動摩擦力は、管路との動摩擦力より小さい  $\mu_d = 0.25$  に設定した。解析値は実験値とよく一致し、本研究で開発した理論の妥当性を確認することができた。波乗り移動力は、下相ケーブルで約900 N、上相ケーブルで約550 Nにて飽和傾向になる。このようなケーブル波乗り移動力の飽和特性は、実測結果において報告されている<sup>3)</sup>。

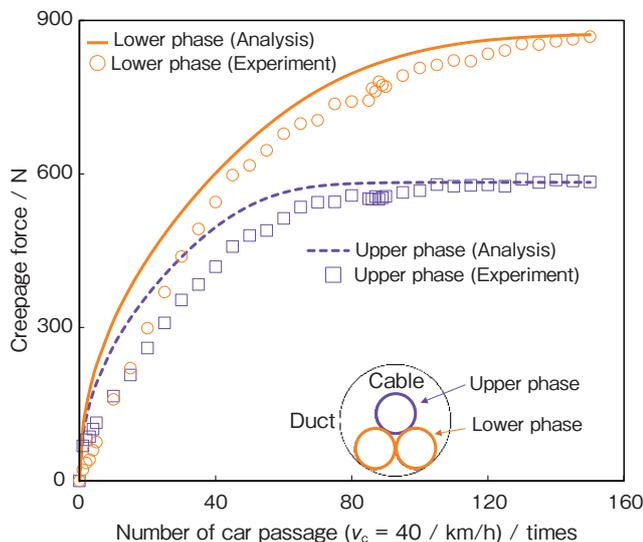


図12 ケーブル波乗り移動力の実験値と解析値の比較  
Experimentally obtained and analytically obtained values of cable creepage force.

5. 解析システムを用いた波乗り移動現象の発生傾向の検討

波乗り移動現象が発生しやすい条件として、軟弱地盤や管路の埋設深さが浅いことが報告されている。また単心ケーブルはトリプレックスケーブルに比べ、波乗り移動現象が発生しやすい傾向がある。本章では、日本の一般的な設備条件の下で、波

乗り移動現象を条件毎に解析し、その発生条件を調査した。

5.1 波乗り移動現象解析検討条件

波乗り移動現象の発生傾向を明らかにするため、解析条件は主にケーブルの弾性変形に対して影響を与える以下の条件を選定した。

- ① ケーブル種類 (単心ケーブル, トリプレックスケーブル)
- ② ケーブルの管路に働く摩擦力の作用範囲

上記に関して詳しく説明する。

本理論では駆動力である動摩擦力の発生条件はケーブルと管路の長手方向変位差により発生すると考えていることから、ケーブルの弾性変形のしやすさが波乗り移動現象に影響すると推察した。

ケーブルの種類に関しては単心ケーブルとトリプレックスケーブルで縦弾性係数が異なっており、トリプレックスケーブルの方が変位しやすい条件となる。

またケーブルの管路に働く摩擦力の作用長は図13に記載のようにケーブルの弾性変位に影響する。ケーブルの弾性変位  $\Delta C$  は、図13に記載しているようにケーブルの縦弾性  $EA$  に反比例して、ケーブルへの静摩擦力  $\mu$  の作用長  $X$  の2乗に比例する。このため、この作用長がケーブルと管路の変位差の発生に影響すると推察した。

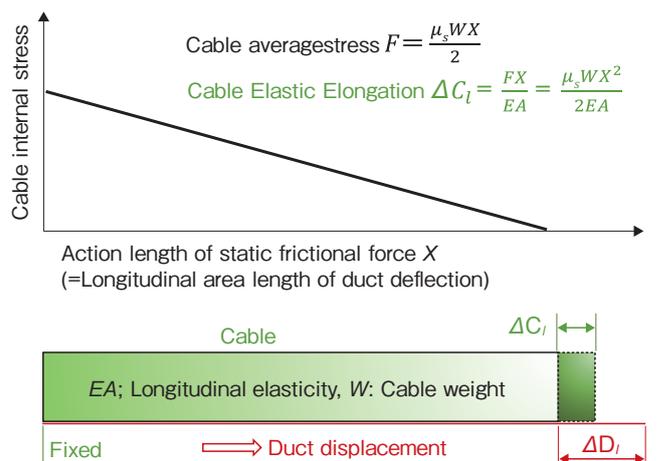


図13 摩擦力がかった際のケーブルの弾性変位  
Elastic displacement of cable when friction force is applied.

上記に伴い、条件を表2, 表3のように選定した。傾向を把握するためケーブルの種類と動摩擦係数を条件として表2のようにした。

表2 波乗り移動力解析に伴うケーブルの解析条件  
Cable condition for cable creepage analysis.

ケーブル種別 項目		単心 (XLPE 800 mm <sup>2</sup> )	トリプレックス (XLPE150 mm <sup>2</sup> )
質量 $W$	N/m	108.8	112.7
縦弾性 $EA \times 10^6$	N	8.01 (ヤング率 $E = 10$ )	1.47 ( $E = 3.3$ )
動摩擦係数 $\mu_d$		0.3, 0.4, 0.5	0.3, 0.4

表3 波乗り移動力解析に伴う管路と車の解析条件  
Cable condition for cable creepage analysis.

項目	設定値			
管路埋設深さ $d$	m	0.6	1.5	2
車の重量 $W_c$	tf	8.57	20	27.17
管路の最大長手方向の変位量	$\mu\text{m}$	35.7		
管路長 $L$	m	300		

表3については管路と車両の条件である。管路長300 mは日本の実設備では一般的な設備条件である。車のスピードは  $v_c = 40 \text{ km/h}$  とした。

ケーブルの埋設深さについて、一般的には埋設深さは深いほど波乗り移動現象は発生し難いことが判明しているが、車両の重量を深さに合わせて重くさせることで②の摩擦力の作用長に影響を与えることを主目的としている。具体的には各々の深さにおける管路の長手方向の最大変位量を  $35.7 \mu\text{m}$  一定に設定することで、管路が深くするとともに車両の重量を増加させている。これによって管路が深く・車両が重くなるにつれてケーブルの摩擦力の作用長が増大する条件となる。

5.2 解析結果および波乗り移動現象発生条件の傾向

図14に、表2、表3に示した解析条件について、車の通過回数に対する波乗り移動力の変化を示した。

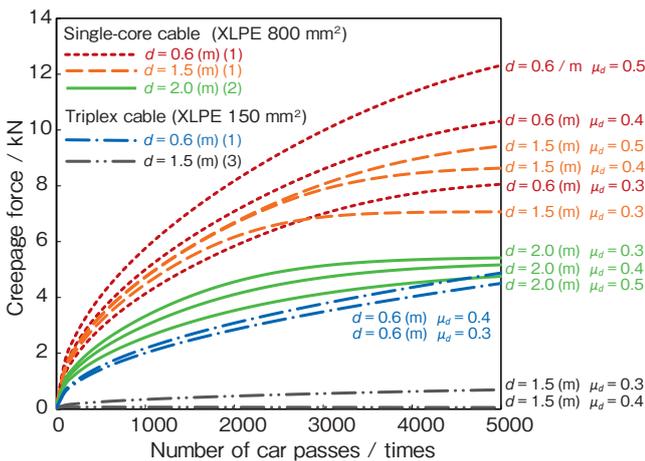


図14 車の通過回数による各種ケーブルの最大波乗り移動力の変化

Variation of the maximum cable creepage force with the number of car passes.

今回の解析によりケーブルの種類ごとに波乗り移動力を比較した結果、縦弾性の大きい単心ケーブルが大きな波乗り移動力となった。一方、トリプレックスケーブルの波乗り移動力は単心ケーブルと比較し非常に小さな値となった。これは縦弾性が

低いトリプレックスケーブルの場合、ケーブルが管路の変位に追従しているためと推察された。

また管路の埋設深さ(摩擦力の作用長の長さ)の条件によって、摩擦力の増加に伴う、波乗り移動力の増減傾向が異なる結果となった。管路の埋設深さが浅い場合(摩擦力の作用長が狭い場合)、摩擦力が増加することで波乗り移動力は増加した。一方、管路の埋設深さが深い場合(摩擦力の作用長が長い場合)、摩擦力が増加することで波乗り移動力は減少した。

上記より、一般的には管路の埋設深さが変わることで車からの直接的な影響を受けやすくなることが報告されているが、これに加えて、管路の埋設深さが摩擦力と波乗り移動力の関係にも影響することが今回の解析により判明した。

上記の結果を、条件別にケーブル弾性変位量  $\Delta C_l$  と管路の長手方向変位量  $\Delta D_l$  との関係から、ケーブル波乗り移動力の発生条件を下記の表4の通り分類できる。

表4 波乗り移動現象の発生条件  
Occurrence conditions of cable creepage.

	設備条件	波乗り移動力	$\Delta C_l$ と $\Delta D_l$ の長さ
(1)	単心ケーブル $d = 0.6 \text{ m}, 1.5 \text{ m}$	増加: $\mu_d$ 大	前進区間, 後進区間共に $\Delta C_l < \Delta D$
(2)	単心ケーブル $d = 2.0 \text{ m}$	低下: $\mu_d$ 大	前進区間: $\Delta C_l \approx \Delta D$ 後進区間: $\Delta C_l < \Delta D$
(3)	トリプレックスケーブル, $d = 1.5 \text{ m}$	$\mu_d = 0.4$ にて ほぼゼロ	前進区間, 後進区間共に $\Delta C_l \approx \Delta D$

$d$ : 管路深さ,  $\mu_d$ : 動摩擦係数

条件により、動摩擦係数  $\mu_d$  の増減により波乗り移動力の大きさの増減傾向が変化する点および縦弾性係数(ヤング率)が低いケーブルにおいて波乗り移動力が発生しにくい傾向が見られた。

6. おわりに

著者らは、波乗り移動現象は、車の荷重によって発生する管路の局所的な長手方向の変位に起因することを報告した。これは次のようなメカニズムで発生する。

- (1) 車荷重によって地中の管路に局所的なたわみが生じる。このたわみは、長手方向の変位成分を持つ。この管路の長手方向変位によってケーブルに静摩擦力が作用して、ケーブルは弾性変位する。ケーブルの弾性変位量が、管路の長手方向の変位量より小さい時に、両者に変位差が発生する。
- (2) 車が管路上を長手方向に移動すると、両者間に生じる変位差も同じ車速で動き、管路とケーブルに局所的な長手方向の速度が発生する。この管路の局所的な長手方向の速度は、車の進行方向の前進方向領域と、反対方向の後進方向領域から成る。
- (3) 動摩擦力は滑り速度に依存しないとするアモントン・クーロンの摩擦法則に基づいて、動摩擦力は滑り速度に依存しない一定値と扱う。アモントン・クーロンの摩擦法則を管路とケーブルの長手方向の相対速度に適用すると、ケーブルに作用する動摩擦力量は、以下のように前進方向の方が後進方向領域よりも大きくなる。この動摩擦力の作用量の相違によって、ケーブルは前進方向に移動する。

最大動摩擦力の絶対値 : (前進) = (後進)  
 動摩擦力の領域長さ : (前進) > (後進)  
 (絶対値) × (領域長さ) : (前進) - (後進) > 0

この理論に基づき、ケーブルの設計やメンテナンスのために、普通のPCで容易に使える波乗り移動力解析システムを開発した。さらに、実規模実験を行い、測定値と解析値がよく一致することを確認することにより、理論の妥当性を検証した。開発したケーブル波乗り移動力解析システムを用いることにより、波乗り移動現象の発生傾向を検討することが可能になった。

## 参考文献

- 1) 電気協同研究会, “CVケーブル線路における工事技術の現状と今後の展望”, 電気協同研究, Vol.61, (2005).  
Electric Technology Research Association: “The present and future engineering technology applied for XLPE cables installation” Japan, 61 (2005).
- 2) A.C.Timmis: “The Creepage of Underground Cable”, POEEJ, 30 (1937), 180-185.
- 3) Y.Watanabe, K.Kanazawa, T.Sasaki: “MEASURES AGAINST CREEPAGE OF 275KV HPFF CABLE”, IEEE Transaction on Power Delivery, 4 (1989), 25-33.
- 4) J.K.Kim, J.S.Yi: “Kinematics of Cable Creepage”, IEEE Transactions on Power Delivery, 14 (1999), 1-7.
- 5) Valentin L.Popov: “Contact Mechanics and Friction” Springer, April 2010.
- 6) 上林知紀, 長山忠則, 玉井宣光, 中井純平, 村田雅彦, 西久保裕康: “管路布設電力ケーブルの波乗り移動解析手法の開発”, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), 140 (2022)277-285.  
T.Kamibayashi et al.: “Development of Analytical Method for Cable Creepage Phenomenon in Duct” (IEEJ Transactions on Power and Energy, 140 (2020), 277-285).
- 7) K.L.Johnson: “Contact mechanics”, Cambridge University Press, 2008.
- 8) 上林知紀, 坂田学, 海老沼康之, 山本俊和, 村田雅彦, 西久保裕康: “電力ケーブルの波乗り移動の研究(第6報)” 電気学会全国大会講演論文集, 127 (2018)198-199.  
T.Kamibayashi et al.: “A Study of the Power Cable Creepage in the Duct (No.6)” (2018 National Convention Record, IEE Japan, 127 (2018), 198-199).