

ケーブル収容管用ライニング管の 地震時における光ケーブル防護機能

山崎 泰司¹・田中 宏司²・奥津 大³・若竹 雅人⁴・鈴木 崇伸⁵・庄司 学⁶

¹正会員 NTTインフラネット株式会社 (〒460-0003 名古屋市中区錦 1-10-20)
(筑波大学大学院システム情報工学研究科 博士後期課程 早期修了プログラム履修中)
E-mail: yamazaki-yasushi@nttinf.co.jp

^{2,3,4}正会員 NTTアクセスサービスシステム研究所 (〒305-0805 つくば市花畑 1-7-1)
²E-mail: tanaka.koji@lab.ntt.co.jp

³E-mail: okutsu.masaru@lab.ntt.co.jp

⁴E-mail: wakatake.masato@lab.ntt.co.jp

⁵正会員 東洋大学教授 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 川崎市鯨井 2100)
E-mail: tsuzuki@toyo.jp

⁶正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

地震時に既設管路設備が損傷しても光ケーブルを防護し通信遮断させない対策(二重管構造)が可能になれば、減災効果を可能とする新しい設計・対策の展開を図ることができる。本研究では、管路が損傷した後の光ケーブル損傷メカニズムを考慮した既設管路設備の性能評価を行う。具体的には、1) 既設管路継手が押込み・引き抜きにより繰り返し衝突する場合、2) 液状化地盤並びに軟弱地盤での不等沈下など永久変位を受ける場合、3) 防護コンクリートの破断に伴うせん断作用を受ける場合、の3通りの作用を想定し、既設管路継手が破損した後、ケーブル収容管用ライニング管が光ケーブルの収容空間を保持し、ケーブル防護機能を有することを実験的に明らかにした。

Key Words: optical fiber cable, pipe in pipe, failure due to cyclic loadings, uneven subsidence

1. はじめに

上下水道、電気、ガス、通信など各ライフライン設備は、人々の日常生活に無くてはならない重要な設備という共通点はあるものの、それぞれの提供するサービスの違いにより、その設備に対する要求性能は異なる。例えば、ガス管が地震時に破損しガス漏洩が発生した場合、サービス提供に支障を生じることのみならず、人命に影響しかねない大事故が想定されるためガス管そのものの耐震性を向上させる必要がある。

一方、通信において通信サービスが途絶すると、損傷直後の安否確認や建物の被害状況などの把握が困難になる他、災害救助に必要な行政・防災機関等においても初動に必要な情報伝達が遅れるなど生命・財産に関わる重大な危機を招く恐れがある。しかしながら、地震により管路設備が損傷しても、通信ケーブルが損傷せず使用可能であればサービス提供を続けることが可能となる。

これまで、通信における既設管路の耐震対策は、主に

継手部における伸縮機能の向上や離脱防止機能、マンホール取付け部における伸縮機能の向上であり、管路設備が力学的に損傷しにくくすることに重点が置かれた¹⁾。しかし、これらの耐震対策は、管路や光ケーブルを取り換える必要があり、多大な費用を伴うことから現実的には行われていない。

これらの課題に対し、筆者ら²⁾が開発した光ケーブルが収容されている状態で老朽管路を再生する技術であるケーブル収容管用ライニング管(以下 ライニング管)が地震時の管路損傷に対して収容された光ケーブルを防護する効果について検討を行った。

既設管路の更生工法による耐震補強は、下水道分野で導入されており、日本下水道協会は2011年12月に「管きょ更生工法における設計・施工管理ガイドライン(案)」で更生工法の耐震性能の評価方法をまとめている³⁾。同ガイドラインでは、更生材単独で自立できる耐久性と耐荷能力により新管と同等以上の性能を有する自立管、既設管路と更生材が構造的に一体となって新管と

同等以上の性能を有する複合管を対象にしている。

前者は、継手のない一体構造となっており、既設の小口径管（呼び径 800mm 未満）を対象に、地震時に更生材が単独で耐力を有する必要があるとされている。耐震設計においては、管軸方向に地震動が伝搬し軸方向の影響を受けやすいため、管軸方向の応力度を主体に検討し、鉛直断面に対する検討は省略してもよいとしている。さらに、自立管の周囲には既設管路が存在し、自立管に対し局所的に外力が働く可能性があるものの、既設管 1 本毎の地震時挙動を把握することは不可能であることから、既設管路がないものとして検討を行うこととしている。

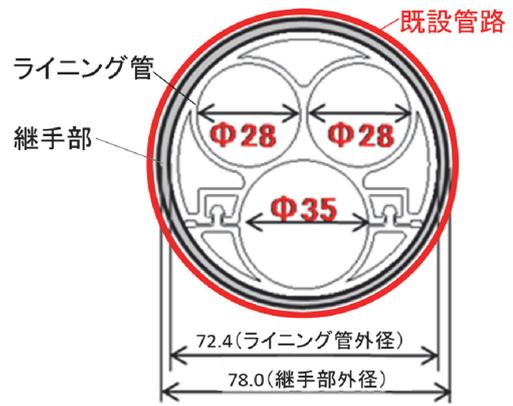
後者は、既設管路と更生材が一体となった構造であることから、地震時に既設管路の挙動が優位に働くと想定している。耐震設計においては、管軸方向と鉛直断面を検討することとしているが、既設管呼び径 800mm 未満の場合は、軸方向の検討でよいとしている。

本研究対象とするライニング管は、継手を有するとともに、既設管路と密着せず構造的に一体とならないことから、同ガイドラインにおける自立管、複合管とも異なり、既設管路の挙動を考慮した耐震設計の考え方や手法は確立されていない。

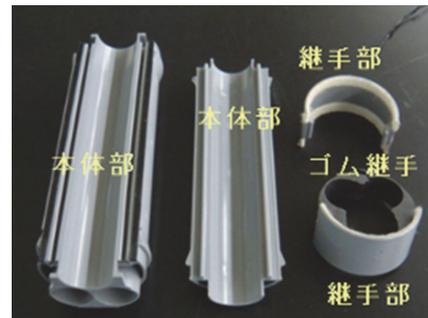
通信分野において、田中ら^{4),5)}は、更生管の耐震性評価方法を提案し、ケーブルを収容していない更生管を対象とした地震時の挙動及びケーブル防護効果を解析と検証実験により確認している。これらの検討は、継手構造を有しない、シームレスな更生管であり、本研究対象としている図-1 に示すような継手構造を有するライニング管とは、明らかに構造特性及び地震時挙動が異なる。

ライニング管によるケーブル防護効果について、奥津ら⁶⁾及び筆者ら⁷⁾は、地震応答解析と検証実験を行い、ライニング管と既設管路との接触面積が小さく既設管路の挙動による影響を受けにくいこと、短い間隔で継手があり系として変位を吸収できること、などから光ケーブル防護効果が期待できるとし、既設管路継手が離脱した後の地震外力を想定した実験を行っている。しかしながら、光ケーブルが損傷に至るメカニズムは十分に明らかになっておらず、さらにメカニズムを考慮した性能評価を示すには至っていない。

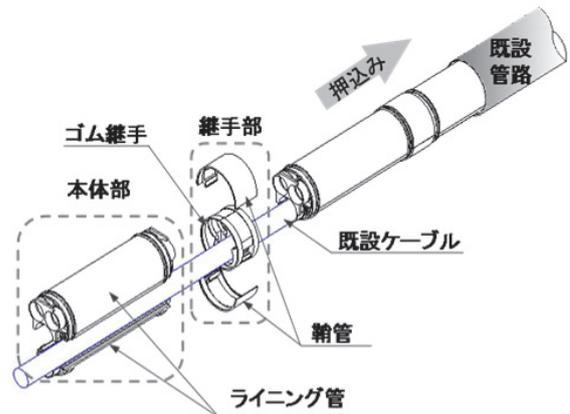
本研究では、光ケーブル損傷のメカニズムを代表的な損傷モード別に整理し、地震応答解析では求めることが難しい既設管路が損傷した後のライニング管の挙動およびライニング管の光ケーブル防護機能の評価に研究対象を絞り、損傷モード毎の性能評価を実験的に明らかにする。その上で、ライニング管の既設管路への耐震対策としての有用性を提案する。



(1) ライニング管の断面



(2) ライニング管の部材構成



(3) ライニング管の施工方法

図-1 ライニング管の概要

2. ライニング管、既設管路の特性

ライニング管は、内径 80.7mm の金属管に適用しており、本研究では既設管路の大半を占めるねじ継手鋼管 (JIS G 3452)⁸⁾とライニング管との組み合わせを検討する。

ライニング管の概要を図-1 に示す。ライニング管は、既設の 1000 心光ケーブル 1 条と新設の細径 1000 心光ケーブル 2 条を収容できる独立した 3 つの光ケーブル収容空間を備えている。材料は主に硬質塩化ビニルである。また、曲線区間への対応として、図-1 に示すようにラ

ライニング管本体同士を接続する継手部分に 6mm の伸び代を設け、一か所で約 7度の曲げを可能とすることで管軸方向および屈曲挙動に対し柔軟性を持たせている。

本研究に用いるライニング管とねじ継手鋼管の寸法及び材料特性を表-1 に示す。ライニング管継手並びにねじ継手の引き抜きと押し込み、及び、回転に関する力学性状を図-2、図-3 にそれぞれ示す。なお、ライニング管の特性は、開発時の物性試験値を基に設定した。

ねじ継手鋼管における地震被害は数多く報告されており、ケーブルを収容した状態のねじ継手鋼管に対し、耐震性を向上させることが可能となれば、実用的な対策として有用である。

3. 光ケーブル損傷のメカニズム

これまでの管路設備の耐震対策に関する検討は、第 1 章で述べたように管路そのものを損傷しにくくすることに重点が置かれてきた。高田ら^{9, 10)}により通信管路の地震時挙動の解析方法が研究され、1995 年の兵庫県南部地震¹⁾、2004 年の新潟中越地震¹⁾、2007 年の新潟中越沖地震¹⁾、2011 年の東北地方太平洋沖地震^{11, 12)}、2016 年の熊本地震まで最大震度 7 の地震を経験し、既設管路の性能がおよそ判明し、光ケーブルが損傷するメカニズムについてもそのパターンが明らかになってきた。

なお、外力が光ケーブルに及ぼす影響について、田中ら¹³⁾は、光ケーブルに加わる張力、屈曲角の関係を実験的に解明し、心線数が 1000 心の光ファイバーケーブルにおいて、引張荷重 8kN 程度で破断すること、屈曲角 60° を超えると急激に伝送損失が大きくなることなどを示し、引張作用や曲げ作用に対する光ファイバーの脆弱性を報告している。

過去被災から管路が損傷しやすい箇所は、液状化地盤や軟弱地盤における永久変位、盛土造成における沈下・流動・崩壊、橋台背面やボックスカルバート周辺での不等沈下などである。このような過去の損傷状況から光ケーブルが損傷に至るメカニズムについて、図-4 から図-7 に示す以下の 4 つの損傷モードに分類した。図-4 および図-5 は管路軸方向の損傷に伴うケーブルの損傷モード、図-6 および図-7 は不等沈下に伴う管路のせん断損傷に伴うケーブルの損傷モードである。なお、せん断方向の損傷は、過去の地震被害において管軸垂直方向が顕著であり、軸直水平方向の損傷は、大規模土砂崩壊などに伴うケースのためライニング管では防護できないことから、本研究の対象外とした。

パターン 1 は、軟弱地盤での不等沈下、液状化による沈下や側方流動、盛土の流動・崩壊などによりマンホールダクトにケーブルが引き込まれる場合や、地震動による地盤ひずみや側方流動などによりダクト部から管路が

表-1 ライニング管 (提案法) , ねじ継手鋼管 (従来法) の特性

分類	項目	単位	ライニング管 (提案法)	ねじ継手鋼管 (従来法)
寸法	外径	mm	78.0	89.1
	肉厚	mm	5.9	4.2
	管長	mm	230	5,500
材料物性	弾性係数	N/mm ²	2,307	205,940
	塑性後の弾性係数	N/mm ²	23	205,940
	引張強度	N/mm ²	44	350
	塑性開始ひずみ	%	1.91	0.17
	ポアソン比	-	0.35	0.3

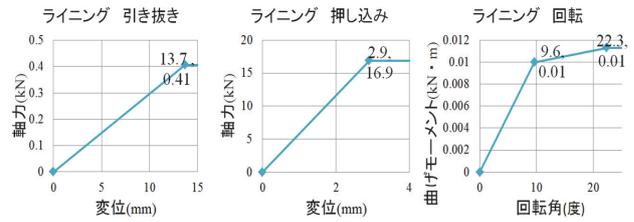


図-2 ライニング管継手の特性

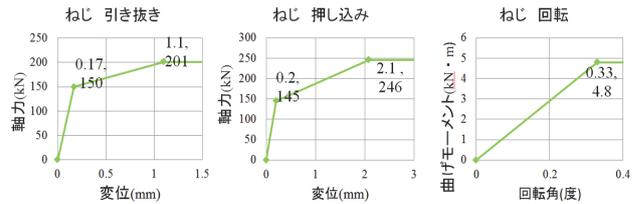


図-3 ねじ継手の特性

マンホール側に突き出す場合において、マンホール内に固定している光ケーブルに引張が生じる損傷モードである。このような場合には、引張力あるいは許容を超える屈曲状態により光ケーブルが損傷もしくは伝送損失が増加する。図-4 にマンホール内での引張・屈曲による損傷メカニズムを示す。図中のケーブル接続点の左側の光ケーブルは通常の状態を示し、右側の光ケーブルは引張られることで屈曲角が生じている。なお、ねじ継手鋼管以前の規格においては、ダクト部での管路突出しによる屈曲状態を伴う損傷も確認されている。

パターン 2 は、地震動によりマンホール間で管軸方向の引張・圧縮を受け、管路の継手部が離脱し、その後の繰り返し衝突により、管路の変形に伴い光ケーブルが損傷もしくは伝送損失が増加する損傷モードである。盛土造成における沈下・流動、液状化地盤や軟弱地盤における永久変位などにより、軸方向に対し屈曲角度を伴って繰り返し衝突する場合もある。図-5 に地震動による繰り返し衝突に伴う損傷メカニズムを示す。

パターン 3 は、橋台背面やボックスカルバート周辺な

ど人口造成された比較的軟弱な地盤での不等沈下, 同様に液状化地盤で強固な構造物周辺に生じる不等沈下により, ねじ継手が離脱する. このような場合には, 離脱した管路が地盤変状に追従し, 光ケーブルが損傷もしくは許容を超えた屈曲状態になることで伝送損失が増加する. **図-6** に管路区間での不等沈下に伴う引張・屈曲による損傷メカニズムを示す.

パターン4は, 橋台背面やボックスカルバート周辺など人工造成された軟弱な地盤での不等沈下や液状化地盤で強固な構造物周辺におこる不等沈下により, 防護コンクリート区間内で防護コンクリートが破損し, 鉛直方向に沈下する損傷モードである. このような場合には, 光ケーブルにせん断作用が生じ, 損傷もしくは伝送損失が増加する. **図-7** に防護コンクリート区間内でのせん断作用による破断・損失増加による損傷メカニズムを示す.

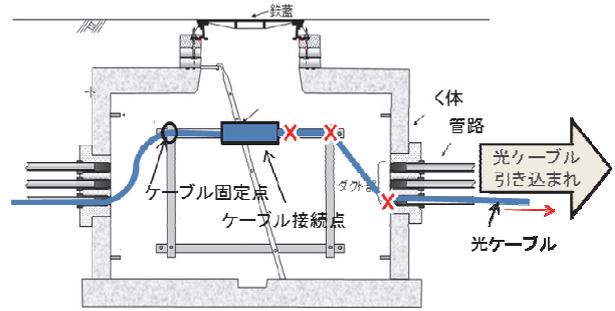
パターン1については, 既設管路への対策ではなく, マンホール内に光ケーブルの余長を多くとり, 光ケーブルに作用する引張力や屈曲角度を緩和する方法が有効である. なお, 既設管路の突出しに対しては, ライニング管による二重管を適用している場合において, **写真-1** に示すようにライニング管把持具や取付け金物をアンカーボルトによりダクト口に固定しているため, ダクト部におけるコンクリートの剥離・落下や管路突出しへの抑制効果も期待できることから, 今後とも損傷事例を注視しつつ, 特段の方策はとらないこととする.

従って, 次章以降, パターン2からパターン4の3パターンについて, ライニング管によるケーブル防護機能の性能評価を実験的にを行い, 光ケーブルの損傷低減効果について述べる.

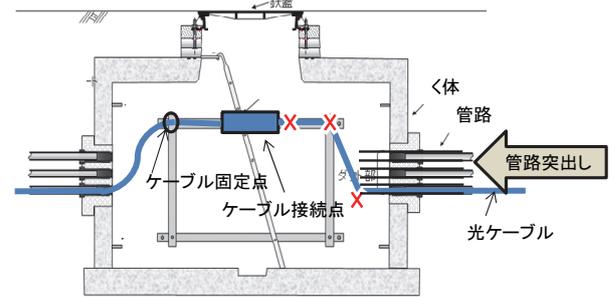
4. 繰り返し衝突に関するケーブル防護機能評価

(1) 繰り返し衝突に関する実験条件の設定

過去被災では, **図-5** に示したとおり, 土中での引張と圧縮を受け, 管路の継手部が損傷し継手が離脱した後, 再び元の位置に戻ろうとするため離脱した継手部で繰り返し衝突が生じ, ケーブル損傷にまで至るケースがある. 繰り返し衝突によって管端部が著しく損傷した実被災状況を**写真-2**に示す. 実験モデルを**図-8**に示す. 評価は, 250kN 万能試験機を用いて軸方向に繰り返し引張と圧縮を加え, ライニング管がある場合と無い場合で光ケーブルの損傷に与える影響を比較する. 供試体は, **表-1**に示すねじ継手鋼管を使用した. 実験は鉛直方向の変位制御により行い, 振幅は, 2007年新潟県中越沖地震での被災事例を再現した解析より得られた値⁵⁾とし, 継手が50mm押し込まれる圧縮を想定している. その際, 屈曲角なしの場合(屈曲0°)と側方流動等により屈曲角を伴う場合(屈曲4°)の2ケースを想定した.



(1) ダクトへの光ケーブル引き込まれ



(2) 管路のマンホールへの突出し

図-4 パターン1 (マンホール内での光ケーブル引張, 屈曲)

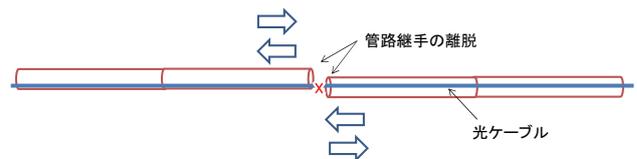


図-5 パターン2 (離脱したねじ継手の繰り返し衝突)

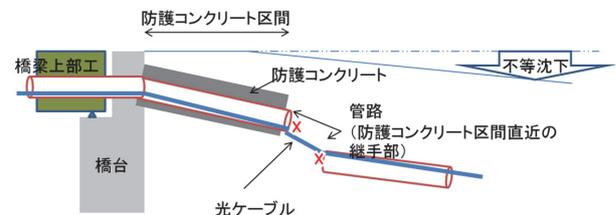


図-6 パターン3 (不等沈下)

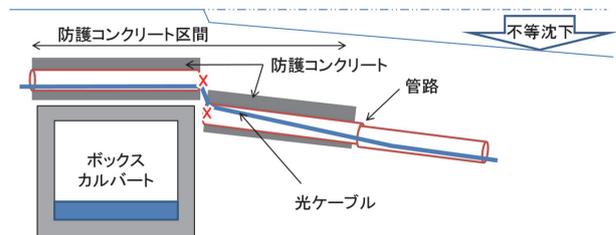


図-7 パターン4 (せん断作用)

屈曲角 0°の試験では, 試験機の圧縮性能の関係からねじ同士を突き当てた位置 (ねじ込んだ位置から 30mm程度抜けた位置) から 80mmの押し込み, 引き抜きのサイクル試験を3サイクル行った. ライニング管がない状

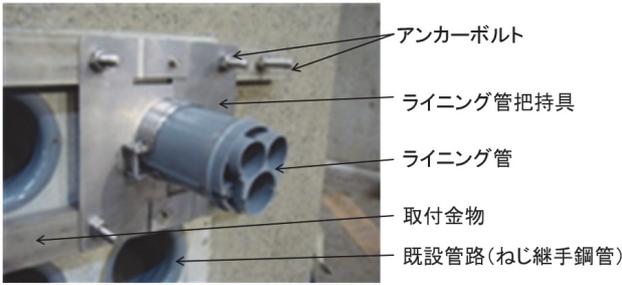


写真1 ライニング管のマンホール内取付状況

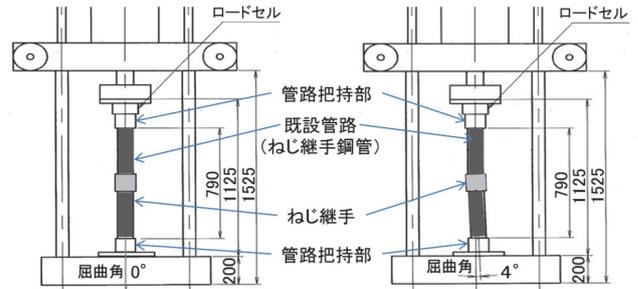


図8 繰り返し衝突の実験モデル

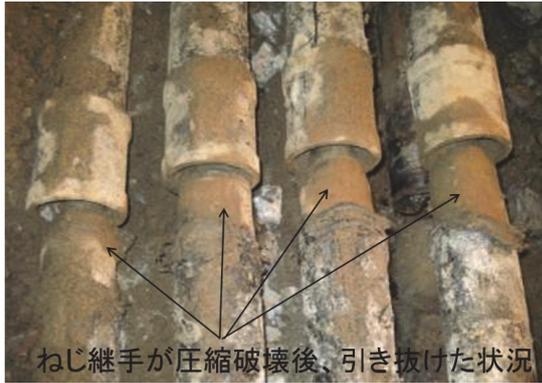


写真2 繰り返し衝突による実被災状況

	ライニング管なし	ライニング管あり
屈曲角 0°	<p>管路 光ケーブル ケーブル損傷</p>	<p>ライニング管 ライニング管損傷なし</p>
屈曲角 4°	<p>光ケーブル ケーブル損傷</p>	<p>管路 ライニング管 ライニング管損傷なし</p>

図9 繰り返し衝突に関する実験結果

態で管内部に光ケーブル (SM1000) を挿入し、ケーブル外被の損傷状況を確認する。

屈曲角 4°の試験では、試験機の圧縮性能の関係から管端部同士を突き当たった位置 (ねじ込んだ位置から65mm程度抜けた位置) から115mmの押し込み、引き抜きのサイクル試験を3サイクル行った。ライニング管のケーブル収容空間に光ケーブル (SM1000) を挿入し、ケーブル外被の損傷状況を確認する。

なお、衝突による鋼管の変形は、3回程度の衝突で収束し、さらなる衝突回数による変形が期待できないことから3サイクルとしている。また、試験速度はいずれの屈曲角のケースにおいても試験機の最大速度である500mm/minとした。

(2) 繰り返し衝突に関する評価結果と考察

屈曲角 0°の時、ライニング管がない場合は、図9(上)に示すように、衝突時の軸ずれにより鋼管継手部が管内側にめくれ上がる様な損傷が再現され、鋼管の変形により収容された光ケーブルの外被が損傷している。ケーブルを多条布設している場合やケーブルに張力が働いている場合は、更に損傷度が高くなるのが想定される。一方、ライニング管がある場合は、ねじ継手鋼管は損傷するが、ライニング管が管軸方向へのガイドになり鋼管の変形は軽減され、ライニング管の表面に傷は付いたがケーブル収容空間は健全であり、収容した光ケーブルに損傷は生じなかった。

屈曲角 4°の時、ライニング管がない場合は、図9(下)に示すように、衝突時の軸ずれが大きくなるため鋼管継手部が管内側に大きくめくれ上がり、内側に食い込む損傷が再現され、鋼管の変形により光ケーブルが断線にまで至っている。一方、ライニング管がある場合、ねじ継手鋼管は損傷するが、ライニング管が管軸方向へのガイドになり鋼管の変形は著しく軽減され、ライニング管の表面に傷は付いたがケーブル収容空間は健全であり、収容した光ケーブルに損傷は生じなかった。

繰り返し衝突に関する性能評価として、ライニング管が無い場合のねじ継手鋼管は、継手部でねじが管内部に捲れるように損傷し、収容された通信ケーブルを損傷する可能性が高いことが確認できた。一方、ライニング管がある場合、ライニング管表面に傷は付くものの、ケーブルの損傷は無く、光ケーブルを防護する効果が期待できることが確認できた。

5. 不等沈下に関するケーブル防護機能評価

(1) 不等沈下の評価モデルの設定と解析的検証

液状化地盤や軟弱地盤においては、図6に示したとおり、不等沈下、盛土の変状などにより、防護コンクリート直近継手部が離脱し、離脱した管路が地盤変状に追

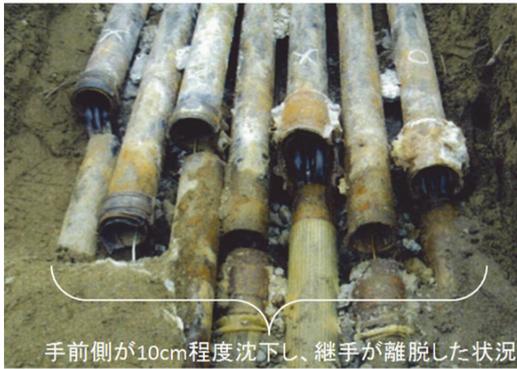
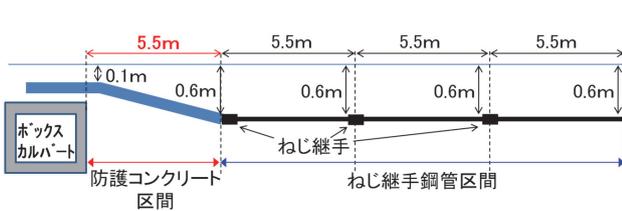
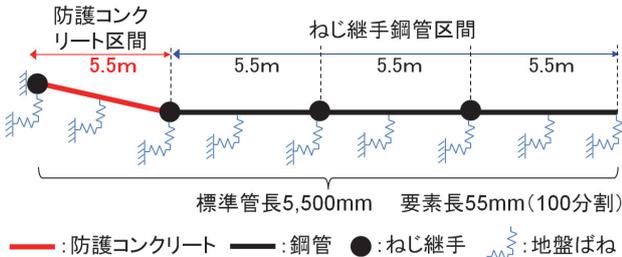


写真-3 不等沈下による実損傷状況



(1) 解析を行った設備構成



(2) 解析モデル

図-10 不等沈下に伴うねじ継手の挙動解析モデル

随することでケーブルが損傷することがある。地盤変状による管路の損傷状況を写真-3に示す。なお、防護コンクリートは、無筋構造で、そのコンクリート強度は13MPa以上と定めている。ここでは、防護コンクリートによる補強が機能し、防護コンクリート区間直近の第一接続部のねじ継手が離脱した事例を想定する。この損傷パターンも、管路の連続性が継手部で損なわれた場合にはケーブル損傷にまで至る可能性が高い。

このような箇所への耐震対策として、1983年に伸縮機能と離脱防止ストッパー機能を具備した離脱防止継手を導入している。離脱防止継手の設計上の沈下量は、道路土工指針¹⁴⁾に規定されている最大沈下量である30cmの不等沈下に対応可能であること、兵庫県南部地震以降、震度階7クラスの地震を経験し、大規模な土砂崩壊、大規模な流動、断層を伴う大規模な地盤変状を除き、施工時の転圧不足を想定した不等沈下においては、現在まで被災事例がないことから、離脱防止継手の効用は確認できていると考える。

ライニング管のケーブル防護効果を評価する手順は、1)解析により30cmの不等沈下が発生した時のねじ継手

表-2 部材特性

区間	断面形状	部材特性
ねじ継手鋼管区間		弾性係数E: 206 kN/mm ² 標準管長L: 5500 mm 外径D: 178 mm 肉厚t: 0.92 mm
防護コンクリート区間		弾性係数E: 35 kN/mm ² 標準管長L: 5500 mm 外径D: 350 mm 肉厚t: 16.5 mm

表-3 地盤ばね

地盤ばね (N/mm ³)		すべり限界値 (mm)	拘束力 変位
軸直角方向	$K = 0.89 \times 10^{-3}$ $K' = 0.0089 \times 10^{-3}$	40	
軸方向	$K = 1.9 \times 10^{-3}$ $K' = 0.17 \times 10^{-3}$	5	

鋼管の挙動を求めた上で、ねじ継手鋼管の損傷が見られる場合には、2) 解析により30cmの不等沈下が発生した時の離脱防止継手の挙動を求め、3) さらに、解析結果で離脱防止継手が損傷しない領域では、解析で得られた離脱防止継手の挙動がライニング管に作用すると考え、ライニング管が離脱防止継手以上の地盤追従性を有するかを検証する。不等沈下に伴うねじ継手の挙動解析モデルを図-10に示す。挙動解析は、不等沈下が発生した際の強制変位を地盤ばねを介して管路に作用させた。解析には、地下線状構造物の耐震解析に実績のある ERAUL2007¹⁵⁾を用いた。防護コンクリート部の長さを5.5mとし、5.5mのねじ継手鋼管3本が接続されたモデルとした。

1983年に離脱防止が導入される以前の管路設計に基づく、代表的な旧規格管路設備形態である。図-10に示すように左端のボックスカルバート端部は沈下しないため固定点とし、右端を自由端とした。各部材の要素長は0.1mで分割した。表-2にねじ継手鋼管区間と防護コンクリート区間の断面形状を示す。防護コンクリート区間の弾性係数は、ねじ継手鋼管とコンクリート合成値とした。

部材の特性は、ERAUL2007で解析可能な様に、断面幅と断面係数が等価となるパイプ断面に置き換えた。地盤ばねは、又木らの研究¹⁶⁾により報告された軟弱地盤における通信管路の挙動解析の値を用い、表-3に示すようにバイリニア形の地盤ばね特性とした。すべり限界値までの地盤ばねをK、すべり限界以降の地盤ばねをK'とする。ねじ継手鋼管の特性は表-1を、ねじ継手の特性は、図-3に示す非線形特性を用いた。

表-4に各要素に不等沈下を想定した地盤の強制変位

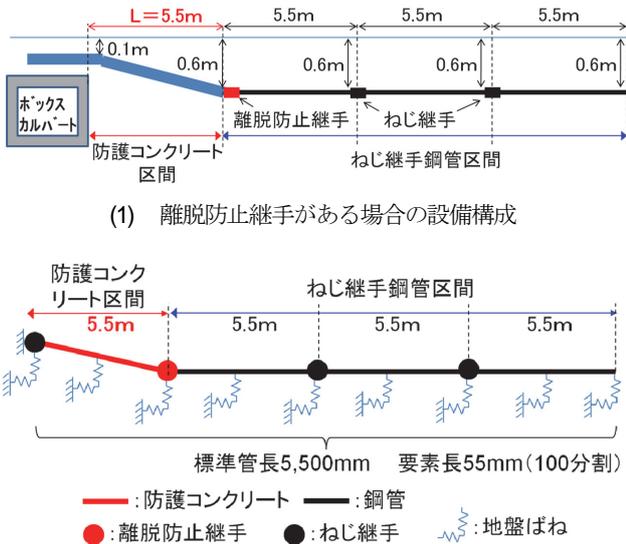


図-11 不等沈下に伴う離脱防止継手の挙動解析モデル

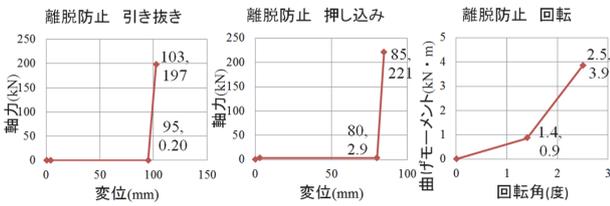


図-12 離脱防止継手の特性

表-4 不等沈下に伴う挙動解析結果

第一接続点の継手種別	沈下量10cm		沈下量20cm		沈下量30cm	
	回転量 (Deg)	伸縮量 (mm)	回転量 (Deg)	伸縮量 (mm)	回転量 (Deg)	伸縮量 (mm)
ねじ継手	-0.14	0.01	0.73	0.02	1.7	0.02
離脱防止継手	-0.23	4.1	0.69	7	1.74	8.01
ライニング管継手の特性(図-2より)					9.6	13.7

を与えた場合の挙動解析結果を示す。不等沈下に伴うねじ継手の挙動解析から、伸縮量は 0.02mm と許容値 0.17mm を下回るものの、回転量については、沈下量が 20cm を越えた時点で 0.73° となり、許容値 0.33° を大きく超える結果となった。なお、回転量は時計回り方向を正とする。

次に、防護コンクリート端部に離脱防止継手を設置した現行設計における挙動を求める。なお、離脱防止継手を設置した現行規格管路で被害が生じた事例は報告されていない。解析により 30cm の不等沈下が発生した時の離脱防止継手の挙動を求めることで、既設管路に作用する最大クラスの変形を求める。不等沈下に伴う離脱防止継手の挙動解析モデルを図-11 に示す。図-10 に示したねじ継手の解析と同様に、防護コンクリート部の長さを 5.5m とし、防護コンクリート右端部の継手を離脱防止継手とした。各部材の要素長は 0.1m で分割した。断面

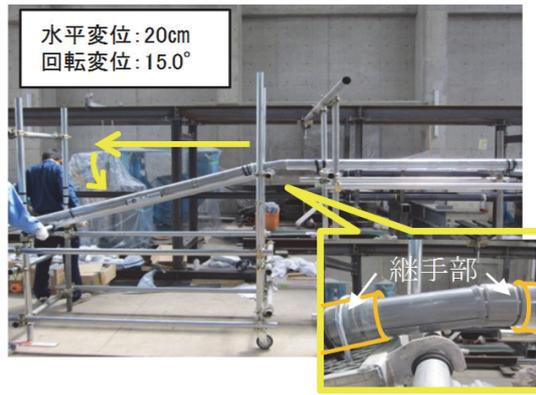


写真-4 不等沈下による検証モデル

表-5 不等沈下を想定した強制変形実験の結果

		回転変位量					
		0°	2.5°	5.0°	7.5°	10.0°	12.5°
水平変位量	7cm 引張	離脱防止継手の可動域		ライニング管の可動域			
	10cm 引張	離脱防止継手の可動域					
	15cm 引張	離脱防止継手の可動域					
	20cm 引張	離脱防止継手の可動域					

形状・部材の特性および地盤ばね特性もねじ継手と同様に、表-2 および表-3 の値を使用した。離脱防止継手の特性は、図-12 に示すように実験から得られた非線形特性を使用した。

不等沈下に伴う離脱防止継手の挙動解析結果を表-4 に示す。沈下量 30cm の場合において、離脱防止継手の伸縮量は 8mm 程度と限界値 103mm に対し小さな値となり、回転量についても、1.7° となり、限界値 2.5° を下回り継手の損傷や収容ケーブルの被害は生じない結果となった。従って、ライニング管の不等沈下に伴う地盤追従性については、ライニング管が離脱防止継手以上の伸縮量と回転量を有している場合、光ケーブルを防護できる可能性が高いと考えられる。

図-2 に示したライニング管継手の特性から、離脱防止継手の伸縮量 8mm に対しライニング管継手は 13.7mm と上回り、離脱防止継手の回転量 1.7° に対しライニング管継手は 9.6° と上回る結果となった。従って、図-10、図-11 に示す不等沈下モデルに対し安全と考えられる。しかしながら、離脱防止継手の特性として、引き抜き量 103mm を有していることから、性能評価として離脱防止継手と同等以上の引き抜き量と回転量を有していることを実験的に検証することとした。

(2) 不等沈下に関する評価実験と考察

検証実験は、ライニング管部材 36 個(8.3m)を接続し、ライニング部材の状態が目視確認できるようなねじ継手鋼管と同じ内径の亚克力製の透明な管の中に設置した。

アクリル管とライニング管の接続条件は、両者を両端でボルトにより固定した状態とした。写真-4 に示すようにアクリル管中央部に離脱箇所を設け、強制的に水平方向の引張変位を与えた後、強制的に曲げ変形を加える順番で不等沈下を想定した強制変形実験を行い、継手部に破損などの異常がないか目視により確認した。

不等沈下を想定した強制変形実験の結果を表-5 に示す。水平方向の強制変位は 7cm から最大 20cm まで引張り、曲げ変形については 0° から 2.5° 間隔で最大 15° まで強制的に変形を加えた。接続部においてライニング管の破損は生じていないことから、ライニング管の不等沈下に対する限界値は水平引き抜き量 20cm、回転変位量 15° であることが確認できた。

不等沈下に関する性能評価として、ねじ継手鋼管離脱後の地盤変状に対し、ライニング管は、スムーズに挙動し、光ケーブル收容空間を維持し続けていることから、現行対策である離脱防止継手以上の十分な追従性を有していることが確認できた。ライニング管は、ねじ継手鋼管離脱後の不等沈下に対し、光ケーブルを防護する効果が期待できることを確認した。

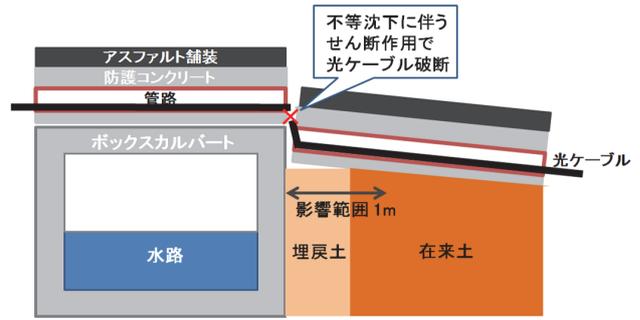
6. せん断作用に関するケーブル防護機能評価

(1) 損傷事象を踏まえた光ケーブルに作用するせん断力のモデル化

暗渠や橋台などの周辺は、構造物を建設した後に埋戻した土により覆われている。埋戻土は、一般地盤に比べ地震動で沈下が生じやすい軟弱な地盤と言える。このような、沈下の生じやすい埋戻土に覆われた暗渠や橋台の周辺では、構造物の周辺地盤が沈下する不等沈下が発生しやすい。

東北地方太平洋沖地震時に実際に生じたケーブル切断事例は、図-7 に示すように、ボックスカルバートを上越した区間の防護コンクリートが破断し、周辺地盤の沈下に伴い防護コンクリートが鉛直方向に沈下し、光ケーブルにせん断力が作用し破断した事例である。図-13 にその損傷事象を示す。

損傷は、国道に添って歩道内に占用する管路設備と国道を横断するボックスカルバート製の水路との交差する箇所が発生している。管路設備は、ボックスカルバートを上越しするために占用位置を浅くする必要があり、通常であれば多条多段のところを1段9条の平積みにしてボックスカルバートに直接載せていた。管種は、ねじ継手鋼管であり、継手位置は、管軸方向に千鳥配置ではなく同一箇所にて位置していた。管路布設時に管路を並べてから継手を接続するため施工上のやり易さから継手位置を揃えていることが過去多かったためである。継手位置としては、4条はボックスカルバート直上に位置し、



(1) 縦断方向断面図



(2) 損傷状況写真

図-13 せん断作用による光ケーブル損傷事象

残り5条はボックスカルバート直上からずれ、埋戻土の上に位置している。

損傷状況は、ボックスカルバート端部に位置するねじ継手部で防護コンクリートが継手位置に添って割れ、管路継手は全て離脱していた。今回、複数のねじ継手の位置を同一線上に揃えることで継手の外径分のコンクリート厚さが薄くなること、隣り合う継手間のコンクリート厚さが薄くなることなど、構造体として弱点部になり易いと考えられる。なお、離脱した継手のねじ部を中心に管路が腐食しており、地震前から防護コンクリートに亀裂等が発生し、水分を供給していた可能性も考えられるが、コンクリート厚さが薄いことやこのような形態での施工箇所が多いことを考えると防護コンクリート区間における不等沈下に伴う現象と考えられる。

9条の管路の内、ボックスカルバート直上に継手が位置している4条については、防護コンクリート端部がボックスカルバート上にあり段差を伴う沈下は生じず、光ケーブルの損傷も免れた。一方、ねじ継手位置がボックスカルバート上に無い5条については、管路を含む防護コンクリート、アスファルト舗装ともに管軸鉛直方向に約 15cm 沈下している。鋼管の内径は 80.7mm、外径は 89.1mm であり、約 15cm の沈下は、管路直径の約 2 倍の

沈下に相当する。管路に収容されている光ケーブルは、ボックスカルバート上に位置し続ける管路と離脱後沈下する管路に挟まれるように上載荷重相当のせん断力が加わり、光ケーブルが破断し通信が途絶した。

鋼管は、ボックスカルバートを上越すため地表面に近い場所に占用している。ケーブル切断箇所では、15cmの沈下が見られたが、1m程度先からは元の地面と接地しており上載荷重は地盤が負担している。管路の占用位置は、歩道 0.6m、車道 1.2m を標準としておりボックスカルバートを上越する浅層区間からは通常の占用位置に向かって深く埋設することになる。

今回の損傷事象は、1) ボックスカルバートの埋戻土近辺で発生する急激な段差を伴う不等沈下であること、2) 沈下側の管路、防護コンクリートの軸方向は埋設深度が深くなる方向に傾斜していること、3) ボックスカルバート周辺から離れた位置では地盤の転圧が冴いており比較的安定した状態で防護コンクリートを支持していること、などから光ケーブルに作用したせん断力は図-14 に示すように影響範囲の両端部で支持する片端持上荷重モデルであることから、全上載荷重 F (単位幅あたりの上載荷重 $W_c \times$ 影響範囲の長さ L の 1/2 がせん断力 Q として作用するモデルとなる。図-15 に上載荷重モデルを示す。上載荷重としては、1) アスファルト舗装重量、2) 防護コンクリート重量、3) 既設管路重量、を考える。荷重モデルから総計重量の 1/2 がせん断力として作用するので光ケーブルに作用するせん断力 Q は、以下の式(1)となる。

$$Q = \frac{1}{2} [B \times h_1 \times L_s \times \gamma_1 + B \times h_2 \times L_s \times \gamma_2 - \frac{\pi}{4} D_c^2 \times L_s \times \gamma_2 \times R + \frac{\pi}{4} (D_c^2 - d_c^2) \times L_s \times \gamma_3 \times R] \quad (1)$$

ここに、 L_s : 管路軸方向の不等沈下する区間の長さ、 B : 管路鉛直方向の沈下する防護コンクリートの幅、 h_1 : アスファルト厚、 γ_1 : アスファルト単位体積重量、 h_2 : 防護コンクリート厚、 γ_2 : 防護コンクリート単位体積重量、 D_c : 管路外径、 d_c : 管路内径、 γ_3 : 管路の単位体積重量、 R : 管路条数をとす。なお、これらの諸量は以下の数値となる。

- γ_1 : アスファルト単位体積重量 22.5 kN/m³
- γ_2 : 防護コンクリート単位体積重量 23.0 kN/m³
- γ_3 : 管路の単位体積重量 78.5 kN/m³
- D_c : 管路外径 : 0.0891m
- d_c : 管路内径 : 0.0807m

これより、今回の損傷事象における光ケーブルに作用したせん断力を算出する。現場の状況から管路軸方向の不等沈下した長さ L_s は 1m、管路鉛直方向の沈下した防護コンクリートの幅 B は 1m、管路条数 R は 5 条、ア

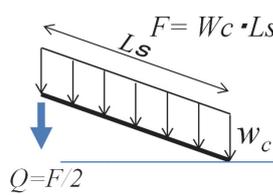


図-14 せん断作用荷重モデル (縦断断面)

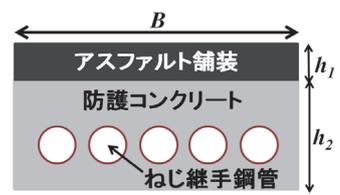


図-15 上載荷重モデル (横断断面)

スファルト舗装厚 h_1 は 0.15m、防護コンクリート厚 h_2 は 0.2m であることから、式(1)より 3.9kN であったと算出できる。

なお、せん断力 Q に対するライニング管のケーブル防護効果を用いた対策を検討する場合、設計時に光ケーブルに作用するせん断力を算出する必要がある。アスファルト舗装厚、防護コンクリート厚は設備記録図から算出できるが、個々の地震時における不等沈下する長さや幅など挙動を把握することは困難である。高田ら⁹⁾は、実際の地震時における地盤沈下では沈下部と非沈下部との間に穏やかな過渡的沈下領域があること、本事例のような段差的な沈下は地中に強固な構造物が埋設されているなど特殊な条件でのみで発生するとしている。

また、管路設備の占用位置は、地表面に近いボックスカルバートの上越し区間から深くなる方向に線形していることや、ボックスカルバート建設時に大型転圧機による施工が難しい箇所はボックスカルバートなど構造物周辺に限られることを勘案し、不等沈下する長さは、今回の損傷事例である 1m で設計した上で、防護コンクリート幅は、部分的な沈下を考慮せず既設設備全体を対象に設計することが妥当と考える。ただし、この考え方は、構造物周辺における転圧不足を想定したもので、大規模な盛土のすべりや流動を想定したものではない。

(2) ライニング管のせん断耐荷力の算出

これまで、管路や管渠更生工法など地下に連続する小口径の構造体では、管軸方向に地震動が伝搬するとしており、そのため影響の受けやすい管軸方向を主体に検討し、せん断力などの鉛直断面に対する照査・検証を省略してきた。

評価にあたり、管路が継手部で破損し鉛直方向に変位しようとする状況下で、光ケーブルを収容しているライニング管にせん断力が作用した場合には、ライニング管は徐々に変形するが、光ケーブル収容孔の内径が光ケーブル外径より大きい状況では光ケーブルに外圧は作用せず通信が途絶することはない。

図-16に実験概要を示す。管路は既に離脱していることから250kN万能試験機に鋼管を固定した側と固定架台に固定した鋼管側を突合せ、その中にライニング管と光

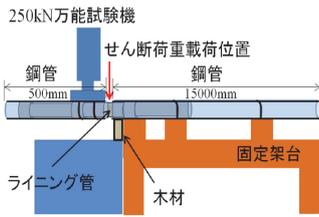


図-16 せん断作用の実験モデル

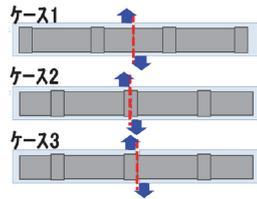


図-17 せん断荷重の作用位置

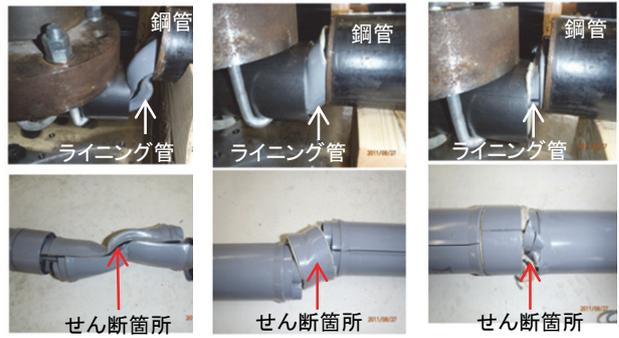


写真-5 せん断作用実験のライニング管破断状況 (左: ケース 1, 中: ケース 2, 右: ケース 3)

表-6 ライニング管へのせん断作用実験結果

ケース	破断荷重 (kN)	平均破断荷重 (kN)	空間限界荷重 (kN)	平均空間限界荷重 (kN)	せん断耐荷力 (kN)
ケース 1	22.8	26.6	10.1	9.90	9.68
	27.0		9.96		
	30.0		9.76		
ケース 2	7.44	7.52	3.85	3.56	3.19
	8.16		3.31		
	6.97		3.51		
ケース 3	11.2	11.1	8.36	7.49	6.08
	11.5		6.31		
	10.5		7.80		

ケーブルを設置する。万能試験機に設置した鋼管側に鉛直方向に変位制御にて荷重をかけることでライニング部材にせん断力を作用させる。なお、固定側は、鋼管のたわみによる影響を低減するため木材で支えると同時に、鋼管が回転しないように固定した。

荷重の際、光ケーブル收容孔が変形し光ケーブルを挟み込むことで容易に軸方向前後に移動できなくなる荷重を空間限界荷重とする。その後、部材が破断するまでの荷重を破断荷重とする。なお、ライニング部材は、継手を有する構造から継手部が弱点となり、せん断荷重を作用させる位置により空間限界荷重、破断荷重が異なることが想定される。せん断力を作用させる位置を3ケース設定し、各ケース3回測定する。図-17にせん断荷重を作用させる3ケースの位置を示す。赤色破線がせん断力を作用させる位置である。

ケース 1は、部材本体部の中央に位置し、せん断力は継手に左右されず本体部分に作用する。ケース 2は、継手部中央に位置し、継手内部の本体部材の切れ目となるため、せん断力は継手部材に作用する。ケース 3は、継手部端部に位置し、継手内部の一部本体と継手部が重なり合っており、せん断力は本体並びに継手内部の一部本体と継手部に作用する。

各ケースにおいて、破壊荷重 > 空間限界荷重の関係が成り立ち、かつ空間限界荷重が弾性領域内での変形であることが確認できれば、構造力学的に安定した状態で

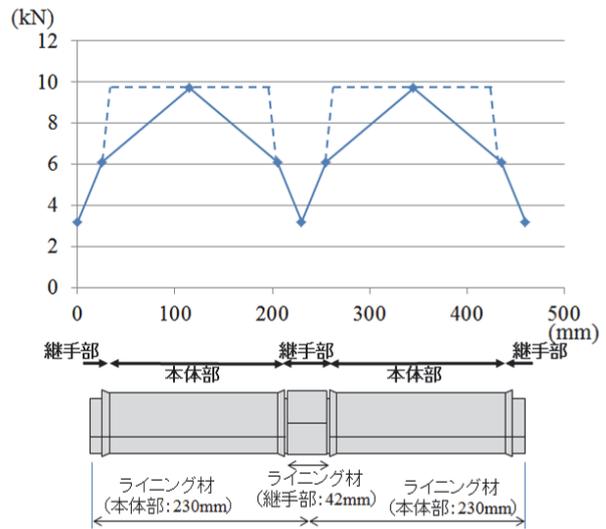


図-18 ライニング管のせん断耐荷力

あるといえる。

(3) せん断作用に関する安全照査方法の提案

表-6 に各ケースの試験結果を示す。空間限界荷重は、ライニング部材にせん断力を作用させながら、光ケーブル收容孔の変形により光ケーブルが軸方向前後に移動できなくなる位置まで荷重を行った結果である。破断荷重は、ライニング部材が破断するまで荷重を継続的に行った結果であり、破断した試験体を写真-5に記載する。

ケース 1〜3 で破断荷重、空間限界荷重ともに異なる結果であった。

ケース 1は破断荷重、空間限界荷重ともに最も高い数値となっている。継手部を含まない本体部材のみでせん断荷重を受けるため鋼管と鋼管に挟まれ本体部材に食い込むように破断した。弾性変形領域は 15kN となり、空間限界荷重は弾性領域内であった。

ケース 2は破断荷重、空間限界荷重ともに最小値を示した。これは、ライニング管の構造上の不連続点にあたる継手中央位置であり、せん断荷重に対しても最も弱い箇所と言える。せん断荷重に継手部が抵抗するものの上

下に引きちぎられるように継手が離脱し破壊した。弾性変形領域は 5.5kN となり、空間限界荷重は弾性領域内であった。

ケース 3 は破断荷重、空間限界荷重ともにケース 1, 2 の間に位置する。せん断力が作用する継手部の端部は、継手本体部材と継手内部で一部本体と継手部が重なり合っている箇所との間に位置するため、荷重の増加に伴い継手部から本体部材側で引きちぎられるように破壊した。弾性変形領域は 9kN であり、空間限界荷重は弾性領域内での結果であった。

さらにデータ母数が少ないこともあり試験結果を正規分布と考え 95%の信頼性をもって安全側に判断することとし¹⁸⁾、標準偏差を求め平均空間限界荷重から -1.64σ の値をせん断耐荷力 q とする。なお、通信途絶を想定した限界設計であることから安全率は考慮しない。

部材が連続した状態でのせん断耐荷力を図-18に示す。横軸に本体部と継手部の位置関係がわかるよう併記した。230mmが継手部の中心となりケース2の載荷位置に相当する。なお、本体部分でのせん断耐荷力が連続していると想定したラインを点線で示した。実際の現場において、どの位置にせん断荷重が作用するかは不確定なため、最も弱いケース2の継手部にせん断荷重が作用するものと考えることが安全側と言える。従って、ライニング管のせん断耐荷力 q は、設計上3.2kN程度と考えるのが妥当と言える。

光ケーブルに作用するせん断力 Q に対し、それを上回るに必要なライニング管の必要条数 P_x を求めることで、安全照査を可能とした設計が実施できる。ライニング管とねじ継手鋼管は規格品のため径のばらつきやがたつきがほとんど無く、防護コンクリートにより沈下量は一定であり、複数のライニング管により上載荷重を分担できることから、式(2)により必要条数の算出を行う。

$$P_x > \frac{Q}{q} \quad (2)$$

ここに、 P_x : ライニング管の必要条数 (本) , Q : 上載荷重によるせん断力 (式1) , q : ライニング管のせん断耐荷力(3.19kN/本)である。

通信途絶回避レベルでのライニング管のせん断耐荷力を明確にすることで安全照査を可能とした耐震設計が可能となる。

また、本事例と同様の現象を伴う橋台背面での不等沈下対策への適用が期待できる。さらに、ケーブルが収容されていない空き管路がある場合には、更生管を適用することで、全体としてのせん断耐荷力を向上させる方法も考えられる。

これまで管路のような小口径の設備については、断面

方向の検討を省略してきたが、ライニング管など継手構造を有する構造物については、せん断耐荷力を明確にし、せん断荷重に耐えうる必要条数を設計することで安全照査が可能となる。

7. まとめ

既設管路の継手離脱後のライニング管の地震時挙動に対し、光ケーブルの損傷パターンを考慮した性能評価により、ライニング管によるケーブル防護機能の検証を試みた。このことは、たとえ通信管路設備は損傷しても、光ケーブルは途絶させない、既設管路に対する耐震対策として有用である。

ただし、この性能評価は拘束条件のない地上で行っており、実際の埋設環境とは異なる。軸方向変位であれば、継手などの突起部や防護コンクリートの端部などの変位により地盤内に空隙を生じること¹⁹⁾や、沈下を伴う場合は、地盤拘束力が低下すること¹⁷⁾が知られているが、今後の損傷事例に注視し、検証を重ねる必要がある。

また、これまで管路のような小口径の設備については、地震動による管軸方向の損傷に着目し、地盤の不等沈下などに伴う軸直角方向の鉛直方向の検討を省略してきたが、ライニング管など継手構造を有する構造物については、そのせん断耐荷力を明確にし、せん断荷重に耐えうる必要条数を設計することで安全照査が可能であることを提案した。

地滑りを伴うような著しい地盤変状や熊本地震で見られた断層による地盤のずれなどに関しては今後の課題と考えるが、既往地震において経験した一般的な損傷現象に関しては、ライニング管を既設管路に適用することで光ケーブルを防護することが十分可能であると考えられる。

以上より、ライニング管は、既設管路破損後のケーブル防護機能の観点から、既設管路に対する耐震性向上施策として展開できることが明らかとなった。既設管路の耐震対策が進むことで、ネットワークのさらなる信頼性向上が期待される。

謝辞 : 本研究にあたり、NIT 耐震検討委員会で数々のご指導・ご助言を頂いた、東京電機大学安田副学長、元京都大学教授小池武先生をはじめ検討委員会の関係各位に感謝します。また現在、博士課程在籍中であり、筑波大学境有紀教授、松島亘志教授よりご指導頂いています。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会 : 都市ライフラインハンドブック, 第 IV 編 ライフラインの防災技術, 6 章 情報通信, pp.759-786, 2010.

- 2) 山崎泰司, 是国亨, 小高直樹, 山下宏幸, 稲村俊郎, 山田佳彦, 秋山武士: 不良管路を再生する「ケーブル収容管補修技術」, NTT 技術ジャーナル, 2010.12.
- 3) 公益社団法人日本下水道協会: 管きょ更生工法における設計・施工管理ガイドライン(案), 2011.
- 4) 田中宏司, 鈴木崇伸, 片桐信, 山崎泰司: 通信管路設備の実被害分析によるライニング補強の耐震性に関する考察, 土木学会第 64 回年次学術講演会, I-204, pp.407-408, 2009.
- 5) 田中宏司, 奥津大, 山崎泰司, 片桐信, 鈴木崇伸, 杉山俊幸: ライニング補強した通信管路の地震時ケーブル防護効果評価方法, 土木学会論文集, A1(構造・地震工学), Vol.68, No.4, pp.I_959-968, 2012.
- 6) 奥津大, 榊克実, 山崎泰司, 片桐信, 鈴木崇伸: ケーブル収容管補修技術によりライニングした通信管路の地震時ケーブル防護効果, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.70, No.4(地震工学論文集第33巻), pp.I_897-I_907, 2014.
- 7) 山崎泰司, 瀬川信博, 奥津大, 石田直之, 稲村俊郎, 田中宏司: ケーブル収容管補修技術(3000心タイプ)による既設設備の耐震性向上, NTT 技術ジャーナル, 2011.11.
- 8) 日本工業規格: 配管用炭素鋼鋼管, JIS G 3452
- 9) 高田至郎, 中野雅弘, 片桐信, 谷和弘, 小柳悟: 地震時地盤不等沈下を受ける耐震性硬質塩化ビニル管路の挙動, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.145-154, 1999.4.
- 10) 高田至郎, 李騰雁, 東俊司: 多条多段地中管路の不等沈下設計算法, 土木学会論文集, No.577/I-41, pp.141-151, 1997.
- 11) 山崎泰司, 瀬川信博, 石田直之, 鈴木崇伸: 東日本大震災における電気通信土木設備の被害状況に関する考察, 日本地震工学会論文集, 第12巻第5号(特集号), pp.55-68, 2012.
- 12) 土木学会他7学会: 東日本大震災合同調査報告, 土木編3 ライフライン施設の被害と復旧 第6章 通信施設, pp.310-319, 2015.
- 13) 田中宏司, 山崎泰司, 石田直之, 鈴木崇伸, 杉山俊幸: ケーブル防護機能を考慮した通信管路の耐震対策, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.69, No.4, pp.I_539-I_548, 2013.
- 14) 公益社団法人日本道路教会: 道路土工-軟弱地盤対策工指針, 第4章 軟弱地盤対策 4-3-3 設計条件の設定, 2012.
- 15) ERAUL2007の解析理論“ライフライン地震工学”(高田至郎, 共立出版)より抜粋・加筆, クボタシーアイプラテック発行, 2007.
- 16) 又木慎治, 出口大志, 中野雅弘, 鈴木崇伸, 友永則雄: 通信用中口径管路設備の耐震設計方法の検討, 土木学会構造工学論文集, Vol.42A, pp.685-696, 1996.
- 17) 高田至郎: ライフライン地震工学, pp.112-119, 共立出版, 1991.
- 18) 土木学会: トンネル標準示方書 シールド工法・同解説, 第5編 限界状態設計法 3 材料の設計値, pp.253, 2006.
- 19) 若竹雅人, 伊藤陽, 田中宏司, 片桐信, 鈴木崇伸: コンクリート巻き立て管の埋設地盤内の挙動に関する研究, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp.I_496-I_505, 2016.

(2016. 11. 3 受付, 2017. 1. 20 修正, 2017. 2. 18 受理)

EVALUATION OF SEISMIC PERFORMANCE OF CABLE-LAYING CONDUIT LINING FOR THE PROTECTION OF OPTICAL FIBER CABLE

Yasushi YAMAZAKI, Koji TANAKA, Masaru OKUTSU,
Masato WAKATAKE, Takanobu SUZUKI and Gaku SHOJI

The purpose of this paper is to develop a new earthquake-resistant design and a new countermeasure for telecommunication conduits against large earthquakes. The paper discusses the countermeasure, which doubles pipes by lining, through both experimental and analytical methods, considering failure mechanism of optical cables. Specifically, three next actions were assumed: when the joints of pipes collide during compression-tension cyclic loadings; when permanent ground displacement due to liquefaction, subsidence or collapse of ground occur; when the protection concrete fractures and the shearing stress act on the cables. It was found that even though the failures at the joints of pipes occur, the cable-laying conduit lining can still contain the essential function to keep space for cables and to prevent the disruption of cables.