

ケーブル防護機能を考慮した 通信管路の耐震対策

田中 宏司¹・石田 直之²・鈴木 崇伸³・杉山 俊幸⁴

¹正会員 NTTアクセスサービスシステム研究所 (山梨大学大学院医学工学総合教育部博士課程在籍中)
(〒305-0805 茨城県つくば市花畑1-7-1)

E-mail:koji-tanaka@lab.ntt.co.jp

²NTTアクセスサービスシステム研究所 (〒305-0805 茨城県つくば市花畑1-7-1)

E-mail:ishida.naoyuki@lab.ntt.co.jp

³正会員 東洋大学理工学部都市環境デザイン学科 教授 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail:tsuzuki@toyo.jp

⁴正会員 山梨大学大学院医学工学総合教育部 (工学部土木環境工学科) 教授
(〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

E-mail:t-sugiyama@yamanashi.ac.jp

通信管路設備は、地下に布設するケーブルを効率的に運用・保守するだけでなく、地震時にはケーブルに作用する外力を低減する性能が求められる。管路設備の耐震性能を効率よく向上させるには、通信用地下ケーブルの耐震性能の把握が不可欠であり、収容物であるケーブルの限界状態に応じた性能設計が必要とされる。本研究は、管路設備が地震外力により破損した状態を想定して、収容した地下通信ケーブルに外力を与え、ケーブル障害が生じる張力と屈曲角の関係を明確にした。また、地震時の管路の変形を通信サービスに影響を与えないレベルに低減する対策技術について整理した。

Key Words : telecommunication conduit, protection of optical fiber cable, telecommunication bridge, enforce experiment of pipe and cable

1. はじめに

電気通信システムは国内あるいは国境を越えて張り巡らされた通信ケーブルによってさまざまなサービスが提供されている。電話のみならずコンピュータ通信も通信ケーブルで送られる信号が基本となっており、携帯電話においても基地局から先はケーブル通信となっている。日本では通信ケーブルは管路設備に収容することが基本とされ、NTTの管路あるいは電線共同溝などの基盤設備が整備されている。これらの基盤設備には平常時のみならず地震などの災害時にも収容ケーブルを防護する機能が望まれている。最近では高速大容量の通信が可能な光ファイバーケーブルが主流になっており、作業性や経済性の点からケーブルの多芯化・軽量化が進んでおり、管路の果たす防護機能の確実性が求められるようになってきている。

日本における管路設備はNTTの前身である日本電信電話公社により整備されてきた。欧米諸国よりも遅れていた日本に電話網を早急に建設するために建設投資が行われ、特に1970年代から80年代にか

けて大量の管路設備が建設された¹⁾。電線共同溝の整備はやや遅れて1995年の電線共同法制定後推進され、現在では道路整備にあわせて計画的に工事が進められている²⁾。これらの管路設備は所定の耐震機能を見込んで設計されているが、過去の大地震を教訓に耐震規定の見直しが行われてきたことにより、旧仕様の管路は耐震性能が低くなっており、さらに材料の老朽劣化の影響により機能低下が懸念される状態にある¹⁾。その中でも特に設備量が多く防食対策も十分でない金属管と橋梁添架管が懸念される。

最近の地震被害の調査結果によると、壊滅的な管路設備の被害はないものの、設置環境の良くない条件で旧仕様の管路において収容ケーブルが被害になるケースが報告されている。新潟県中越地震³⁾、新潟県中越沖地震⁴⁾、東日本大震災⁵⁾の調査結果では、大規模な道路崩壊箇所や津波被害を除くと被害の殆んどは盛土の沈下や軟弱地盤、液状化による地盤変状に旧仕様管路の継手が追従できずに折損や離脱を生じたもの、橋梁に添架された旧仕様の管路が地震時の橋梁の振動に追従できずに損傷するケースである。

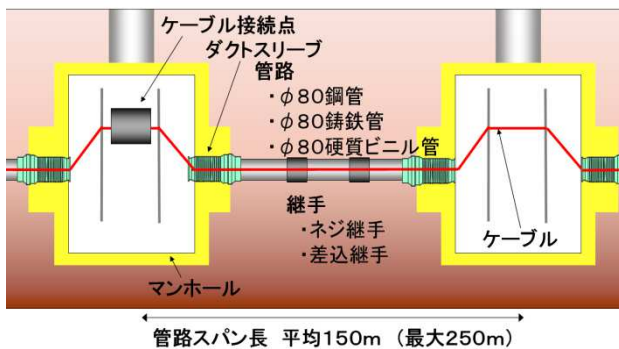


図-1 地下管路設備の概要

管路は土圧・水圧に抵抗し、温度伸縮や地震時の伸縮を許容する構造であるのに対し、光ファイバケーブルは、布設時以外は外力が作用しない状態が望まれる。しかしながら大地震のように稀に発生する外力に対しては、ある程度のケーブルの変形を許容する性能規定が望まれる。地震時に起こりうる管路の変形を予測し、収容ケーブルに作用する外力を実験的に再現して、通信サービスに影響を与えないレベルあるいは長期信頼性は保てないが短期的にサービスを維持できるレベルを明確にできれば既設管路の耐震対策を効率的に進めることができる。本論文は、筆者らがこれまで提案してきた管路の大変形解析とケーブル損傷実験について性能設計の観点から整理している。耐震性が十分ではない既設管路の補強を行う際には、設置環境評価と収容ケーブルの防護機能のレベル設定が必要とされ、データに基づいて合理的に耐震対策を行う必要がある。

2. 管路・ケーブル設備の概要

2.1 管路の概要

図-1にNTTの地下管路設備の概要⁶⁾を示している。管路設備は矩形のマンホールで接続されており、管路とマンホールの接合部は1981年以降にダクトスリーブを導入したことで伸縮性および可とう性の向上を図り、地震時の震動や地盤変位を吸収する構造としている。それ以前の設備についてはモルタルによる固定方式を採用していたことから地震時には突き出しや引き抜きなどの被災事例が報告されている。管路自体の材質は主に鋼管および硬質ビニル管を使用している。軟弱地盤や液状化地盤では鋼管を用い、地盤変位の予測される箇所には離脱防止継手を設けることとしている。また、軌道近傍の誘導による通信品質低下の恐れがある地域に鋳鉄管を使用することとしている。管路の内径はφ80mmを基本としており、収容される地下ケーブルも管路設備に布設することを前提として設計が行われている。継手構造は1985年に地震時の震動や地盤変位に対して柔軟性のある差込継手を導入しているが、全管路の内、差込継手の割合は15%程度であり、それ以前のネジ継手を中心とする耐震性の乏しい旧仕様設備が大半を占めているのが現状である¹⁾。地下ケーブルは、管

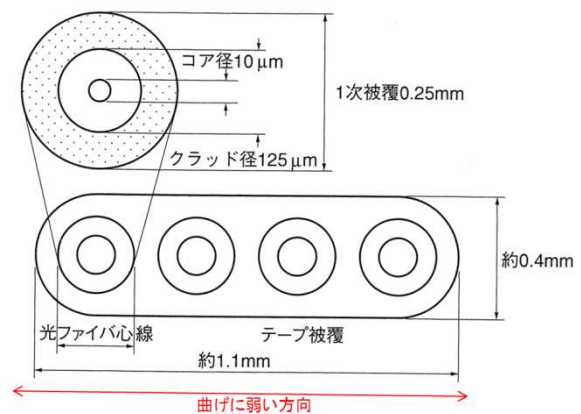


図-2 光ファイバ心線およびテープ心線の構造

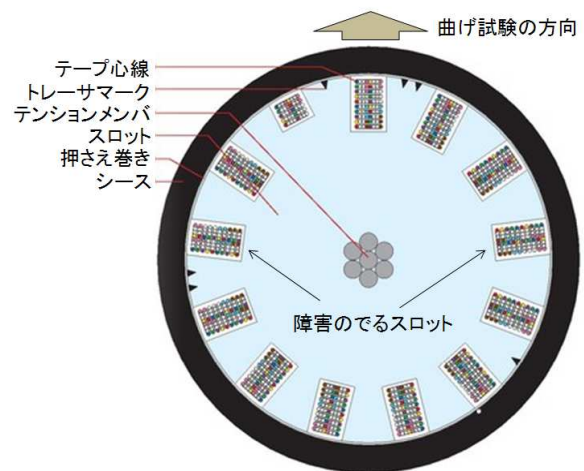


図-3 光ファイバケーブルの断面構造

表-1 光ファイバケーブル仕様一覧

項目	単位	SM100	SM200	SM400	SM1000
標準外径	mm	13.5	17.0	20.0	30.0
スロット数	個	5	10	5	13
テープ数	テープ	25	50	50	125
単位重量	kg/m	0.17	0.26	0.35	0.77

路の中を引き通し、マンホール毎に側壁に設置されたケーブル受金物へ縛り紐により固定される。ケーブル接続点もクロージャと呼ばれる防水ケースの中で接続され、受金物へ縛り紐により固定される。

2.2 光ファイバケーブル設備の概要

地下に布設される光ケーブルは一般的にスロット構造を採用している。図-2に示すように光ファイバ心線は4心もしくは8心が束ねられたテープ心線に成形された状態で光ファイバに収容される。光ファイバケーブルは図-3に断面構造を示すとおり、テンションメンバを中心に配置し、その外周をポリエチレン材質で外周に四角い空隙を設けたスロットと呼ばれる部材を設け、スロットの空隙内にテープ心線を収容する。スロットの外周をさらに押さえ巻きおよびポリエチレンシースで被覆する構造をとっており、テープ心線は断面内で完全に浮いた状態になっている⁷⁾。ケーブル布設時の張力やマンホール内の接続



写真-1 管路折損離脱によるケーブル被害



写真-2 ダクト突出によるケーブル被害



写真-3 路肩崩壊箇所でのケーブル被害



写真-4 路肩崩壊箇所でのケーブル被害



写真-5 路肩崩壊箇所でのケーブル被害

ときには曲率半径30cmが安全基準とされている。

光ファイバ心線は石英ガラスが主材料であり、温度変化、電磁誘導、材料劣化などの影響を受けにくく、経年劣化に対して安定していることが特徴である。ケーブル布設後の故障の主な要因は、地震や道路工事による管路被害、接続点への浸水、コネクタの接続不良による経時的なゆるみなどの物理的な外力であり、本研究の実験についても地震による管路被害にともなう張力や曲げなどの外力に対する光伝送の損失特性を評価する。

3. 通信ケーブルに影響を及ぼす管路被害の分析

3.1 管路被害事例

既往地震による通信地下ケーブルの地震による被災は、地盤急変部や他企業埋設物と交差する区間での地盤沈下などにより管路が折損離脱し、ケーブルに急激な曲げやせん断力が作用することにより生じるケース（写真-1）、地震動による地盤のひずみによりマンホール内に管路が突き出すことでケーブルに屈曲が生じたり、剥落したコンクリートや管端部にケーブルがぶつかることでケーブル外被が損傷を受けるケースが多く報告されている（写真-2）。

このような被災を防止するため、管路の継手部及びマンホールとの接続部を可動構造とすることで、耐震性能の向上を図ってきた。これに対し、通信ケーブルの光化が進んだ 2004 年の新潟県中越地震や 2007 年の新潟県中越沖地震では、管路の折損離脱箇所だけではなく、道路の崩壊や地盤沈下等によりマンホール内ダクトへケーブルが引き込まれ、ケーブ

作業等の通常作業時にケーブルに作用する外力は、テンションメンバおよび被覆材に作用し、光ファイバ心線自体には作用しにくい構造になっている。テンションメンバは鋼線や鋼撚線で構成され、4kN（100心ケーブル）から8kN（1000心ケーブル）程度の破断強度を有している。表-2に代表的な光ファイバケーブルの仕様一覧を示す。また、光ファイバ相互の接続は、マンホールの接続点内でテンションメンバおよびケーブル外被を把持具で固定することで、光心線自体へは直接張力が作用しない構成をとっている。

ケーブル布設時の安全基準は、ケーブルに作用する張力をケーブル毎に規定されている基準値以下とし、最小曲率半径を60cm以上に保つように布設する。また、ケーブル固定に際しては、マンホール内でケーブル余長を設け、最小曲率半径を30cm以上に保つように固定することとしている。すなわち、張力が作用するときには曲率半径60cm、張力が作用しない

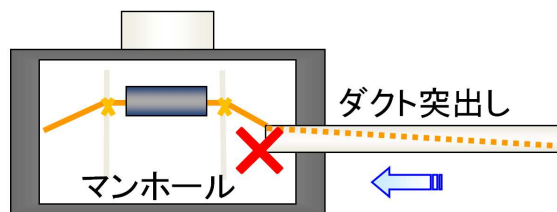


図-4 既往地震の被害例

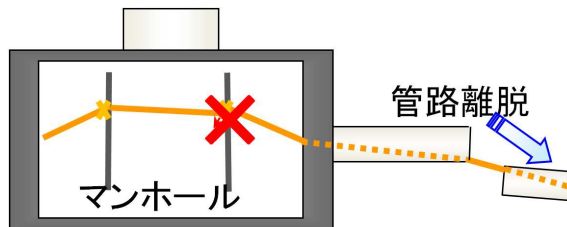


図-5 光ファイバケーブルの被害例

ルに引張力が生じることでマンホール内のケーブル固定位置で伝送損失増加やケーブルの切断が生じる被災事例が報告された⁹⁾(写真-3)。

また、過去の地震被災でも、橋梁添架管路の被災率が高いことは報告されている⁴⁾(写真-4)。地下設備と比較し、橋梁添架管路の被災率が高くなる要因としては、地震動により自由振動を起こすことや橋梁自体の移動量に追従できなかったことが考えられる。現行規格では、伸縮機能、回転機能を具備した橋梁添架管路用伸縮継手を設置することとしているが、旧規格設備が多くを占めることから、被災率が高い結果となった。東日本大震災の橋梁被害では、広域で道路橋の橋台背面における盛土沈下による段差部でのケーブル被災が目立ったため対策検討を継続中である⁵⁾(写真-5)。

3.2 管路変形解析

管路の耐震性能評価解析は、弾性床土上の梁理論に基づく地中管路の地震応答変位法により被災状況が分析されてきた。通信や電力のようにケーブルを収容することを目的に多条多段布設する管路の耐震性評価方法について、高田らの研究⁹⁾により報告されている。また、片桐の研究¹⁰⁾により地盤の破壊にともなう局所的な亀裂・開き・地盤沈下時の管路の挙動が検討されており、実際の被害分析や実規模に近いモデル実験を通じて数値解析の結果が検証され、高い精度で地下管路の耐震性評価が可能となっている。

通信管路の被災分析もモデル実験による地盤ばね特性の把握¹¹⁾や実地震による被災状況の挙動シミュレーションとの照査により分析されており¹²⁾、土質・管路種別・管路線形・地盤変位に影響する周辺埋設環境等が把握できれば、継手部の相対変位や相対角といった被災状況が概ね把握可能となりつつある。そこで、管路の被災状況をシミュレーションすることでケーブルに作用する外力を推定し、通信サービスへの影響を把握することで合理的な耐震対策を策定する方法を検討した。

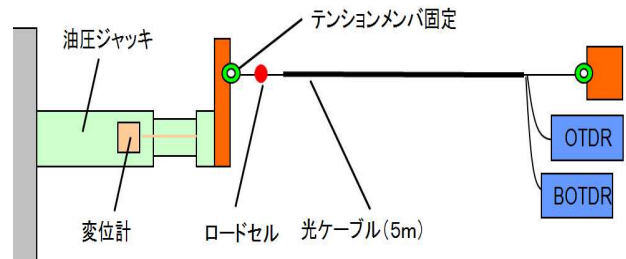


図-6 光ケーブル引張実験概要図

表-2 光ファイバ引張試験測定条件

光ファイバ種別	測定項目
・SM40 心 ・SM100 心 ・SM200 心 ・SM300 心 ・SM400 心 ・SM1000 心	・荷重 ・変位 ・ケーブルのびひずみ (テンションメンバ間の実測値) ・光ファイバ心線ひずみ ・光伝送損失

4. ケーブル損傷実験

4.1 地震時に懸念されるケーブル変形モード

これまで地震時のケーブル被害は、ケーブルに急激なせん断や側圧が作用することで、ケーブル断面の偏平や心線自体の断線が生じるケースが多く報告されてきた。これに加え近年の光ケーブルの被災例では、図-4に示すダクト突出や図-5に示すように管路のたわみや継手の離脱によりケーブルに張力や曲げが作用することで、ケーブル外被の損傷等外観上何も問題がなくとも長区間にわたり伝送障害が生じた例が多く報告された。

管路は道路や河川等の状況により様々な形態で使用されていることから、地下ケーブルの被害を評価するためには、地下ケーブル自体の限界状態を把握し、収容物であるケーブルの限界状態に応じた管路設備の性能設計が必要となることから、光ファイバケーブルの基本特性を把握する実験を行った¹³⁾。本実験では、光ケーブル特有の障害事例である張力や曲げによる通信品質の低下度合いを測定することで、管路に許容される離脱量等の許容値を規定する。

4.2 光ファイバケーブル限界状態把握試験

(1)光ケーブル引張実験

光ファイバケーブルに対して図-6に試験概要を示すように、油圧ジャッキを用いて引張試験を実施し、引張変形と光伝送損失の関係を明確にする。荷重条件は静的荷重を油圧ジャッキにより載荷した。光心線の伝送損失を計測しながら引張力を載荷するため、光ケーブルのテンションメンバを固定金具を用いて固定した。試験を実施した光ファイバケーブルは表-2に示すとおり6種類とし、測定項目は荷重、変位、ケーブルの伸びひずみ、OTDR¹⁴⁾による光ケーブル

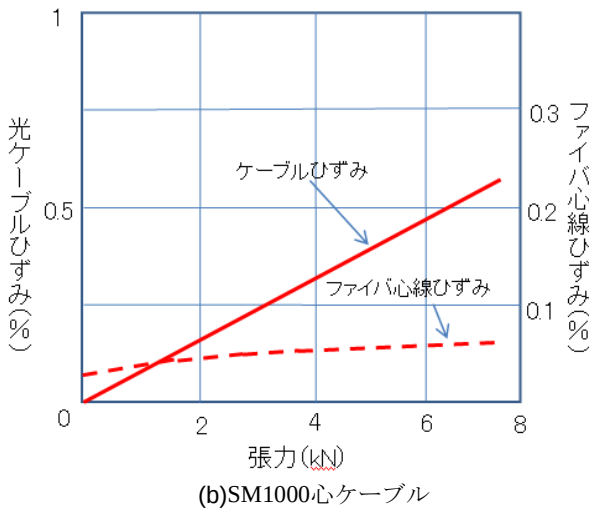
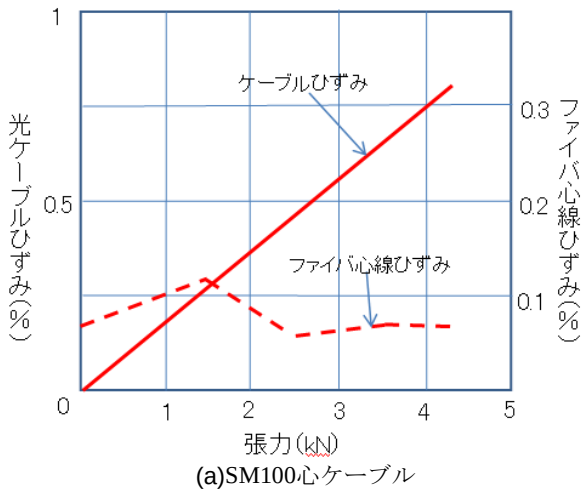


図-7 光ファイバケーブルの引張ひずみとファイバー心線のひずみ

の伝送損失測定値、BOTDR¹⁵⁾による光心線自体のひずみ計測値とした。

引張試験の結果、ケーブル張力と伝送損失量の関係は、通信ケーブルの引張荷重に対して伝送損失は初期値からほとんど変化せず、一定値を示した。引張力のみ作用する場合は、ケーブルの破断張力まで伝送損失は発生しないことが判明した。図-7にケーブル張力とケーブルひずみ、心線ひずみの関係について、SM100心、SM1000心の測定結果を示す。ケーブルひずみは、図-6で示すテンションメンバの固定点の間隔を実測した値である。心線ひずみは、BOTDR測定器による光ファイバ心線自体のひずみ値である。心線自体に生じるひずみはテンションメンバが破断するまで、心線に生じるひずみは初期ひずみからほとんど変化がないことから全く問題ないレベルであり、光ケーブルのスロット構造が機能しケーブルに働く外力から、心線を保護していることが確認できた。

(2)光ケーブル曲げ実験

図-8の実験概要図に示すように光ファイバを通した管路を回転ドラムに固定し、ドラムを回転させ

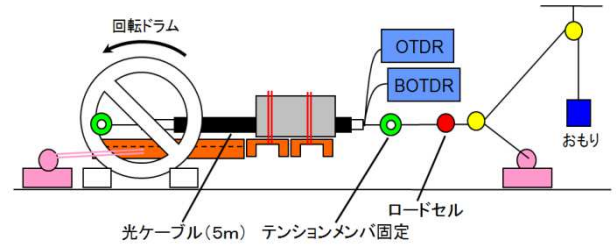


図-8 光ケーブル曲げ試験概要図

表-3 光ファイバ曲げ試験測定条件

光ファイバ種別	張力	測定項目
・SM40 心 ・SM100 心 ・SM200 心 ・SM300 心 ・SM400 心 ・SM1000 心	管路長別 摩擦係数 ・75m ・150m ・250m	・ケーブル屈曲角 ・光ファイバ心線ひずみ ・光伝送損失

ることでケーブルに屈曲角を与え、ケーブル屈曲角と光伝送損失の関係を計測した。

試験を実施した光ファイバケーブル種別は表-3に示す6種類とし、測定項目はケーブル屈曲角と光ケーブルの伝送損失、光心線のひずみとした。各光ファイバとも3パターンの張力を作用させた状態で伝送障害の発生屈曲角を確認した。張力については図-7に示すように光ファイバのテンションメンバにももりを接続し、常に一定の張力が作用する条件で行った。また、作用させた張力の選定基準は75mスパン、150mスパン、250mスパン（スパン $L(m)$ ：マンホールからマンホール間の管路長さ）のケーブルと管内面との摩擦張力とした。管路とケーブルの摩擦係数 μ は設計基準値である0.5とし、管路の布設設計基準の最大交角である60度の曲がりがある場合の張力増加係数 K を1.3とした。各ケーブルの単位重量を $W(kg)$ とするとケーブルに作用する摩擦張力 $T(N)$ は次の(1)式で算出した¹⁶⁾。

$$T=L \times \mu \times K \times 9.8W \quad \cdots (1)$$

通常、管路スパン長は最大250mを上限として設計を行うこととしているため250mスパンの摩擦張力は、光ケーブルに作用する最大摩擦張力を想定している。また、全国の平均的な管路スパン長である150mと摩擦張力が少ないケースとして75mのスパン長での光ケーブルの伝送損失を計測した。

図-9にケーブル屈曲角と光伝送損失の関係についてSM100心、SM1000心の測定結果を示す。図-8のケーブル屈曲角と光伝送損失の測定値は各スパン長毎に3本の供試体について一定速度で屈曲角度を大きくしていき、完全に光伝送ができなくなるまでケーブルを屈曲させた結果を平均化した数値である。いずれのケースも屈曲角が小さいと伝送損失も小さいが、ある屈曲角を境に伝送損失量が急増しはじめる特徴がある。

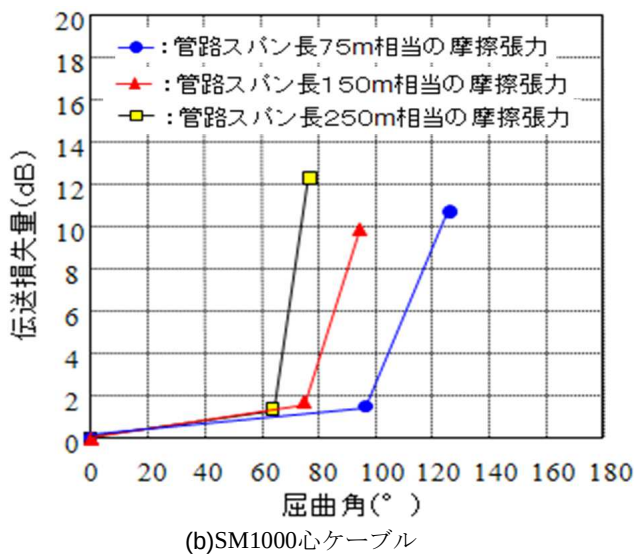
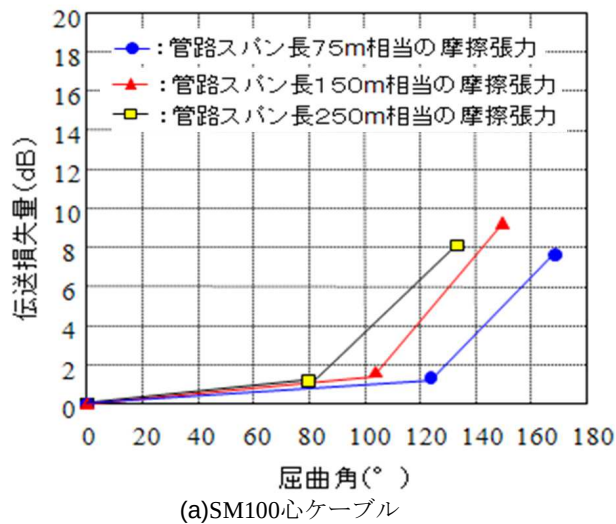


図-9 光ファイバケーブルの引張ひずみとファイバー心線のひずみ

光ファイバーの心数が少ないほど伝送損失が発生する曲げ角度は大きくなる傾向が見られる。屈曲角に対しては心数の少ない（細い）ケーブルの方が有利である。管路スパン長が短いほど伝送損失が発生する曲げ角度は大きくなる傾向が見られ、設計ケーブル長さが75mの場合は伝送損失が発生する角度は概ね100°を超える。光ファイバによる光信号の伝送は、図-2の光ファイバ心線に示すコア部分とクラッド部分の屈折率の違いを利用しており、クラッドに比べて光の屈折率が高いコアに光りを走らせるとクラッドとの境界面で全反射を繰り返しながら進む原理である。光ファイバ心線に急激な屈曲や極端な曲げが作用した場合、反射進行が途絶えてしまう。今回のケーブル曲げ試験により、伝送損失が発生した箇所を詳細に見ると、図-3の光ファイバケーブルの断面構造に示す曲げ試験方向に対して直角方向にあるスロット内のテープ心線に障害が発生していることが判明した。光ファイバケーブルは心線の収容効率を向上させるため、各スロット内に高密度でテープ心線が収容されており、図-2の赤矢印で示した曲

1)被災事例の分析

2)管路挙動の把握

- ・損傷部の相対変位
- ・損傷部の相対角度

3)ケーブルに作用する外力の把握

- ・急激なせん断力
- ・張力
- ・屈曲角

4)ケーブルの限界状態を超えない 管路防護対策の策定

図-10 ケーブル防護対策検討手順

げに弱い方向に曲げられることで、テープ心線の内側もしくは外側に成型された光ファイバ心線に急激な曲げやひずみが発生し、光信号の全反射を阻害するものと思われる。4心テープを使用しているSM100心とSM200心、8心テープを使用しているSM400とSM1000心で伝送損失の発生傾向が分かれることからテープ心線の収容形態による影響が大きいことが推測される。

最も条件の厳しいSM1000心ケーブルの管路スパン長250mの場合で屈曲角が約60°を超えると伝送損失が被災判定値を超える傾向が見られる。最大管路スパン長は250mであるため、地震時にケーブルに作用する屈曲角が60°を越えないように管路設備を構築することで、どのような種類のケーブルが管路設備内に収容されても地震時に光ケーブルの修復限界は超えない対策を行うことが可能である。また、屈曲角が厳しい条件での管路設計を行う場合、管路スパンを短くしケーブルに作用する摩擦張力を小さくする方法も考えられる。

ファイバ心線ひずみは光伝送が完全にできなくなる状態まで発生しなかった。測定器の分解能が1m程度ファイバ心線長さが必要なため、本実験では検知できなかったことが想定される。実被災で長区間にわたりひずみが計測されている現象は、同一ケーブルに対して複数のマンホールで曲げが発生していることが推定される。

5. ケーブル防護対策例

5.1 対策の検討手順

既往地震において被災数の多い事例について、ケーブルの限界状態に応じた管路設備の防護対策を検討した。対策の検討手順は図-10に示すとおり 1)通信管路の被災事例の分析により管路の損傷状況・土質・管路種別・管路線形・地盤変位に影響する周辺埋設環境等を定量的に把握する 2)モデル実験による地盤ばね特性の把握や被災状況の挙動シミュレーションにより管路挙動を再現し、損傷部の相対変位お

表-4 SA 管とライニング管の仕様

管種	外径(mm)	厚さ(mm)	材質
SA管	89.1	4.2	配管用炭素鋼鋼管(JIS3452相当)
ライニング管	80.7	3.0	PVC, FRP(自立断面強度を有する)

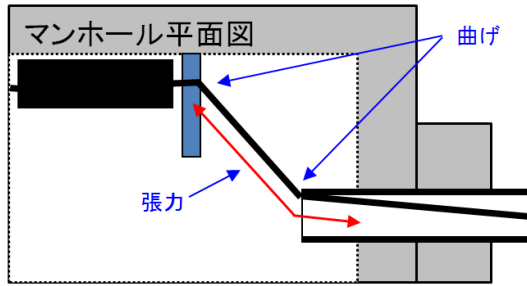


図-11 ダクト突出時のケーブル線形

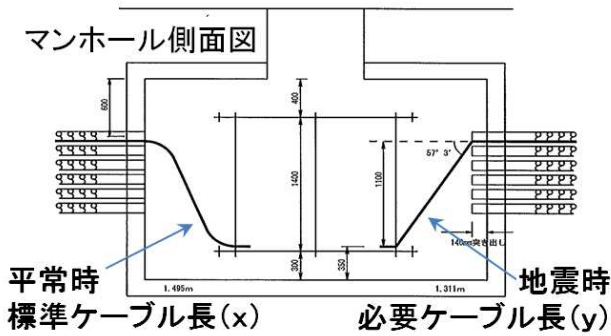


図-12 ダクト突出時のケーブル長

よび相対変位角の最大値を安全側に見積もる 3)ケーブルに作用する外力（急激なせん断，張力，屈曲角）を推定し，管路長・管路線形等を考慮した上で通信サービスへの影響を照査する 4)収容ケーブルが限界状態を超えないよう管路補強対策の性能設計値を定め，合理的な対策技術を開発する手順で検討を行った。

5.2 地下管路

(1) ダクト突き出しによるマンホール内ケーブル 屈曲対策

マンホールと管路の接続部のダクト突出しによるケーブル損傷事例の対策を検討した。検討した管路は 1964 以前の建設工事で使用された印籠継手鋳鉄管とした。マンホールと管路の接続はモルタルによる固定であり，伸縮継手を有していないことから，既往地震でもダクト突出し事例の多い管種である。実際に撤去した老朽管の管体および継手の材料特性値を測定し，地盤バネモデル¹¹⁾により，レベル 2 地震動によるダクト突出し量を推定した結果，150mm 程度突出することが判明した¹⁷⁾¹⁸⁾。

図-9 にダクトが突出した際のケーブル線形のイメージを示す。地震時のダクト突出しによるマンホール内のケーブル固定位置とダクト間に作用する張力を防止し，ケーブルの曲げを限界値以下とならないようケーブルを布設することで，地震時のケーブル被害を防止することができる。

通信用マンホールは 2 号から 6 号までの 5 種類があり，それぞれについて平常時の標準ケーブル長と地震時ダクト突出長を照査することで，地震時の安全性を確認した。平常時の標準ケーブル長は図-12 の左側のダクトとケーブル固定位置間に示すように

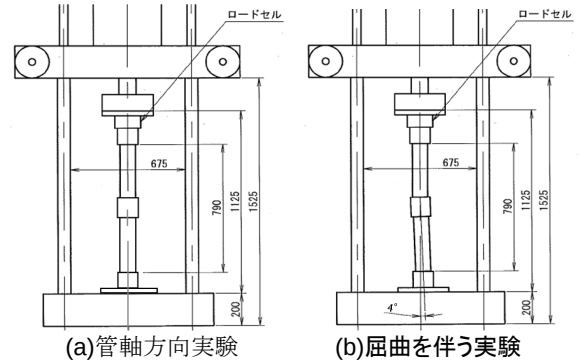


図-13 被災再現実験

標準曲率半径 30cm 以上を確保するようにケーブルを固定した場合の線形であり，地震時の必要ケーブル長は図-12 の右側の突出したダクトとケーブル固定位置を最短で結んだ線形とした。

平常時標準ケーブル長(x)>地震時必要ケーブル長(y)の関係となることで安全なケーブル布設状態と判断できる。5 種類のマンホールについて，照査した結果すべて(x)>(y)となり，ケーブルを固定する際に標準で規定された曲率半径 30cm 以上を確保することで，ダクト突出しによるケーブル被災は軽減できることが確認できた。

また 5 種類のマンホールについて標準的なケーブル固定位置とした場合の曲げ角を検討した結果，ダクト突出し時に 60°を超える曲げはほとんど発生しない結果となった。盛土崩壊による管路のたわみ等でケーブルがダクト内に引き込まれる事例もあることから，ケーブル固定位置は曲げ角が極力小さくなるよう設計する必要がある。ケーブルが輻輳している場合や線形の厳しい特殊マンホール等でケーブル線形に制約がある場合はケーブルの重要度等を考慮して固定位置を設計することが重要となる。

ケーブル限界状態を考慮した対策を検討することで，これまでダクト部を破砕し，伸縮構造を付加する対策を検討していたが，ケーブル余長を確実にすることで合理的に対策が可能であることが判明した。

(2) 旧仕様ネジ継手管路の折損・離脱に対する ケーブル防護対策¹²⁾

既往地震では，老朽化したネジ継手鋼管（以下 SA 管）のネジ部の破損により，ケーブルに張力や曲げが作用するとともに，有効断面が縮小した箇所にてケーブルが食い込むことで通信障害が生じている。そこで筆者らは，現場調査および地震時応答解析により，被害状況の分析を行い，ネジ部の破壊による影響を実験で再現することで地下ケーブルの損傷状況を確認した。また，SA 管内面にライニング補強を施した供試体を作成し，同様にネジ部の破壊実験



写真-6 SA 管の状況



写真-7 ライニング管の状況



写真-10 通信専用橋設置状況



写真-8 屈曲SA管の状況



写真-9 屈曲ライニング管状況

を行い、ケーブル外被の損傷状況やケーブル断面の扁平状況を確認することで、ライニング補強による地下ケーブル防護効果について確認を行った。表-4 に被災再現実験に使用した SA 管とライニング管の仕様を示す。

実験方法は、図-13に示すように250kN万能試験機を用いて、管軸方向の繰返し载荷試験を実施した。繰返し载荷試験の振幅は過去の被災調査結果や解析結果から継手が50mm押し込まれる位置までの圧縮と引張を再現した。管内部に光ケーブル（SM1000）を挿入し、管軸方向の繰返し载荷試験と4°の屈曲を伴う繰返し载荷試験の2ケースについて、SA管単体とライニング補強した場合の挙動比較を行った。

管軸方向の震動による被害例の確認実験では、ライニングを施していない SA 管を試験した結果、写真-6 に示すようにネジ部が管内面にめくれるような被害の再現を行うことができた。収容された光ケーブルは外被が損傷し、一部ファイバ心線の断線が確認された。

ライニング補強した SA 管の被災再現試験後の管内面状況を写真-7 に示す。SA 管の継手はライニング管が無い場合と同様に破壊するが、ライニング管は材料の柔軟性から損傷や破断することなくケーブルを防護することが確認できた。

屈曲を伴う変位による被害例の確認実験では、ライニングを施していない SA 管を試験した結果、写真-8 に示すようにネジ部が管端部に食い込み、継手が激しく破壊される被災を再現することができた。収容された光ファイバケーブルは、管端部に食い込んだネジ部に押し潰され、ファイバ心線が全断される結果となった。

ライニング補強した SA 管の被災再現試験後の継手部の状況を写真-9 に示す。ライニング管がガイドとなり SA 管の継手の損傷がライニング管が無い場

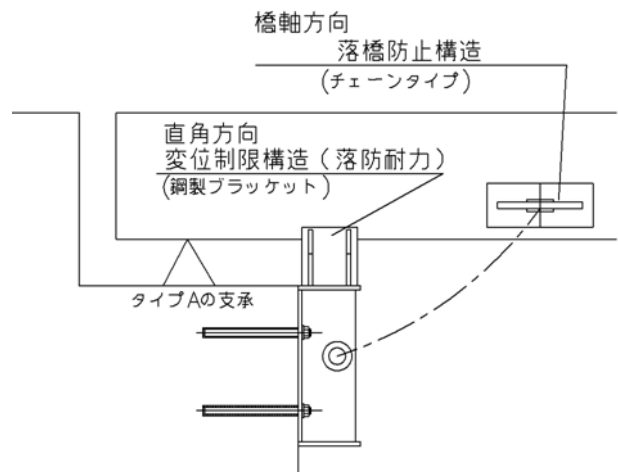


図-14 落橋防止対策

合と比較して著しく軽減される結果となった。試験後もライニング管は損傷や破断することなくケーブルを防護できることが確認できた。

本検討により、これまでの開削工事で耐震管に取り替える工法から、非開削で経済的に重要回線を防護出来る工法へ置き換え可能であることが明確となった。

5.3 橋梁添架管路

(1) 専用橋の被害軽減対策¹⁹⁾

過去の地震被災でも、橋梁添架管路の被災率が高いことは報告されている⁴⁾。地下設備と比較し、橋梁添架管路の被災率が高くなる要因としては、地震動により自由振動を起こすことや橋梁自体の移動量に追従できなかったことが考えられる。被害の大変は旧規格の伸縮量の乏しい伸縮継手の離脱によるものである。現行規格の伸縮機能、回転機能を具備できる割管構造の補修用伸縮継手が開発されており、ケーブルの重要度や災害の危険度を考慮し、計画的に更改しているが、旧規格品が多くを占めているのが現状である。

通信専用橋は写真-10 に示すように道路橋の近傍に設置されているのが一般的である。支持するのは通信ケーブル、管路、橋桁であり荷重は小さく、道路橋と比較すると橋桁断面の小さい軽い構造となっている。また、建設後 30 年以上経過した古い橋が多く、現在の仕様に比べて耐震性能の劣る旧仕様で設計された橋が多く存在する。通信専用橋の種類と

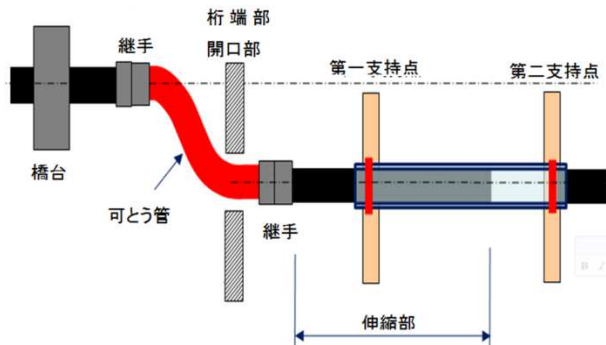


図-16 橋梁添架設備の免震橋対策例

して圧延鋼桁橋、プレートガーダー橋、トラス橋、パイプビーム橋の 4 種類が標準的に設計されている。

道路橋示方書に基づきレベル 2 地震に対する安全性を照査した結果、圧延鋼桁橋はほとんどの橋でレベル 2 地震動に対する必要耐力を満足していると判定されるため、具体的な補強対策工は不要である。

一方、プレートガーダー橋、トラス橋、パイプビーム橋は、橋長、荷重条件によって支承の損傷が起こる可能性があり、落橋を防止する対策を講じる必要があることが判明した。図-15 に示すとおり、橋軸方向の落橋によりケーブルに張力や曲げが作用することを防止するため、桁かかり長を増加する対策もしくは落橋防止チェーンを設置することとした。また、橋軸直角方向に上部工が移動した場合、管路が損傷しケーブルに急激な曲げが作用することから、変位制限装置を設置することでケーブルの限界値を超えない構造とした。

(2)免震橋添架管路のケーブル被害軽減対策¹⁶⁾

兵庫県南部地震以降、大規模な橋梁では橋脚に作用する慣性力を低減するために、免震支承を採用するケースが増加している。橋梁の免震化工法は、地震時の振動を長周期化・高減衰化し、上部工の慣性力を低減することで耐震性を向上することができる。しかしその一方で添架管に対しては厳しい設置環境が生じる。従来数 cm であった上部構造と下部構造の相対変位は数十 cm に増加し、変位方向も橋軸方向に加え、橋軸直角方向に振動する。このため、免震化支承を考慮していない従来の添架方法では、地震時の相対変位に追従できず、管路およびケーブルの損傷が発生する可能性がある。

NTTの通信管路が添架されている国土交通省管理橋梁の調査結果、設計で想定される水平変位量の最大値は新荒川大橋の橋軸方向60cm、橋軸直角方向40cmであったことから対策案の目標値とした。波付硬質ポリエチレン管を利用することにより、橋軸直角方向及び橋軸方向への大変位に対応可能な工法を検討した結果、図-16に示すように可とう部と大変位に追従可能な伸縮構造をとることで、目標値に対応可能な工法の試作を行った。

対策工法について実地震時の性能評価を行うため、振動台による加振実験を実施した。加振波形は、道路橋示方書の標準波形の中で最も大きな変位が生じ

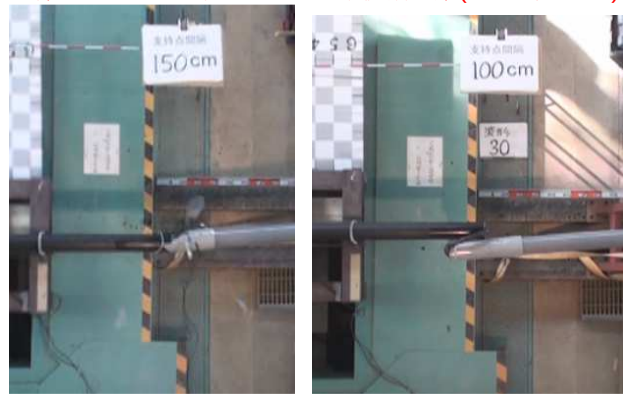


写真-10 既存添架設備の損傷例

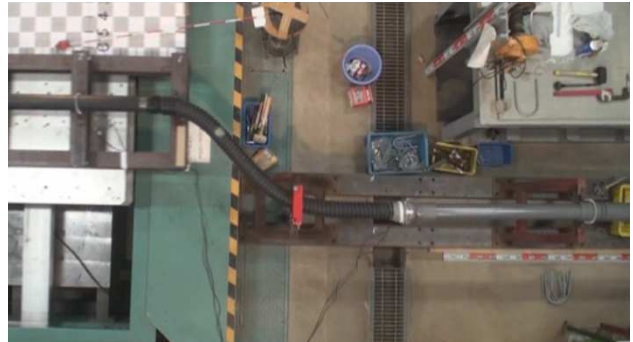


写真-11 対策案の振動状況

たレベル2タイプ2（内陸直下型）の地震動による上部構造の応答波形を入力した。

実験の結果、既存添架設備は引張方向へ20cm変位した位置で伸縮継手部が離脱し、露出したケーブルを管端部同士の衝突で擦り潰すようにケーブルの断線が発生した。写真-10に既存添架設備及び収容ケーブルの損傷例を示すが、左側写真は離脱した管端部が衝突し、継手部が破損した事例である。右側の写真は、離脱した既存添架管により収容ケーブルが急激に曲げられ断線した損傷例である。橋軸直角方向の変位と管同士の衝突が加わることで、免震橋に添架した管路に収容された光ケーブルは著しい損傷を受けることが確認できた。

対策案は、桁端部の開口部位置や支持間隔によらず管材及び収容ケーブルの損傷や光伝送損失は生じず、通信の機能性への影響はないことが確認できた。本対策により免震橋梁の大変位に対して通信サービス途絶を防止する効果があることが確認できた。写真-11に対策案の実地震動による加振後の状況を示す。写真計測の結果、実地震動による管体および継手の曲げ角度の最大値は光ファイバケーブル修復限界である60°を大きく下回っており、本対策案は通信サービスの途絶に対して安全に機能していることが確認できた。

本件も簡易な補強によりケーブルの限界状態を超えない対策がとれることで、地震後の管路通過性能は維持できないが、地震時の大変形からケーブル切断を防御し、情報の孤立を防止することが可能である。

6. おわりに

通信土木設備に対する要求性能は、とう道設備についてはレベル2地震でもサービスに影響がないこととしているが、管路設備についてはレベル2地震時の損傷は止むを得ないとの考えに基づいて設定されている²¹⁾。しかし、近年発生した大地震では、設備の損傷により大規模な情報孤立エリアが生じ、様々な復旧活動の障害となったことから、通信設備の信頼性向上は社会的な要請となっている²²⁾。

本研究は、ケーブルの限界状態を把握することで、管路および橋梁設備が地震外力により破損した場合でも、ある程度のケーブルの変形を許容し、通信サービスに影響を与えないレベルあるいは長期信頼性は保てないが短期的にサービスを維持できるレベルに損傷部の相対変位や相対角度を抑えることで、合理的な耐震対策が可能であることが明確となった。また、既設設備の耐震対策を検討する際の性能目標値の設定が明確となり、効率的な対策検討が可能となった。

本研究成果を用いた耐震対策の開発例として、旧仕様鋳鉄管のダクト突出しによるケーブル被害防護対策、旧仕様ネジ継手鋼管の継手離脱に対するライニング補強対策技術、専用橋の落橋防止対策技術、免震橋梁添架管路の大変位対策技術の有効性を実験により確認した。

今後も、膨大な老朽設備を更改することなく、補強対策により、レベル2地震時にも重要回線の防護機能に影響のない水準に管路および橋梁設備の耐震要求性能を向上させるため、被災設備個々の分析に基づいた対策検討を継続する予定である。

謝辞：本論文の作成にあたり、NTT耐震検討委員会で数々のご指導、ご助言を頂戴いたしました東京電機大学安田進教授、京都大学小池武教授、摂南大学片桐信准教授、NTTインフラネット(株)飯田敏昭取締役、山崎泰司四国支店長、NTTアクセスサービスシステム研究所杉野文秀部長をはじめ委員会メンバーの皆様に感謝します。

参考文献

- 1) 守屋洋,小松秀一：次世代ネットワークを支える基盤設備技術の概要,NTT技術ジャーナル,No-3,pp32-35,2006
- 2) 土木学会：都市ライフラインハンドブック,第I編ライフラインサービスの概要7章共同溝,pp217-241,2010
- 3) 田中宏司,鈴木崇伸：新潟県中越地震の電話施設の被害分析,第12回地震工学会シンポジウム,0351,2006
- 4) 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,pp759-786,2010
- 5) 山崎泰司,瀬川信博,奥津大,石田直之,稲村敏郎,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,No3,pp42-46,2012。

第32回地震工学研究発表会講演論文集(2012年10月)

- 6) 土木学会：都市ライフラインハンドブック,第II編ライフライン施設の建設技術6章情報通信,pp323-353,2010
- 7) 光製品総合カタログ,フジクラ,2009
- 8) Koji T.,Takanobu S.,Yasushi Y.,Toshiaki K.and Katsuji I.:Experiment on Seismic Disaster Characteristics of Underground Cable,14thWCEE,06-0069,2008
- 9) 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計算法,土木学会論文集No.577/I-41,pp.141-151,1997
- 10) 片桐信：地盤破壊を考慮した地中管路の耐震性評価に関する研究,神戸大学大学院博士論文,pp.33-81,2002
- 11) 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の検討,構造工学論文集Vol.42A,pp.685-696,1996
- 12) 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.67,No.4,地震工学論文集,Vol.32,2012
- 13) 田中宏司,鈴木崇伸,山崎泰司：通信用地下ケーブルの耐震性能に関する実験的研究,第30回土木学会地震工学論文集,4-0022,pp.1-7,2009
- 14) NTT東日本ネットワーク事業推進本部サービス運営部技術協力センタアクセス技術担当：光ファイバ故障時における探索方法,NTT技術ジャーナル, No.10, pp.53-54, 2006.
- 15) 田中宏司,上原秀幹：安全・安心なネットワークに寄与する防災・セキュリティ技術,NTT技術ジャーナル, No.3, pp.55-58, 2006.
- 16) 豊田直樹,安齋貢一郎,山本智也幹：新たな多条布設技術および細径1000心ケーブルの開発,NTT技術ジャーナル, No.12, pp.55-58, 2008.
- 17) 岡澤毅,田中宏司,岸本敏明,西野龍太郎：通信用管路のライニング補修による耐震機能の検討,ISTT NO-DIG Moscow,2008
- 18) 岡澤毅,田中宏司,岸本敏明：通信用鋳鉄管路の耐震性能検証,土木学会年次学術講演会,1-334,pp.665-666,2008
- 19) 馬場進,鈴木崇伸,森敦,田中宏司,通信専用橋の耐震性能評価方法,土木学会構造工学論文集Vol.54A, 2008
- 20) 田中宏司,鈴木崇伸,岩田克司,山崎泰司：通信管路の免震橋梁への添架方法に関する研究,第30回土木学会地震工学論文集,4-0023,pp.1-11,2009
- 21) 藤橋一彦,奥津大,小松宏至：レベル2地震動に対する地下基盤設備の耐震性評価とその対策技術,NTT技術ジャーナル, No.10, pp.58-61, 2002.
- 22) 東日本電信電話株式会社：東日本大震災における復旧活動の奇跡,pp.7-30,2011

(2012.9.21受付)

EARTHQUAKE-PROOF METHOD OF TELECOMMUNICATION CONDUIT WHICH CONSIDERED PROTECTION OPTICAL FIBER CABLE.

Koji TANAKA, Naoyuki ISHIDA, Takanobu SUZUKI, and Toshiyuki SUGIYAMA

The telecommunication conduits are needed to protect underground cables from damages due to earthquakes. However, the seismic capacity is being degraded due to the superannuated conduits that were constructed during the high-growth economic period. To sustain the reliability of the conduits efficiently through maintenance is the current challenge.

This paper presents the reproductive experiments of the damage of underground telecommunication cable at the time of earthquakes in order to clarify the limit of optical fiber cable restoration. By modeling the seismic damage of underground conduits for the experiment, we could confirm that optical fiber cables are damaged not only at conduit fractures but also manholes which they are pulled into. When the characteristics of optical fiber cables on the seismic disaster were verified by experiment, it is shown that not only tension force but also bending angles causes the fault of transmission. The relation between the tension and the bending angles that the cable suffers damage is clarified. This result can be used for the rational measures to prevent the damage of the telecommunication service.