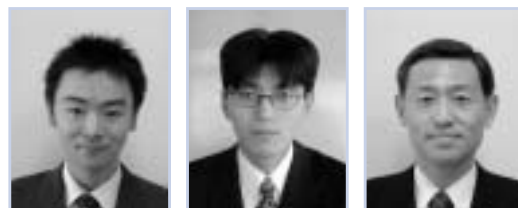


土砂崩壊検知システムの開発



四宮 卓夫* 奥水 聡** 蔭山 朝昭***

鉄道路線の多くは土を盛った盛土区間、地山を切取って整形した切取区間で構成されている。これらの斜面崩壊は大きな列車事故につながる恐れがある。そのため、運転規制、のり面工事、土砂崩壊検知装置の設置などの対策を講じている。中でも比較的成本の安い土砂崩壊検知装置は、効果的な災害対策の一つとして注目されつつある。本システムは、検知原理を単純に、機器の構成をシンプルなものとする事で、信頼性の高いシステムとすることを検討し、室内実験、崩壊実験により性能を確認した。本システムは、2001年度より全社的な導入が開始されている。

●キーワード：土砂崩壊、盛土、切取、運転規制、センサ、崩壊実験

1 はじめに

日本は国土の約70%が山岳地帯であるため、鉄道路線の多くは土を盛った盛土区間、地山を切取って整形した切取区間で構成されている。また、多雨多雪という気候条件から、台風や集中豪雨時あるいは融雪期の盛土や切取の土砂崩壊は、大きな列車事故につながる恐れもあり、安全運行上の大きな課題となっている。

盛土および切取斜面で、崩壊の危険性が高いと思われる箇所に対し、ハード対策として斜面防護工事や土砂止柵の設置工事等を進めている。

その一方で、鉄道用地外からの大規模な土砂の流入など自然災害の発生をハード対策のみで確実に防止したり、あるいは発生箇所を確実に予測したりすることは困難である。そこで、危険を回避するためにソフト対策として、①降雨量による運転規制の実施②自然斜面や高い盛土など、防護工事が難しい箇所では、災害検知システムの導入をおこなっている。

ソフト対策②の災害を検知するシステムは、センサを設置した場所で災害が起きた場合に、発生を報知し、列車を止めることで危険を回避するものである。土砂崩壊検知システムについては、これまで多くのメーカーが開発をおこない、当社でも一部光ファイバを用いたシステムを導入した実績があるが、全社に導入するにはコストが高く、これまで本格的な導入・展開までに到っていない。

そこで、2000年度までに従来の問題点を改善した新しい土砂崩壊検知システムの開発を終了し、2001年度から

本格的に導入をおこなっている。

2 開発のコンセプト

土砂崩壊が発生した場合、崩壊の規模が大きくなるほど列車運行の安全性が脅かされる。従来の土砂崩壊検知システムは、のり面のはらみやのり肩のき裂といった崩壊の予兆まで捕えようとするものが多く、高性能なセンサを使用する必要があるため、コストが高いことなどが問題となり、災害対策の主流として普及してこなかった。

そこで、新しい土砂崩壊検知システムの開発コンセプトとして、予兆まで捕えるではなく実際の崩壊を捕捉対象とすることでシステム導入のコストを下げること、崩壊時には確実に動作し、設置環境、人為的条件等による誤動作を極力排した信頼性の高いシステムとすることを目標とした。

2.1 捕捉対象とする崩壊規模と崩壊形態の想定

盛土では崩壊により施工基面を含む土砂が流失する事象が捕捉対象であり、切取では崩壊した土砂が建築限界内に流入する事象が捕捉対象である。このように盛土と切取では崩壊時の捕捉対象が異なるため、盛土崩壊検知用、切取および自然斜面崩壊検知用の2種類のシステムを開発することとした(図1)。それぞれのセンサが捉えるべき崩壊の規模としては、崩壊が直接列車運行に障害となる状態を想定した(図2)。

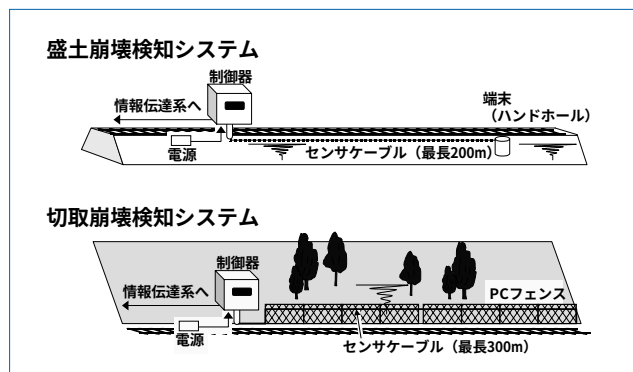


図1：システムの概要

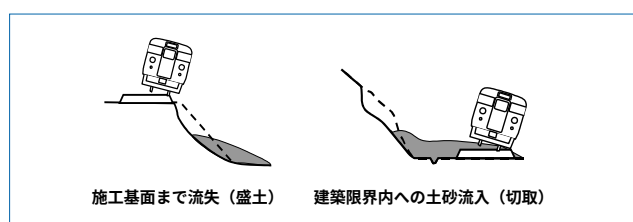


図2：検知対象とする崩壊の規模

そこで、具体的な検知規模を決定するため、過去の崩壊事例として1991、1992年の災害データを収集し、崩壊の規模について分析をおこなった。盛土において、崩壊が道床尻まで達した事例を抽出したところ、崩壊の幅（線路延長方向）は15m以上のものが多く、最小は5mであった（図3）。一方、切取、自然斜面の崩壊事例については、崩壊した土砂が建築限界内に流入するのは崩壊土量15m³前後、崩壊幅10m以上のものが多い（図4、図5）。また、高さ4m未満の切取で建築限界支障となる

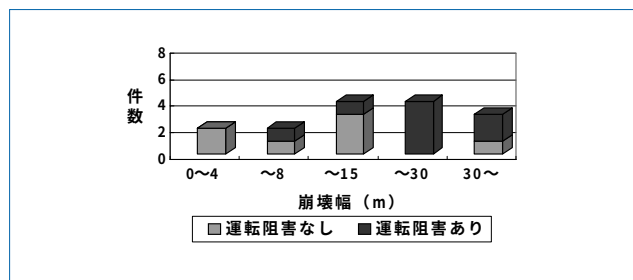


図3：盛土崩壊幅と列車運転阻害

ケースは見受けられず、高さ4mにおいて、想定される崩壊土量を計算すると、3.5m³となった（図6）。

以上の分析結果から、安全上の余裕も見込み、盛土では線路方向4m以上、施工基面（のり肩）まで達する崩壊事象を、切取では崩壊土量2m³の土砂が4m以上の高さから建築限界内に流入する事象をそれぞれ捕捉対象とし、これら確実に検知できるセンサを開発することとした。

2.2 信頼性の向上

今回の開発においては、実用化を前提とした信頼性の高いセンサを開発するため、センサの構成部品に耐久性および性能に既の実績のある汎用部品を使用すること、単純な原理かつシンプルな機器構成とすること、の2点を重視した。

2.3 導入価格のコストダウン

土砂崩壊検知システムは、災害発生を検知する「検知システム部」、防護無線や特殊信号といった「情報伝達部」、の二つに区分される。今回は検知システム部に絞りを、センサおよびその制御器のコストを現状の1/2程度まで下げるによりシステム導入コストを抑えることとした。そこで、安価なセンサ開発のため、汎用部品を使用し、部品数を減らすことに主眼を置いた。情報伝達部については、制御器の信号出力を汎用方式とすることで、システム全体を汎用品の構成としてコストを下げることにした。

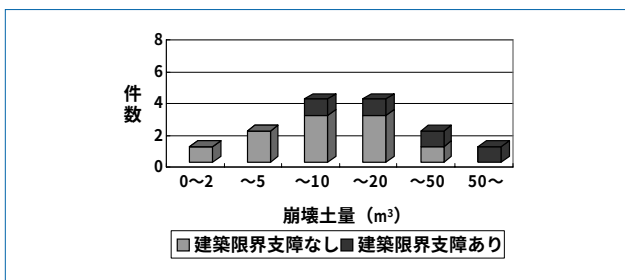


図5：切取崩壊土量と建築限界支障

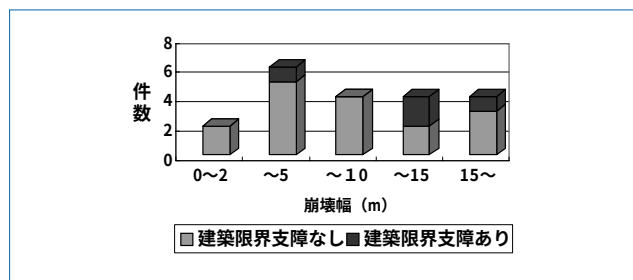


図4：切取崩壊幅と建築限界支障

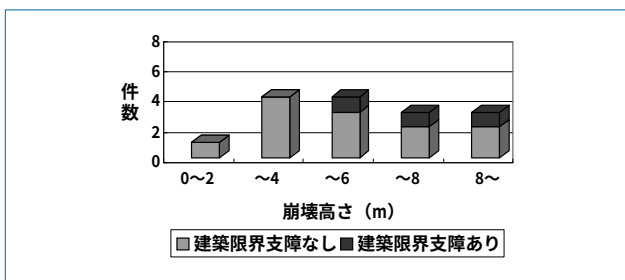


図6：切取崩壊高さ（m）と建築限界支障

3 盛土崩壊検知システム

3.1 検知機構の検討

室内試験により検討した結果、盛土のり肩に傾斜センサを等間隔に設置する「傾斜検知方式」を基本として開発を進めることとした。

防水ケース内に収納した傾斜センサを、樹脂製の杭上に設置し、このセンサを盛土のり肩部に一定間隔で設置する構造とした。また、耐久性確保と誤作動防止のため、防水ケース内に絶縁・防水レジンを充填し、傾斜センサ間のケーブルは、アルミ管あるいはエフレックス管（電線の埋設時などに用いられている樹脂管）で防護することとした。傾斜センサはコストおよび誤動作対策から傾斜計は用いず、単純に30度をしきい値としON/OFFを出力するセンサを使用した（図7）。

また、列車振動等によるチャタリング（振動によりスイッチON/OFFが連続的に発生する現象）信号はカットする回路を組み込んだ。杭はセンサを支持すると同時、崩壊時にセンサを確実に傾斜させるため、鉛直方向に対して45度の角度をつけて設置する（図8）。

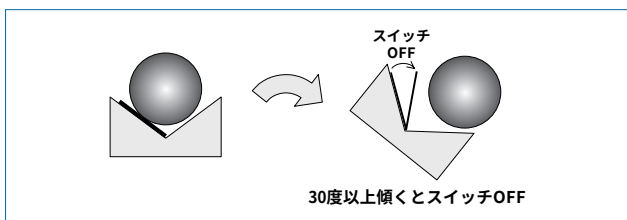


図7：傾斜センサの原理

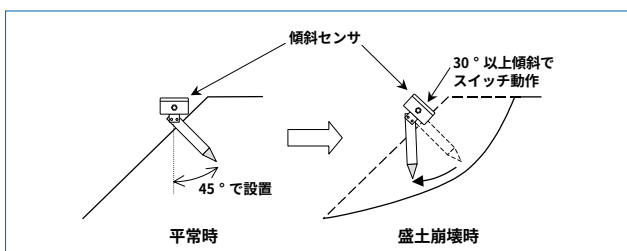


図8：傾斜検知機構

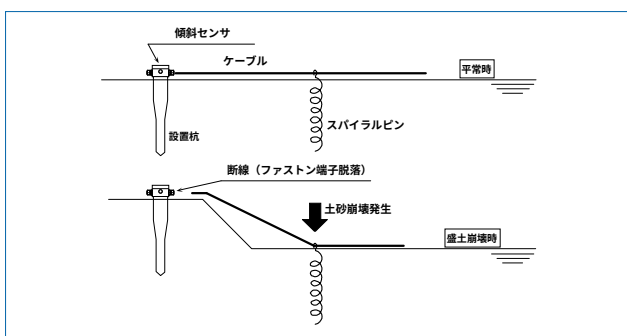


図9：断線検知機構

さらに、構成部品の中で比較的高価である傾斜センサの設置間隔を広くし、その間は断線検知機構を併用することでコストを下げることとした。断線検知機構は、傾斜センサとケーブルの接続部のファストン端子（電気配線で一般的に使用されている端子）を使用し、傾斜センサ間のケーブルをスパイラルピン（鉄筋をらせん状に加工した杭）で盛土に固定する構造とした。検知原理は、傾斜センサ部で崩壊が発生した場合にはセンサが杭の重量で傾斜して検知し、傾斜センサの中間で崩壊が発生した場合にはスパイラルピンが崩壊に追従し、ケーブルが断線することで検知するものである（図9）。

3.2 崩壊実験

想定した最小崩壊幅4m以下で崩壊する試験用の盛土を構築し、試作したセンサを用いて土砂崩壊実験をおこなった（図10、11）。

構築した盛土にセンサを設置し、人為的に崩壊を発生させ、センサの検知性能を確認した。実験方法としては、

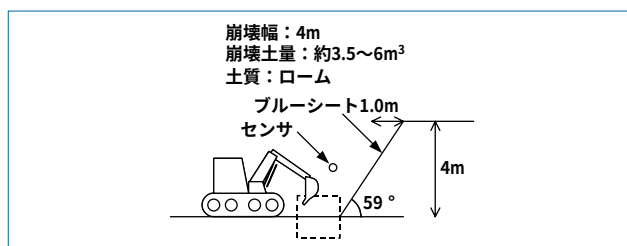


図10：盛土崩壊実験



図11：盛土崩壊実験の状況

表面から1mの深さに設置したブルーシートをすべり面とし、盛土下部を重機で掘削することで崩壊を発生させた。その結果、傾斜センサの間隔を10m、中間部ケーブルのスパイラルピンを1m間隔とした場合、コストおよび性能を満足することがわかった。

3.3 実用化仕様の検討

これまでの検討および試験結果から、目標を満足するものが開発された。しかし、実用化を考えた場合、施工性の面からスパイラルピンは一本ずつ手作業で施工が必要があること、傾斜センサ部は現地での設置時に防水ボックス内の基盤とケーブルの配線をおこない、その後防水ボックス内にレジン充填をおこなう必要があること、の2点で施工性が悪く、このことがセンサ設置時の施工ミスを生み、誤動作の要因となる恐れがあることがわかった。

そこで、検知原理および全体構成は変更せず、装置を構成する各使用部品を改めて見直した。まず、傾斜センサについては、開発開始時より小型のものが実用化されており、それを使用することとした。しきい値等については、これまでと同じ30度とした。また、傾斜センサの小型化により、市販の防水コネクタにセンサを基盤ごと内蔵することができた。コネクタ構造とすることで、配線は全て工場製作時に可能で、現地ではコネクタを接続するのみの作業となった。これにより、傾斜センサ部のコストが低減し、施工が簡易でコストの安い傾斜センサの多用が可能となった。そこで、傾斜センサの設置間隔を想定する最小崩壊幅の半分の2mとし、スパイラルピンによる断線検知方式を排し、検知性能を向上させた。

また、傾斜センサ部の設置方法は、誤作動対策から埋設を前提とすることとし、杭上に固定する方式から小型のステンレス製プレート上に固定する方法に変更した。これを盛土のり肩部、深さ約150mm（最小土被り約100mm）に埋設し、傾斜センサ間のケーブルはエフレックス管を用いて防護した（図12、図13）。

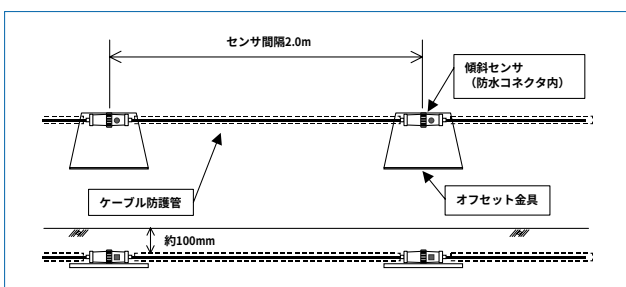


図12：盛土崩壊検知システム一般図

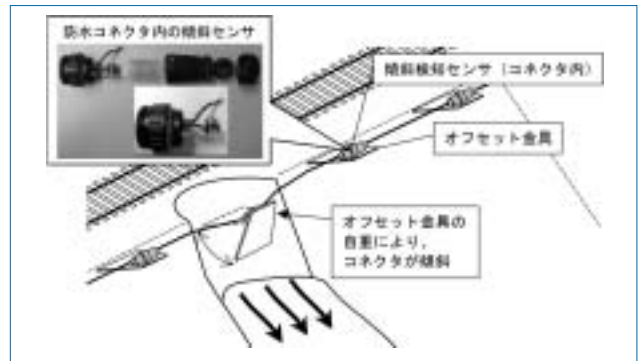


図13：盛土崩壊検知のイメージ

3.4 最終確認試験

最終確認試験として、改良したセンサの機能確認と、より降雨時の崩壊に近い状態での検証をおこなうため、水を用いた崩壊実験を実施した。実験方法としては、土質をロームから砂質土に変更し、盛土への水の供給方法は、盛土下部の水槽からの浸透、穴をあけた塩ビ管によるブルーシート面への浸透、表面からの散水を組み合わせた。比較のため、スパイラルピンを用いたものも設置し、実験をおこなった（図14、15）。その結果、改良したセンサの方が、早い段階で崩壊を検知することができ、検知性能に優れていることを確認した。

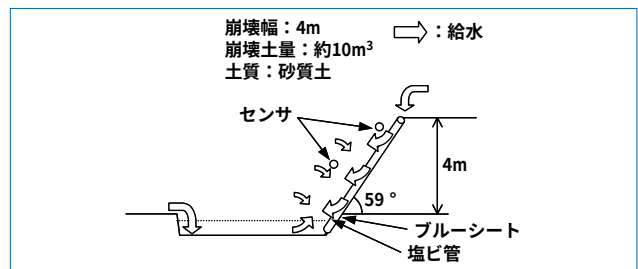


図14：水を用いた盛土崩壊実験



図15：水を用いた盛土崩壊実験の状況

4 切取崩壊検知システム

4.1 検知機構の検討

室内試験をおこなった結果、切取用センサは最も単純な構造で確実に動作する断線検知方式を基本として開発を進めることとした。断線機構はコネクタの脱落を用いる方式、ケーブルを加工し弱点部とした方式、ケーブルをそのまま用いる方式により、検知性能の比較実験をおこなった。

その結果、断線機構はケーブルの芯線を間引き、応力集中により断線しやすい加工をした箇所（以下、弱点部）を持つケーブル加工方式によることとした（図16）。センサケーブルは弱点部が中央に位置するように固定部を設け、このセンサケーブルを斜面下部に敷設する構造とした。検知性能としては、8 m間隔でセンサケーブルを固定したときに、中央部で500mm以上の変位で断線する構造とした。誤動作対策として、センサケーブルは保護管内に収納し、こちらもチャタリング信号をカットする回路を組み込んだ。

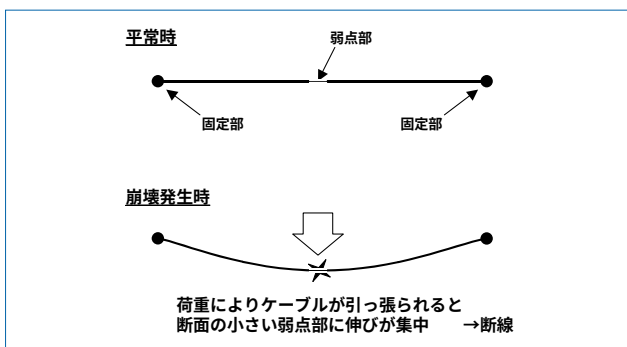


図16：センサケーブルの検知原理

4.2 崩壊実験

斜面下部にセンサを敷設し、約4 m上部から2 m³の土砂を落下させ、センサの検知性能を確認した（図17、18）。防護管、固定部の構造等について検討した結果、センサケーブルは、φ20mmのアルミ管内に通線する構造とし（図19）、2 m³以下の土砂でも確実に断線することを確認した。アルミ管は、8 m毎に固定金具による潰し加工を施し、センサケーブルを面接触で固定する機能と、センサケーブルを保護する機能を兼ねている。

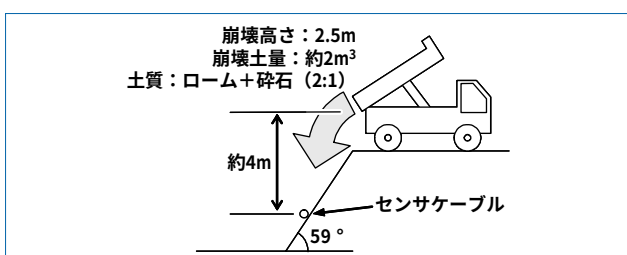


図17：切取崩壊実験

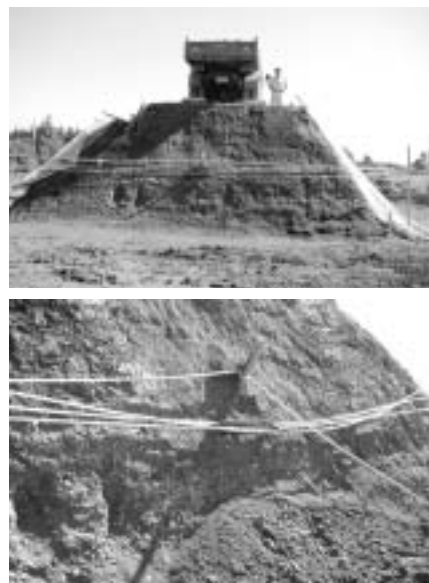


図18：切取崩壊実験の状況

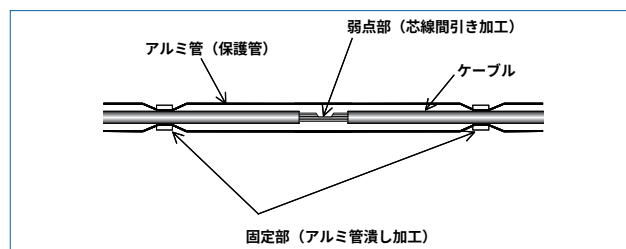


図19：センサケーブルの構造

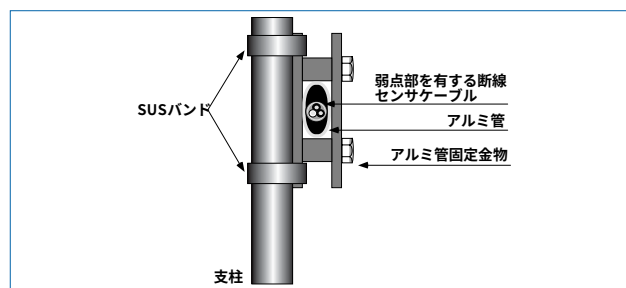


図20：ケーブル固定部の構造

4.3 実用化仕様の検討

過去の事例より、センサケーブルを単独に架設した場合は、アルミ管により防護されていても人やシカ等の接触により誤動作が懸念されることと、あらゆる崩壊の形態に対応する必要があることからセンサケーブルはフェンス上部に固定金具およびSUSバンド（ステンレスバンド）で固定することとした（図20）。検討した結果、高さ0.8mのパイプフェンスを用いることとした。フェンスは延長方向の剛性が検知機構の障害とならないよう、センサケーブルの固定間隔に合わせてスパン2 mを4径間、約8 m毎に独立で設置する構造を標準型とした（図21、22）。

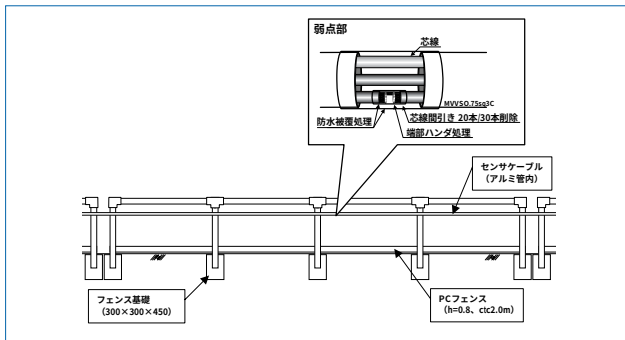


図21：切取崩壊検知システム一般図

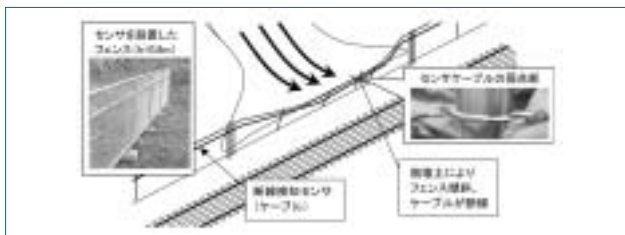


図22：切取崩壊検知のイメージ

4.4 安全性の確認

大型動物の接触を想定した載荷試験をおこない、使用するフェンスの基礎寸法の確認をおこなった。標準型の高さ0.8mのパイプフェンス4径間8mを設置し、基礎は平面寸法300mm×300mm、深さ450mmのコンクリートブロックを使用した。載荷方法は滑車と水を入れたポリタンクを使用し、スパン中央部上端に水平方向に100kgの静的載荷、60kgを300mm自由落下による衝撃により、フェンス上端の変位量の測定し、実際に設置したセンサケーブルが断線しないことの確認をおこなった。その結果、断線は発生せず、変位量も50mm以下と十分小さいことを確認した（図23、24）。

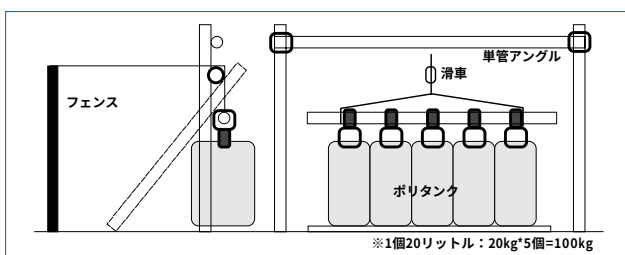


図23：フェンス基礎寸法の試験



図24：フェンス基礎寸法の試験状況

5 情報伝達系

災害発生を列車の運転士に報知する情報伝達は2重系とした。一つは、降雨量、河川の水位、地震の発生などをオンラインで監視している防災情報システム（通称、PreDAS）を用いる。土砂崩壊検知システムより出された警報は、端局から信通回線を経て施設指令等に設置された防災情報システムに送られる。そして、指令員より列車無線を介して、列車の運転士に列車を停止するよう伝達される。同時に、その箇所の列車運転速度から決まる非常ブレーキ距離に200mの余裕を加えた距離をとって設置した特殊信号発光機が点灯し、直接運転士に崩壊の発生を報知する（図25）。

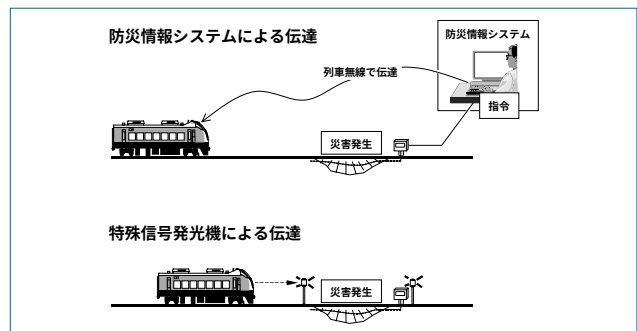


図25：情報伝達の概要

6 おわりに

今回開発したシステムは「SFラインセンサー」として、2001年度は奥羽線、田沢湖線他7箇所に設置（図26）、また、2002年度は25箇所設置と、本格的な全社導入が進められている。



図26：設置状況（切取）

参考文献

- 1) 奥水聡、森島啓行、村上正人；土砂崩壊検知センサの開発、土木学会第56回年次講演会講演概要集、IV-325、2001.10
- 2) 四宮卓夫、奥水聡；新しい土砂崩壊検知システムの開発と導入、日本鉄道施設協会誌、pp39～41、2002.4