

土砂崩壊検知システムの開発

THE DEVELOPMENT OF THE LANDSLIDE COLLAPSE DISASTER DETECTION SYSTEM

村上正人*・黒澤伸好*・張本紀行**・藤原鉄朗***・岡田 健****
 Masato MURAKAMI, Nobuyoshi KUROSAWA, Noriyuki HARIMOTO, Tetsuro FUJIWARA and Takeshi OKADA

Slope failure prevents safe train operation. To prevent accidents and control driver operations with reliable counter-measures, such as sensor-supervised systems, it is desirable to apply counter-measures to all dangerous points. However this is very difficult because of cost. It is necessary to supervise the dangerous points without sensor-based countermeasure systems. Slope failure detection equipment has been under development for such dangerous points since the year 2000.

This report outlines the development of the landslide collapse disaster detection system.

Key Words : driver operation, the landslide collapse disaster detection system

1. はじめに

鉄道沿線で発生する自然災害のなかでも、盛土・切取の斜面崩壊は列車の安全に支障をきたす恐れがある。そのため、運転規制、のり面強化工事、土砂崩壊検知装置の設置などの対策が講じられている。これら方策のうち、危険箇所に対しては防災対策工事などハードウェア対策が望ましいが、すべての箇所に実施することは費用や路線ごとの重要度の面から難しく、やむなくハードウェア対策が実施できない地点についてはセンサによる監視(ソフトウェア対策)が有効であり必要といえる。

土砂崩壊検知装置については、過去に数々の開発が行われ、光ファイバ方式など実用化されたものも存在するが、システム全体としてのコストが高く、普及するに至っていない。

本開発は、平成 11 年 4 月に東日本旅客鉄道株式会社(以下:JR 東日本)が公募した「新しい土砂崩壊検知システム」案件に対し、応募企業の提案を選考した結果、日本工営案が採用され、平成 11 年 12 月より JR 東日本・テクニカルセンターと共同研究で実施したプロジェクトである。

2. 開発の目的

車の安全運行に支障をきたす盛土や切取(切土と同義語: JR 東日本では切取と表記)の斜面崩壊について確実かつ正確にこれを検知する安価なセンサの実用化開発である。検知可能な斜面崩壊の規模としては、建築限界を支障するような崩壊を検知できることとし、盛土用と切取用の 2 種類を開発した。写真-1 に示すような切取斜面崩壊については崩壊土砂のフロント部をフェンスで捉える断線ケーブル方式を提案。写真-2 に示すような盛土斜面災害については、盛土の崩壊と侵食による崩落に対応する転倒センサ方式を提案。それぞれのセンサについて開発を実施した。



写真-1 切取崩壊による建築限界内への土砂流入

* 日本工営パワー・システムズ株式会社 事業開発部
 ** 日本工営パワー・システムズ株式会社 システムソリューション部
 *** 社会環境エンジニアリング事業部 ライフサイクルマネジメント部
 **** 日本工営パワー・システムズ株式会社 営業企画部



写真-2 盛土崩壊および施工基面までの土砂流入

3. 切取崩壊検知システムの概要

切取崩壊検知システムの仕様・性能の概要は以下の通りである。

(1) 基本機能

引張力によるケーブルの伸びを利用して断線を誘発する弱点部を有する断線センサケーブルをアルミ管で防護し、フェンスに取りつける構造とした。図-1に示すように、崩壊発生時にはフェンスが傾き、センサケーブルが 50cm 以上水平に変位したときに、弱点部が断線することで崩壊を検知する。

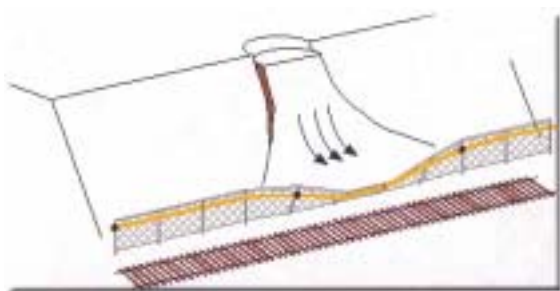


図-1 検知イメージ

(2) 特徴

切取崩壊検知システムの特徴は、崩壊量の最小量とした 2m³以上の崩壊土砂を確実に捉え、かつ人為的な揺さぶりなどを含む誤動作(誤断線)を防止する機能を有している点にある。

(3) システム構成

本装置は、図-2 に示すように弱点部を有する断線センサケーブルと制御・伝送を行う制御盤から構成される。

制御盤は 1 監視地点につき 1 台、断線センサケーブルは監視地点内に高さ 800mm(積雪地用 1,000mm)の PC フェンスを媒体として必要延長設置できる(最大延長 300m)。

断線センサケーブルと制御盤の間は伝送ケーブルで接続し、断線/短絡(ショート)の事象を制御盤が判断し、警報を端局および特殊信号発光機コントローラへ伝送し警報表示する。

検知装置は、図-3 に示すように検知機構部のほかプレダス端局などを実装したものである。表-1 に基本仕様を示す。

プレダス[PREDAS]とは、JR 東日本が構築した土木防災情報システムである。

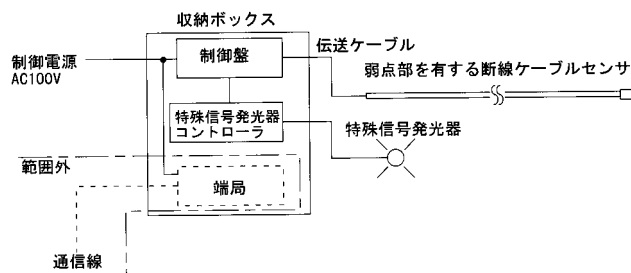


図-2 ブロック図

表-1 基本仕様

項目	仕様内容
使用温度範囲	-20℃～+60℃
制御電源	制御盤からの供給
バッテリー動作	標準仕様として、センサ検出機能および特殊信号発光機注 1)への制御接点出力はバッテリー動作後 1.5 時間を保証する。
消費電流	定常 AC100V 0.02A 最大 AC100V 2.0A (バッテリー充電、ヒータ稼動時)
出力情報	警報1(運転中止 ^{注2)})、バッテリー動作(停電)、装置故障の3つの情報とする。

注 1) 特殊信号発光機〔light signal〕とは、踏切支障があったとき、雨量計・風速計などの計測値が規定値に達したとき、災害を検知するセンサが作動したときなどに乗務員に異常を知らせる装置で、5 角形の板にランプが取り付けられ異常時には発光信号(赤色光が 2 つずつ現示しながら左に回転する)を現示(発光)するタイプと、高輝度 LED 素子が赤色点滅現示するものがある。本システムには LED タイプを標準とする。

注 2) 運転中止とは、気象や地震の災害から列車の安全を守るために設けられた運転規制〔operation control〕のひとつであり、運転士の判断で運行再開が認められない規制レベルを指す。

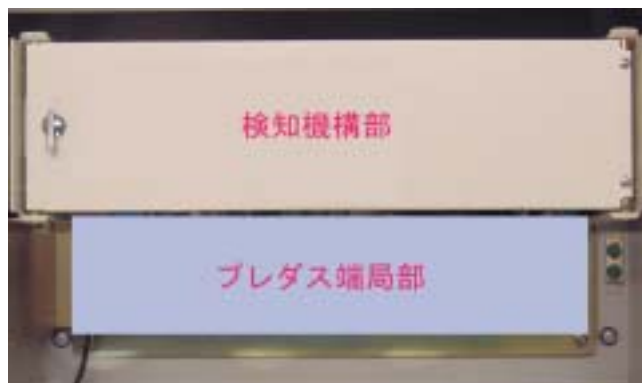


図-3 検知装置内部イメージ

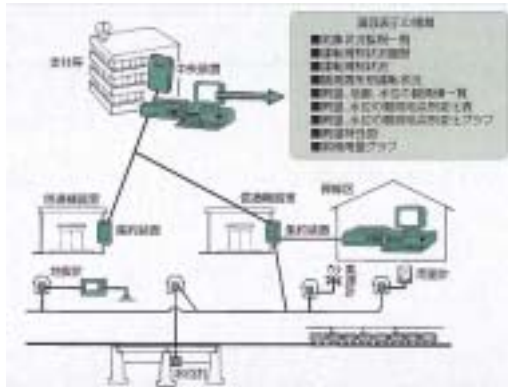


図-4 プレダスシステム

図-4 に示すシステムは、JR 東日本の全ての支社で構築されている。従来は営業線路各地に設置された雨量計、地震計、風向風速計などの情報を集約して監視する土木情報システムであったが、今回共同開発した土砂災害検知装置や、同時期に開発された橋梁洗掘装置などの新型センサシステムの情報を新たに集約することで、土木防災情報システムに進化したものである。

(4) 断線センサケーブルの機能

1) 確実な検知性能の確保

断線センサケーブルは、図-5 に示すような構造を特徴とする。後述する崩壊実験の結果、 2m^3 の土量ではケーブル径を細く(ケーブル断面積 0.12mm^2)してもケーブルの伸びの範囲内で収まってしまいうため断線に至らないことが判明した。このような弱点部を設けることでケーブルにかかる応力が弱点部に集中し、確実に断線させることが可能となる。

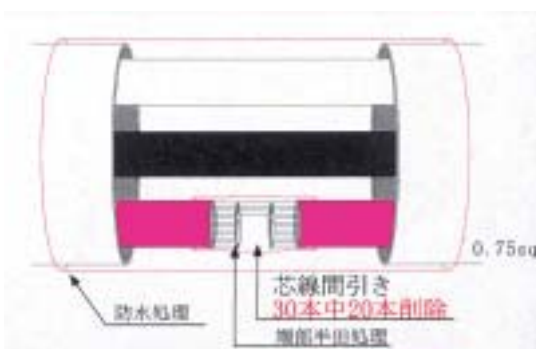


図-5 弱点部を有する断線センサケーブル

2) 検知性能と防護機能の分散化

検知性能と防護機能という相反する機能事象を両立するため、それぞれの機能を分散させる手法を採用した。

防護機能は、直径 20mm 厚さ 1mm のアルミ押出管により持たせ、断線センサケーブルは 50cm 以上変位(伸びる)する

とケーブル弱点部が断線する構造となっているが、採用したアルミ管は 150kg 以上の荷重がかからないと 50cm 以上変位しない特性を有する。この特性により人間や動物が乗りかかったり引っ張ったりしても断線せず、 2m^3 以上の崩壊土砂には断線検知する性能を実現した。

3) 敷設方法

本装置は、崩壊土砂の衝撃を受ける媒体としてフェンスを利用する。

図-1 に示すように、のり尻近傍(フェンスが倒れても先端が建築限界を支障しない位置)に PC フェンス(高さ 800mm)を 4 スパンごと(PC フェンス $8\text{m} +$ 基礎 $0.3\text{m} = 8.3\text{m}$)に独立敷設する。断線センサケーブルは、アルミ管に収納し、PC フェンス両端支柱(8.3m ごと)に、写真-3 に示すような構造のアルミ管固定金物を用いて、アルミ管とケーブルを共締め固定する。固定点以外の箇所については 50cm 毎にフェンス網に固定する。弱点部は固定点間の中心に位置するよう敷設する。写真-4 は PC フェンスに断線センサケーブルを敷設した状況である。



アルミ管固定金物
(試作品)
専用アルミ管加工
工具を使用する

写真-3 アルミ管固定金物



写真-4 センサ全景



写真-5 特殊信号発光機(右がLEDタイプ)

4. 盛土崩壊検知システムの概要

盛土崩壊検知システムの仕様・性能の概要は以下の通りである。

(1) 基本機能

転倒センサユニットは、防水機能を有するケーブルコネクタ内に 30～45 度以上の傾きを検知する 2 軸対応の超小型傾斜センサが内蔵されている。施工基面(レールを敷設する路盤の地表面部分を指す)まで達する盛土崩壊が発生したときに、盛土のり肩に設置した転倒センサユニットが傾斜あるいは断線し崩壊を検知する。既設の落石防止柵などに設置することも可能である。

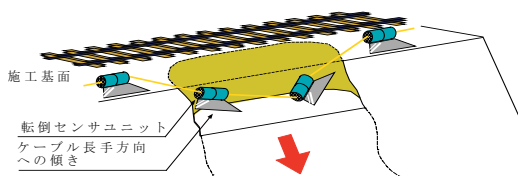


図-6 検知イメージ(崩壊)

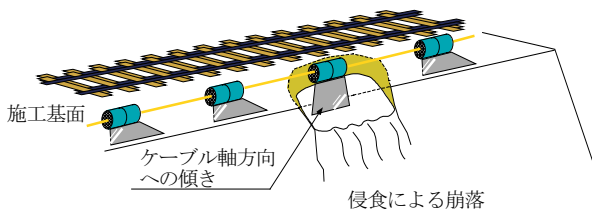


図-7 検知イメージ(崩落)

(2) 特徴

盛土崩壊検知システムの特徴は、施工基面まで到達する土砂崩壊現象の検知のほか、ゆっくりと地盤を侵食して空洞を形成する崩落現象のいずれにも対応でき、構造的に極めて簡便に施工できる点が挙げられる。以下に個別機能について述べる。

1) 検知性能

比較的大規模に発生する土砂崩壊の検知は、図-6 に示すように接続した転倒センサユニットがケーブル長手方向に傾斜することで検知できる。

一方、通常の斜面崩壊と違い、侵食の進行(シートエロージョン リル ガリ 崩壊)に起因する崩壊現象はその進行速度が遅く、盛土斜面の周囲から多数の水みちが形成され、やがて一箇所に集約される、という特徴がある。開発した転倒センサユニットは施工時に併設する台形固定プレートの作用によりケーブル軸方向に 90 度回転する機能を具備し、図-7 のように侵食による崩落現象にも対応する。

2) 構造

写真-6 の上は平成 12 年度までに開発した転倒センサユニット、写真-6 の下は平成 13 年度に開発した防水ケーブルコネクタ内に転倒センサを実装したユニットである。新型ユニットはセンサ回路部の高実装化により、コネクタとの一体化を図ることで、接続および施工の簡素化、センサ自体の高強度化を実現したものである。

写真-7は転倒センサユニット(試作品)の施工状況である。

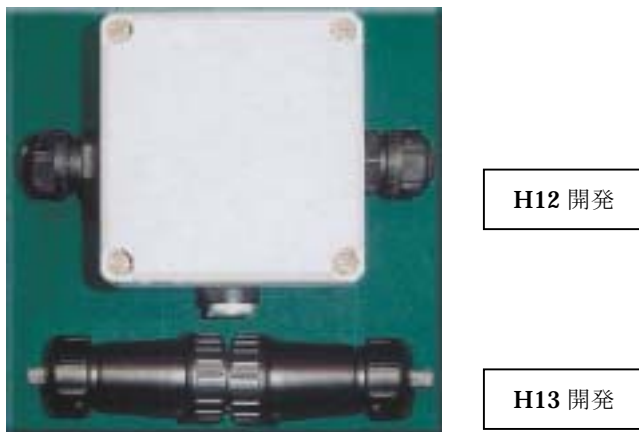


写真-6 転倒センサユニット

(3) システム構成

本装置は、図-8 に示すような転倒センサと制御・伝送を行う制御盤から構成される。制御盤は 1 監視地点に 1 台、転倒センサは監視地点内に必要数量設置する(最大延長 200m)。



写真-7 転倒センサユニット敷設状況(試作品)

転倒センサユニットと制御盤の間は伝送ケーブルで接続し、転倒/断線、短絡それぞれの事象を制御盤が判断し、警報を出力する。

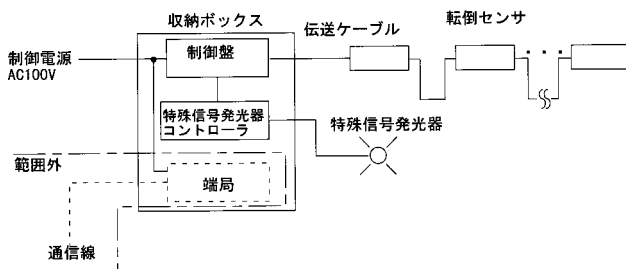


図-8 ブロック図

(4) 転倒センサユニットの機能

転倒センサユニットの機能を表-2 に示す。表-2 以外の項目については表-1 に示す。

表-2 基本機能

項目	内容
基本性能	地盤の傾斜(固定角度)および断線、短絡を検知する。防水コネクタ内に転倒センサを実装する。
傾斜角の検知方向	水平直交 2 方向とする。
傾斜角の測定範囲	30 度から 45 度の範囲で傾斜を捉えるものとする。
構造	のり肩近傍に埋設する構造とする。なお、転倒センサ収納コネクタは、結合時に防水機能を有する。(通常の状態では水圧下(0.04MPa)に24時間以上放置したとき浸水などの異常がない。)

5. 機能の検証

(1) 設置環境の実態

開発したセンサの想定設置地点における暗騒音レベルを確認するため、JR 東日本営業線路近傍にて設置環境の調査を実施した。

1) 実施箇所

現地踏査を行った区間は以下の 2 箇所である。

① 常磐線 取手～藤代間

交流区間、直流区間、無電(交直切り替え)区間。

常磐線区間は、交流区間、直流区間、無電(交直切り替え)区間が混在する。

≪# 交流区間

下り 41k 900m～42k 100m 区間

≪# 直流区間

下り 42k 165m～42k 365m 区間

≪# 非電化区間

下り 42k 100m～42k 165m 区間

② 水郡線 水戸～常陸青柳間

≪# 非電化区間(ディーゼル)

下り 0k 517m～0k 717m 区間

2) 計測結果

① ノイズ状況

交流成分計測、直流成分計測で実測した電氣的なノイズは、AC成分 1.78mV(最大振幅)、DC成分 143mV(±成分最大幅、DC 電源電圧の 1.1%)と微小であり、センサへの影響はないことを確認した。

② 振動状況

常磐線(普通列車、特急列車、電気機関車貨物列車、ディーゼル機関車貨物列車)、水郡線(ディーゼル普通列車、ディーゼル貨物列車)全てにおいて、振動による転倒センサの誤動作は発生しないことを確認した。

3) 設置環境におけるセンサへの影響

ノイズ状況、振動状況ともに、センサに影響を及ぼすレベルにないことを確認した。

(2) フィールドテスト

タイプの異なる検知システムの性能比較を行うには、崩壊実験における崩壊規模や形態をできる限り人為的に制御し、これらについて実験間に大きな差が生じないことが重要である。そこで、切取・盛土崩壊について、実際の崩壊現象から大きな相違がない範囲で、最も崩壊の発生およびその形態が制御しやすい方法を検討した。崩壊実験に用いた斜面の全体概要を図-9 に示す。

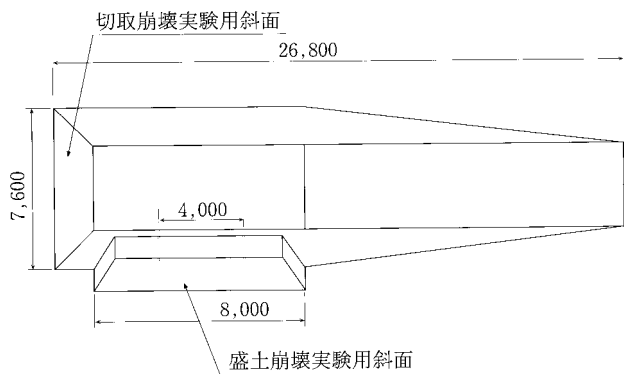


図-9 崩壊モデル

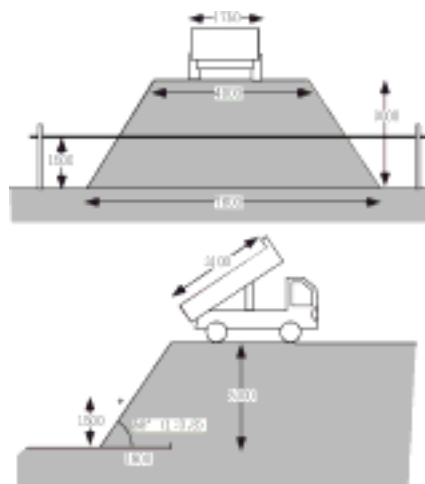


図-10 切取崩壊モデル

1) 切取崩壊モデル

切取斜面の崩壊は地山の不均質性に強く依存しているため、崩壊現象そのものを正確に再現することは極めて困難である。このため今回の実験では、あらかじめ準備した崩土を斜面上で滑落させることによって、崩土の落下および堆積を再現することにした。また、崩土については関東ロームと碎石(5~20mm)を体積比 2:1 で混合したものとし、関東ロームは自然状態(含水比約 105%)、碎石については表乾状態で使用した。切取崩壊における崩土の衝撃力については、落石対策便覧¹⁾による以下の式を参考とした。

$$P = \rho s \cdot V^2 \cdot A \cdot \sin^2 \alpha \quad (1)$$

- P : 構造物に作用する衝撃力(kN)
- ρs : 崩土の単位体積質量(t/m³)
- V : 崩土の衝突速度(m/s)
- A : 構造物の面に対する崩土の作用投影面積(m²)
- α : 崩土の構造物への衝突角度(°)

(1)式が示すとおり、衝撃力は衝撃受面における単位面積あたりの質量と衝突速度に依存している。このため、崩土の量を調整することで衝撃力を調整した。

落下させる崩壊土量については、災害が発生しうる最小の土量であることが必要である。杉山友康著の研究報告²⁾によると、切取災害(表層崩壊)における最小土量は、0.8m³であるとしており、そこで今回の切取崩壊実験では、崩壊土量を近似的に 2m³に設定した。また、切取災害の発生している斜面勾配は、51~42° が 40%近くと最も多く、次いで 63~51° が 30%弱であった。本実験では、崩壊土量の落下をスムーズに再現することを考慮し、斜面勾配は1:0.6 勾配(59°)とした。

2) 盛土崩壊モデル

フィールドテストでは盛土上に線路があり、盛土が崩壊することによって線路に変状をきたすような場合を想定した。このため、盛土の崩壊はある程度規模が大きく、しかも、後退性崩壊のように徐々に崩壊範囲が広がるのではなく、一挙に発生するような崩壊形態を再現する必要がある。通常、盛土の深層崩壊は降雨などに伴う間隙水圧の上昇に起因するが、散水などでこれらの発生要因を制御するのは困難であり、また、実験回数を経るに従って条件が変わる恐れがあった。これらの盛土の崩壊は、のり面下部の圧縮領域におけるせん断抵抗力の低下に伴って発生する。そこで、最も制御しやすい方法として、のり面下部のせん断抵抗力を排除すること、すなわち、のり面下部を掘削することで崩壊を発生させるものとした。また、崩壊の規模を限定する目的で、すべり面にビニールシートを張り、側面は合板によって仕切った。この際の崩壊深度は約 1.0m、崩壊幅は約 4.0m、崩壊高さは約 1.5m(2.5~1.0)としており、崩壊予定土量は約 6.0m³である。

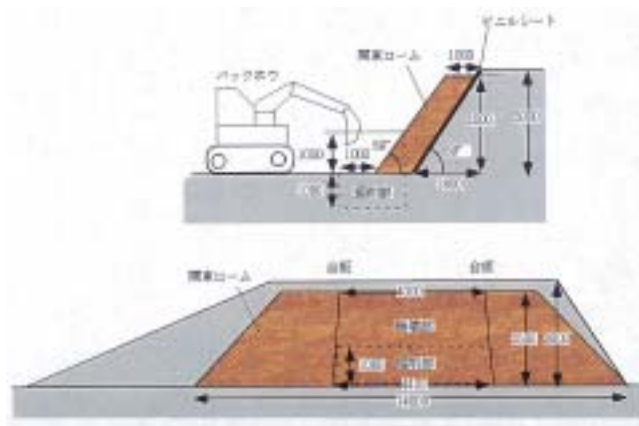


図-11 盛土崩壊モデル

3) 実験結果

フィールドテストでは、切取崩壊実験を全 12 回、盛土崩壊実験を全 8 回(各予備実験を含む)実施し、開発した切取・盛土崩壊検知センサの最適化および機能を検証した。写真-8 に盛土崩壊実験状況を示す。



写真-8 フィールドテスト状況(盛土崩壊)

6. 工業所有権

開発した土砂崩壊検知システムは、JR 東日本と共同で特許出願した。

- ① 土砂崩壊検知装置 (特願 2001-052202)
- ② 斜面崩壊検知装置 (特願 2001-052203)

7. 開発の成果

本システムは平成 13 年 7 月には JR 東日本社内技術展示会へ出展するとともに、8 月には JR 東日本全支社土木担当者に対する説明会が開催された。以後 JR 東日本標準購買仕様として告知されている。

平成 13 年度中には、図-12 に示すような防災対策強化区間のうち、表-3 に示す箇所へ採用された。写真-9 は平成 13 年度設置箇所のうち奥羽本線(山形新幹線)管内の状況である。

平成 14 年度以降については、複数年で数百箇所への設置が計画されている。



写真-9 センサ設置想定地点(奥羽本線)

表-3 平成 13 年度採用区間

設置区間	センサ形式
仙台支社管内	盛土・切取
秋田支社管内	切取
高崎支社管内	切取
千葉支社管内	切取
大宮支社管内	盛土

※ 平成 14 年 3 月現在

その他、平成 13 年 10 月に開催された土木学会全国大会 学術講演会で、JR 東日本による本システムについての講演が行われた。



図-12 平成 13 年度防災対策強化工事区間

8. おわりに

簡便な構造、低コストといったコンセプトに基づき開発した土砂崩壊検知システム 2 機種は、JR 東日本から高い評価を得ることが出来、共同研究としては異例の早期採用を実現した。

今後は、製品として機能面、製造面を含めた品質および施工性の向上を図ることで、商品力の充実を目指す。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧(改定版)、2000
- 2) 杉山友康：降雨時の鉄道斜面災害防止のための危険度評価手法に関する研究、鉄道総研報告、特別第 19 号、1997.5.