ＩＳＳＮ ０３８６-５８７８
土木研究所資料第 4250 号

土 木 研 究 所 資 料

斜面崩落検知システム
運用マニュアル

平成 25 年 1 月

独立行政法人土木研究所
土砂管理研究グループ
地 す べ り チ ー ム

Copyright © (2013) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土 木 研 究 所 資 料
第 4250 号　2013 年 1 月

斜面崩落検知システム
運用マニュアル

独立行政法人土木研究所　土砂管理研究グループ地すべりチーム　上席研究員　武士俊也
総括主任研究員　千田容嗣
主任研究員　三輪賢志
元主任研究員　石田孝司*
交流研究員　坂野弘太郎

＊現国土交通省四国地方整備局四国山地砂防事務所

要　旨

大規模な落石や斜面崩落が発生する前兆現象として落石や小崩落が発生する場合がある。このような現象は目視で比較的確認がしやすいと考えられる。しかし仮設防護柵を設置すると道路利用者がこの現象の認識が困難となる。また、前兆現象の発生頻度と大規模な落石や斜面崩落の発生について観測された事例は少ないことから、その予測に関する検討が十分実施できていないという課題が残されている。そこで、仮設防護柵に設置して前兆現象と考えられる落石・小崩落を検知するための試行システムを共同研究で開発した。本書は、「仮設防護柵設置区間の安全管理を目的とした斜面崩落検知システム」を実現場において運用するためのマニュアルである。

キーワード：斜面崩落、落石、仮設防護柵、前兆、発生予測、振動、検知システム

目　次

1.　はじめに

1.1 「仮設防護柵設置区間の安全管理を目指した斜面崩落検知システム」の目的 1-1

1.2 「斜面崩落検知システム」の概要 1-2

1.3 用語の定義 1-3

2.　適用条件

2.1 現場条件 2-1

2.2 適用対象となる仮設防護柵の規格 2-3

3.　斜面崩落検知の仕組みとシステム概要

3.1 崩落検知システムに要求される性能 3-1

3.2 導入目的とシステム要件 3-3

3.3 システムの種類 3-4

4.　システムの設計

4.1 システム設計フロー 4-1

4.2 導入時の検討 4-3

4.3 システムの設計 4-14

4.4 運用上の留意点 4-39

4.5 崩落検知システムの適用事例 4-43

5.　道路管理ツールとしての運用方法の提案

5.1 システム運用の考え方 5-1

5.2 目安値の設定について 5-2

まえがき

仮設防護柵は道路斜面が崩落した場合の応急緊急的な対策として、また、道路法面工事などの際に発生する浮石等の飛散から道路利用者の安全を確保することを目的として数多く設置されている。しかし、降雨や凍結融解、切土工事等による斜面の緩みの進行により適用範囲外の大規模な落石や斜面崩落が発生し、道路利用者が仮設防護柵とともに被災するといった事例の報告もある。

大規模な落石や斜面崩落が発生する前兆現象として落石・小崩落が発生する場合があることは、一般的に知られているが、仮設防護柵は高さが数ｍあることやその構造から仮設防護柵の山側の状況が不可視となり前兆現象を感知することができない場合がある。そこで、前兆現象と考えられる落石・小崩落を検知するためのセンサーを仮設防護柵に設置し、センサーで捉えたデータを落石イベントとして判定する試行システムを土木研究所と民間４社との共同研究（斜面の崩落の検知センサーと検出システム）を通じて開発した。本マニュアルは、上記システムの標準的な使用方法を示したものである。

1. はじめに

1.1 「仮設防護柵設置区間の安全管理を目指した斜面崩落検知システム」の目的

「仮設防護柵設置区間の安全管理を目指した斜面崩落検知システム（※以下「斜面崩落検知システム」と呼ぶ）」は、仮設防護柵にセンサーを簡易に設置することにより、斜面からの落石・小崩落の頻度の観測を行うものである。

＜解説＞

大規模な斜面崩落の前兆として、落石・小崩落が発生すると考えられている。しかし、落石・小崩落の頻度について観測された事例は少ない。そこで、観測データを蓄積し将来的に崩落予測を行うことを目的として、仮設防護柵に設置することが容易で落石・小崩落の頻度を捉えることのできるセンサー及び検知システムを開発した。本マニュアルでは落石・小崩落の頻度を観測する方法を示すとともに、第5章では検知システムを用いて得られた観測結果を元に崩落を予測する「検出システム」の考え方についても記載した。

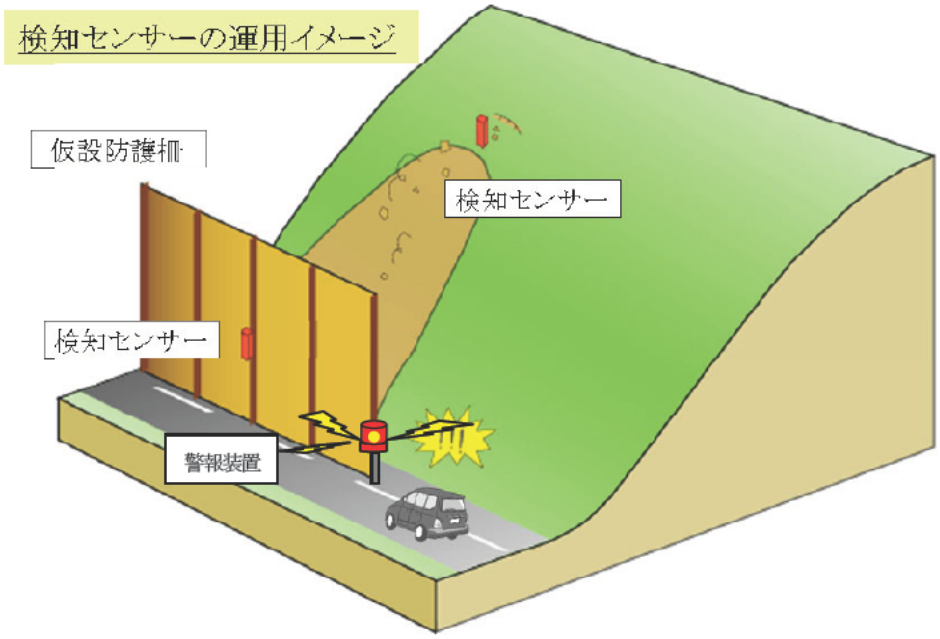


図 1.1　崩落検知センサーの運用イメージ図

1.2 「斜面崩落検知システム」の概要

「斜面崩落検知システム」とは、道路斜面対策の施工の際に設置されることの多い仮設防護柵に、加速度型振動計もしくは速度型振動計を用いたセンサーを設置し、落石・小崩落を検知してそれらの発生頻度を定量的に観測する技術である。

＜解説＞

「斜面崩落検知システム」の特徴を以下にまとめる。

特徴①　一般的な仮設防護柵に取り付けが可能で、その取り外しも容易である。

特徴②　振動により落石・小崩落を捉える本システムは、事前に基礎実験を行うことで交通振動などの落石等の衝撃以外の振動成分(周波数成分)をノイズとして除去することが可能である。

特徴③　ネットワーク環境が整備されていれば観測データの遠隔モニタリングが可能である。

特徴④　検知システムのオプションとして別途プレトリガー機能（崩落を検知する２～５秒程度前から撮影・録画する機能）を有した監視カメラを併設することにより、落石・崩落状況の確実な把握及び規模・範囲を画像により確認が可能である。

1.3 用語の定義

本マニュアルに用いる用語を新たに定義する。

＜解説＞

(1) 崩落検知センサー、崩落検知システム

落石あるいは小崩落の発生を検出する機構を有する装置である。本マニュアルでは、仮設防護柵に直接取り付けることで、落石あるいは小崩落によって生じる仮設防護柵の振動を選択的に検出する機能を備える装置を指す。この振動検出機能を備える装置を「崩落検知センサー」、振動検出機能の他に検出結果を伝達する通信機能や検出頻度から大規模崩落の発生を推定する機能など、複数の機能を有する装置を「崩落検知システム」と定義する。

(2) 仮設防護柵

道路斜面が崩落した場合の安全確保のための応急緊急的な対策として、また、道路法面工事などの際に発生する浮石等の飛散から道路利用者の安全を確保することを目的として、斜面に沿って設置される仮設構造物である。そのうち、本マニュアルでは、利用頻度が高いH形鋼による支柱と軽量鋼矢板の横矢板の組み合わせからなる仮設防護柵を対象とする。

2. 適用条件

2.1 現場条件

崩落検知システムは、仮設防護柵を設置して工事を実施中の現場、あるいは斜面等の工事に伴いこれから仮設防護柵を設置する現場に設置・導入する。

＜解　説＞

崩落検知システムは、仮設防護柵にセンサーを設置することを前提に開発したものである。そのため、仮設防護柵以外への適用に対して検証は行われていない。設置・導入時には、仮設防護柵の設置条件を含めて現場の条件を確認し、必要に応じて崩落検知システム導入のための対応をとるものとする。現場条件と対応方針を表 2.1 に示す。

表 2.1　現場条件と崩落検知システム導入のための対応方針

区　分	着　目　点	確　認　内　容	対応方針
仮設防護柵の設置要件	小規模な飛石・落石に対する防護機能	標準的な材料・規格の採用	・一般的仕様（2.2 項参照）であることを確認 ・特殊な場合には設計条件とその妥当性を確認 ・材料や設置方法に不備・弱点が無いことを確認
斜面変動のタイプ等	想定される落石	発生位置・規模	・防護柵衝突時のエネルギーが明らかに防護柵機能を超過すると想定される場合は浮き石の除去等の対応を実施
		落石材料・形状	・特殊な場合は現地試験時に配慮（発生材料使用）
		落下経路	・設置延長が不足している場合は追加設置等必要な仮設を実施
	岩盤崩壊・地すべり等の大規模斜面変動	変動タイプ	・トップリング等前兆が乏しいと想定されるタイプでは適切なタイプの変動監視体制が構築されていることを確認
		現況の活動性	・現時点で不安定な可能性がある場合は適切な変動監視体制が構築されていることを確認
地形地質と防護柵配置	柵高	想定落石跳躍高との比較	・落石が柵を飛び越えないことを確認
	防護柵への想定衝突形態	柵背後のポケット	・柵に近接する崖錐や落石錐は極力除去（柵上部への落石衝突や土圧作用の危険を軽減） ・既往の小崩壊発生事例がある場合は相当する容量を確保
		柵への想定衝突方向	・柵に対して上下・左右に極端に斜交する場合は現地試験時に配慮（複数方向からの衝撃実験の実施等）

仮設防護柵は、斜面等の工事に伴う小規模な飛石や落石から通行者・通行車両を防護する目的で設置されており、施工期間や設置範囲が限定された仮設構造物である。落石や崩壊を想定した設計が行われているケースは少ない。

一方、斜面内に地すべり土塊や緩み岩塊など周囲より安定度の低い部分（移動体）が存在し、これらの変形や移動（以降、「斜面変動」と呼ぶ）に伴って移動体周辺で落石が発生する場合がある。移動体が徐々に不安定化し、やがて大規模な移動を引き起こす際には、移動体周辺の落石の量や発生頻度が徐々に増加する場合があることから、落石の発生傾向から斜面変動の前兆現象として把握できる可能性がある。

崩落検知システムは、仮設防護柵に設置したセンサーでこのような前兆現象を把握し、斜面変動による被害を回避することを目的としている。

今回開発した崩落検知システムは、仮設防護柵に期待される、小規模な飛石や落石（発生確率は高いが被害は小）に対する防護機能に対して、落石の検知機能を付加することで、よりリスクの大きい現象のうち、前兆現象を伴う斜面変動による被害の回避を目指すものである。

このため、リスクの大きい現象の中でも、前兆現象を伴わないもの、前兆現象として想定される個々の落石規模が大きく、直接仮設防護柵に衝突が想定される場合等には対応できない(図2.1)。

あらかじめ仮設防護柵の機能を越える可能性のある現象が具体的に把握された場合は、その時点で現象に応じた応急対策や監視体制をとる必要がある。

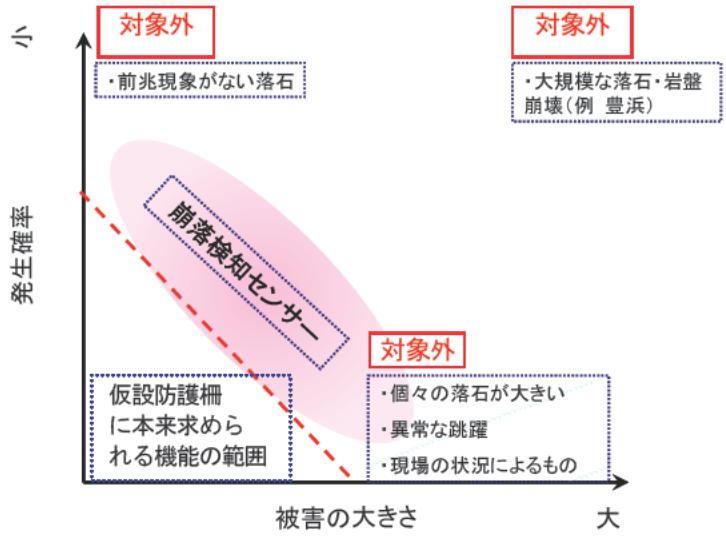


図 2.1　崩落検知センサーによる前兆把握の対象となる現象とリスク概念図

2.2　適用対象となる仮設防護柵の規格

センサー設置を検討する仮設防護柵の仕様・規格は、鋼矢板を土留材とするもので、一連の仮設防護柵の仕様が統一されているものとする。

＜解説＞

関連文献や実態調査の結果等から、仮設防護柵はH形鋼を支柱とし、木製あるいは鋼製の土留材を使用した仕様が多く、地盤条件を含め様々な形態のものが採用されているものの、概ね標準的なタイプが使用されている。

崩落検知システムでは計測開始前の現地での衝撃実験を導入の前提としており、設置箇所において標準的な仕様で統一されている仮設防護柵であれば、基本的に崩落検知システムの設置が可能である。ただし、木矢板を使用した現地試験では結果のばらつきが大きいため、本マニュアルでは鋼製土留材を使用した仮設防護柵を対象とする。

2.1 で示した現場条件を確認のうえ現地での衝撃実験を行い、必要な特性を把握するものとする。

一般に仮設防護柵の設置方法や仕様・規格は設置箇所内で共通しており、部分的に極端に老朽化している場合や別規格の矢板が混在するような場合等を除き、使用材料の特性は箇所内では概ね同等であると考えられる。

全国地すべりがけ崩れ対策協議会が各都道府県に対して実施した「急傾斜地崩壊防止工事における仮設防護柵についてのアンケート」の集計結果を参考に提案された 12 種類の標準タイプの諸元を表 2.2 に示す[9]。これによると支柱に H 形鋼を採用する場合（下表内⑦、⑧、⑪、⑫）は、H-150 を 2m 間隔で建込む仕様が標準とされている。

国土交通省の土木工事積算基準では、「支柱はH形鋼とし、高さ（地上高）は 2.5～10m、支柱間隔は 1.5～4.0m及び根入れ長さは 2m以下」を適用範囲としている。標準図等を　図 2.2　に示す。

平成 10 年度に実施された実態調査においても、使用材料や規格はおおむね共通し、土留め材は、鋼板・鋼矢板ないし板材・丸太の全面使用が圧倒的に多く、支柱は H 形鋼が使用され、高さは 4m～6m、間隔は 2mの事例が多いことが分かる（図 2.3)。

表 2.2　仮設防護柵標準タイプ 12 例の諸元

タイプ / 諸元	①	②	③	④
長 × 高（m）	10.0×1.5	10.0×3.0	10.0×3.0	10.0×4.0
主　柱（cm）	杉または松丸太 200×φ12×10本	杉または松丸太 400×φ12× 5 本	杉または松丸太 400×φ12× 5 本	単　管 450×φ4.86× 5 本
横　梁（cm）	〃 400×φ 9 × 5 本	〃 400×φ12× 5 本	〃 400×φ12× 5 本	〃 400×φ4,86× 5 本
控　木（cm）	〃 200×φ12× 5 本	〃 200×φ12× 5 本	〃 200×φ12× 5 本	〃 300×φ4.86× 5 本
控　杭（cm）	〃 100×φ12× 5 本	〃 150×φ12× 5 本	〃 150×φ12× 5 本	—
筋　違（cm）	—	—	〃 260×φ12×20本	単　管 300×φ4.86×20本
土留板（cm）	厚　板 200×20×3.6×35枚	厚　板 200×20×3.6×80枚	—	—
防　護　網	—	—	網目40×8#×30.0㎡	網目40×8#×40.0㎡

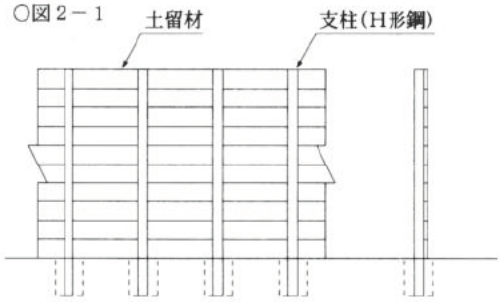
タイプ / 諸元	⑤	⑥	⑦	⑧
長 × 高（m）	10.0×4.0	10.0×4.0	10.0×4.0	10.0×4.0
主　柱（cm）	杉または松丸太 500×φ12× 5 本	杉または松丸太 500×φ12× 5 本	H　形　鋼 450×15×15×0.7× 5 本	H　形　鋼 450×15×15×0.7× 5 本
横　梁（cm）	〃 400×φ12× 5 本	〃 400×φ12× 5 本	L　形　鋼 400×0.6×7.5×7.5×10本	L　形　鋼 400×0.6×7.5×7.5×10本
控　木（cm）	〃 280×φ12× 5 本	〃 280×φ12× 5 本	—	—
控　杭（cm）	〃 150×φ12× 5 本	〃 150×φ12× 5 本	—	—
筋　違（cm）	—	〃 290×φ12×20本	—	—
土留板（cm）	厚　板 200×20×3.6×100枚	—	厚　板 200×20×3.6×100枚	—
防　護　網	—	網目40×8#×40.0㎡	—	網目40×8#×40.0㎡

タイプ / 諸元	⑨	⑩	⑪	⑫
長 × 高（m）	10.0×5.0	10.0×5.0	10.0×5.0	10.0×5.0
主　柱（cm）	杉または松丸太 600×φ12× 5 本	杉または松丸太 600×φ12× 5 本	H　形　鋼 580×15×15×0.7× 5 本	H　形　鋼 580×15×15×0.7× 5 本
横　梁（cm）	〃 400×φ12×10本	〃 400×φ12×10本	L　形　鋼 400×0.6×7.5×7.5×12.5本	L　形　鋼 400×0.6×7.5×7.5×12.5本
控　木（cm）	〃 400×φ12× 5 本	〃 400×φ12× 5 本	—	—
控　杭（cm）	〃 150×φ12× 5 本	〃 150×φ12× 5 本	—	—
筋　違（cm）	—	〃 290×φ12×30本	—	—
土留板（cm）	厚　板 200×20×3.6×100枚	—	厚　板 200×20×36×125枚	—
防　護　網	—	網目40×8#×50.0㎡	—	網目40×8#×50.0㎡

「新・斜面崩壊防止工事の設計と実例（建設省河川局砂防部）」より抜粋

2－2　参考図等

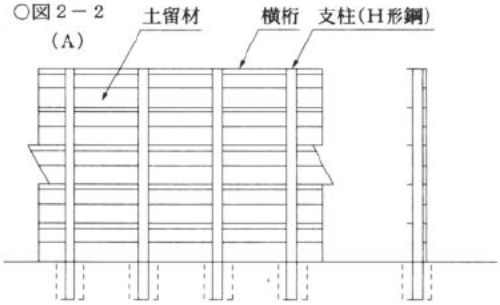
○図2－1



支柱形式	支柱	H形鋼
	横桁	無し
土留材	種類	有り
	施工内容	全面施工
金網・シート施工内容		－

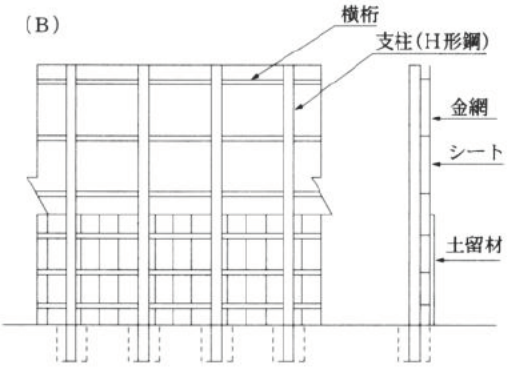
○図2－2

(A)

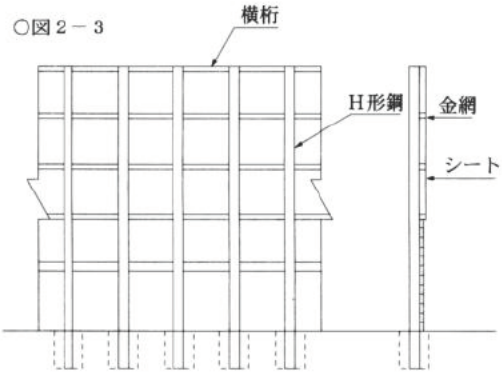


支柱形式	支柱	H形鋼
	横桁	有り
土留材	種類	有り
	施工内容	土留全面又は土留及び金網・シート併用施工
金網・シート施工内容		

(B)



○図2－3



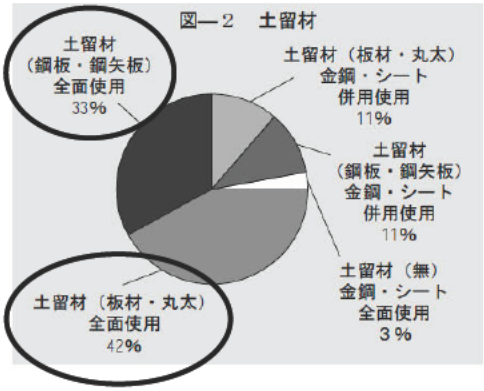
支柱形式	支柱	H形鋼
	横桁	有り
土留材	種類	－
	施工内容	－
金網・シート施工内容		全面施工

「国土交通省土木工事積算基準（国土交通省）」より抜粋

図2.2　積算基準における参考図

「建設マネジメント技術」2000 年 8 月号（財団法人経済調査会）より抜粋

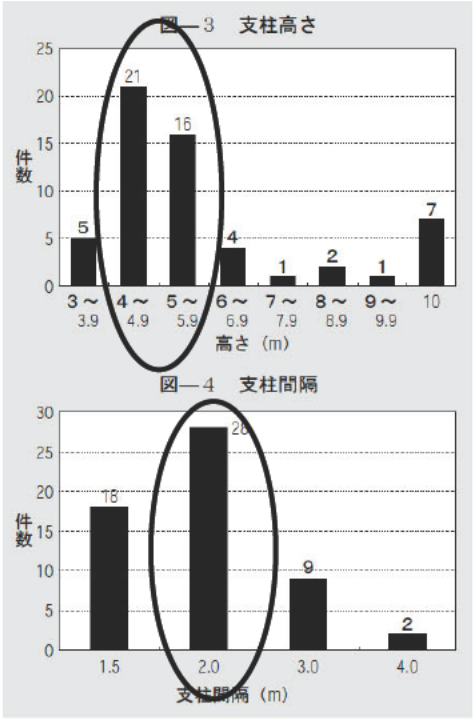
切土及び発破防護柵の構造は支柱にＨ形鋼を



太を全面使用したもの（**写真—2**），板材を下面に使用し金網・シートを上面に併用使用しているもの（**写真—3**）があり，土留材に板材・丸太を全面使用したものが多く施工されていた。

切土及び発破防護柵の高さについては**図—3**に示すように3～10m の間で施工されており，高さ5ｍ前後の施工が最も多く見られた。また，支柱間隔は**図—4**に示すように2ｍの施工が多く見られた。

使用しており，土留材は**図—2**に示すようにさまざまなものがある。主なものとしては，鋼板・鋼矢板を全面使用したもの（**写真—1**），板材・丸



写真—1

写真—3

写真—2

写真—4

図 2.3　仮設防護柵に関する実態調査結果

3. 斜面崩落検知の仕組みとシステム概要

3.1 崩落検知システムに要求される機能

崩落検知システムは、「測定機能」、「A/D変換機能」、「演算処理機能」および「通信・ネットワーク機能」の４つの基本的な機構（機能）から構成される。

＜解説＞

本マニュアルで扱う崩落検知システムは、基本的には振動計を用い、斜面崩落の前兆現象としての落石・小崩落の衝撃による仮設防護柵の振動を検知するものである。ただし、落石・小崩落以外の振動（交通振動等）に反応すれば誤報につながる。このことから、崩落検知には、「落石・小崩落以外の振動をノイズとして選択的に取り除く」仕組みが求められる。

上述の内容を含め、崩落検知システムは、以下の４つの基本的な機構（機能）から構成される。（図3.1）

- 振動を加速度または速度の出力で測定する機能　**→測定機能**
- 測定されたアナログ（電流、電圧）の振動データをデジタル値に変換する機能　**→Ａ／Ｄ変換機能**
- 変換されたデジタル値のうち、交通振動などの落石衝撃以外の振動成分（周波数成分）をノイズとして取り除き、ある一定の振幅レベルを超過した場合、崩落として検出する解析機能　**→演算処理機能**
- 崩落として検出された検知情報を遠隔地に通信する機能　**→通信・ネットワーク機能**

① 測定機能

システムの要である振動測定には振動計を用いる。この振動計には「測定する対象別（出力種類）」による変位型、速度型および加速度型の３つの区分、あるいは「変換方法」による動電式と圧電式の２つの区分がある。本マニュアルでは、地震動観測や工業分野での振動計測での利用実績が豊富で信頼性も高く、長期実証実験などで現場への適用性、信頼性が確認された圧電式加速度型振動計（MEMS 加速度センサー含む）」あるいは「動電式速度型振動計」を対象とする。

② A/D 変換機能

振動計のデータは通常アナログ値であるため、解析処理のためのデジタル値に変換する A/D 変換機能を有する必要がある。A/D 変換は落石等の衝撃による比較的高い周波数の振動を的確に捉え、抽出するためのサンプリング速度や分解能が求められる。本マニュア

ルでは、検証実験結果を踏まえ、サンプリング周波数は 500Hz 以上、A/D 分解能は 10 ビット以上のものを利用する。

③ 演算処理機能

解析機器には落石・小崩落時の仮設防護柵特有の卓越周波数帯域（200～500Hz）の振動データを確実に抽出するためのデジタルフィルター（ハイパスフィルター、ローパスフィルター、など）が必要である。また、得られた振動データに対する落石崩落検知の判定やノイズデータとの切り分けのため、振幅レベルや振動継続時間（あるいは振幅レベル超過回数）の設定機能を有する機器を使用する。

④ 通信・ネットワーク機能

落石・崩落として検出された検知情報を遠隔地に通信する機能は、ネットワーク上でのデータ利用が現在一般的になっていることから、LAN に対応した通信規格（Ethernet、TCP/IP プロトコル）に準じた通信機能を有する必要がある。

一方、仮設防護柵が設置される区域は工事車両が頻繁に出入りすることから、車両による切断などを考えるとケーブル敷設はなるべく避けたい。したがって、仮設防護柵のセンサー取り付け位置から解析機器やネットワーク機器までの通信は無線とすることが望ましい。

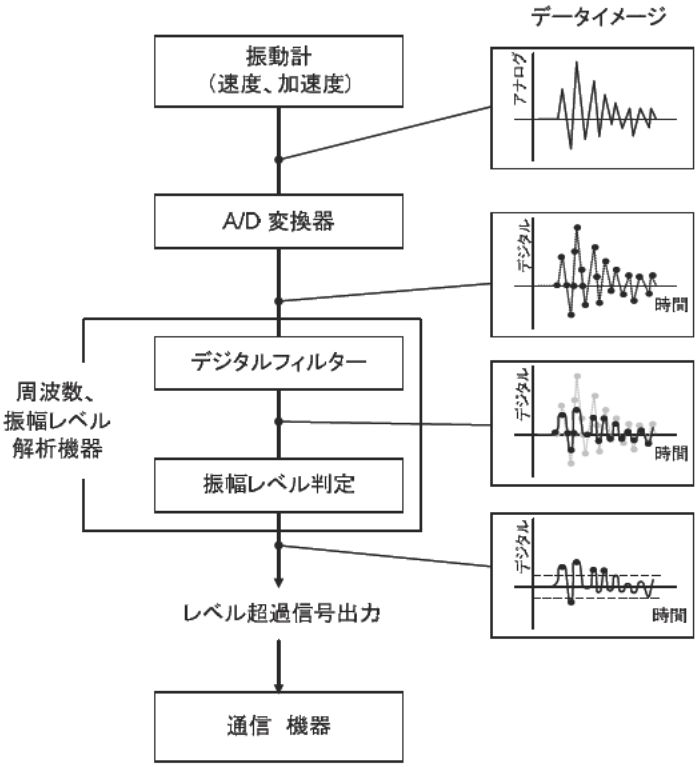


図 3.1　振動計測による崩壊検知システムの基本機構

3.2 導入目的とシステム要件

崩落検知システムは、仮設防護柵設置箇所での安全管理上の導入目的に応じて、システム要件を満たすものを導入するものとする。

＜解説＞

崩落検知システムは、落石・崩落の危険性の高い場所に設置された仮設防護柵を利用して、落石・崩落発生を早期に検知し、道路利用者、道路管理者および工事関係者に伝えることがシステム導入上での第一義的な目的といえる。

一方で、仮設防護柵への落石や崩落の規模や位置を検出することも、安全管理や具体的な崩落対策立案のために重要といえる。

この２つの導入目的について、まず前者の「早期検知」という目的達成のためのシステム要件としては、前項で述べた 4 つの基本機構・機能を全て有する必要がある。

後者の「崩落の規模・位置の検出」という目的達成のためのシステム要件としては、崩落の規模・位置の推定に必要なデータ容量の大きい波形データを収録可能な「メモリー機能」と、波形データ処理や規模・位置の計算、複雑な判定処理を行うための「高度な演算処理機能」を加えることが必要である。

3.3 システムの種類

崩落検知システムには、大きく「落石・崩落の発生のみを検知する」ものと、「落石・崩落の発生に加えて、その規模や位置を推定する」ものがある。目的に応じて適切なシステムを採用する。

＜解説＞

本マニュアルでは、3.2 に示した導入目的に合致した以下の２種類の崩落検知システムを提示する。

① 仮設防護柵への落石・崩落の発生のみを検知するシステム（以下、「システムⅠ」と呼ぶ）
② 落石・崩落の検知に加えて仮設防護柵への落石・崩落の規模や位置を推定するシステム（以下、「システムⅡ」と呼ぶ）

表3.1は、2種類のシステムの概要（仕様内容の比較）である。以下、2種類の崩落検知システムについて紹介する。

表3.1　導入目的に応じた崩落検知システムの概要

システム種類	システムⅠ	システムⅡ
導入目的（区分）	仮設防護柵への落石・崩落の発生のみを検知	落石・崩落の発生検知に加えて落石・崩落の規模を推定
測定機能（採用振動計）	圧電式加速度型振動計（MEMS加速度センサー（半導体ピエゾ方式））	動電型速度型振動計（MC 型小型地震計）
A/D 変換機能	サンプリング500Hz、処理分解能10bit	サンプリング 1kHz、処理分解能16bit
メモリー機能	なし	100GB（波形連続記録で約 200 日分収録可能）
演算処理機能		
・デジタルフィルタ	ハイパス、ローパス	ハイパス、ローパス
・振幅レベル設定	設定可能（4Gまで、0.05G刻み）	任意レベル設定可能
・振動継続時間設定	振幅レベル超過回数で設定	任意時間設定可能
・波形モニター機能	なし	あり
・波形区分機能	なし	工事振動、自動車などの区分可能
・科学技術計算機能	なし	振動エネルギー、検知位置、落石質量計算
・処理結果表示機能	イベント数の経時変化グラフ（別途ネットワークを通じた処理アプリケーションによる）	イベント数、エネルギー時間変化、最大振幅(質量)の時間変化、検知位置の平面分布と時間変化などのグラフ表示
・セルフチェック機能	センサーのバッテリ寿命や通信リンク切れの場合にメールを送信する	観測部/送信部と記録部/処理部の状態を 1 日 1 回以上セルフチェックし、異常の有無をメール送信する
通信・ネットワーク機能		
・エリア内通信機能	センサー～ネットワーク機器までの通信は特定小電力無線採用（通信距離、最大200m（見通し）	センサー～ネットワーク機器までの通信は、Bluetooth 採用（通信距離：見通し約 300m）
・ネットワーク機能	Ethernet、TCP/IPプロトコル（検知センサ情報のEメール機能）	Ethernet、TCP/IP プロトコル
警報出力機能	あり（ブザー、ネットワークへメール送信、監視カメラ起動などのための接点出力）	なし

システムⅠ：仮設防護柵への落石・崩落の発生のみを検知する崩落検知システム

本システムは、加速度型振動計（加速度センサー）を使った仮設防護柵への落石・崩落の発生のみを検知する崩落検知システムである。

(1) 主な使用機器

表3.2にシステムの仕様を示す。本システムの使用機器は、図3.2に示すように検知ユニット、中継ユニットおよびメインユニットの3つのユニットからなる。以下、3つのユニットについて説明する。

① 検知ユニット

- 振動測定（加速度)、A/D 変換、フィルタリング、振幅レベル判定、検知情報の通信といった、崩落検知に最低限必要な機能が全て盛り込まれている。
- 仮設防護柵の H 形鋼に直接取り付けることで、落石・小崩落による振動を選択的に検知し、無線通信（特定小電力無線）によって中継ユニットに伝送する。
- 4 段階の振動レベルを設定することができる。

② 中継ユニット

- 検知ユニットの検知情報をメインユニットに無線通信（特定小電力無線）により伝送する機器である。
- 合計 10 台の検知ユニットからの検知情報を伝送することが可能である。
- 同一箇所の崩落に対して反応した複数の検知ユニットからの検知情報が同時にメインユニットに伝送されないよう、通信プログラムに組み込まれた不感知時間（10 秒間）の設定により検知情報の伝送を制御する。

③ メインユニット

- ネットワーク通信機能を有し、中継ユニットからの検知情報をインターネット伝送用にプロトコル変換し、E メール形式で送信する機器である。
- 警報出力機能として、ブザーの他、接点出力機能（1 接点）を有し、監視カメラやその他の警報装置の起動制御が可能である。
- 検知ユニットに予め設定した 4 段階の振幅レベルをメインユニットからの遠隔設定で変更できる。

表 3.2　システムⅠの仕様

■共通	
電波方式	特定小電力無線　ARIB-T67準拠
無線周波数	429.25MHz～429.7375MHz、12.5KHz間隔、40chの中から10ch使用
送信電力	10mW
送信距離	100m（環境条件による）
	※検知ユニット～中継ユニット間100m、中継ユニット～メインユニット間100m
検知ユニット最大数	10台（中継ユニット当たり）
■ 検知ユニット	
電源制御	微振動センサー（ボール接点式、30gal以上で感知）
加速度センサータイプ	半導体ピエゾ抵抗型、3軸
A/D変換	サンプリング500Hz、分解能10bit
フィルタリング	デジタルフィルター（ハイパスフィルター、ローパスフィルター）
振幅レベル設定	4段階、設定下限値0.05G、設定上限値4G　※メインユニットからの変更可能
電　源	アルカリ単三電池3本
動作時間	約1年（使用条件による）
動作温度	-10～60℃　（結露なきこと）
材質、保護等級	ポリカーボネート、IP54準拠
寸　法	60（W）×120（H）×40（D）mm　（突起物含まず）
■ 中継ユニット	
通信制御	不感知時間（10秒）による受信待機機能
電　源	アルカリ単一電池2本
動作時間	約1年（使用条件による）
動作温度	-10～60℃　（結露なきこと）
材質、保護等級	ポリカーボネート、IP54準拠
寸　法	80（W）×160（H）×56（D）mm　（突起物含まず）
■ メインユニット	
ネットワーク機能	10BASE-T／100BASE-TX、RJ45コネクタ
警報機能	圧電ブザー
接点出力機能	無電圧タイプ、1接点、接点容量DC30V2A以下
電　源	DC6V（専用ACアダプタ）
バックアップ電源	3.6Vニッケル水素電池パック1本（動作時間：1時間程度）
動作温度	-10～60℃　（結露なきこと）
材質、保護等級	ポリカーボネート、IP54準拠
寸　法	135（W）×200（H）×50（D）mm　（突起物含まず）

左より、検知ユニット、中継ユニット、メインユニット

図 3.2　システムⅠの使用機器

(2) システム構成

図3.3にシステムの配置イメージ、図3.4にシステムのブロック図を示す。図に示すとおり、本システム構成は検知ユニット、中継ユニットおよびメインユニットの３ユニットの他、ネットワーク回線接続用ルーター、無停電電源装置（UPS)、データ集計用アプリケーション用のデータセンター（Webシステム）からなる。

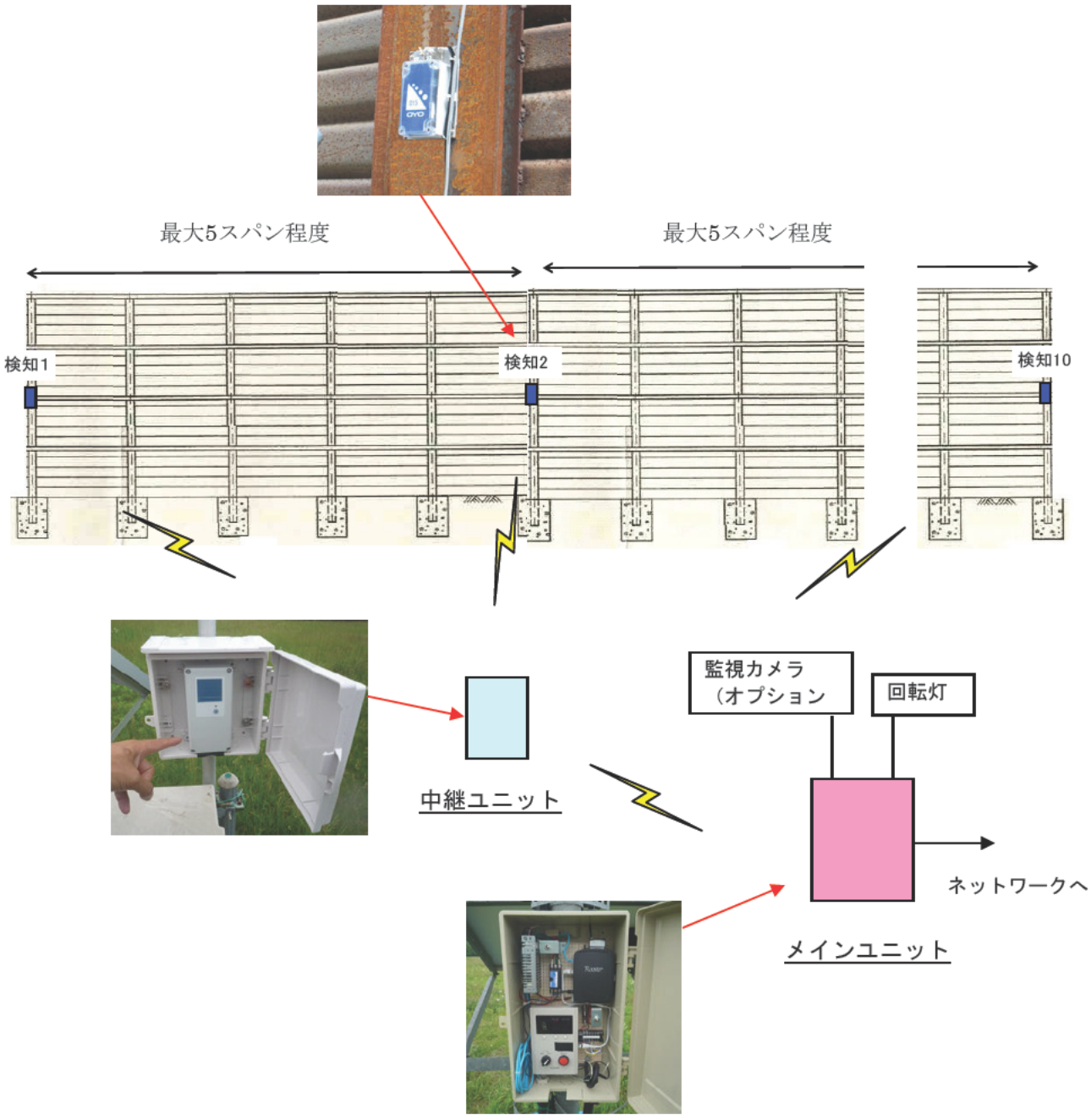


図 3.3　システムＩの配置例

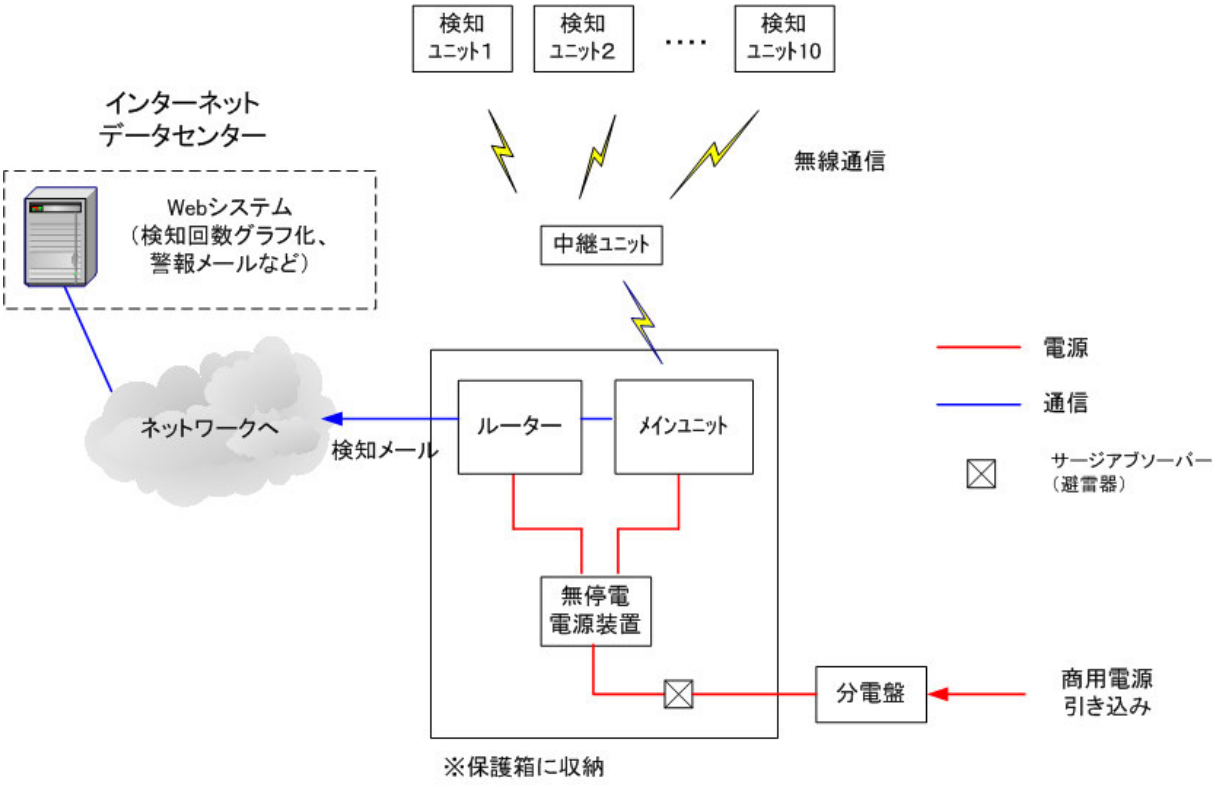


図 3.4　システム I のブロック図

(3) 検知フローとアウトプット

図3.5にシステムⅠの検知フローを示す。以下、検知の流れについて説明する。

- 図に示すように検知ユニットは、微振動センサー（ボール接点方式、3 軸）と加速度センサー（MEMS 半導体ピエゾ抵抗、3 軸）を用いた 2 段階の検知方式を採用している。この微振動センサー方式を採用した理由は、微振動センサーによる ON/OFF の制御によって加速度センサーの消費電力を抑えるためである。
- 微振動センサーにより 30gal 以上の振動が検知された場合、加速度センサーは測定を開始する。加速度センサーによって測定された振動データは、デジタルフィルター（ハイパスフィルターとローパスフィルターの組み合わせ）により、防護柵の振動特性を踏まえて予め設定した周波数帯域（200～500Hz）によりフィルタリングされる。
- フィルターを通過した特定周波数の波形データを落石判別レベルである振幅レベル値（3 軸の合計値）とレベル超過回数とを比較し、振幅レベル値およびレベル超過回数が設定値を超過した場合に「崩落検知」として検出する。
- 検知ユニットの検知情報は、中継ユニットを介して、メインユニットに伝えられる。ここで、直後の 2 台目以降の検知ユニットからの検知情報は中継ユニット側で受信を拒否し、不感知時間 10 秒間は受信待機する。このようにして、複数の検知センサーによる同一崩落の検知を防いでいる。言い換えれば、10 秒毎の検知＝崩落イベントとして扱う。

図3.6に検知データの取りまとめ例を示す。崩落検知システムから送信された検知情報（Eメール）は応用地質㈱が運営するモニタリングデータ処理の汎用Webシステム上で収集され、時間当たりの検知回数、累積検知回数のグラフや一覧表として図化される。また、同Webシステム上では、任意単位時間当たりの検知回数のしきい値設定に応じた警報メール送信も可能である。

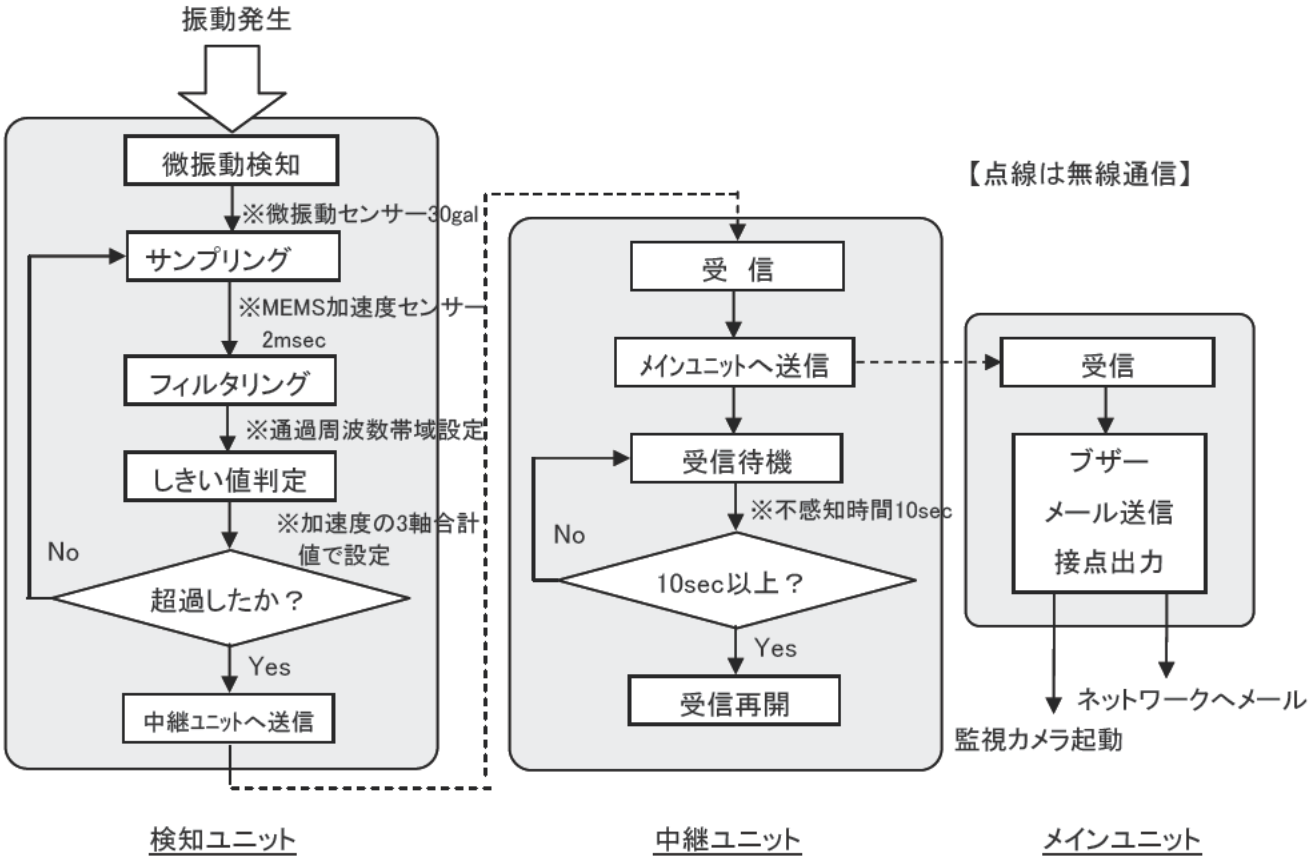


図 3.5　システムⅠの検知フロー

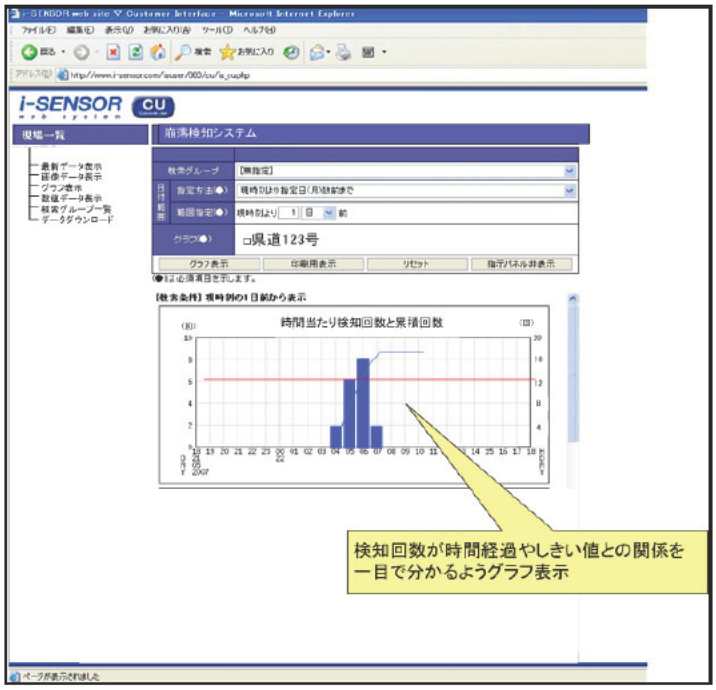


図 3.6　システムⅠのアウトプット例
（検知回数の Web 表示例）

システムⅡ：検知に加えて仮設防護柵への落石・崩落の規模や位置を推定するシステム

本システムは、速度計（地震計）を使った仮設防護柵への落石・崩落の規模や位置の推定も可能な崩落検知システムである。

① 使用機器

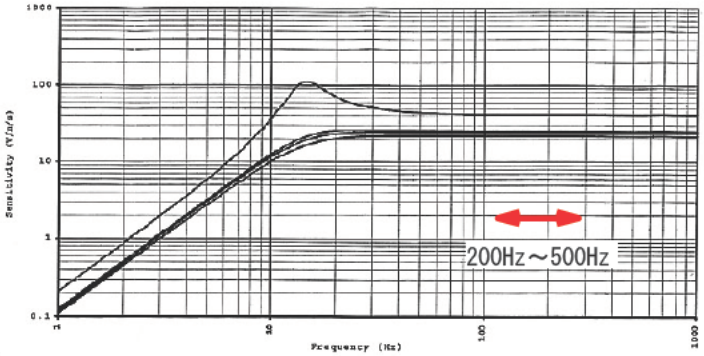
システムⅡは、仮設防護柵へ衝突する落石の検知数を計測すると共に、落石や崩落の規模を推定できる機能を有しているシステムである。

表3.3は、落石・崩落の規模を推定するシステムⅡの仕様である。

図3.7～図3.9は、それぞれ振動センサーの外観図及び周波数特性、各システムの外観図及び構成ブロック図である。

表 3.3 システムⅡの仕様

種 類	数 量	製 品 仕 様	
振動センサー	1成分3個	形 式	MC型小型地震計（速度計：水平動のみ）
		固有周波数	14Hz（28Hz可）
観測部/送信部	3成分1台	周 波 数	200Hz～500Hz
		増 幅 度	1倍，2倍，・・・，100倍（プログラムにより可変）
		サンプリング	1kHz（1msec）
		分 解 能	16Bit以上
		通信方式	Bluetooth（通信距離：見通約300m）
		記録方式	波形の連続送出方式（トリガー無し）
記 録 部	1台	装置形式	WindowsXp/7 パソコン
		通信方式	Bluetooth（通信距離：見通約300m）
		観測方式	連続記録方式（100GByteで約200日）
処 理 部 （記録部と兼用）	1台	モニター機能	波形を常時表示することによる監視
		トリガー機能	ソフトウエアトリガー方式（不感時間帯の除去）
		ノイズ除去機能	卓越周波数 ：200Hz(変更可)以下はノイズ 振動継続時間：0.1S(変更可)以下は空電ノイズ
		波形区分機能	落石、自動車、発破(段発)、工事など
		波形処理機能	疑似エネルギー、検知位置計算、落石質量計算
		処理結果 表示機能	1時間別(変更可)検知頻度グラフ 1時間別(変更可)疑似エネルギー時間変化グラフ 1時間別(変更可)最大振幅(質量)の時間変化グラフ 検知位置の平面分布と時間変化グラフ
		通信機能	TCP/IP通信により波形と処理結果等を遠隔地に送出



固有周波数 14Hz の速度型地震計　　同左の周波数特性(200Hz～500Hz のみ使用)

図 3.7 振動センサーと周波数特性

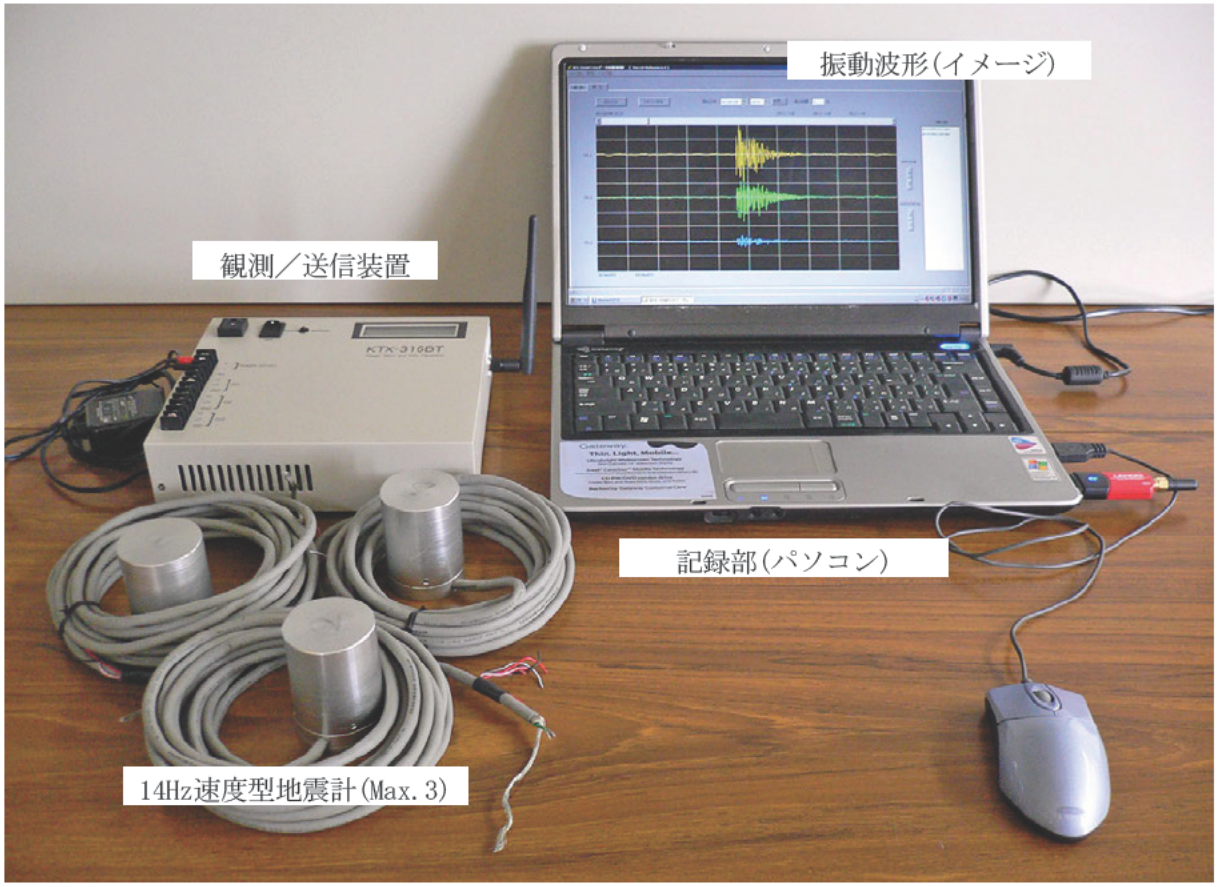


図 3.8 観測部／送信部(左)と記録部／処理部用ノートパソコン(右)

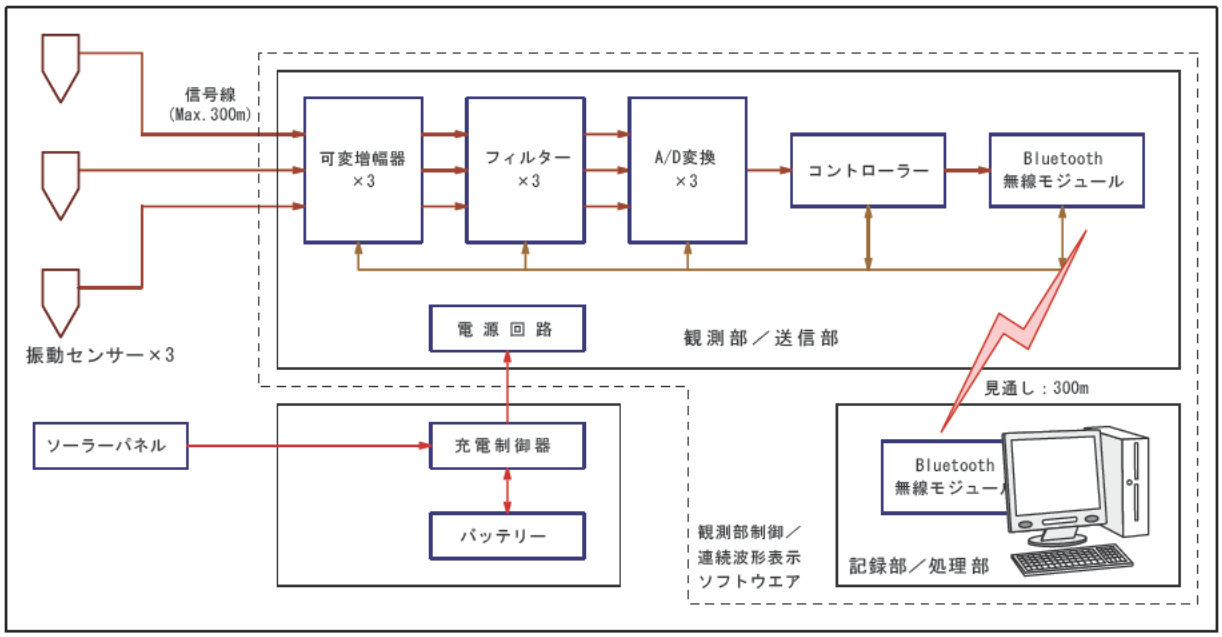


図 3.9 システムⅡの構成ブロック図

(2)　システム構成

①　振動センサー(図3.7 参照)

・固有周波数 14Hz の小型地震計(水平動)を使用する。

・屋外に設置することから、防水ケースに格納されているものを使用する。

・落石や崩落の位置を推定するためには最低 3 個設置する必要があるが、発生数(検知数)のみ必要とする場合は、最低 1 個設置すればよい。

・振動センサーの質量が 300 グラムあるので、落下防止のため仮設防護柵の H 形鋼には、振動センサーを設置するためのビス穴を備えているものが望ましい。

・鋼製横矢板における基礎実験の結果から、位置を精度よく検知するためには振動センサーを 3 スパン（6m）～4 スパン（8m）程度の間隔で設置することが望ましい。

② 観測部／送信部(図3.8 参照)

・最大 3 個の振動センサー(小型地震計)をメタルケーブルで接続する。

・増幅度は、プログラムによって最低 1 倍から最大 100 倍まで 7 段階に変更できるので、実際に使用する場所の暗振動（グランドノイズ）やノイズレベルを勘案して、最も適切な増幅度に設定すること。

・周波数特性は 200Hz～500Hz に設定する。

・波形をデジタル化する分解能は 16bit、サンプリング周波数は 1kHz である。

・落石や崩壊が急激に増加した場合でも、全ての振動を検知できるように不感時間を無

くした設計が望ましいので、一定期間の振動波形を連続して観測／送信できる機能を有している。

・最大 3 個の振動センサーからの振動波形信号 Bluetooth 無線で記録部／処理部へ送信できる機能を有しており、通信距離は、見通しで最大約 300m 程度である。

③　記録部／処理部(図3.8 参照)

・原則，O.S.が WindowsXp あるいは Windows7 のパソコンとする。

・観測部／送信部から伝送されてくる波形信号を、一定期間連続的に保存できるプログラムを内蔵している。

・プログラムにより、保存した波形に対してほぼリアルタイムで、落石・崩落の検知頻度、規模や検知した位置の推定・表示が可能である。

・処理結果をインターネットあるいはイントラネットで、遠隔地へ通信することが可能である。

④　ソフトウエア群

・図3.10 は、システムⅡで使用する3つのソフトウエアの名称と各機能である。

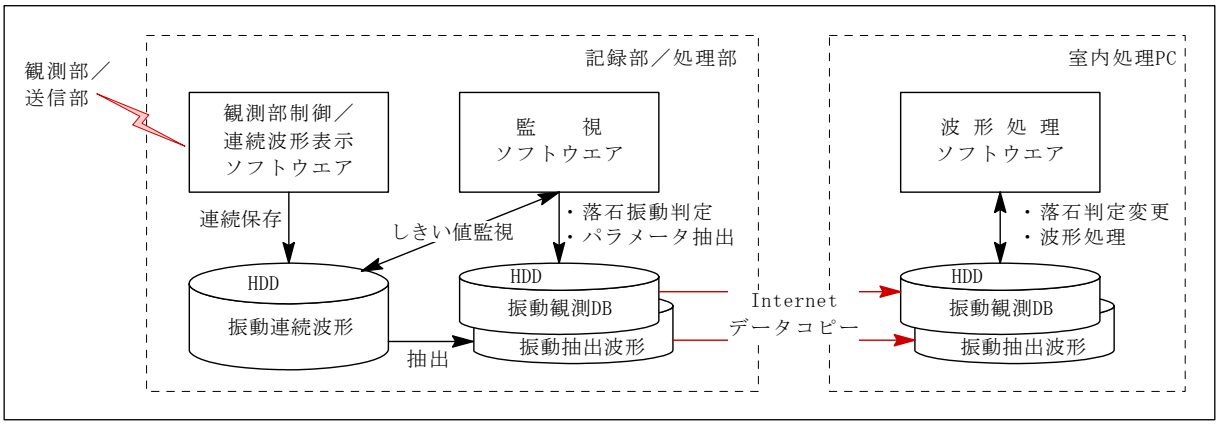


図 3.10 システムⅡで使用する 3 種類のソフトウエア

(a) 観測部制御／連続波形表示ソフトウエア

・「記録部／処理部」で常時起動しているプログラムであって、「観測部／送信部」を制御することと波形を連続して表示することが可能である。

・振動波形データは、連続する 1 分間のデータファイルとして保存される。

・波形記録は連続記録である。すなわち、「記録開始」ボタンが押された後は、「記録停止」ボタンが押されるか、ハードディスクが一杯になるまで波形記録を取り続ける。

(b) 監視ソフトウエア

・「記録部／処理部」で常時起動しているプログラムであって、振動の検知(トリガー

機能)、振動波形の抽出、波形種別の判定及び波形パラメータの抽出を行う。

・ここで言う波形パラメータとは、波形の最大振幅、継続時間、卓越周波数のことである。

・本ソフトウエアの詳細は、「(3)落石検知フロー」で詳しく説明する。

(c) 波形処理ソフトウエア

・室内の PC にインストールして起動させるソフトウエアであって、振動波形の再生や落石頻度のグラフ化などの機能がある。

(3) 落石検知フロー(監視ソフトウエアの機能)

本システムの波形記録は、原則として連続記録方式であって、落石の検知と波形の種別判定などは、「記録部／処理部」のパソコンに常駐し、常に起動している専用の「監視ソフトウエア」が担当する。 以下は、その原理や機能である。

① 落石検知機構の原理

・図3.11 は、振動波形を常時監視するソフトウエアの仕組みを模式化したものである。

・以下の②に示す原理により、波形が保存された 1 分間のファイルを監視し、あらかじめ設定したしきい値(レベル)を超えた振動を検知すると、波形の切出し保存，波形処理と各種処理を行って、次の波形振幅を監視する状態に戻る。

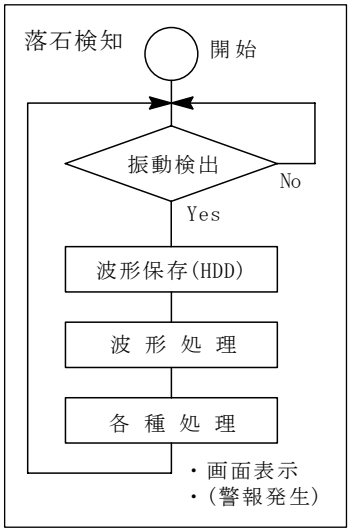


図 3.11 監視ソフトの仕組み

② 落石検知(波形処理)の原理

・監視ソフトは、新規に保存された振動波形ファイル(1 分間)が保存されると直ちにデータを読み出し、図 3.12 のようにあらかじめ設定したしきい値との比較を行う(最大 1 分間の時間遅れあり)。

・「＋しきい値」あるいは「－しきい値」を超えた場合は、その時点から「-1 秒」～「+3 秒」の波形データ(4 秒間)を切り出して別途保存すると共に、波形種別の判定と波形パラメータの抽出処理を行う。
・この 4 秒間が、2 つの 1 分間データファイルにまたがっている場合も対処する。
・抽出処理などが終了した場合、前記の「+3 秒」の時点から、しきい値との比較処理を再開する。

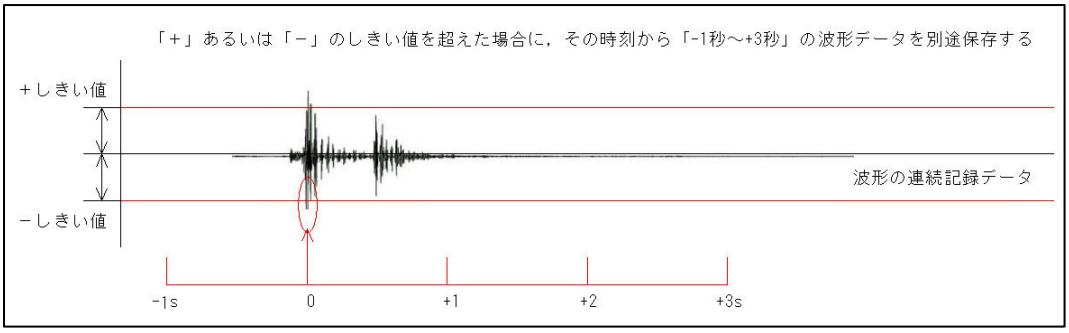


図 3.12 落石検知の原理(イメージ)

③ 落石振動の判定

・前記の処理でしきい値を超えた波形は、必ずしも落石振動ではない可能性があるので、図3.13 の処理手順に従って波形の種別を判定する。この波形処理手順は、共同研究時の基礎実験結果（相模原および足尾）から得られた成果である。
・以下の条件を同時にクリアしている場合に落石振動と判定し、「振動観測データベース(後述)」に登録する。

A：卓越周波数が 200Hz～500Hz の場合

B：振動継続時間が 0.1 秒より長い場合

・「振動観測データベース」は、検出した振動の種類、最大振幅や周波数などを記録するファイルであって、リアルタイムグラフ化処理や、室内でのデータ処理の際に使用するためのものである。表3.4 に、振動観測データベースのイメージを示す。

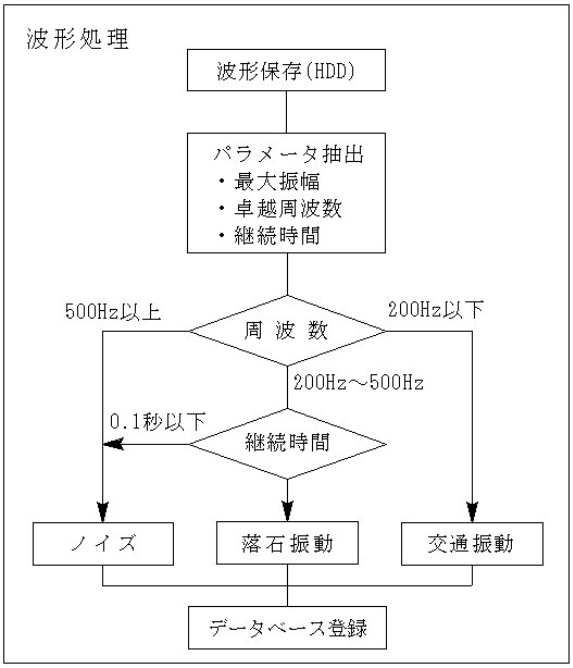


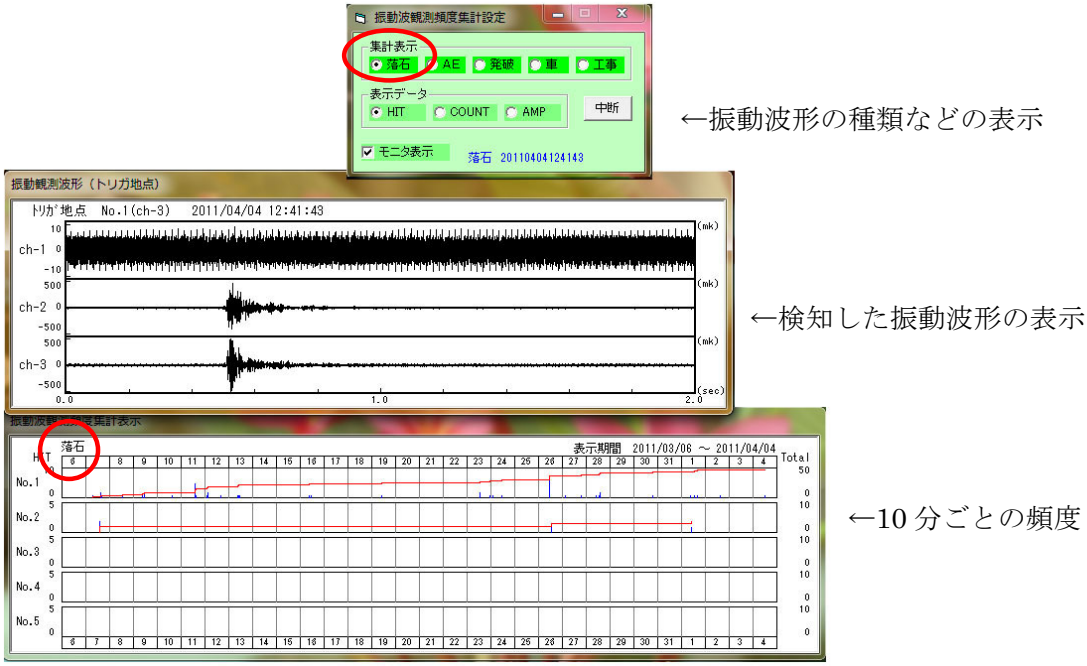
図 3.13 落石振動を判定するための手順

表 3.4　振動観測データベース(イメージ)

種類	日時	ﾄﾘｶﾞCH	ｶｳﾝﾄ	開始T	終了T	周波数	最大CH	最大値	ch1	ch2	ch3	ch4
落石	2011/3/1 8:35	3	113	0.503	0.903	190	3	1313.9	6.6	686.3	1313.9	298.3
落石	2011/3/2 8:57	4	13	0.502	0.569	251	4	488.8	4.2	14.3	13.7	488.8
落石	2011/3/2 9:51	2	90	0.511	0.884	210	2	246.2	7.0	246.2	117.7	38.3
落石	2011/3/2 12:53	4	10	0.510	0.529	550	4	355.7	3.7	8.0	12.4	355.7
落石	2011/3/3 4:47	2	0	0.414	4.088	251	2	128.3	6.1	128.3	37.6	18.0
落石	2011/3/3 5:00	3	470	0.508	4.075	251	3	161.8	6.0	23.9	161.8	4.4
落石	2011/3/3 7:16	2	0	0.508	0.670	251	2	93.8	5.8	93.8	23.8	4.5
落石	2011/3/3 10:49	3	0	0.417	4.083	251	4	34.9	5.8	20.1	19.3	34.9
ﾉｲｽﾞ	2011/3/3 15:44	3	0	0.414	4.092	251	3	20.7	5.7	17.0	20.7	4.4
落石	2011/3/3 20:40	2	0	0.503	3.903	251	2	78.9	6.1	78.9	24.2	8.8
落石	2011/3/3 22:23	3	0	0.487	4.082	251	3	129.2	6.2	24.4	129.2	4.9
落石	2011/3/3 22:36	2	0	0.498	1.163	251	2	80.5	6.0	80.5	36.4	4.7
落石	2011/3/4 0:58	2	365	0.511	2.501	293	2	688.1	7.1	688.1	482.4	40.1
ﾉｲｽﾞ	2011/3/5 19:10	2	0	0.413	4.092	251	3	24.0	7.1	21.3	24.0	5.4

④ 各種処理（モニタリング）

・崩落検知は「記録部／処理部」で専用の「(b)監視ソフトウエア」によって行うが、本ソフトウエアは検知した結果をリアルタイムで表示すること、すなわち波形の種類、振動波形および10分間ごとの検知頻度を表示することが可能である。図3.14は、そのイメージである。



図中の丸は、検知した振動波形の種類を自動判別した結果である

図 3.14 落石振動のリアルタイム監視(イメージ)

・本ソフトウエアは，「② 落石検知の原理」で抽出した全長 4 秒間の波形記録に対して「③ 落石振動の判定」を行い、その結果を以下のようにリアルタイムで表示する。

A：判定結果と波形は、波形の種類にかかわらず全て表示

B：集計結果は、あらかじめ選択した種類について表示(例、落石ならその頻度)

・本システムを一旦停止して再起動させた場合，振動観測データベースに保存されているデータから一ヶ月前に遡って表示する。

4. システムの設計

4.1 システム設計フロー

崩落検知システムの設計は、「導入時の検討」と「システムの設計」から構成される。

＜解説＞

崩落検知システムの導入目的は、本マニュアルの「2.1 現場条件」や「3.2 導入目的」に示すように、地すべりや岩盤崩壊など移動体本体の大規模な斜面変動の発生に先行し、あるいはそれに伴って移動体の周縁部や末端部で発生する小規模な崩壊や落石の発生を仮設防護柵に設置した崩落検知システムで検知し、その結果を速やかに道路管理者や工事関係者に伝達することである。上記の目的を達成するためには、「導入時の検討」と「システムの設計」を確実に実施する必要がある。

図4.1は、検知システム設計の全体フローである。

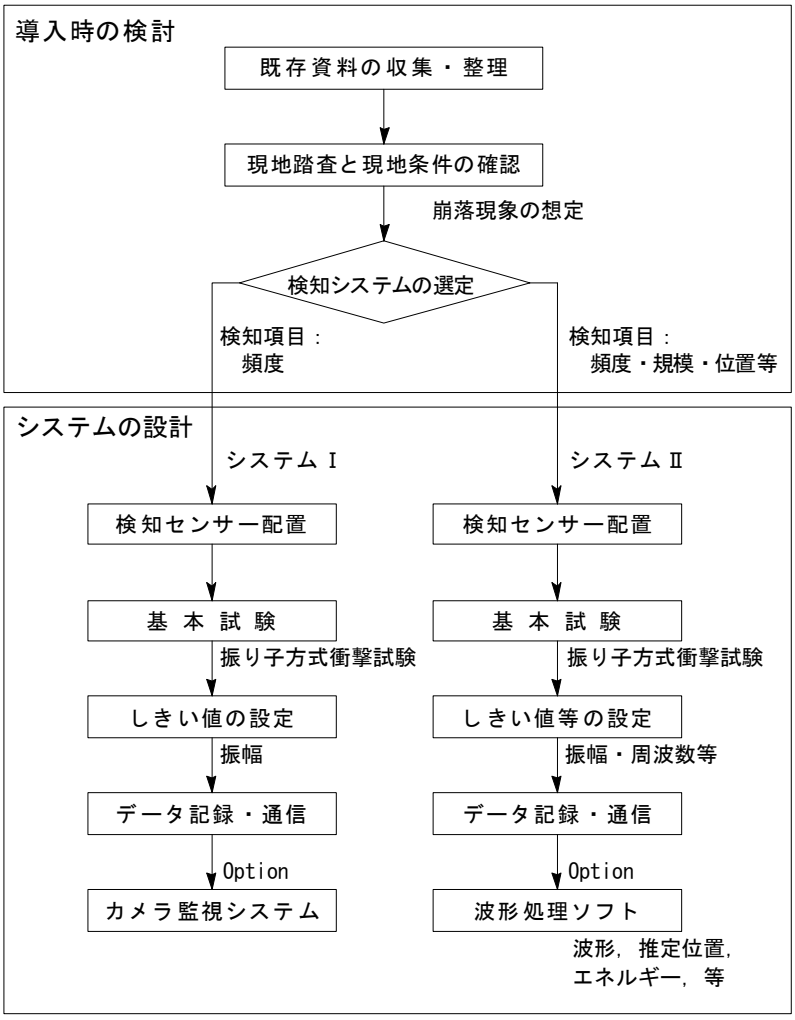


図4.1 検知システム設計の全体フロー

本マニュアルで記載する崩落検知システムには以下の 2 種類があり、それぞれの特徴については本マニュアル「3.3　システムの種類」を参照されたい。

①システムⅠ：仮設防護柵への落石・崩落の発生のみ（頻度）を検知するシステム

②システムⅡ：落石・崩落の検知に加えて仮設防護柵への落石・崩落の規模や位置を推定するシステム

4.2 導入時の検討

導入時の検討においては、「既存資料の収集・整理」と「現地踏査と現地条件の確認」を行った上で、システム採用の可否を判断し、採用するにあたり必要な条件がある場合にはその対策を講じる。

4.2.1 既存資料の収集・整理

崩落検知システムの設計、設置と管理運営を行う際に必要となる既存資料を収集・整理し、予め問題点などを抽出する。

＜解説＞

以下の各資料を収集・整理し、崩落検知システムの設計、設置と管理運営時に想定される問題点などを抽出し、予め対策を講じる必要がある。

- 道路新設時の地質調査報告書*
- 道路新設時の工事完成図書あるいは工事記録*
- 地すべりや岩盤崩壊などの災害調査報告書*
- 仮設防護柵設計書および工事完成図書あるいは工事記録*
- 現地にネットワーク環境が整備されている場合はその仕様*
- 公刊されている地質図や気象観測結果などの文献類

注）＊印の資料は、現地踏査時に入手しても良い。

4.2.2 現地踏査による諸条件の確認

現地踏査では、崩落現象の想定ならびに崩落検知システムを設計・設置・維持管理するために必要な諸条件について検討・確認する。

＜解説＞

現地踏査による諸条件の確認において、調査・検討すべき主な項目を以下に示す。

- 小規模な崩壊や落石の発生箇所と崩落現象の想定
- 崩落検知システムの設置可能場所の確認
- 自動車の交通量と種類や道路面状況の確認
- 復旧や道路工事等による影響の確認
- 監視カメラの設置位置と監視範囲の確認（オプション）

(1) 小規模な崩壊や落石の発生箇所と崩落現象の想定

図4.2は、崩落検知システムが対象とする小規模な崩壊や落石の発生状況と、検知センサーの設置位置（イメージ）である。

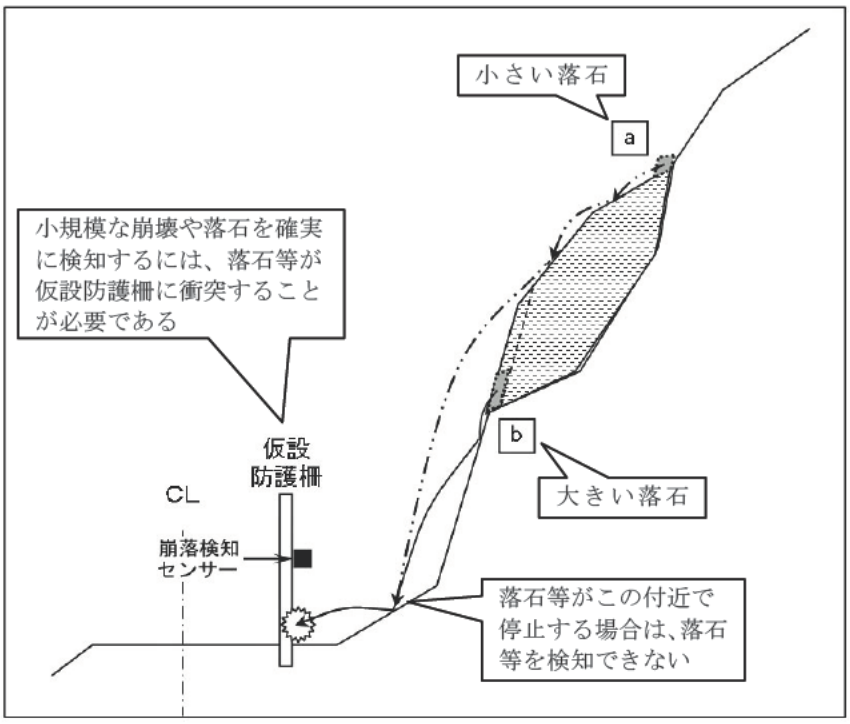


図 4.2 崩落現象の想定と検知センサーの位置（イメージ：2.1 章参照）

- 崩落検知システムで検知できる事象は、仮設防護柵に衝突する落石等の衝撃振動であるが、検知システムの仕様に定められている一定レベルよりも大きな振幅が必要であ

る。

- 図4.2中の「a」のように、仮に小さな落石であっても落下高が大きい場合には、衝突速度が速くなり衝撃力は大きくなるため発生振動の振幅は大きくなって、崩落検知システムで十分検知が可能となる。
- 一方、同図中の「b」のように、仮に大きな落石であっても落下高が小さい場合には逆に衝撃力は小さくなって、崩落検知システムで検知不可能な小さな振動しか発生しない場合もある。
- 小規模な崩壊や落石が発生しても、落下経路や斜面の抵抗や障害物などによって、仮設防護柵まで到達しない場合もある。
- 小規模な崩壊や落石が斜面のどの位置で発生し、どのような経路で落下するかは明確ではないが、崩落検知システムの設計・設置・管理運営にあたって重要な事項であるため、斜面の浮石や岩盤の亀裂などを観察し、上述したような各ケースについて崩落現象を想定してシステムの設置計画にあたることが必要である。

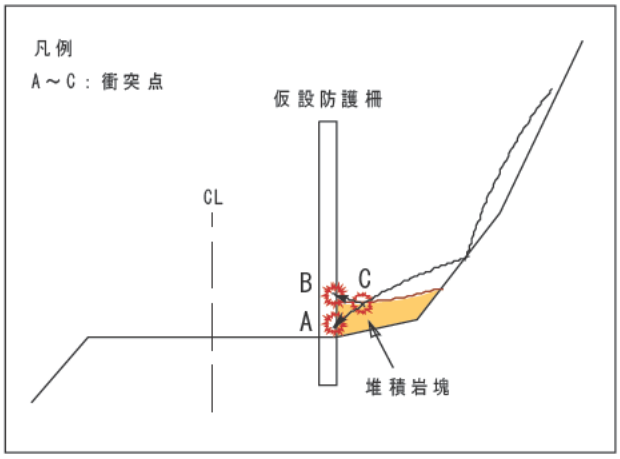


図 4.3 崩落現象による岩塊の堆積状況（イメージ）

- 図4.3は、長時間にわたって崩壊が続き、仮設防護柵の背後に岩塊が堆積したイメージである。このような崩壊現象が想定される場合には、検知センサーの設置場所を慎重に検討する。特に、図中の「C点」付近で落石が停止するようになると、仮設防護柵に設置した検知センサーの検出限界外となることも予想される。なお、システムⅡでは、検知センサーを岩盤あるいは堆積岩塊に設置することが可能である。

(2) 崩落検知システムの設置可能場所の確認

図4.4は、2種類の崩落検知システムの設置イメージである。これに基づき、崩落検知システムを設置できる場所を選定するために必要な調査や確認の内容を表4.1～表4.3にまとめた。

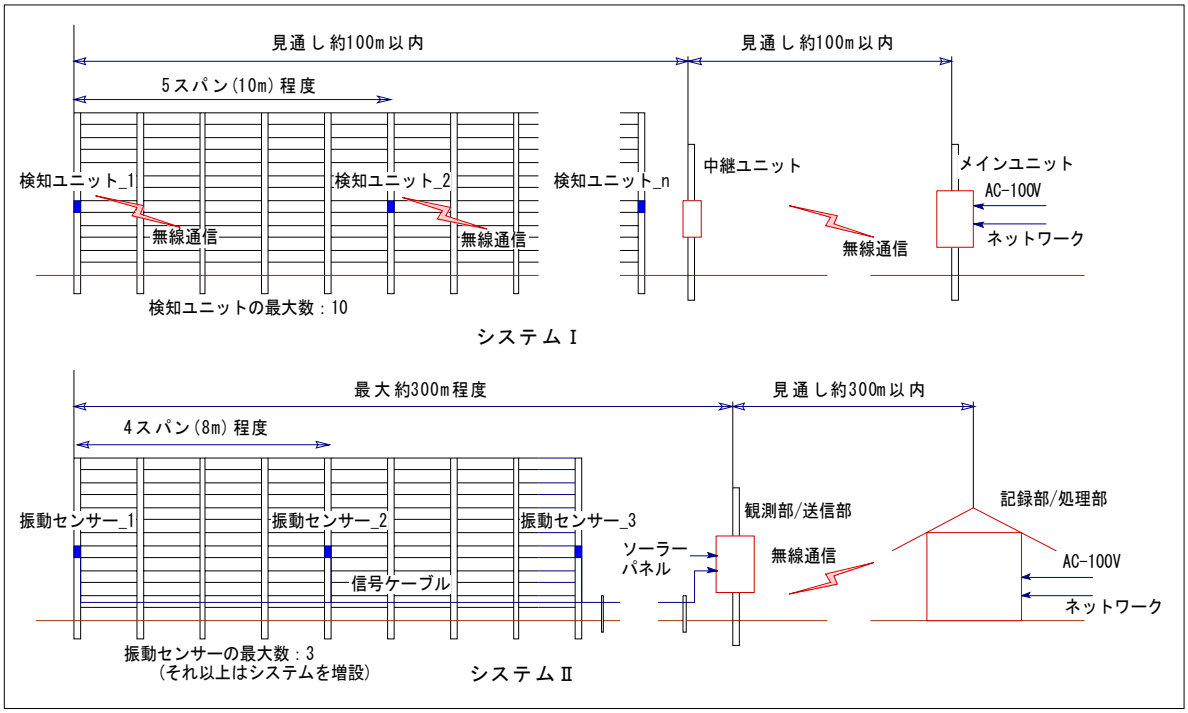


図 4.4 崩落検知システムの設置イメージ

① 崩落検知システムに共通する現地条件の確認

崩落検知システムの設置に際しての調査・確認内容および留意点を表 4.1 に示す。

表 4.1 崩落検知システムの設置可能場所の確認（両システム共通）

項　　目	調 査 ・ 確 認 内 容 や 留 意 点
仮設防護柵の仕様規格	H形鋼や鋼製横矢板の構造と設置位置など
斜面との距離	仮設防護柵と斜面との距離を、落石等の想定範囲との関係で調査
検知センサーの設置範囲	落石等の想定衝突範囲によって設置範囲を決定する
商用電源	電圧と変動の程度、電流、電源ノイズの状況
ネットワーク環境	ネットワークの種類、通信速度や通信プロトコル

a)仮設防護柵の仕様規格

崩落検知の対象である仮設防護柵が、本マニュアルに記載した仕様規格に合致しているかどうかを確認する。仕様規格が合致していない場合は、「4.3.2 基本試験」の実施結果によって、検知システムの設定パラメーターを適宜調整する必要がある。

b)斜面との距離

防護柵と斜面との距離については、落石等が防護柵に確実に衝突するかどうかに観点をおいて現地確認する。（距離が離れていて落石等が仮設防護柵に衝突しないと想定される場合には、本マニュアルに記載した標準的な検知センサーの設置方法では適切に観測を行うことはできない。）

c)検知センサーの設置範囲

落石等が仮設防護柵に最も衝突しやすいと想定される場所付近に検知センサーを設置するが、その想定が難しい場合には可能性のある場所を全てカバーするように検知センサーを設置すると良い。

d)電源

システムⅠではメインユニットが、システムⅡでは記録部/処理部が商用電源(AC-100V)を必要とする。電源電圧の変動とノイズの混入は、検知システムの誤作動や誤検知に繋がるため、可能な限り安定していることが望ましい。電源電圧の変動とノイズの混入を調査して、これらが発生している場合には安定化電源を使用するなどして万全な対策を取る。

e)ネットワーク環境

検知結果を速やかに道路管理者や工事関係者に伝達する手段であるため、有線あるいは無線のネットワーク環境が確保できるかを調査し、万一その環境が確保されない場合には、メインユニットあるいは記録部/処理部で目視による確認ができるような対策を取る(作業員や監視員による目視監視となる)。なお, ここでいうネットワークとは、インターネットまたはイントラネットのことであって、後者には道路管理者あるいは工事関係者の常設あるいは仮設ネットワークを含める。

② システムⅠに関する現地条件の確認

システムⅠの設置に際しての調査・確認内容および留意点を表4.2に示す。

表 4.2 崩落検知システムの設置可能場所の確認（システムⅠ）

システムⅠ	調 査 ・ 確 認 内 容 や 留 意 点
検知システムの設置位置	検知ユニット～中継ユニット間の距離（見通し約100m）
	中継ユニット～メインユニット間の距離（見通し約100m）
検知ユニットの必要個数	1ユニットあたり 5 スパンごとに設置するとしての必要個数。
検知ユニットの設置場所	設置するH形鋼の選定とその設置高さ（磁石止め）
中継ユニットの設置場所	保護箱等の設置場所
メインユニットの設置場所	保護箱や測定小屋等の設置場所
監視カメラの設置場所	オプションとして実施 種類、設置場所、撮影範囲（距離）、夜間照明、商用電源、映像の保存と配信

注）システムⅠでは、検知センサーのことを「検知ユニット」と称す

a)検知システムの設置位置

図4.4と表4.2に示したように、検知ユニット～中継ユニット間の信号伝達は無線を使用し、その距離は見通し約100mである。同様に、中継ユニット～メインユニット間の信号伝達も無線を使用し、その距離も見通しで約100mである。したがって，これらを満足

する位置に中継ユニットとメインユニットの設置場所を確認する必要がある。

b)検知ユニットの必要個数

検知ユニットを鋼製横矢板の間隔を概ね 5 スパン（10m）ごとに設置することを基本とした時の必要個数である。ただし、5 スパン間隔は条件が良い場合であるため、最終的には基本試験の結果によって決定する。

c)検知ユニットの設置場所

検知ユニットは H 形鋼に磁石で固定するため、その H 形鋼の選定と固定する高さを確認する。

d)中継ユニットの設置場所

前述の条件を満たし、かつメンテナンスの容易な場所に設置する。なお、ユニットは仮設電柱に開閉式プラボックスを取付けその中に格納する。

e)メインユニットの設置場所

中継ユニット設置場所の条件に同じ。

f)監視カメラの設置場所

落石・小崩落の確実な検知と誤検知防止のためにオプションとして導入する。以下に監視カメラの設置に関する現地確認事項を列記する。

- 種　類：現地の状況によって、動画か静止画かを選択する。
- 設置場所：どの検知ユニットの周辺を監視するか検討する。
- 撮影範囲（距離）：画素数と画角により、どの程度撮影可能かを現地確認する。
- 夜間照明：撮影範囲と距離により、夜間照明の必要性と光量等を検討する。
- 電源：夜間照明、監視カメラと映像を保存する装置などに必要な電力量を確保する。
- 映像の保存と配信：どの時点から映像を保存するか、どこに保存するか、またインターネットで同時配信するかなどについて検討する。

③ システムⅡに関する現地条件の確認

システムⅡの設置に際しての調査・確認内容および留意点を表4.3に示す。

表 4.3 崩落検知システムの設置可能場所の確認（システムⅡ）

システムⅡ	調 査 ・ 確 認 内 容 や 留 意 点
検知システムの設置位置	観測部/送信部～記録部/処理部間の距離（見通で約300m以内）
振動センサーの必要個数	1 個あたり 4 スパンごとに設置するとしての必要個数 ただし、検知位置を推定するためには 3 個必要
振動センサーの設置場所	設置する H 形鋼の特定とその設置高さ（ビス止め） 岩盤や堆積岩塊にも設置が可能
信号ケーブルの設置場所	振動センサー～観測部/送信部間に使用する信号ケーブルの位置
観測部/送信部の設置場所	保護箱や測定小屋等の設置場所
記録部/処理部の設置場所	測定小屋等の設置場所

注）システムⅡでは、検知センサーのことを「振動センサー」と称す

a)検知システムの設置位置

図4.4と表4.2に示したように、観測部/送信部～記録部/処理部間は無線を使用し、その距離は見通し300m以内である。したがって、これらを満足する位置に観測部/送信部と記録部/処理部の設置場所を確認する必要がある。

b)振動センサーの必要個数

振動センサーを鋼製横矢板の間隔を概ね 4 スパン（8m）ごとに設置することを基本とした時の必要個数であるが、1 システムあたり最大 3 個までである。ただし、4 スパン間隔は条件が良い場合であるため､最終的には基本試験の結果によって決定する。また、4 個以上の振動センサーが必要な場合は、検知システムⅡそのものを増設する必要がある。

c)振動センサーの設置場所

振動センサーは H 形鋼にビス留めをするため、固定作業が可能な H 形鋼の選定と固定する高さを確認する。システムⅡでは、岩盤や堆積岩塊にも設置可能である。岩盤と仮設防護柵の間隔が開いており､小さな岩塊が仮設防護柵に衝突しないと想定される場合では、岩盤などで振動センサーを設置可能な場所を確認する。

d)信号ケーブルの設置場所

図4.4に示したように､振動センサー～観測部/送信部間の信号伝達は信号（メタル）ケーブルを使用する。落石等を検知する期間は原則として固定となるため、仮設防護柵や道路脇に確実に固定すると共に、小動物などによる食害や天候障害等を避けうる場所を確認する。

e)観測部/送信部の設置場所

前述の条件を満たし、かつメンテナンスがし易い場所に設置する。なお、装置は仮設電柱に開閉式プラボックスを取付け、その中に格納する。

f)記録部/処理部の設置場所

本装置はパソコンを使用する。使用するパソコンが仮にノートパソコンであっても作業性の観点から、設置場所として最低でも 2m² 程度の金属製物置あるいはプレハブ小屋を設置できる面積を確保する。

(3) 自動車の交通量と種類や道路面状況の確認

自動車の走行に伴って地盤振動が発生するが、自動車の種類（ダンプカーなど）・重量とタイヤの性質、あるいは道路面の凹凸などによって振動の振幅、周波数や継続時間などが様々に変化する。

「4.3.3 しきい値の設定」に詳述するように、自動車の走行振動が大きい場合は、検知センサーの設置間隔（システムⅠの標準は 5 スパン、システムⅡは 4 スパン）を狭くする必要があり、結果的に検知センサーの個数を増やすことに繋がる。

両方のシステムを設置する際に、自動車の走行に関する調査・確認すべき内容および留意する点を以下にまとめる。

a)仮設防護柵の振動測定

振動計（加速度型振動計あるいは速度型振動計）を持参し、防護柵に設置して自動車走行振動を測定する。

b)自動車の走行速度等の測定と対策

一般的に走行速度が大きいほど発生する走行振動は大きくなる。小型車や中型車であっても走行速度によっては、しきい値の設定に影響を与える可能性があるため、振動測定時に併せて車種、走行速度と積み荷の状態なども確認する。しきい値や周波数帯に影響を与えるほどの走行振動が得られた場合には、管理者と協議を行い可能であれば速度規制を実施するなど必要な処置を講ずる。

c)道路面の状況確認と対策

一般的に、道路面に凹凸が存在すると大きな走行振動が発生する。走行振動の測定に併せて道路面の形状を確認し、両者の関係を明らかにする。しきい値や周波数帯に影響を与えるほどの走行振動が得られた場合には、道路面の補修などの処置を講ずる。

d)仮設防護柵の衝撃振動測定

仮設防護柵は道路脇に設置されていることが多いので、自動車の風圧によって防護柵(矢板)が自由振動する可能性がある。ハンマーなどで横矢板に衝撃を与えて自由振動の有無と落石振動への影響を確認する。

(4) 復旧や道路工事等による影響の確認

両方のシステムを設置する際に、復旧や道路工事等による影響に関する調査・確認内容および留意点を以下にまとめる。

a)復旧や道路工事の振動測定

復旧や道路工事が行われている場合には、振動計を持参し、仮設防護柵に設置して工事振動を測定し，しきい値や周波数帯への影響を確認する。また、付近で発破工が行われている場合、発破振動がしきい値や周波数帯に与える影響が懸念されるため、仮設防護柵で発破振動を測定しその影響を確認する。発破工が予定されている場合は、予定ルートや発破工法の種類名などの情報を入手し、しきい値や周波数帯に対する影響を推定する。

b)その他ノイズ等の確認

工場など、隣接地に大きな振動を発生している施設が無いかどうか確認の上、存在する場合には振動計（加速度型振動計あるいは速度型振動計）を仮設防護柵に設置してノイズを測定し、影響を確認する。

4.2.3 システムの選定

現地踏査と現地条件の確認結果を踏まえ、崩落検知システムの導入目的を達成できるよう「システムⅠ」「システムⅡ」のいずれかを選定する。

＜解説＞

現地踏査と現地条件の確認の後、表 4.4 に示す検討を行って、以下に示す「システムⅠ」、「システムⅡ」のどちらを使用するかを選定する。

① システムⅠ：仮設防護柵への落石・崩落の発生（頻度）を検知するシステム

② システムⅡ：発生頻度に加えて仮設防護柵への落石・崩落の規模や位置を推定するシステム

表 4.4 崩落検知システム選定のための主な検討項目

項　目	システムⅠ	システムⅡ
検知情報	イベント（検知時刻）	イベント（検知時刻）、振動波形、最大振幅，卓越周波数、継続時間
データ処理後情報	－	振動エネルギー（規模）、検知位置
検知センサー数	最大 10 箇所（検知ユニット）	最大 3 箇所（振動センサー）
センサーの設置	H 形鋼に磁石留め（取外し容易）	H 形鋼にビス留め
センサーケーブル	使用せず	使用する（取外し困難）
ノイズ	ノイズが多い場合は、監視カメラを使用して確認する必要有り	波形解析機能があるのでオプション機器を必要としない

a)検知情報

システムⅠは、仮設防護柵へ落石・小崩落が衝突したこと（発生頻度：イベント）を検知するシステムであるのに対し、システムⅡは発生頻度に加えて振動波形、最大振幅、卓越周波数および継続時間を知ることができる。更に、後者は、デジタルフィルターを通さない波形を記録／再生することが可能であるため、小岩塊が仮設防護柵へ単発的に衝突する現象と崩落土砂などが低速度で衝突する現象を分離することができる。

b)データ処理後情報

システムⅡのみに付加されている機能であって、振動のエネルギー（最大振幅値×振動継続時間）と、落石等が仮設防護柵へ衝突した位置を推定する機能がある。

c)検知センサー数と検知対象距離

システムあたりの検知センサー数は、システムⅠは 10 個、システムⅡは 3 個である。システムⅠは概ね横矢板間隔 5 スパン（10m）ごとにセンサーを設置できるため、

最長 90m（（10 個－1 個）×10m）の仮設防護柵を対象となる。一方、システムⅡは概ね 4 スパン（8m）ごとの設置であるため、最長 16m（（3 個－1 個）×8m）の仮設防護柵が対象となる。

d)センサーの設置

システムⅠの場合、検知ユニットを H 形鋼に磁石で留める構造のため取外しも極めて容易であり、仮設防護柵自体の工事の都合による一時撤去なども可能である。システムⅡの場合, H形鋼にビスで留める構造のため、H形鋼にビス穴を穿孔できるスペースが必要であり、また、工事の都合によっては、一時的にビス留めを外して撤去する作業が必要となる。

e)センサーケーブル

システムⅠはセンサーケーブルを使用しない。システムⅡはセンサーケーブルを使用するため、仮設防護柵自体の工事の都合によっては、センサーケーブルを一時的に撤去する必要がある。

f)ノイズ

崩落や落石以外のノイズが多い場合、システムⅠでは発生原因を推定してノイズを削除するためにオプション機器である監視カメラを必要とするが、システムⅡは波形解析機能を有しているため、監視カメラといったオプション機器を特に必要としない。

4.3 システムの設計

システムの設計は、導入時の目的と選定システムに応じ、現場条件を踏まえて適切に行うものとする。

＜解説＞

システムの設計は、基本的に図4.1の全体フローに基づいて行う。すなわち、選定システムがシステムⅠとシステムⅡのいずれにおいても、「検知センサー配置」→「基本試験」→「しきい値の設定」→「データ記録・通信」の４つの設計項目については、基本的に同じである。

ただし、システムⅡを選定し、システムⅡの特徴である崩落規模・位置の推定機能を使用する場合は、「基本試験」や「しきい値の設定」でシステムⅡでのみ考慮する内容（例えば、崩落規模・位置推定のために必要な衝撃位置と振動センサーの振幅比の関係の取りまとめ）についても実施する必要がある。

一方、システムⅠは振動波形を解析する機能がないため、崩落現象と崩落以外の事象（交通振動、工事振動、動物の接触など）を確実に分離することはできない。このため、導入現場の重要性に鑑み、崩落現象とそれ以外の事象を確実に区別する必要がある場合は、補完システムとしてカメラ監視システムを併用することが望ましい。カメラ監視システムによる落石を直接視認した例を 4.5 で示す。

なお、システムⅡは、振動波形を解析して落石かどうかを判定する機能があるため、カメラ監視システムは特に使用しない。

4.3.1 検知センサー配置

崩落検知システムの検知センサーの配置は、採用システムの特徴と、仮設防護柵の設置状況と崩落想定範囲、工事区域状況等との関係を念頭に置き、適切に検討することとする。

＜解説＞

崩落検知システムの検知センサー配置において、検討する主な項目を以下に示す。

- 崩落想定箇所との位置関係
- ノイズ振動発生源との位置関係
- 信号ケーブルの配置および処置

(1) 崩落想定箇所との位置関係

a)検知センサーの平面配置

検知センサーの平面配置は、崩落想定範囲を確実に包含する必要がある。このため、現地斜面の緩み状況などから想定した崩落範囲と仮設防護柵の設置状況を踏まえ、配置を決定することとなる。図4.5に示すとおり、崩落想定範囲を包含する仮設防護柵延長方向2箇所のH形鋼支柱に検知センサーを配置する他、その間3～5スパン（1スパン2mの場合は6～10m）に1箇所の割合で、等間隔にあるH形鋼に検知センサーを配置する。設置間隔をどの程度の距離にするかは、基本試験で明らかとなった仮設防護柵の振動特性を踏まえ、最終的に決定するものとする。なお、1セットのシステムによる平面配置の最大距離は、仮設防護柵の振動特性やしきい値によって変わるが、1スパン2mの標準的な仮設防護柵の場合、システムⅠで最大90mまで、システムⅡで16mまでとなる。

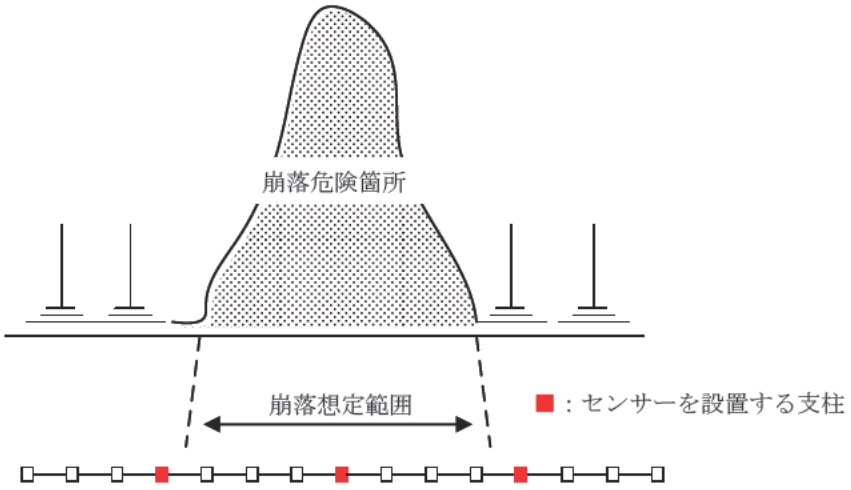


図 4.5　崩落想定範囲と検知センサー配置との関係（平面配置）

b)防護柵への設置位置

検知センサーは斜面側（工事区域側）の防護柵支柱（H 形鋼）に取り付けることを基本とする。防護柵と斜面の距離が近く狭小で、設置作業がしにくく、また危険な場合は、道路側への設置でも良い。ただし、道路通行の影響を受けず、かつ支障にならないように、突起部をなるべく抑えて設置する。なお、検知センサーの取り付け高さは 1～2m程度とし、取り付け高さは全て同一とする。

c)崩落が防護柵手前で停止する可能性が高い場合の処置

4.2.2（1）で述べたように、崩落が防護柵手前で停止する可能性が高い場合は、仮設防護柵への衝撃振動を検知することを前提とした本検知システムでは検知できない。したがって、補完的な処置として斜面上に検知センサーを設置することが望ましい。この場合、感度の高い検知センサー（速度型振動計）を採用しているシステムⅡは、斜面上の岩盤あるいは堆積岩塊に直接検知センサーを取り付けることも可能である。この場合、岩盤や堆積岩塊の振動特性を予め把握して、適切な位置に検知センサーを設置する必要がある。

(2)　ノイズ発生源との位置関係

a)ノイズ発生源の特定

工事区域には、重機や発電機といった建設機械の動力（エンジン、コンプレッサー、モーター）の振動、また建設機械の走行・稼働による振動など、崩落衝撃に起因しない振動（ノイズ）が多く存在する。また、漏電といった電気系統からのノイズも発生している可能性がある。特に検知センサー直近に常時ノイズを発生する施設があると、検知センサーの誤作動により小崩落や落石の検知が全くできなくなる。したがって、まず、工事区域にある振動ノイズ発生源を現地状況から特定する。

b)ノイズ発生源に対する処置

検知センサー設置予定箇所直近に、明らかにノイズを発生する常設施設がある場合は、工事関係者との協議により、予め移設を依頼することが望ましい。移設が難しい場合や発生源特定が現地状況から困難な場合は、後述する基本試験でノイズに起因した仮設防護柵の振動特性（振幅、周波数、継続時間など）を把握し、周波数帯域に応じたフィルタリングや振幅基準値の設定等により、崩落衝撃振動との切り分けが確実にできるかどうかを確認する。

(3)　信号ケーブルの配置および処置（システムⅡのみ）

システムⅡは検知センサーと観測部／送信部間を信号ケーブルで接続する必要があり、このため工事区域内でのケーブル敷設工事を伴う。信号ケーブル配置にあたっ

ては、観測部／送信部の設置位置を確認し、工事車両通行などによるケーブル破断といった事故がないような経路を選ぶこととする。また、破断の可能性が高い経路上のケーブルは保護管に収納し、工事車両走路範囲は深度 20～30cm 程度埋設することが必要である。

4.3.2 基本試験

崩落衝撃に起因した仮設防護柵の振動特性、およびノイズに起因した仮設防護柵の振動特性を把握し、崩落検知システムのセンサー配置や検知基準値等を設定するための基本試験を行う。

＜解説＞

振動測定を前提とした崩落検知システムの設計では、「落石等の崩落衝撃時の仮設防護柵の振動特性」と「ノイズに起因した仮設防護柵の振動特性」の２つの特性について、的確に把握し、崩落衝撃のみの振動を選択的に検知できるよう諸条件を検知センサーに予め設定できるか否かが、システムの信頼性を確保する上で不可欠である。

これまでの調査研究により、次の２点が確認されている。

① 崩落衝撃時の周波数特性：標準的な鋼製横矢板の仮設防護柵の場合では、落石を模した鉄球や玉石による衝撃時振動の応答スペクトルのピークは200～500Hzの周波数帯域である。

② 振幅の距離減衰：検知センサーの設置位置から崩落衝撃位置が離れるにつれ、検知センサーの振幅（最大振幅）は小さくなる。

まず①については、上記周波数帯域前後の振動をフィルターにより除去し、フィルターを通過した振動を崩落規模に応じて設定した振幅のしきい値（振動継続時間も考慮する場合もあり）によって区別することで、落石や崩落を検知することを示唆している。しかし、仮設防護柵の設置箇所周辺には、自動車走行振動や工事振動などの崩落以外の振動源がある場合は、これらの振動源に起因したノイズが含まれる可能性がある。

次に②については、振幅の距離減衰に応じた適切なセンサー配置をしないと、自動車走行振動等のノイズを踏まえて設定した振幅のしきい値よりも、落石等の崩落に起因した振動の振幅が小さくなる可能性があり、検知センサーから比較的離れた崩落が検知できなくなる可能性を示唆している。本マニュアルでは、これまでの調査研究成果より、検知センサーの配置間隔を最大3～5スパン（1スパン2mの仮設防護柵の場合6～10m）にしているが、現場の仮設防護柵の構造・設置状況やノイズ状況によって、配置間隔をより狭くする必要がある。

以上の点に考慮し、設計時の基本試験として次の2つの実験・測定を行うこととする。

① 鉄球を用いた振り子方式衝撃試験

② 自動車走行振動等のノイズ振動の測定

なお、システムⅡを採用し、崩落位置・規模の推定も目的とする場合は、基本試験にお

いて、崩落位置・規模の推定に必要なパラメーターを把握するための試験および取りまとめを併せて行う必要があるが、これについては後述する。

(1) 鉄球を用いた振り子方式衝撃試験

a)本実験の目的

本実験は、鉄球を用いた振り子を擬似的な崩落と見立て、仮設防護柵への衝撃によって生じる振動を測定し、仮設防護柵の周波数特性と振幅（最大振幅）の距離減衰を把握することが目的である。

b)使用する衝撃材料等

擬似的衝撃に使用する鉄球は、図4.6に示す3種類を基本とする。3種類の鉄球を準備できなければ、2kg前後で質量が特定できる鋼球1種類であれば良い。また、図4.7に示すとおり、鋼製単管などを使った架台により一定高さから自由落下できるようにする。

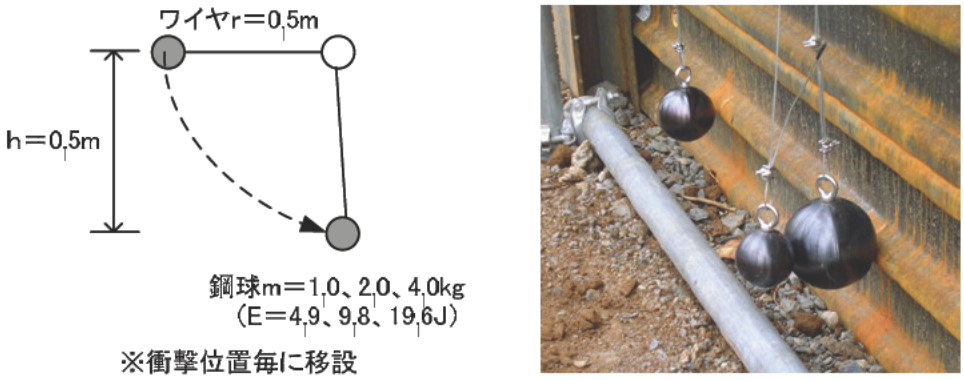


図 4.6　振り子方式衝撃試験に使用する鉄球の例

図 4.7　振り子方式衝撃試験の様子

c)振動測定機材

鉄球を用いた振り子方式衝撃試験に使用する振動測定には、振動計（加速度型、速度型）と振動計を接続可能な高速サンプリング対応のデータロガーを準備する。準備する振動計は、実際に使用する検知センサーと同等あるいはそれ以上の性能を有するものとする。データロガーは、サンプリング周波数が 500Hz～1kHz 以上の設定可能な機種とする。この場合、システムⅡは高速サンプリング対応のデータ収録機能を有しているので、振動測定機材を改めて用意する必要はない。一方、システムⅠにはデータ収録機能がないので、別途加速度型振動計を含めた振動測定機材を用意する。

d)H 形鋼への検知センサー取り付け方法

検知センサーはH形鋼からの検知センサー筐体への振動特性が大きく変わらないよう設置する。すなわち、H形鋼と検知センサー筐体を、①高い摩擦力を保持し密着させる、または②剛結させる、のいずれかの方法とする。①としては耐候性強力接着剤（粘着テープ）、超強力磁石による取り付け（図4.8）、②としてはビス留めによる取り付け（図4.9）がある。どちらかの方法を採用する場合でも、H形鋼の取り付け面の凹凸をやすり、グラインダーなどを使って平滑にすることが必要である。

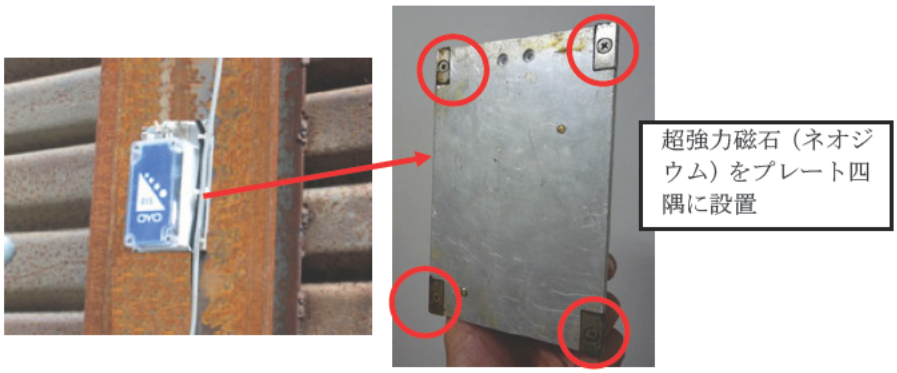


図 4.8　超強力磁石によるセンサーの防護柵支柱への取り付け（システムⅠ）

図 4.9　ビス留めによるセンサーの防護柵支柱への取り付け（システムⅡ）

e)仮設防護柵の衝撃位置

衝撃位置は地表～高さ 50cm までの横矢板中央とする。

f)振動計の設置間隔と衝撃位置の関係

振幅の距離減衰を把握するために、振動計設置位置に対して衝撃位置が変えられるようにする。ここで、図4.10に示すように、システムⅠでは2台の振動計を5スパン離して設置し、5スパン内の5箇所の衝撃位置についての振動測定を行う。

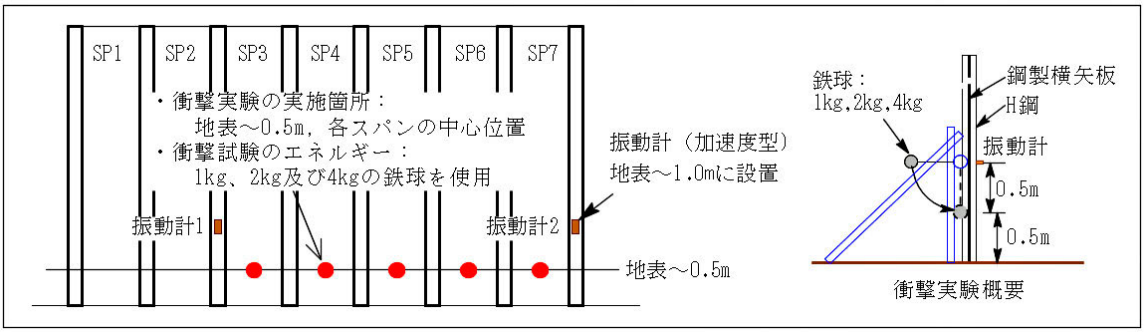


図 4.10　システムⅠを対象とした振り子式衝撃試験概要図

一方、崩落位置・規模を推定するシステムⅡでは、振幅の距離減衰の把握に加え、崩落位置・規模の推定に必要な衝撃位置に応じた振動計設置間の最大振幅比を求める必要がある。この場合、図4.11に示す通り、3台の振動計（1～3ch）をそれぞれ3スパン、4スパン離した位置に設置する。

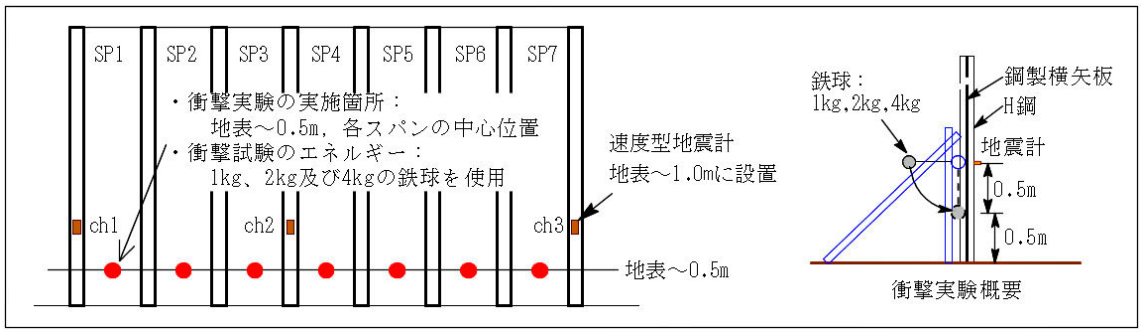


図 4.11　システムⅡを対象とした振り子式衝撃試験概要図

g)衝撃振動の付与

3 種類の鉄球を使用する場合は、鉄球についたワイヤー長を一定（50cm 程度）にし、自由落下させることで 3 種類の衝撃エネルギーを付与する。1 種類の鉄球しか準備できない場合は、ワイヤー長さを調整し自由落下高さを変えられるようにし、3 種類の衝撃エネルギーを付与できるようにする。なお、3 種類の衝撃エネルギーを付与させるのは、衝撃エネルギーの振動特性への影響を把握するためである。

h)防護柵延長方向で基礎部の地質が異なる場合の処置

地質調査結果などで設置予定箇所の地質が防護柵延長方向で変わっていることが明らかな場合は、それぞれの地質において当該実験を行い、地質の違いが振動特性に与える影響を把握する。

(2) 自動車走行振動や工事振動等のノイズの測定

a)測定の目的

本測定は、自動車走行振動や工事振動、電気的ノイズなどの崩落以外の振動の特性把握のために行う。

b)測定対象とするノイズ

自動車走行振動や工事振動（重機や発電機などの建設機械の動力の振動、機械の走行・稼働による振動）は、走行・稼働状況を確認することでほぼ特定できる。電気的ノイズも常時発生していれば、他のノイズ振動がない状況での振動測定によって、ほぼ一定の周波数帯域（電源からの漏電ノイズ（ハム）は 50～60Hz）に確認できる。したがって、基本試験時のノイズ振動の測定は、自動車走行振動、工事振動、および電気的ノイズを対象とする。一方、雷（空電）ノイズや基本試験後に導入された重機によるノイズは、基本試験時に特定し、測定することは困難である。運用時のデータの取得状況を踏まえ、地元気象台が公表する気象データや工事記録から別途検証する必要がある。

c)自動車走行や工事の振動測定時の留意点

自動車走行振動測定は、振動源である通行車両の種類と振動特性の関係が明確になるよう、測定する車種を 1 台に限定し、また工事振動が無い状況で行う。一方、工事振動測定についても、測定データについての振動源の区別ができるよう、極力他の振動が無い状況で行う。

(3)　実験・測定結果の取りまとめ

a)周波数特性に関する取りまとめ

振り子方式衝撃試験、自動車走行振動等のノイズ測定による波形データを対象にFFT（高速フーリエ変換）による周波数解析を行い、図4.12に示すような振動源別の応答スペクトルの関係図を作成する。図より、検知センサーのフィルタリングに必要な崩落衝撃振動に起因した応答スペクトルのピークが分布する周波数帯域を調べるとともに、ノイズの応答スペクトルのピーク分布帯域と崩落衝撃振動の帯域との関係について確認する。

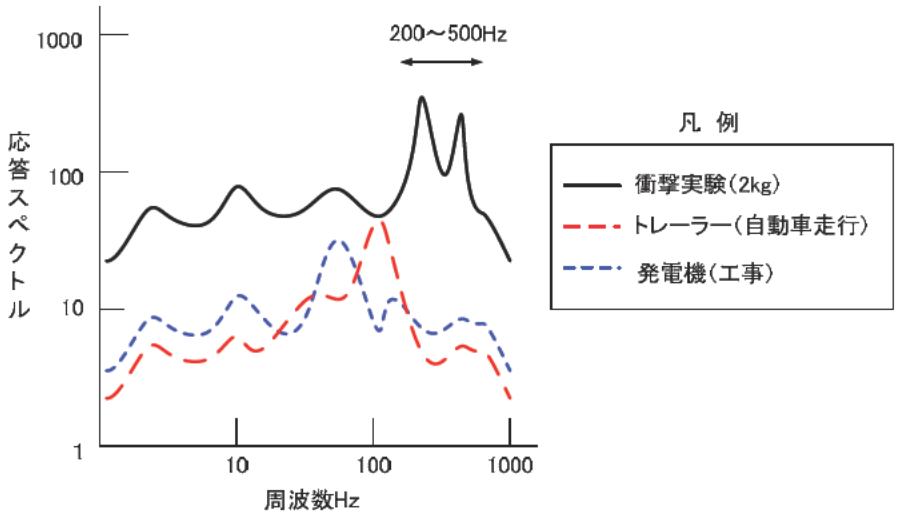
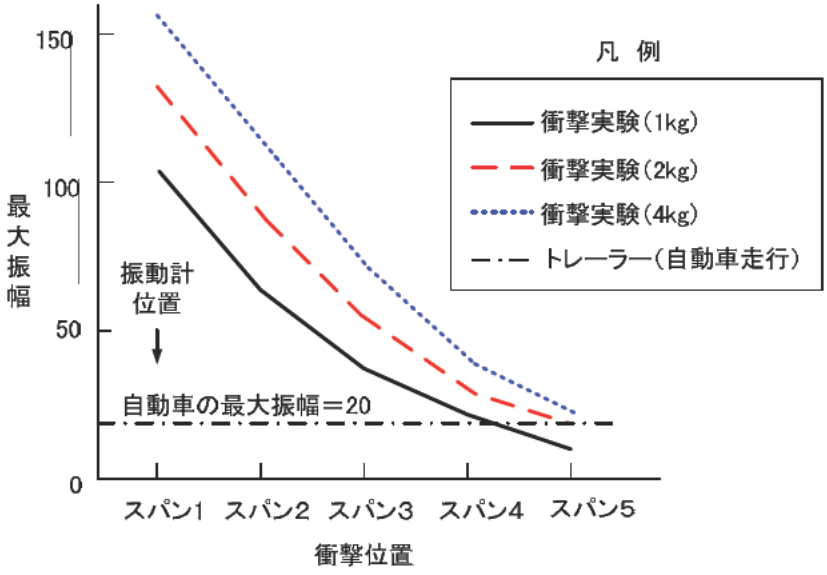


図 4.12　振動源別の応答スペクトルの取りまとめ例

b)振幅の減衰特性に関する取りまとめ

振り子方式衝撃試験を踏まえ、図4.13に示すように、衝撃位置（スパン位置）と最大振幅の関係を図にまとめる。図には、ノイズ測定で明らかとなった最大振幅も記入する。崩落衝撃の最大振幅の距離減衰傾向とノイズに起因した最大振幅を踏まえ、後述するように検知センサーの配置間隔や崩落検知の振幅のしきい値を決定する。

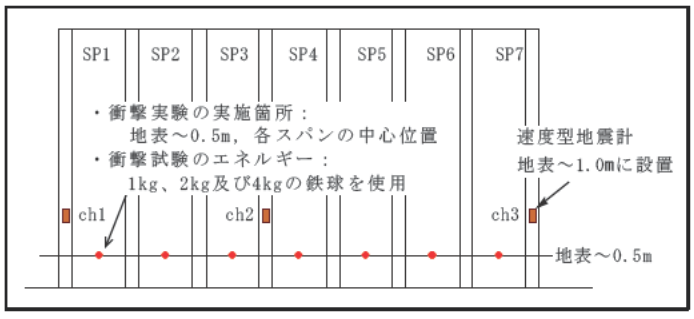


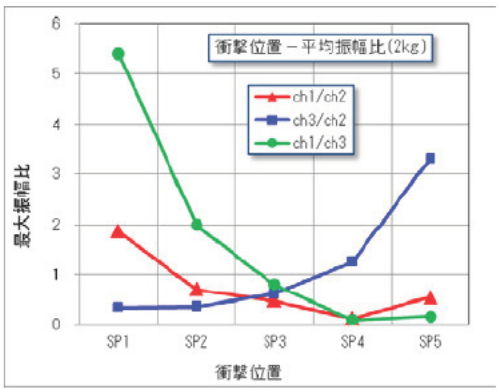
- 3つの振り子重量による衝撃試験の最大振幅を衝撃位置に応じてプロットすると、上図のように振動計から衝撃位置が離れるにつれて最大振幅の値が小さくなる関係図になる。
- 自動車などの崩落検知のノイズになりうる振動の最大振幅も図中に記載する（図中の破線）。

図 4.13　衝撃位置と最大振幅の取りまとめ例

c)振幅比に関する取りまとめ

崩落位置・規模を推定するシステムⅡでは、最大振幅の距離減衰の把握に加え、崩落位置・規模の推定に必要な各衝撃位置に応じた振動計間の最大振幅比を算出する。振幅比の取りまとめ例について、図4.14に示す。





凡例 ch1～ch3：検知センサー（地震計）

SP1～SP5：横矢板の番号

図 4.14　各衝撃位置の最大振幅比の取りまとめ例（システムⅡ）

4.3.3 しきい値の設定

崩落検知システムのしきい値は、交通振動や工事振動を誤検知せず、小さな落石・崩落による衝突振動を確実に検知できるように設定する。

＜解説＞

(1) システムⅠのしきい値設定フロー

システムⅠのしきい値の設定フローを図4.15に示す。

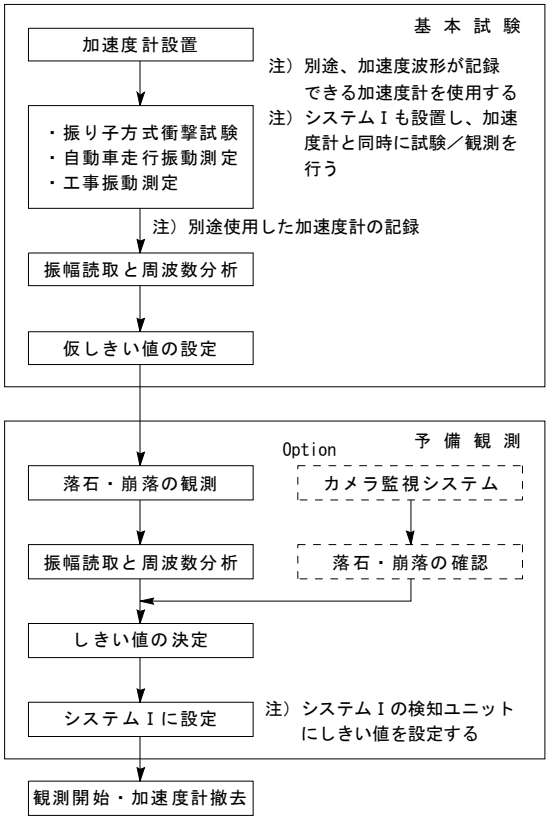


図4.15 システムⅠのしきい値の設定フロー

・システムⅠ自体には加速度波形を観測・記録する機能はないので、「4.3.2 基本試験」に記載したように別途加速度型振動計による記録を使用する。

・基本試験で得られた周波数特性が、本マニュアルで定めた周波数特性(200Hz～500Hz)の範囲内であることを確認する。もし、周波数帯域が前後にずれる場合は、検知ユニットの設定を変更する。

・衝撃実験の衝撃位置（スパン）に応じた最大振幅の距離減衰を考慮し、ノイズ振動の最大振幅よりも確実に大きな振幅が得られる崩落衝撃の衝撃位置を念頭に入れ、振幅

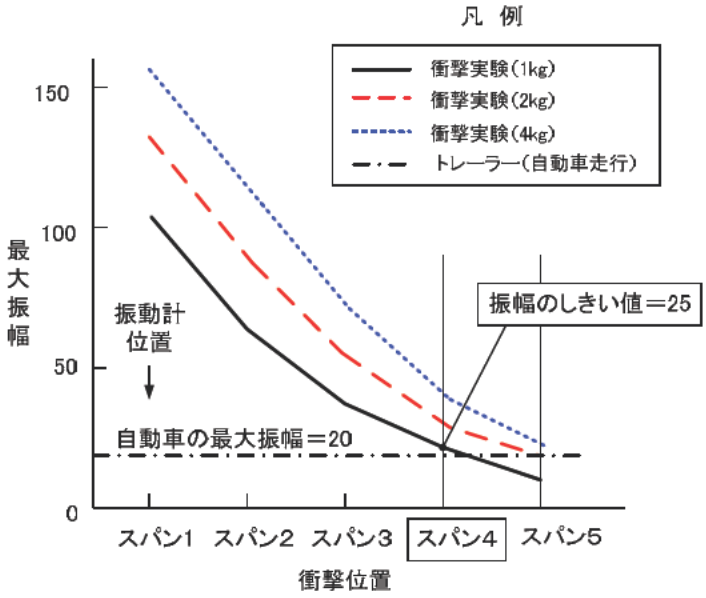
の「仮しきい値」および検知ユニット設置間隔を設定する。具体的には、図 4.16 のとおり、設定するものとする。

・カメラ監視システムを使用する場合は、崩落検知のタイミングでカメラを起動させる必要がある。このため、システムⅠ（メインユニット）が有する検知のタイミングで外部信号を出力する機能と、監視カメラが有する外部信号で起動するトリガー機能を利用し、検知と同時に監視カメラが稼働し、検知前後の画像データを撮影できるように設定する。この場合、監視カメラのプレトリガー機能も設定し、検知数秒前から画像も収録できるようにする。

・一定期間の予備観測後に、検知された加速度波形やカメラ映像と比較して確実な落石・崩落現象とノイズとを分離する。ノイズの混入率が大きい場合には、仮のしきい値を大きくするなどして予備観測を続行する。

注）予備観測の期間は、仮設防護柵の設置期間に合わせて適宜決定する。

注）予備観測期間中にノイズが検知された場合には、「4.4 運用上の留意点」を参考にして誤検知しないような対策を施す必要がある。



- スパン5では、自動車走行の振幅が衝撃実験の振幅を上回るので、崩落衝撃が自動車走行の振幅に埋もれてしまい、検知できない可能性がある。
- 一方、スパン４では衝撃実験の振幅が自動車走行による振幅を上回っている。
- この点を踏まえ、このデータの場合は、振動計の設置間隔を4スパンとし、振幅のしきい値を25とした。

図 4.16　振幅のしきい値と検知センサーの配置間隔の決定例

・ほぼ 100%の検知率が得られた時点でしきい値を決定し、その値（加速度振幅レベル、振幅レベル超過回数）をシステムⅠの検知ユニットに設定して観測（監視）を開始する。加速度計はこの時点で撤去する。

(2) システムⅡのしきい値設定フロー

システムⅡのしきい値設定フローを図4.17に示す。

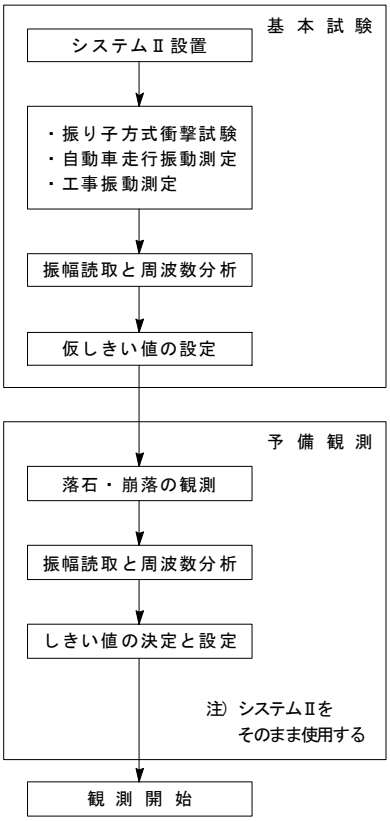


図4.17 システムⅡのしきい値設定フロー

・システムⅡ自体に速度波形を観測・記録する機能があるので、システムⅡの設置後、直ちに「4.3.2 基本試験」を実施する。

・基本試験で得られた周波数特性が、本マニュアルで定めた周波数特性（200Hz～500Hz）の範囲内であることを確認する。

・自動車走行振動と工事振動を比較し、大きい方の振幅値の 2 倍程度を「仮しきい値」として予備観測を開始する。

注）2 倍程度という値は仮定の数値であって、対象とする仮設防護柵の実情に合わせて適宜変更する。

・一定期間の予備観測後に、検知された速度波形と比較して確実な落石・崩落現象とノイズとを分離する。誤検知率が大きい場合には、仮のしきい値を変更して予備観測を続行する。

注）予備観測の期間は、仮設防護柵の設置期間に合わせて適宜決定する。

注）予備観測期間中にノイズが検知された場合には、「4.4 運用上の留意点」を参考に

にして誤検知しないよう対策を施す。

・落石を各実に検知できるようになった時点で、しきい値を固定して観測（監視）を開始する。

・システムⅡは、振動波形を連続して記録する。予備観測期間中にしきい値を変更した場合は、記録済みの振動波形に対する再処理により、予備観測の開始時から同一のしきい値を採用することができる。この機能は、本観測期間中でも同様であって、観測中のどの時点においても、しきい値や周波数帯を変更しての再処理が可能である。

＜参考＞

図4.18は、システムⅠおよびシステムⅡについて、何れも鋼製横矢板での基礎実験（振り子方式鉄球衝撃試験）、玉石の衝突試験の周波数特性に自動車の走行振動の周波数特性を重ね合わせた事例である。

なお、システムⅠは、基本試験時に別途使用した加速度計による記録である。

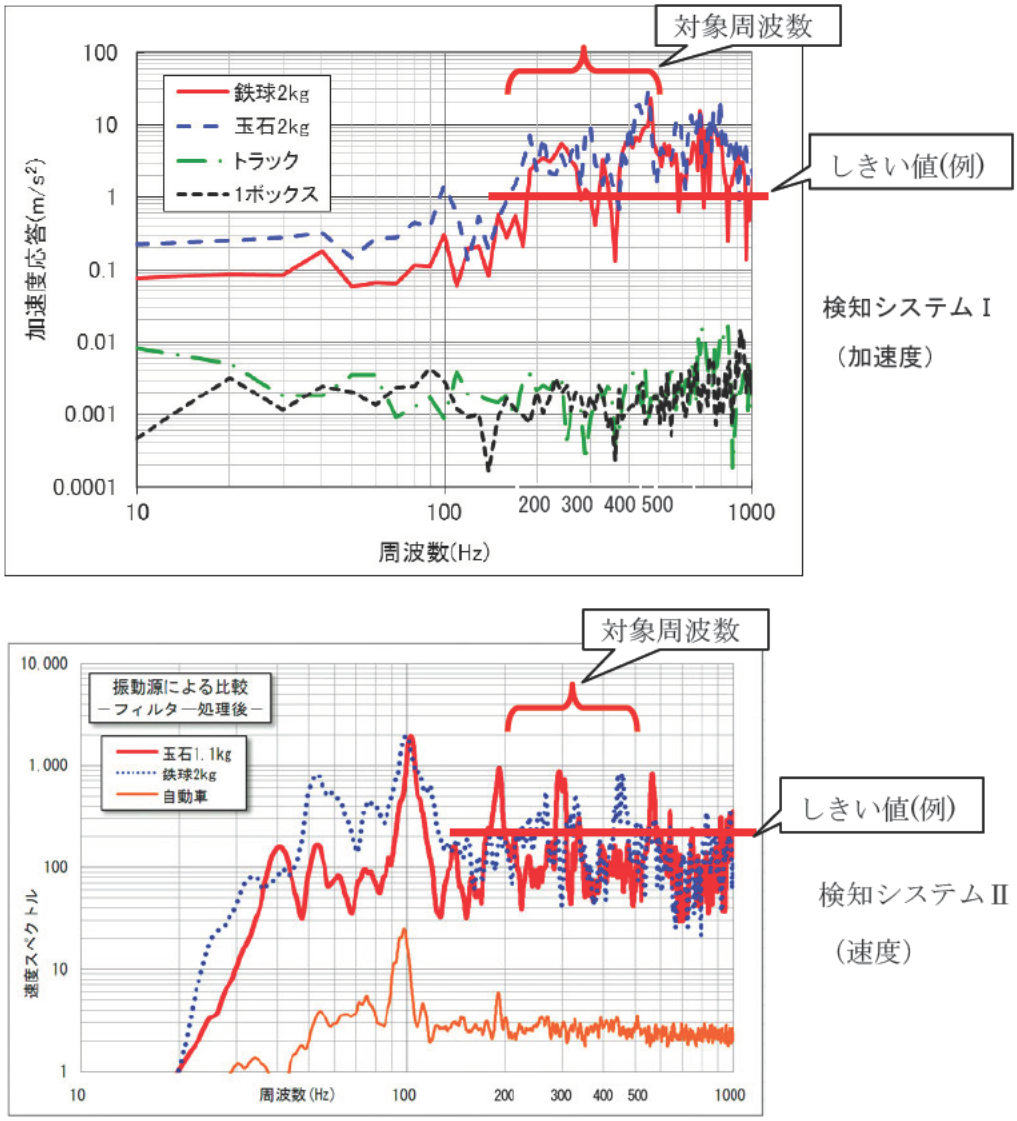


図 4.18 衝撃振動の周波数特性としきい値の設定例

・「4.3.2 基本試験」で実施した測定結果を図4.18のように整理し、対象とする周波数帯（200Hz～500Hz）において、鉄球による衝撃振動の振幅が自動車の走行振動や工事振動の振幅よりも確実に大きいことを確認する。

・図4.18に記入したしきい値は、このように設定するという例である。

4.3.4 データの記録・通信

崩落検知システムの「データ記録機能」とは、落石や小崩落を検知したデータを必要な時に閲覧あるいはグラフ化できるように、パーソナルコンピューターのハードディスクなどに長期間記録するものである。
崩落検知システムの「通信機能」とは、落石や小崩落を検知した場合にネットワークを経由した通信機能により、道路管理者あるいは工事関係者などに対して速やかに連絡するものである。

＜解説＞

検知データとは原則として「発生頻度」であるが、システムⅡでは「振動波形」、「最大振幅」、「卓越周波数」および「継続時間」を含める。

システムⅠとシステムⅡでは、データ記録機能と通信機能や操作手順が大きく異なるので、それぞれについて説明する。

(1) システムⅠ

図4.19はシステムⅠのデータの記録・通信機能と通信のフローである。

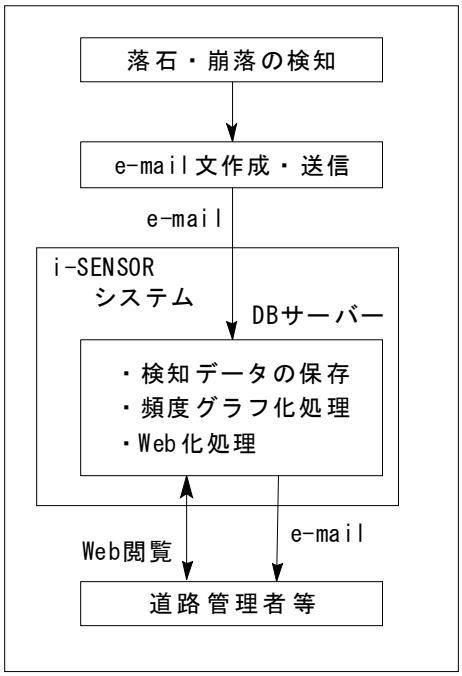


図4.19 システムⅠのデータ記録・通信機能と通信のフロー

・システムⅠの場合、落石や崩落を検知すると「メインユニット」はその事実を「e-mail」にまとめ、モニタリングデータ処理専用のWebシステム（i-SENSORWebシステム）に送信する（図3.6 参照）。

・Web システムでは、検知データを保存すると共に、任意時間あたりの検知回数（イベント：頻度）や累積検知回数のグラフ化処理や一覧表作成処理を行って、Web でインターネット公開（会員限定）する機能がある。道路管理者や工事関係者は、時間を決めて当該の Web サイトにアクセスして状況を確認する。

注）アクセス先、ユーザー名（ID）やパスワードは、システムⅠの設置時に受発注者間で協議する。

・Web システムでは、予め設定した任意時間あたりの検知回数（警報用しきい値）を超えた場合には、道路管理者や工事関係者のパソコンや携帯端末などに対して警報メールを発信する機能がある。

注）警報メールの送信先や検知回数については、システムⅠの設置時に受発注者間で協議する。

(2) システムⅡ

図4.20はシステムⅡのデータの記録・通信機能と通信のフローである。

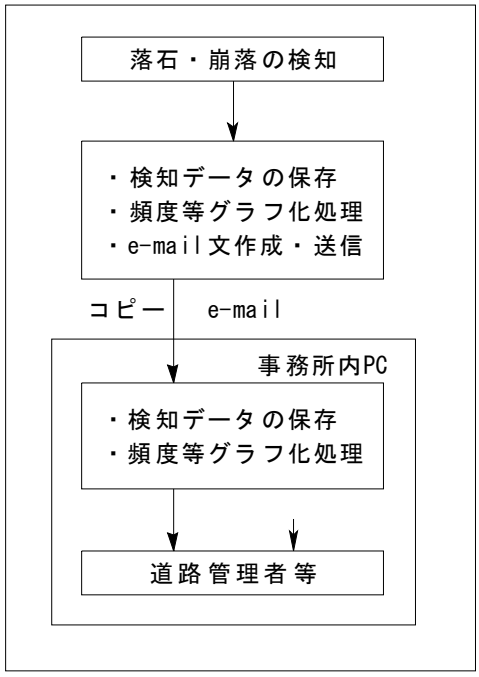


図 4.20 システムⅡのデータ記録・通信機能と通信のフロー

① データの記録・通信機能（基本機能）

・システムⅡの場合、「記録部/処理部」パソコンにインストールされている「監視ソフトウエア」が落石や崩落の検知を行うと共に、その結果をリアルタイムで表示する機能を有しており、その画面を閲覧することによってモニタリングすることができる。

・システムⅡはソフトウエアトリガー方式を採用しているため、振動波形は全て「記録

部/処理部」パソコンの HDD に保存されている。

・道路管理者や工事関係者の事務所と「記録部/処理部」が離れていても、ネットワークが構築されているならば､検知データをネットワーク経由で事務所のパソコンに送信･コピーすることにより、事務所パソコンにインストールした処理ソフトウエアを使用して任意時間あたりの検知回数（イベント：頻度）や累積検知回数のグラフ化処理や一覧表作成処理を行うことができる。

注）ネットワークの構築、「波形処理ソフトウエア」のインストールや使用方法（後述）について、システムⅡの設置時に受発注者間で協議する。

・「記録部/処理部」パソコンには、落石や崩落の「検知時刻」、「最大振幅」、「卓越周波数」および「継続時間」を道路管理者や工事関係者のパソコンや携帯端末などに対してメール発信する機能がある。

注）検知メールの送信先や検知回数については、システムⅡの設置時に受発注者間で協議する。

② データの再生や頻度集計方法（概要）

・波形データの再生や発生頻度の集計と表示処理は、図 3.10(右)に記載した「波形処理ソフトウエア」を使用する。 本ソフトは、事務所等に設置したパソコンにインストールして使用することを基本とするが、落石検知システムⅡの「記録部/処理部」にインストールすることも可能であって、この場合は現場で落石波形や発生頻度等の確認をすることが可能となる。

・以下の説明は「波形処理ソフトウエア」の取り扱い説明書の抜粋であるため、詳細については同書を参照されたい。

・図4.21のように、波形データを選択して［OK］ボタンを押す。

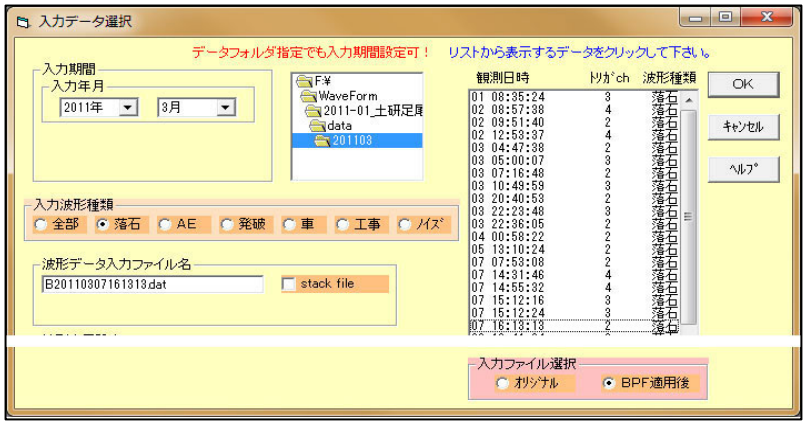


図 4.21 表示する波形ファイルの選択

・振動波形が画面上に表示される（図4.22はイメージ）。

・「波形処理ソフトウエア」には、その他に以下の機能を備えている。

A：振幅軸と時間軸の拡大縮小

B：波形データの CSV 出力（下図、左下のボタン）

C：バンドパス（BP）フィルター処理

D：FFT 処理

E：波形種別を手動で変更する機能（下図、右下のボタン）

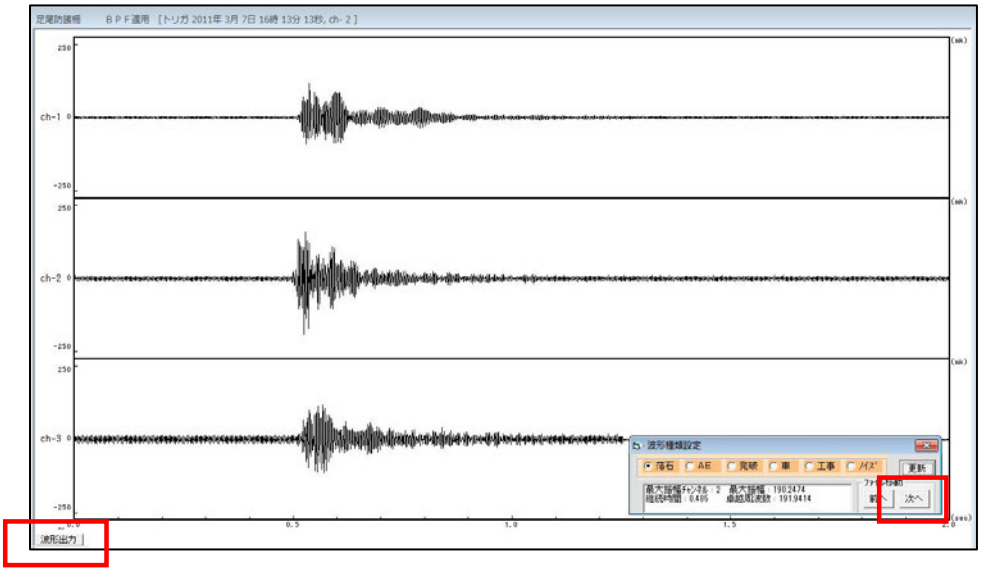


図 4.22 波形表示（イメージ）

・図4.23のように、「表示期間」と「波形種類」を選択して［OK］ボタンを押す。

・検知頻度が画面上に表示される（図4.24はイメージ）。

図 4.23　表示期間と振動の種類の選択

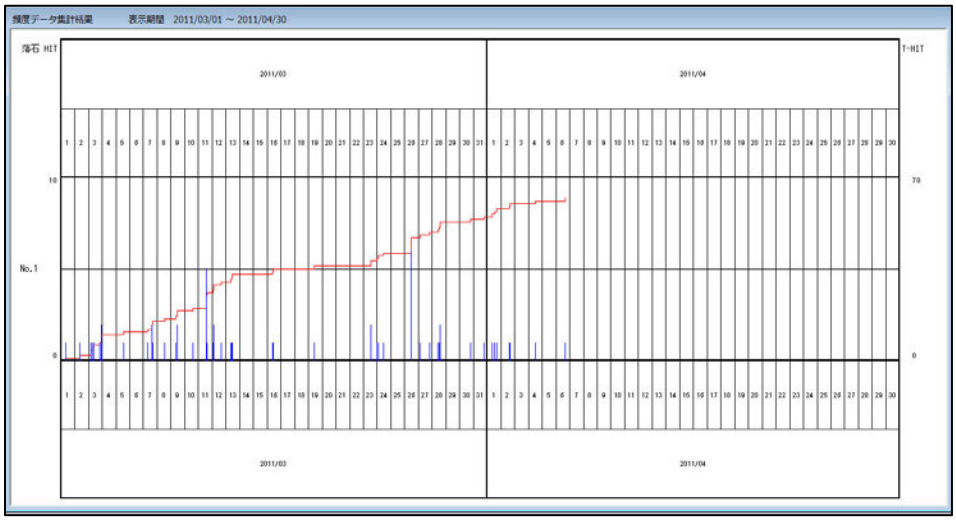


図 4.24 任意時間あたりの検知頻度表示結果(イメージ)

4.3.5 カメラ監視システム（システムⅠのオプション）

システムⅠの使用にあたって、崩落現象とそれ以外の事象を確実に区別する必要がある場合は、補完システムとしてカメラ監視システムを併用することが望ましい。

＜解説＞

システムⅠは振動波形の解析機能がないため、崩落現象と崩落以外の事象（交通振動、工事振動、動物の接触など）を確実に分離することはできない。このため、導入現場の重要性を鑑み、崩落現象とそれ以外の事象を確実に区別する必要がある場合は、補完システムとしてカメラ監視システムを併用することが望ましい。このことから、本マニュアルでは崩落検知時の外部信号出力機能を持ち、監視カメラなどの外部装置を起動できるシステムⅠを、監視カメラと組み合わせて利用が可能な崩落検知システムとして示した。カメラ監視システムによる落石を直接視認した例を 4.5 で示す。

なお、システムⅡは、振動波形を解析して落石かどうかを判定する機能があるため、カメラ監視システムは使用しない。

以下でカメラ監視システムの併用時の留意点などについて説明する。

a)カメラ種類

崩落検知システムと連動し、リアルタイム画像を収録、配信するためのサーバー機能を有するネットワークカメラが望ましい。この場合、商用電源とインターネット接続環境（あるいは専用回線）が整備可能なことが前提となる。

b)画像サイズ

落石状況が視認できるサイズとする。例えば、距離 10m でφ10cm の落石を視認するためには 640×480 以上の画像サイズが必要となる。

c)視認幅

視認幅が比較的広いこと（画角 45° 以上）が望ましい。

d)トリガー設定機能

崩落検知システムの接点出力をトリガーとしてカメラを起動させるためトリガー設定機能を有することが必要である。

e)プレトリガー機能

検知する 2～5 秒程度前から撮影が可能なプレトリガー機能を有することが必要である。（崩落前 2～5 秒程度の時間設定が可能）

f)最低被写体照度

照明併用で夜間でも比較的鮮明に落石状況が撮影可能な感度（最低被写体照度）を有することが必要である。（距離 10m でφ10cm の落石を夜間でも確認するには、

300W 程度の照明併用で最低被写体照度 0.005Lux 程度必要）

図4.25にカメラの設置位置の例を示す。カメラは仮設防護柵の内側で、防護柵延長方向を広く見渡せる箇所（防護柵上もしくは崩壊の可能性の低い斜面上）に設置する。また、道路側の交通振動がノイズになる可能性がある場合は、道路側にもカメラを設置することが望ましい。

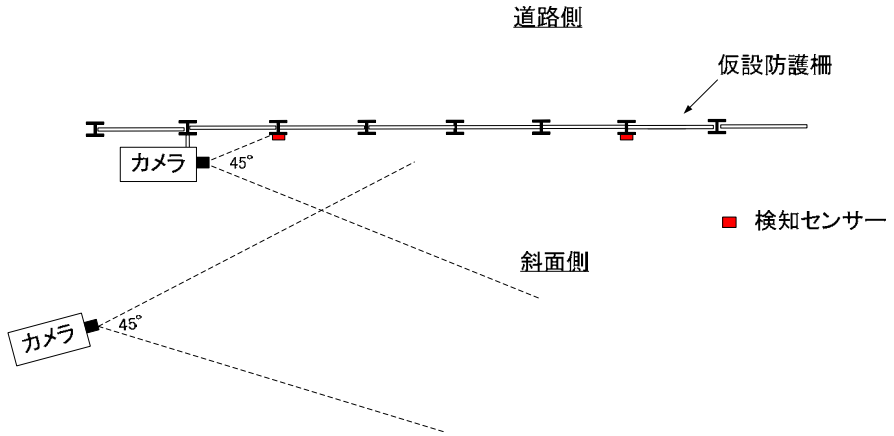


図 4.25　カメラの設置位置の例（設置平面図）

4.3.6 衝撃振動の解析方法（システムⅡ：参考）

システムⅡで保存されている最大振幅値と継続時間から、衝撃振動のエネルギーと衝撃位置を推定することができる。

＜解説＞

（1）振動エネルギーの算出と利用方法（例）

・本マニュアルでは、振動エネルギー（E）を「最大振幅×継続時間」で計算される値とする。

・振動エネルギー（E）の対数値「log （E）」と累積検知数を図4.26のようにグラフ化する。

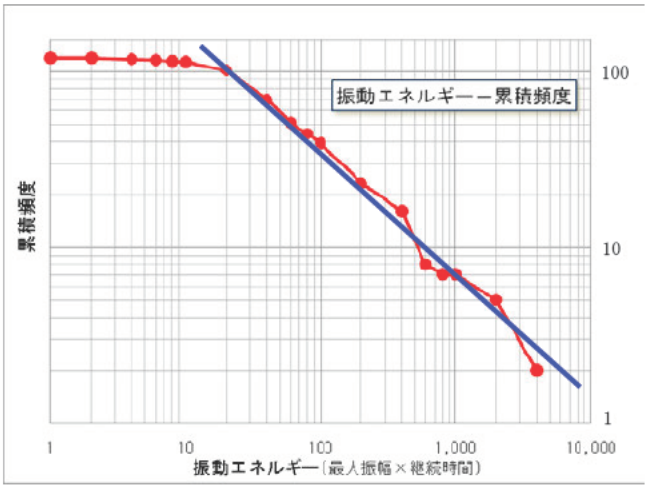


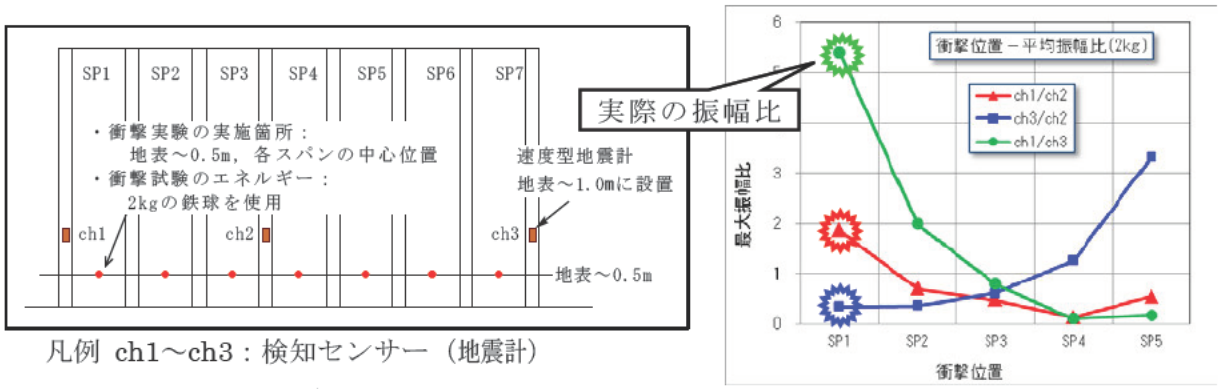
図 4.26 落石の振動エネルギーと累積頻度の関係（図-4.50 参照）

・図4.26の例で、振動エネルギーが概ね4,000を超える検知数が少ないことから、今後大きな落石等が発生する可能性が高いと考える。

・振動エネルギーが概ね 20 より小さい落石等は「しきい値以下のため検知できなかったか」、あるいは「仮設防護柵まで届かない」のいずれかであると考える。現地調査を行った結果、後者のケースが顕著であるならば、全ての落石や小崩落を検知できないことになるので、斜面の崩落を監視する上で留意が必要である。

（2）検知位置の推定方法（例）

・予め、基本試験の「振り子方式鉄球衝撃試験」で各チャンネルの平均振幅比を計算する。すなわち、「ch1/ch2」、「ch3/ch2」及び「ch1/ch3」である。その例を図4.27に示す。



凡例 ch1～ch3：検知センサー（地震計）

SP1～SP5：横矢板の番号

図 4.27 振り子方式鉄球衝撃試験結果（平均振幅比）と落石の振幅比（イメージ）

・システムⅡを稼働させた後、実際に検知した落石振動の振幅値から各チャンネルの振幅比を計算して図4.27と対比する。最も近い組み合わせを示す場所（スパン）を落石等が衝突した場所と推定する。

4.4 運用上の留意点

崩落検知システムの運用にあたっては、「ノイズ」、「故障」や「仮設防護柵自体の工事」など、予め発生しうる障害を想定して対策方法や手順を策定しておく。

＜解説＞

ノイズなどは、誤った警報を発する原因となるので、可能な限り正確な落石・小崩壊による衝撃振動のみを検知するように努める。

崩落検知システムは故障することがあり得るが、システム故障を早期発見し迅速な修理が行えるような管理方法を策定しておく。

斜面や道路の復旧工事に伴って、仮設防護柵自体やその近接地点で工事が行われることがある。監視期間中に崩落検知システムの移設・中断があると予想される場合は、予め対処方法を講じておくことが必要である。

4.4.1 誤検知の原因となるノイズとその対策

誤検知の最大の原因が「ノイズ」である。表4.5は、主なノイズとその対策方法の概要である。

表 4.5 主なノイズと除去の方法

種　類	主な原因	留 意 点 や 対 策 方 法
電源 （システムⅡ）	電源ケーブルからの誘導	・システムⅡのケースをアースする ・入力の平衡バランサーの調整
雷(空電)	雷放電	・システムⅠ：監視カメラ*で確認する** ・システムⅡ：波形を確認する**
工事振動	掘削機、穿孔機、等	・雷ノイズ対処法と同じ
自動車振動	高速走行や重量車	・道路面の凹凸をなくすか、速度規制を行う
原因不明	人為的な衝撃、等	・雷ノイズ対処法と同じ

*：監視カメラはオプションとして設置

**：雷や工事振動などであることが判明した場合は，後日検知データから削除する

(1) 電源

システムⅡは信号ケーブルを使用するため、電源（AC-100V または AC-200V）の誘導ノイズを受けやすいが、システムⅡの金属ケースを確実にアースすることと、信号入力の平衡バランサーの調整で殆ど除去できる。

(2) 雷

雷放電による空電ノイズは避けられない現象であって、それぞれのシステムでは以下のような対策をとる。

- システムⅠ：監視カメラが設置されている場合は、撮影画像を確認し、ノイズ

の場合は手動でデータベース（DB）から削除する。

- システムⅡ：「波形処理ソフトウエア」で当該波形を確認し、ノイズの場合は手動で DB から削除する。

(3) 工事振動

基本的に雷（空電）ノイズの対処方法に同じ。システムⅠで監視カメラが設置されていない場合は、「監視カメラを設置する」、「工事日誌などからその時間帯のデータを削除する」、あるいは「工事時間帯は検知システムを休止させる」ことで対処する。

(4) 自動車走行振動

道路面に凹凸があって自動車の走行振動を検知する時は、「道路面の凹凸を無くす」あるいは「速度規制を行う」ことで対処する。

(5) 原因不明

通行人による人為的な打撃などにより生じるノイズの多くは除去できないので、発生し得るとして対策方法を講じる必要がある。例えば、システムⅠでは、警報発信の目安を「警報発信を検知回数の累積値」とする、システムⅡでは累積値の他に「振動波形を確認する」などである。

(6) 共通

いずれのノイズ共、しきい値を上げることによって排除できる場合が多いが、これは「検知システムの感度を低下させること」になり、結果として小さな落石・崩壊は検出できなくなるので、このことを十分理解した上で実施することが必要である。

4.4.2 故障の早期発見とその対策

①システムⅠ：

- 検知ユニットや中継ユニットの電池切れやリンク切れの状態をメインユニットから警告メールとして送信が可能である。この機能を利用して、一連のシステムの稼働状態を確認する。
- 定期的に検知ユニット取り付け箇所を叩き、Web 上の検知回数の増加傾向を見ることで、各ユニットの故障や Web システムの不具合の有無を確認する。
- この場合、打撃直後にブザー音と各ユニット番号のメインユニット上への表示確認、および、Web システム上の検知回数の増加傾向の確認を行う。表示されないユニットがあればそのユニットの状態を確認する。現地確認で問題がなく、Web システムあるいは通信機能の不具合が生じている可能性があるので、直ちに原因の究明と修理を実施する。

②システムⅡ：

・観測部/送信部と記録部/処理部の状態を 1 日 1 回以上セルフチェックし、異常の有無をメール送信する機能を備えているので、設置直後は本機能が働くかどうかを確認する。

・振動を検知した場合とセルフチェックを実施した場合には、その結果を e-mail 送信する機能があるため、受信者の所属・氏名と e-mail アドレスを設定し、その機能が働いていることを確認する。

・定時に実施されるセルフチェック結果の e-mail が到着しない場合は、記録部/処理部あるいは通信システムが不具合となっている可能性があるため、直ちに原因の究明と修理処置を実施する。

4.4.3 仮設防護柵自体やその近接で工事とその対策

①システムⅠ：

・検知センサー（検知ユニット）～「中継ユニット」間は無線による信号伝達方式であり、検知ユニット自体も H 形鋼への磁石留めであって、取付けと取外しは極めて容易である。移設時の振動が検知されないように、予めシステムを停止するなどの対策を講じた後で取り外す。「中継ユニット」の移設時も同様である。

②システムⅡ：

・検知センサー（振動センサー）～「観測部/記録部」間は信号（メタル）ケーブルでの連結である。仮設防護柵自体あるいは近接地点で工事が行われる場合は、迂回用のケーブルを設置するなどの対策を講じる。ケーブル切断（コネクター取り外し含む）によって大きなノイズが発生するので、予めシステムを停止するなどの対策を講じた後で作業を行う。「観測部/記録部」の移設時も同様である。

4.4.4 ネットワーク環境が整備されていない場合の対処方法

通信環境が確保できない場合でも、崩落検知システムを稼働させることができるが、システムの稼働状況の確認や検知データの回収のために、以下の処置のいずれかを採用する。

A：崩落検知システムを管理するために、担当者を定期／不定期に派遣する。例えば、崩落検知システムの稼働直後は 1 日～3 日ごとに確認し、以後は 1 週間～1 ヶ月ごとに派遣する。停電や故障などで崩落検知システムが停止してもその事実を知ることができないため、大雨注意報や警報などが発令されると予測される場合には、受託会社は担当者を派遣するなどの対策を採る。大きな地震が発生した直後も同様とする。

B：工事現場の事務所職員が訓練を受けて崩落検知システムの管理を担当する。担当

職員は、毎日崩落検知システムをチェックすると共にデータを回収し、受託会社に連絡／データを送信する。異常が発生した場合は、直ちに受託会社に連絡する。

4.5 崩落検知システムの適用事例

前述した2つの崩落検知システムについて、栃木県日光市足尾町の砂防事業区域内での適用事例を示す（図4.28）。

図 4.28 崩落検知システムの配置状況

4.5.1 システムⅠ

(1) システム概要

3章3.3で紹介した加速度型振動計（MEMS加速度センサー）をベースにしたシステムⅠを実際の現場に設置し、その確実性について検証するため、検知センサーの振動計とは別の振動計（加速度型振動計）による振動データ収録システムとカメラ監視システムを設置した。システム概要を図4.29に示す。振動データ収録システムに検知システムと同等の振幅レベルでのトリガー設定を行い、検知前1秒を含む検知前後5秒間の振動データと画像（動画）を収録できるようにしている。

なお、システムⅠにはインターネットを通じて検知状況をメール送信する機能があるが、現場はネットワーク環境が整備されていないので、この機能が使えなかった。このため、システムⅠのメインユニットに別途データロガーを接続し、システムⅠの検知状況（時刻10分毎の検知回数）を現地で収録した。

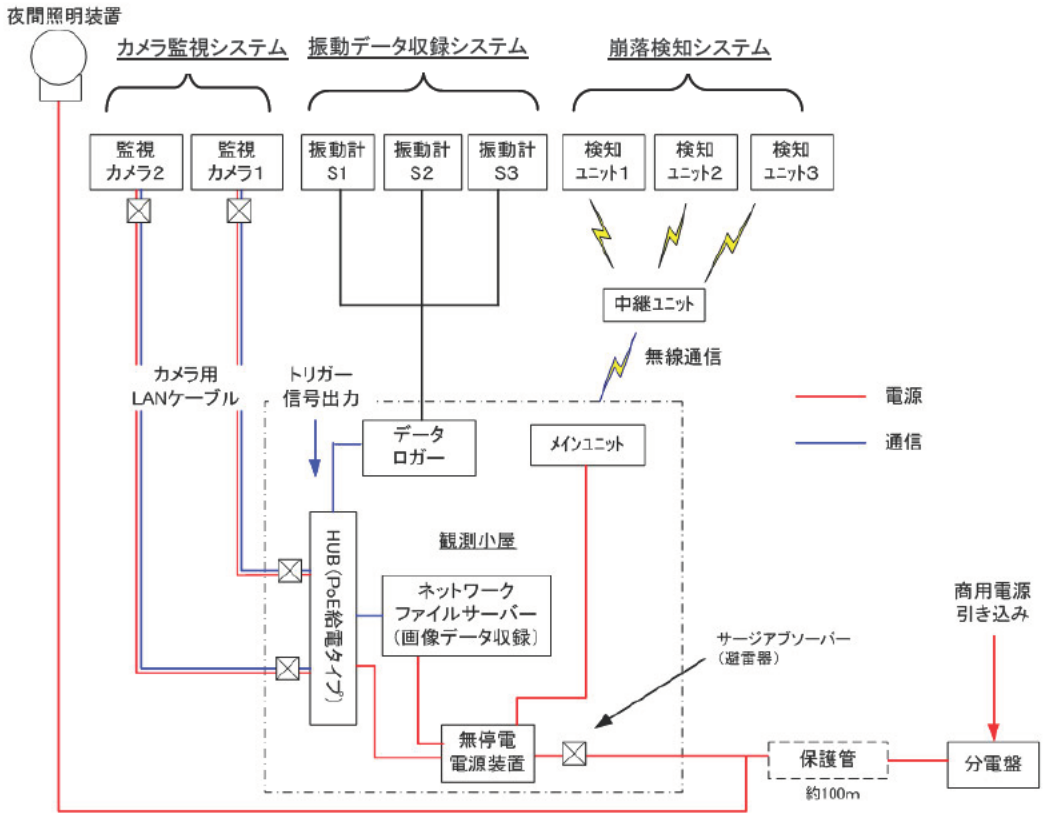


図 4.29 振動データ収録システムとカメラ監視システムを併設したシステムⅠブロック図

(2) 基礎実験

図4.30、31に示す振り子方式衝撃試験を行い、検知センサー（検知ユニット）と衝撃位置の間隔に応じた振幅の距離減衰について調べた。

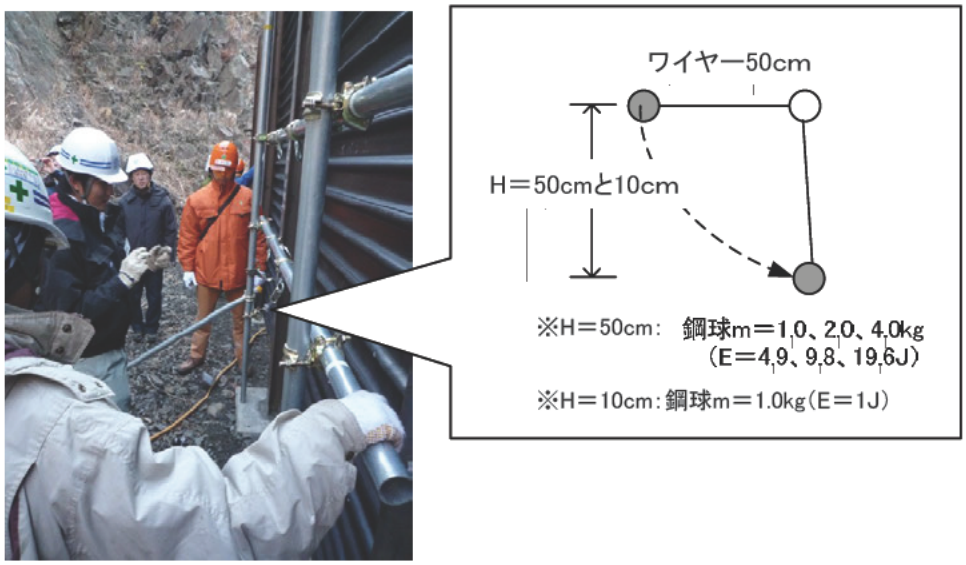


図 4.30 振り子方式衝撃試験の概要

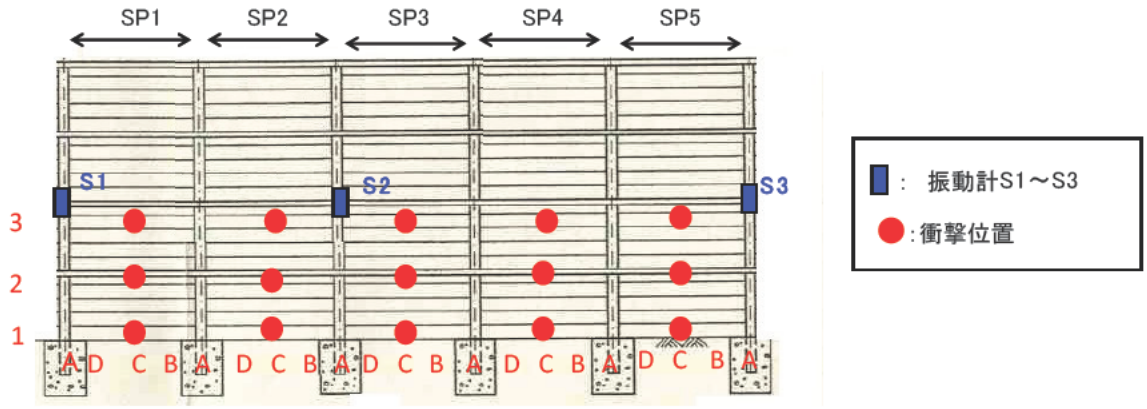


図 4.31　防護柵の衝撃位置

ここで、衝撃エネルギー（約 1J）は、φ5cm の石が数 10cm 程度の高さから転げ落ちた程度である。

衝撃位置と振動計（加速度計）の設置距離に応じた最大振幅の変化（距離減衰）との関係を調べるため、基礎実験を実施した。衝撃位置と最大振幅の関係を図 4.32 に示す。

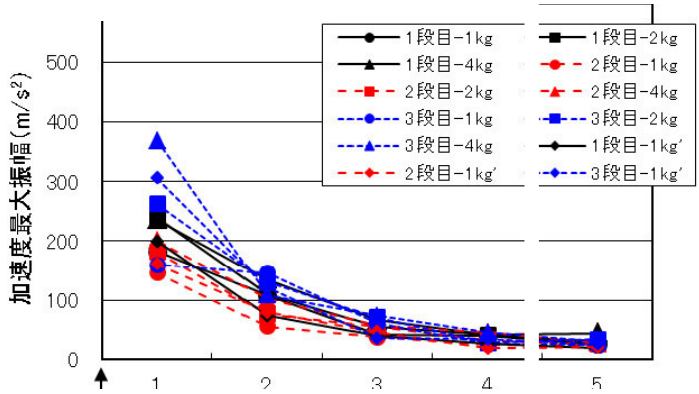
- 実験の結果、各衝撃位置による違いはあるが、1kg の鉄球の場合は、他の鉄球に比べて半分から 5 分の 1 程度の振幅になることが分かった。
- 1 kg の鉄球の場合の最大振幅は 3 スパン以上離れると 10～20m/sec^2 の値となった。

検知センサーの振幅レベルの設定下限値は0.05G＝0.49m/sec^{2}であることから、図4.32の関係を踏まえると3スパン以上離れてもφ5cm程度の落石の検知は可能と考えた。このため、検知センサーは5スパンの防護柵の両端に各1台、計2台設置することとした。

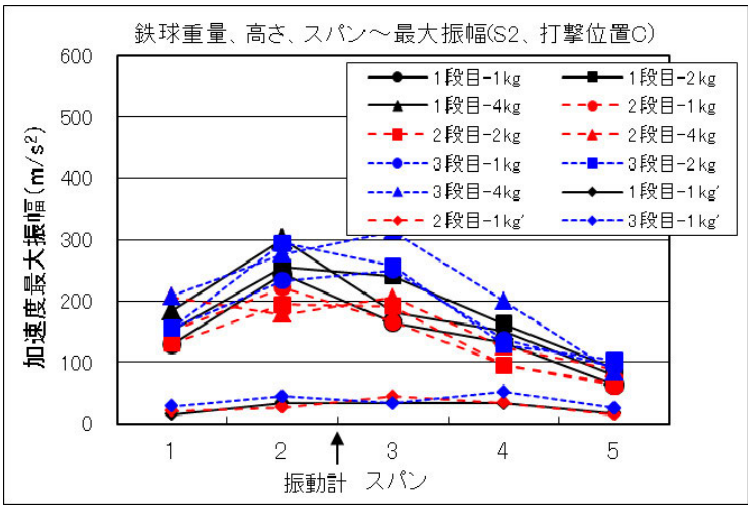
図4.33に示すように2台の検知センサーを配置して、1kgの鉄球を用いた検知確認試験を行ったが、全ての衝撃位置の振動を2台の検知センサーで検知できた。

一方、衝撃による防護柵の周波数特性については、図4.34

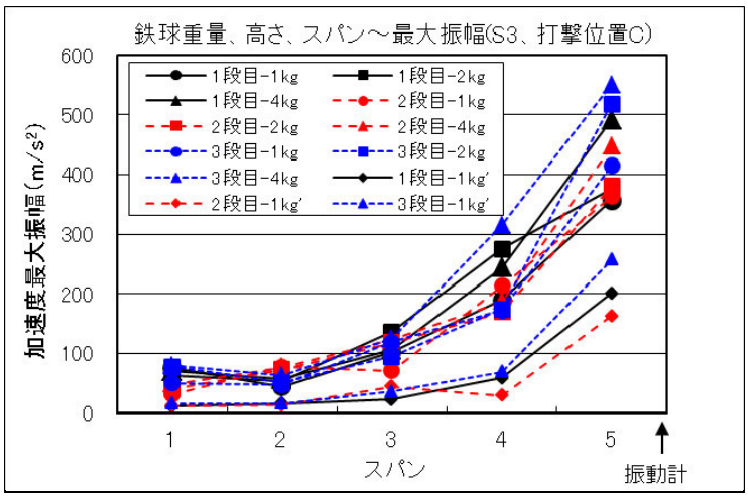
に示すとおり、ピーク周波数が180、270、400Hz 付近に確認できた。この結果を踏まえ、検知センサーのフィルタリング帯域を200～500Hz に設定した。



振動計S1



振動計S2



振動計S3

図 4.32　衝撃位置と最大振幅の関係について

（凡例で振り子重量1kg′ は図4.30の振り子落下高さ H=10cm 場合、それ以外は H＝50cm）

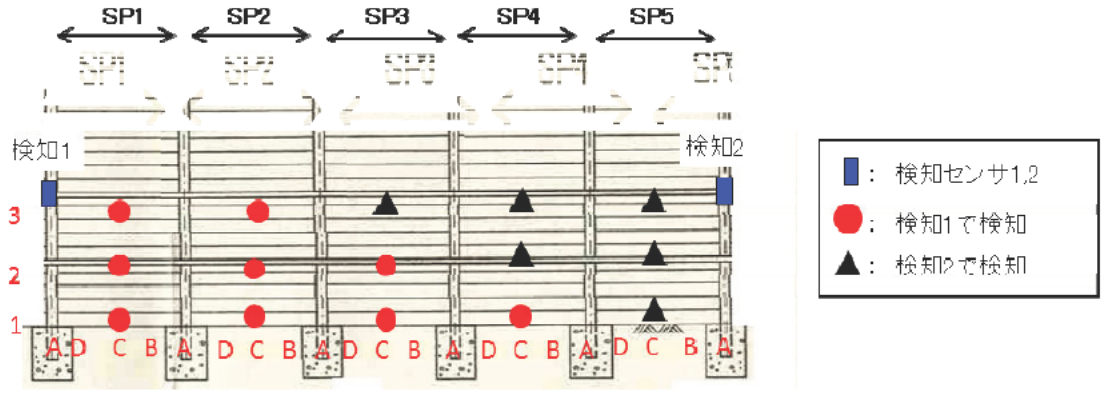
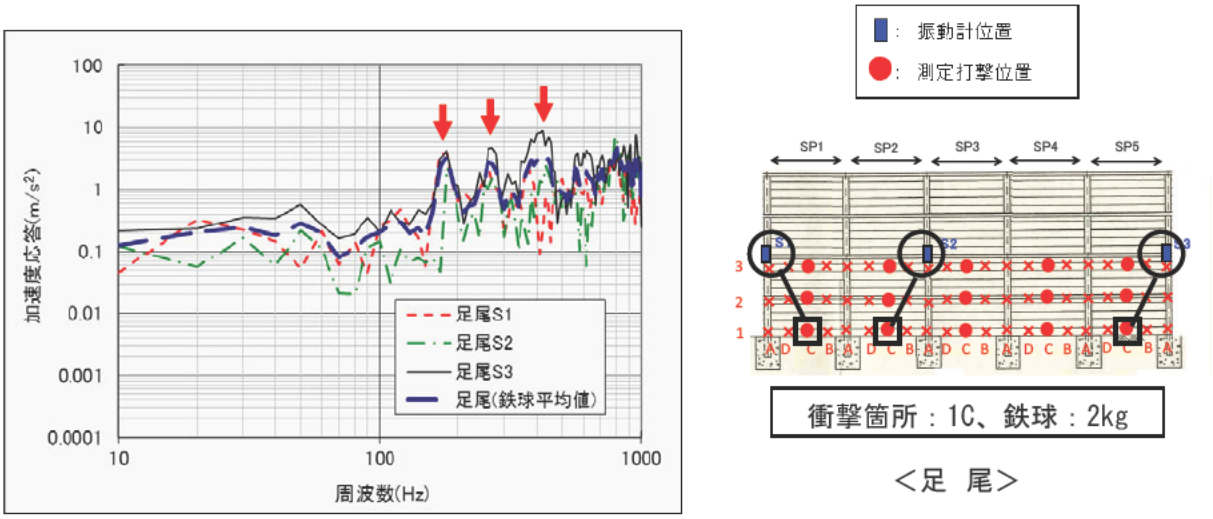


図 4.33　検知センサー2 台による検知確認試験結果



（右図□で囲んだ打撃箇所に対応する○で囲んだ振動計で測定したデータのスペクトルを左に図示）

図 4.34　基礎試験結果による仮設防護柵の加速度応答スペクトル

(3) 検知システムの検証結果

＜落石の発生傾向、予兆など＞

- 図 4.35 に検証期間中（平成 23 年 2 月末～4 月中旬）の検知状況の時系列データを示す。
- １日あたりの検知回数が多いのは強風があった 2 月 25 日（29 回）であった。なお、強風による検知は風による誤作動ではなく、飛び石の影響と推察する。
- 検証実験中、最も大きい落石・小崩落は 3 月 7 日の 2 回のイベント（14:31、15:12）であった。φ20～30cm（最大φ50cm）の落石が多数発生し、落石の直撃により防護柵の横矢板が変形した。ただし、このイベント発生の前には、落石の急増というような崩壊の予兆現象は確認できなかった。
- その他、期間中に発生した落石・小崩落イベントのうち、3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震を除き、地震や降雨に起因したイベントは認められなかった。

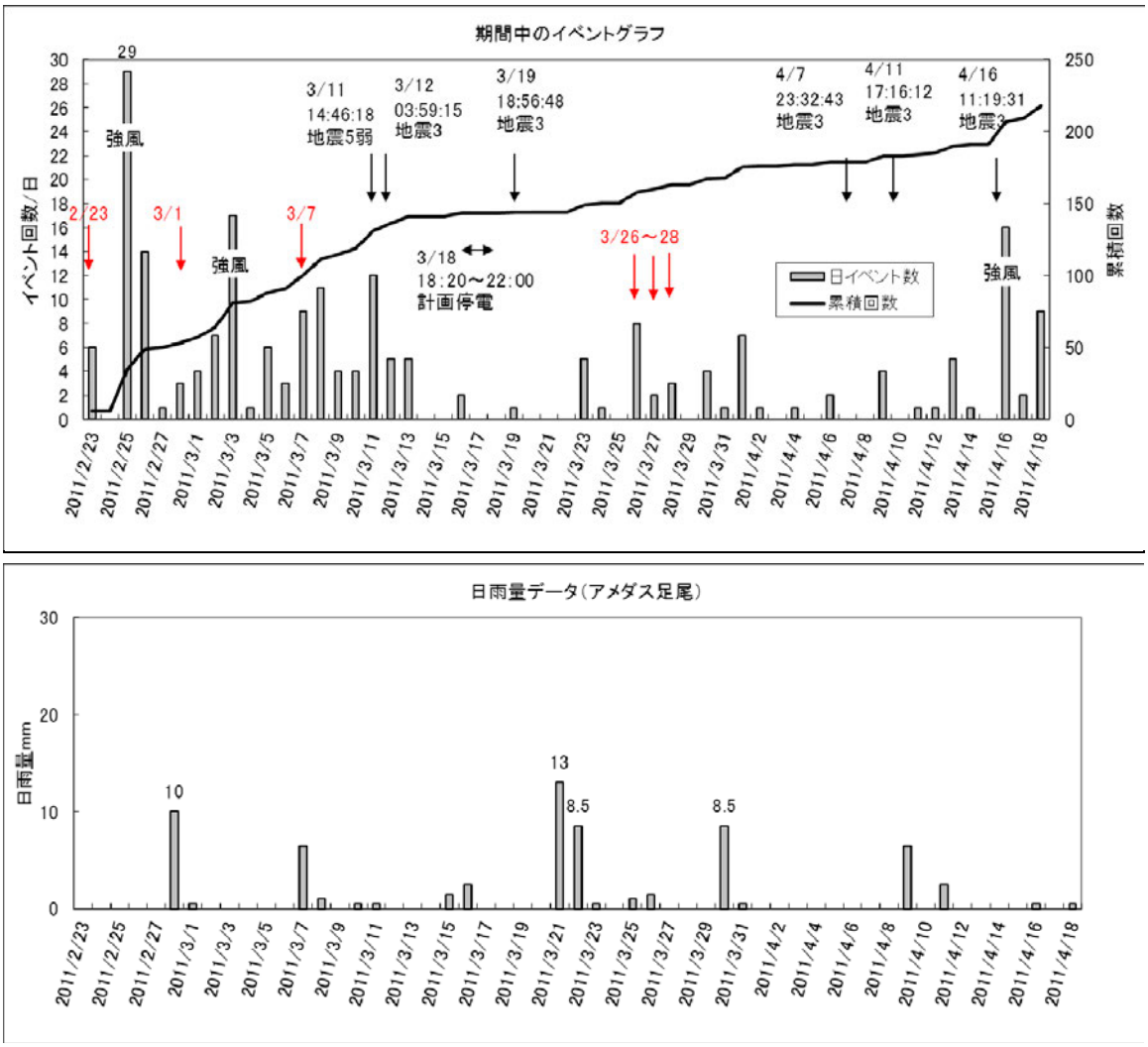
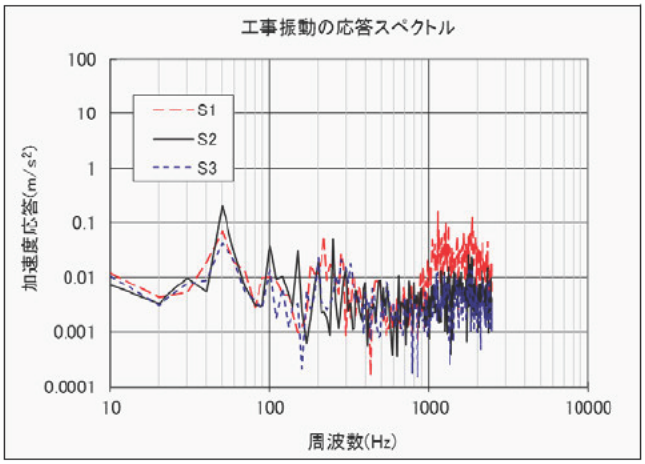


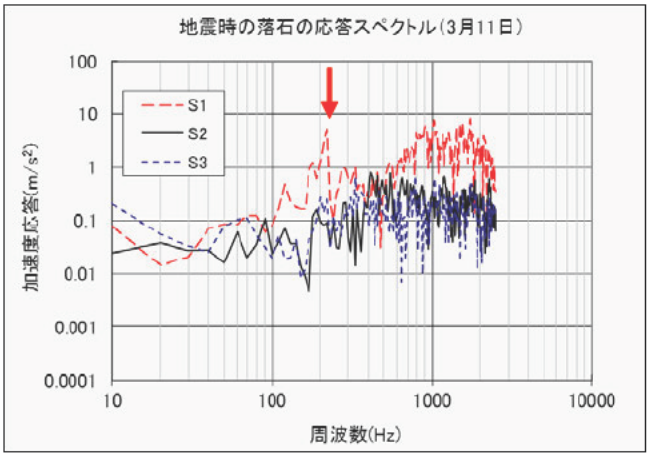
図 4.35　期間中の検知イベント状況と降雨状況

＜検知センサーの性能、信頼性など＞

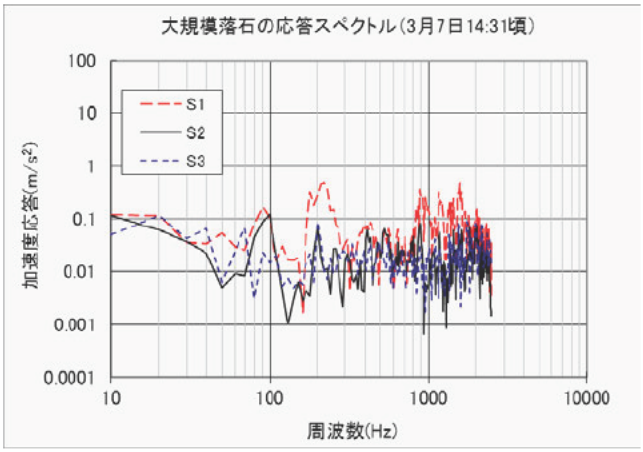
- 振動計（加速度型振動計）による振動データ収録システムの振動データやカメラ監視システムの画像データに基づき、システムⅠの検知状況を検証した結果、検知センサーの振幅レベルのしきい値を 0.05Gに設定することによって、φ5cm の比較的衝撃エネルギーの小さい落石が捉えられることが確認できた。また、延長 10mの仮設防護柵両側に設置した 2 台の検知センサーによって、10m内の小さな落石を検知できることが分かった。一連の検証結果により、落石に対する検知漏れはないと考える。
- しかし、落石判定レベルである振幅レベル値を 0.05Gとした場合、雨だれといった落石以外の微小ノイズによる誤作動が発生することが確認された。雨だれによる小さいノイズの分離は、10bit 程度の分解能のシステムⅠでは難しいといえる。このようなことから、振幅レベル値の設定は下限値である 0.05G以上の値とし、現地で想定される落石の大きさ、衝撃エネルギーを踏まえ設定する必要がある。
- 今回の検証期間中に仮設防護柵周辺の工事に伴う、バケット型掘削機の走行や掘削に伴う振動、工事用モノレールのエンジンや走行に伴う振動が発生したが、検知センサーで得られたデータを落石と分離することができなかった。図4.36に工事振動を含めた、代表的振動源に対応した加速度応答スペクトルを示す。工事振動は、落石衝撃による仮設防護柵の振動と同じ卓越周波数帯域にピークが出ている。このことから、工事振動が頻発する区域での振幅レベル値の設定には、現場で使用している重機の稼働状況を調べるとともに、崩落検知に対するノイズ源の可能性のある重機については、重機稼働時の仮設防護柵の振動を振動計により計測し、ノイズ源毎の仮設防護柵の振動特性を把握することが重要である。
- 検証期間中は氷点下の日が続き、バッテリーには過酷な環境であったが、検知センサーや中継ユニットのバッテリーは期間中切れることは無かった。また、検知センサーのポリカーボネート製ケースに外観上損傷は無く、内部への水の浸入も無かった。表3.2の仕様一覧に示すとおり、検知センサー（検知ユニット）の動作温度は-10～60℃、外装の固形物や水の侵入に関する保護等級は IP54（塵埃や任意方向からの散水に対する保護）であり、検知センサーは安定性や耐久性の面で実用レベルに達していると考えられる。
- 今回検証用としてカメラ監視システムを導入したが、写真4.1に示すように落石状況の画像を収録できた。今回の結果を踏まえると、現地にネットワーク環境が整っていれば、システムⅠとネットワーク対応型のカメラ監視システムの組み合わせることによって、落石状況を直接視認するといったニーズにも十分応えられるものといえる。



代表的な工事振動（工事用モノレールと重機）



3月11日の東北地方太平洋沖地震



3月7日14:31頃の落石

図 4.36　代表的な振動源の加速度応答スペクトル
（検証用振動計 S1～S3 による、図 4.31 参照）

時刻14:30:41

時刻14:30:42

（赤枠は崩落検知システムのトリガー信号により表示）

φ30大の落石が防護柵に直撃し、防護柵が下図のとおり変形した。

時刻14:30:43

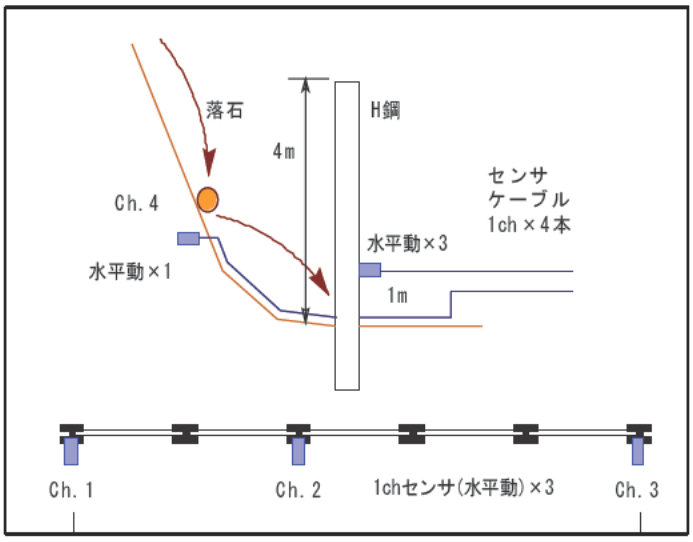
写真 4.1　カメラ監視システムが撮影した落石状況（3 月 7 日 14:30 過ぎの連続画像）

4.5.2 システムⅡ

(1) システム概要

3章3.3で紹介した速度型振動計のプロトタイプである速度型崩落検知システムを使用した。

- 振動センサーは図3.7に示す固有周波数14Hzの「速度型小型地震計」を4台使用し、各センサーは 図4.37 に示すように、仮設防護柵に3台のセンサーを設置し、また、防護柵に衝突しない小さな落石の検知のために、背後の岩盤に1台を設置した。
- しきい値（トリガーレベル）を超えた場合は、その時点から-1.4秒から+6.5秒までの8秒間の振動波形データをハードディスクに保存した。
- 3章3.3で紹介した波形の種別判定とバンドパスフィルター処理を実施した。具体的には、波形データに対して200Hz～600Hzのデジタルバンドパス・フィルター処理を行った後、各成分の最大振幅値、卓越周波数、振動継続時間を自動抽出すると共に，これらの各パラメーターから波形の種別を判別して、別途ファイルに保存した。



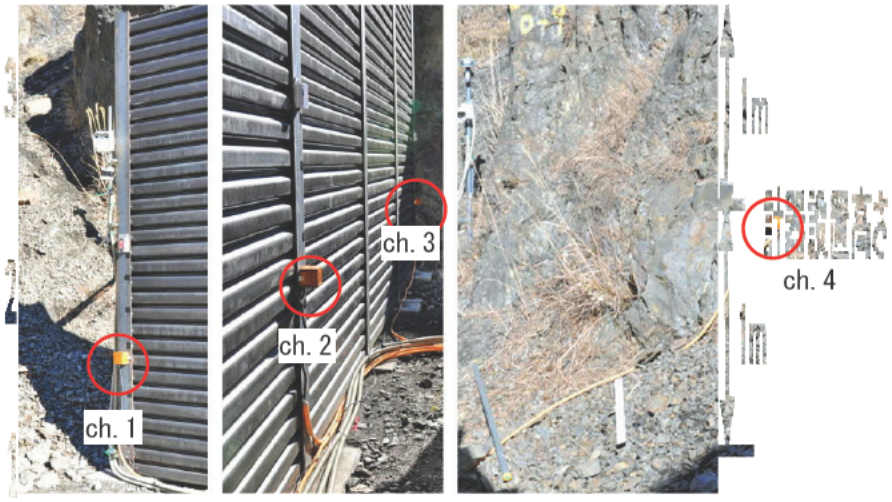
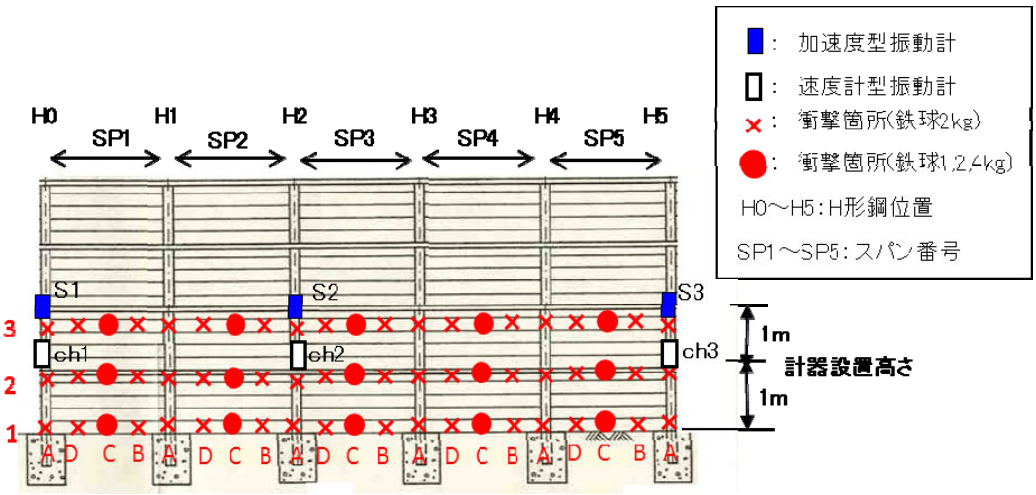


図 4.37 崩落検知センサー（速度型小型地震計）の設置状況

・振動継続時間で 0.1 秒以下の波形については「空電ノイズ」とした。
・システムⅡの代替機である速度型落石検知システムには、インターネットを通じて検知状況をメール送信する機能があるが、現場はネットワーク環境がないので、この機能は使用できなかった。

（2）基礎実験（概要）

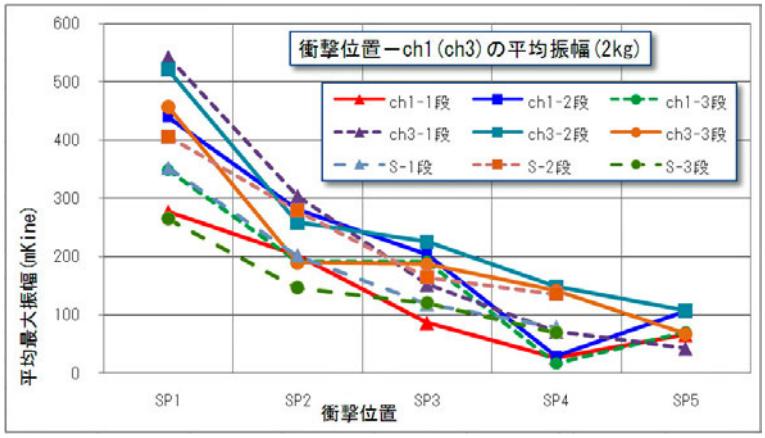
図4.30及び図4.38に示す振り子方式衝撃試験を行い、振動センサー（速度型小型地震計）と衝撃位置の間隔に応じた振幅の距離減衰や周波数特性について調べた。



（高さ位置　1:横矢板 1 段目、2:横矢板 3 段目、3:横矢板 5 段目）

図 4. 38 鉄球衝撃位置図

図4.39 は、前年度の基礎実験で対象とした相模原市内の仮設防護柵（鋼製横矢板）と、今回足尾で実施した基礎実験における減衰特性を比較した結果である。

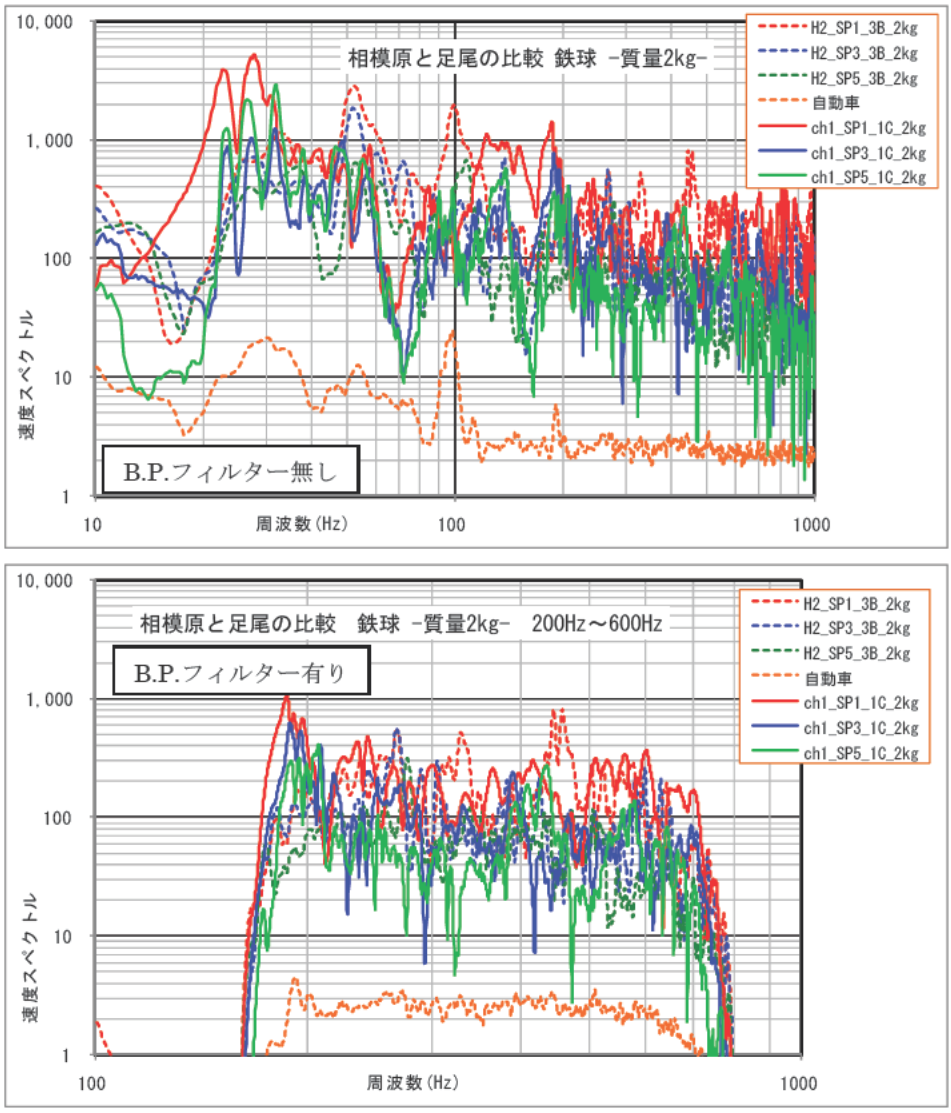


S-1段～S-3段：相模原の結果。 ch1-1（ch3-1）段～ch1-3（ch3-3）段：足尾の結果
いずれも鉄球は2kg。 グラフ作成上、足尾のch3ではSP1～SP5の関係は逆とした

図4. 39　相模原仮設防護柵と足尾仮設防護柵の減衰特性の比較

足尾の「ch1のSP4」を除けば、相模原に設置された鋼製横矢板と足尾の鋼製横矢板の減衰特性に大きな違いがないことが確認された。これにより、4スパン程度離れた位置の落石を検知できる確証を得た。

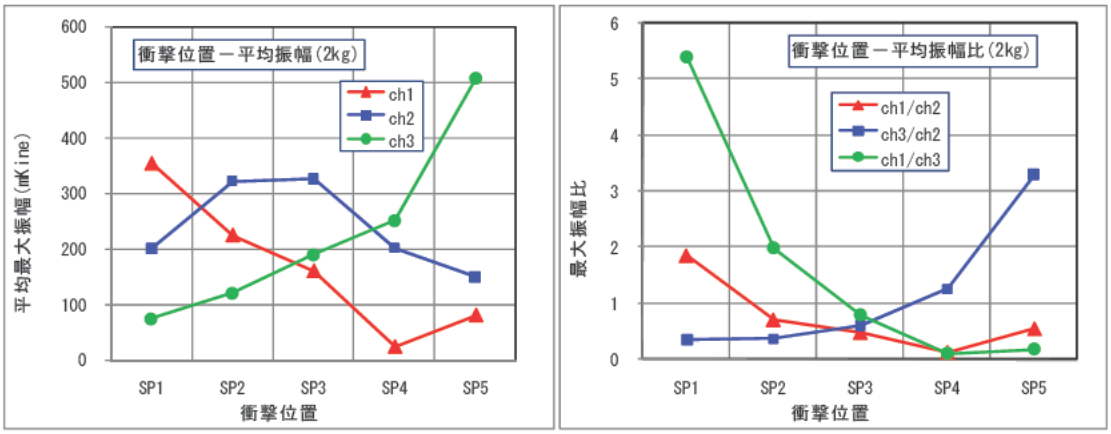
図4.40 は、前年度の基礎実験を実施した相模原市内の仮設防護柵（鋼製横矢板）と、今回足尾で実施した基礎実験における速度スペクトルを比較した結果である。両者とも200Hz～600Hzの範囲において、自動車の走行振動に比べて10倍程度大きな振幅を示しており、これにより上記の周波数帯を長期検証実験で採用することにした。



H2_SP1～SP5：相模原（鉄球2kg）。 自動車：相模原のみ

図4.40 相模原仮設防護柵と足尾仮設防護柵の速度スペクトルの比較

図4.41 は、質量2kgの鉄球の衝撃位置（スパン）と最大速度振幅（平均値）及び、その振幅比の関係である。



平均最大振幅の値は同一スパンの鋼製横矢板内の B（斜面側に向かって左端部）、C（同中央部）と D（同右端部）各箇所での衝撃の測定結果の平均値を採用

図4.41　鉄球の衝撃位置（スパン）と最大振幅（平均値）の関係

図4.41（左）は、2kg による衝撃振動を各センサーで検出した最大振幅値の平均値を使用して求めた「平均振幅比」であって、図4.41(右)は、平均振幅を利用して「ch1/ch2」、「ch3/ch2」及び「ch1/ch3」を計算した結果である。このような平均振幅比計算（＝正規化処理）をしたことにより、落石の規模による振幅の変化に余り影響を受けずに、その衝突位置を推定できる可能性があると考えた。

（3）検証実験

検証実験は、平成 22 年 12 月 8 日～平成 23 年 4 月 22 日に実施した。しかし、原因不明の停電により、平成 23 年 1 月 12 日～2 月 22 日 の間は崩落検知システムが停止したことに加え、3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震の影響で、その後計画停電が実施されたため、検知結果にこれらの停電期間は含まれていない。

また、崩落検知システムは 4 月 11 日の夕刻から停止していたが、この原因は部品の故障であった。

＜崩落検知パラメーター＞

検証実験では、表4.6 に示す波形処理を行って空電ノイズ（例：図4.42）を除去した。

表 4.6 波形処理パラメーター

種 類	概　略　仕　様		備　　考
周波数帯	ローカット	200Hz（カットオフ：160Hz）	デジタルフィルター
	ハイカット	600Hz（カットオフ：800Hz）	デジタルフィルター
抽出条件	継続時間	0.1秒以上の波形のみ	0.1秒以下はノイズ

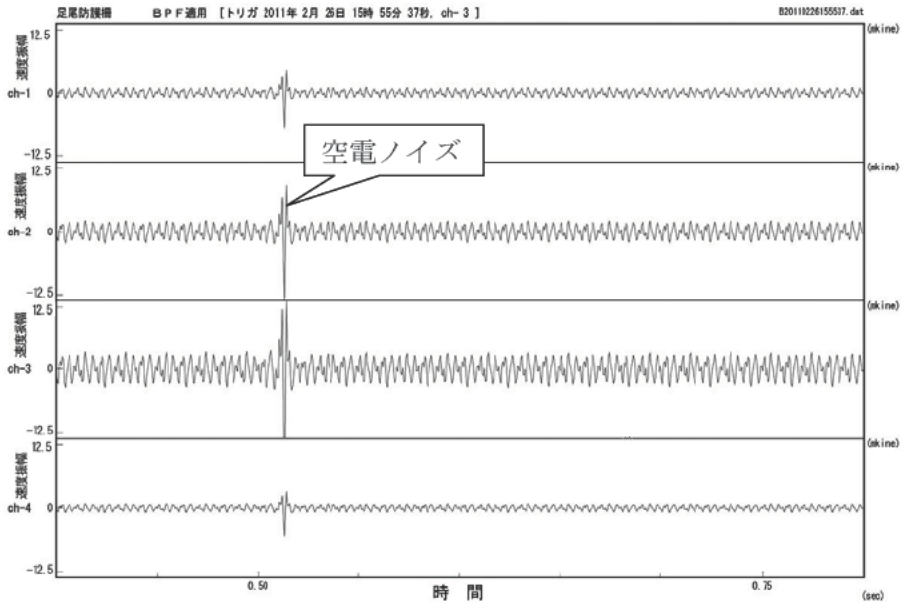


図 4.42 空電ノイズ波形（例）

・一般的に、空電ノイズは高い周波数成分を持つ単発パルス状であって、全成分に同時に混入することが多い。

・図4.42の波形はHDDに保存されているが、波形処理により空電ノイズに自動分類した。

＜主な落石波形と周波数特性＞

① 2010/12/22 18:54:51に発生した落石波形

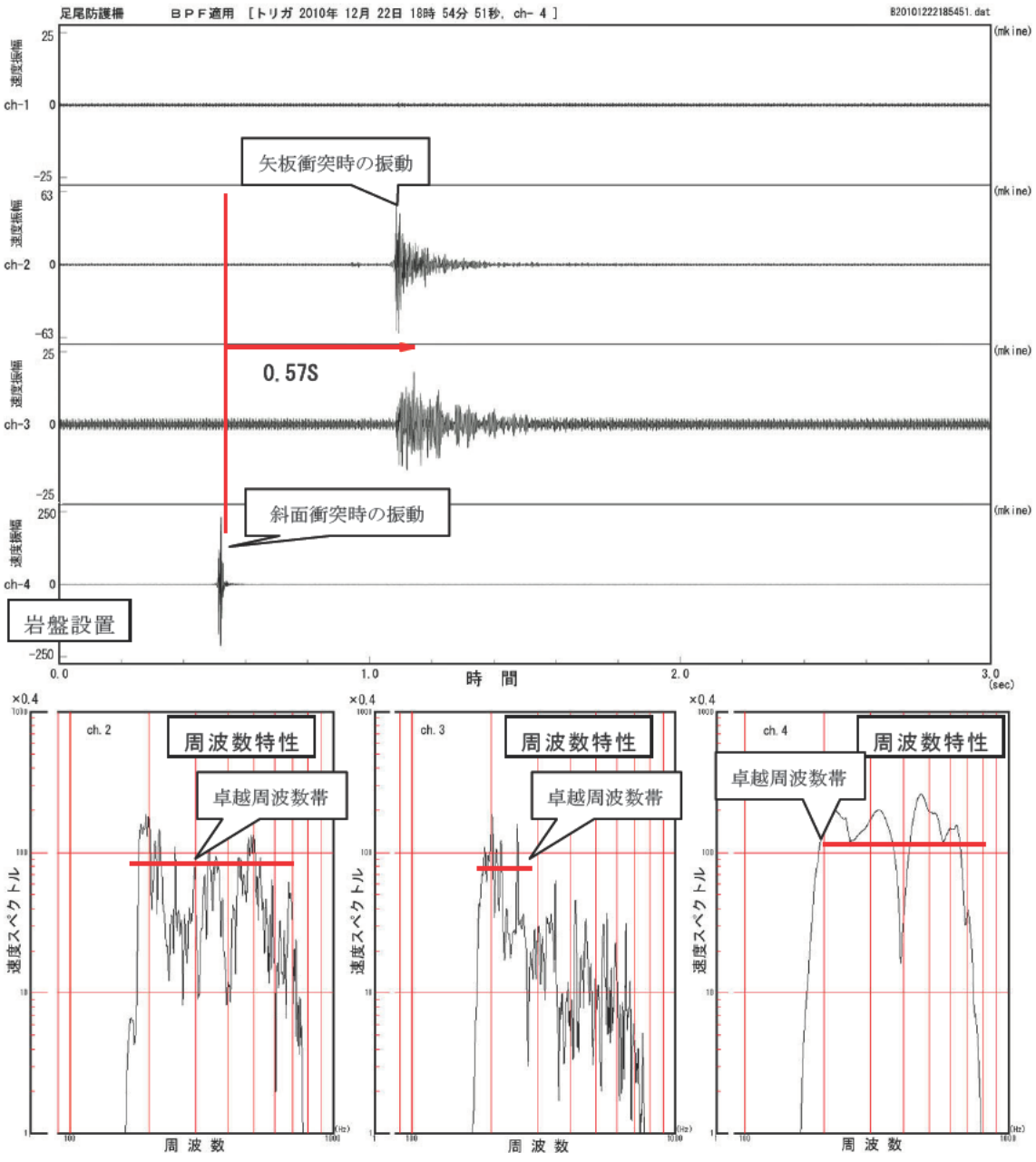


図 4.43 主な落石波形（2010/12/22 18:54:51）

・岩盤に設置した ch.4 の近傍でバウンドした後、SP3 に衝突したと推定される落石の波形である（推定方法は図 4.39 による）。

・防護柵の ch.2 では、概ね 200Hz 前後と 500Hz 付近にピークが存在する。

・ch.3 では、250Hz より高い周波数帯域の振幅値は急速に低下する傾向がある。

・岩盤に設置した ch.4 は、200Hz～600Hz 間でほぼ同一の振幅である。

② 2010/12/27 12:36:25に発生した落石波形

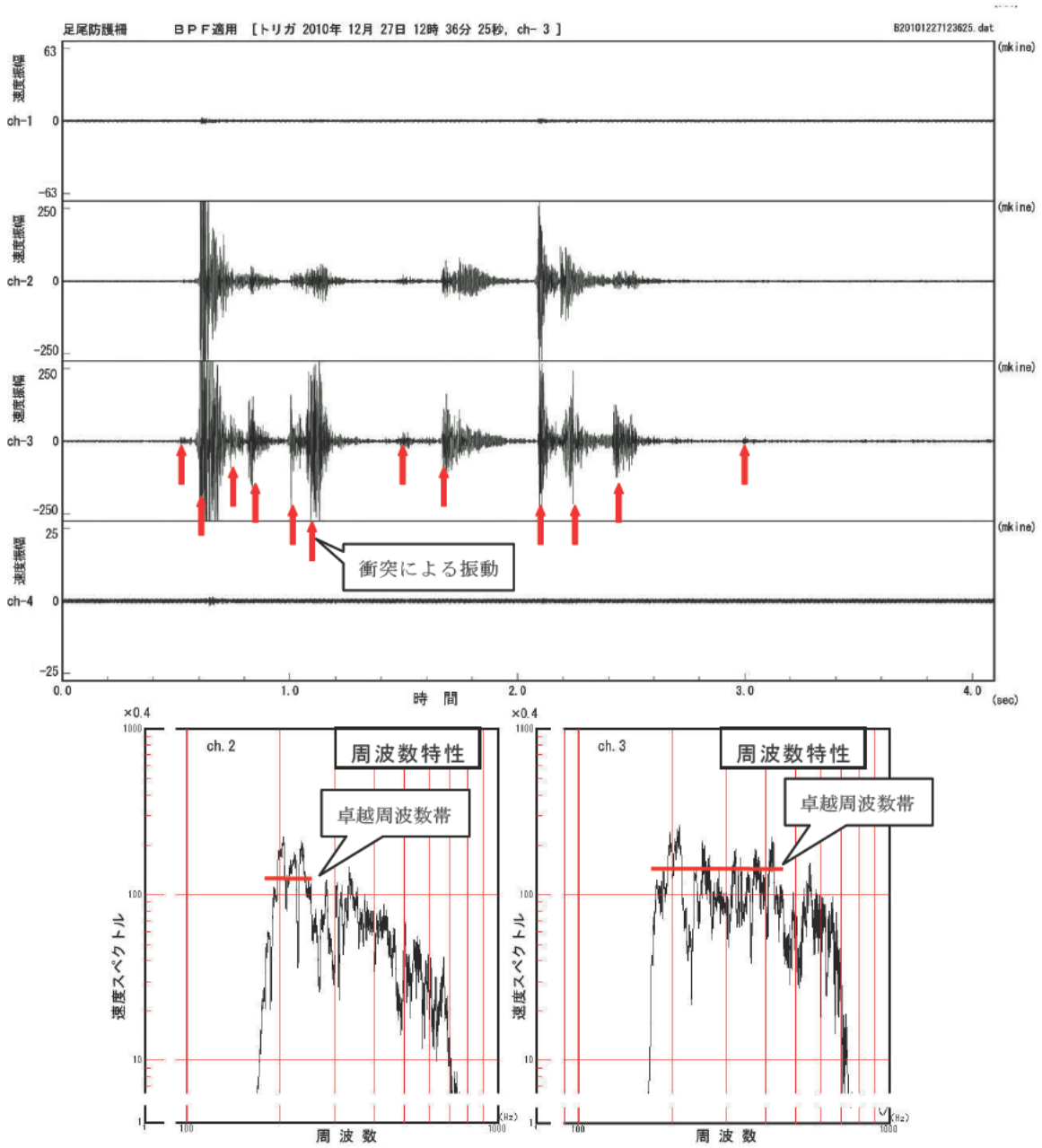


図 4.44 主な落石波形（2010/12/27 12:36:25）

・大小取り混ぜて 10 個～12 個の落石が衝突している。

・図4.39に図示した方法により、衝突位置は SP5と推定した。

・波形から、各個別の落石を分離するにはかなり高度な波形処理が必要である。

・防護柵の ch.2 では、概ね 200Hz～250Hz にピークが存在し、ch.3 では、200Hz～400Hz の帯域でほぼ同程度のピークが連続している。

・ch.2 では，350Hz より高い周波数帯域の振幅値は急速に低下する傾向がある。

③ 2011/03/07 14:31:46 に発生した巨大落石の波形＞

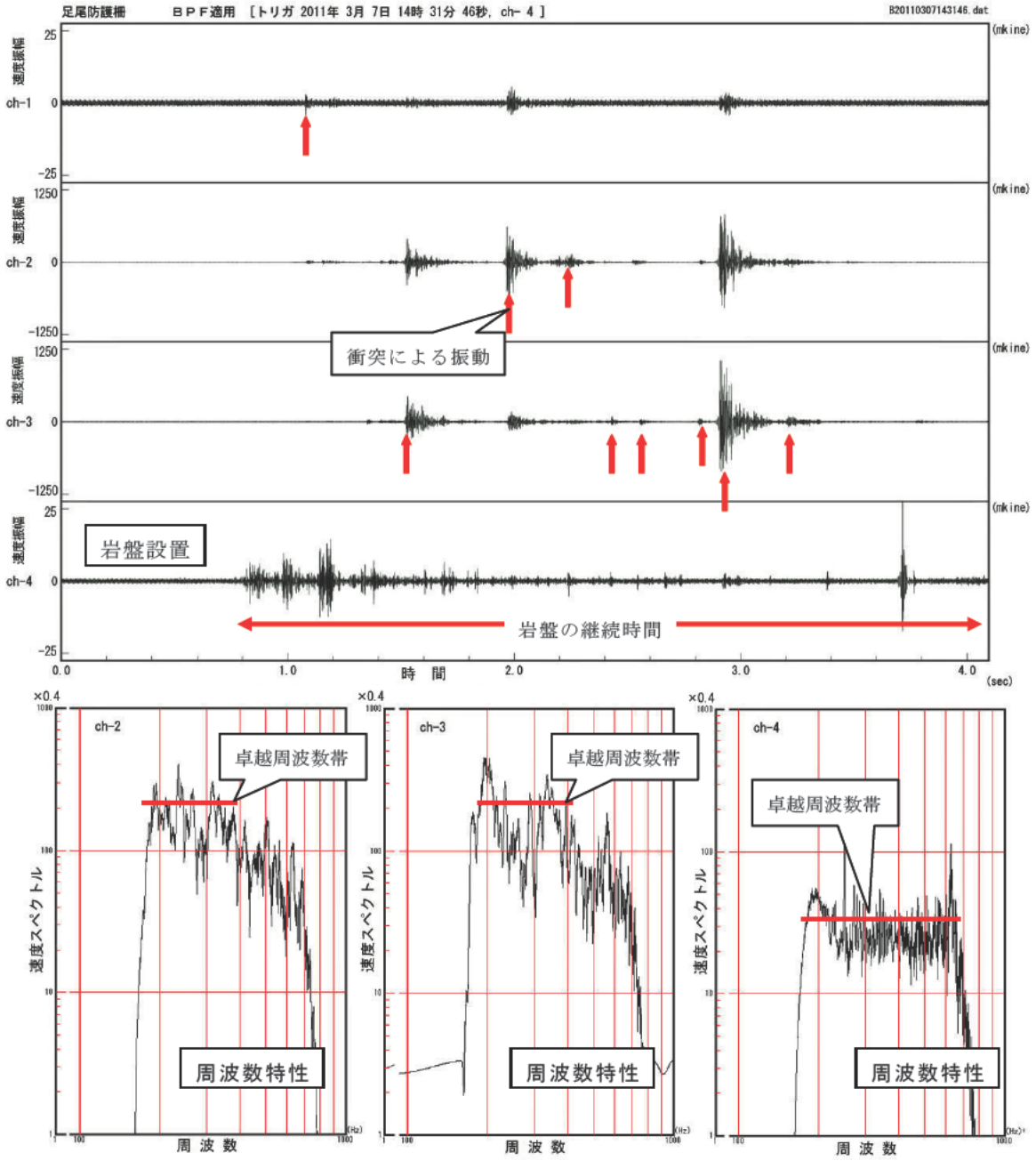


図 4.45 主な落石波形（2011/03/07 14:31:46）

・大小取り混ぜて 5 個～10 個の落石が衝突している。

・岩盤（ch-4）における波形の継続時間が長いことから、崩落した岩塊は土砂状あるいは連続して滑り落ちていることを示唆している。

・図4.41に図示した方法により、衝突位置は SP3と推定した。

・岩盤の ch.4 では、200Hz～600Hz の帯域でほぼ同じ程度の値を示しているが、防護柵の ch.2 と ch.3 は共に，200Hz～350Hz にピークが存在する。

④ 2011/03/07 15:12:16 に発生した巨大落石の波形＞

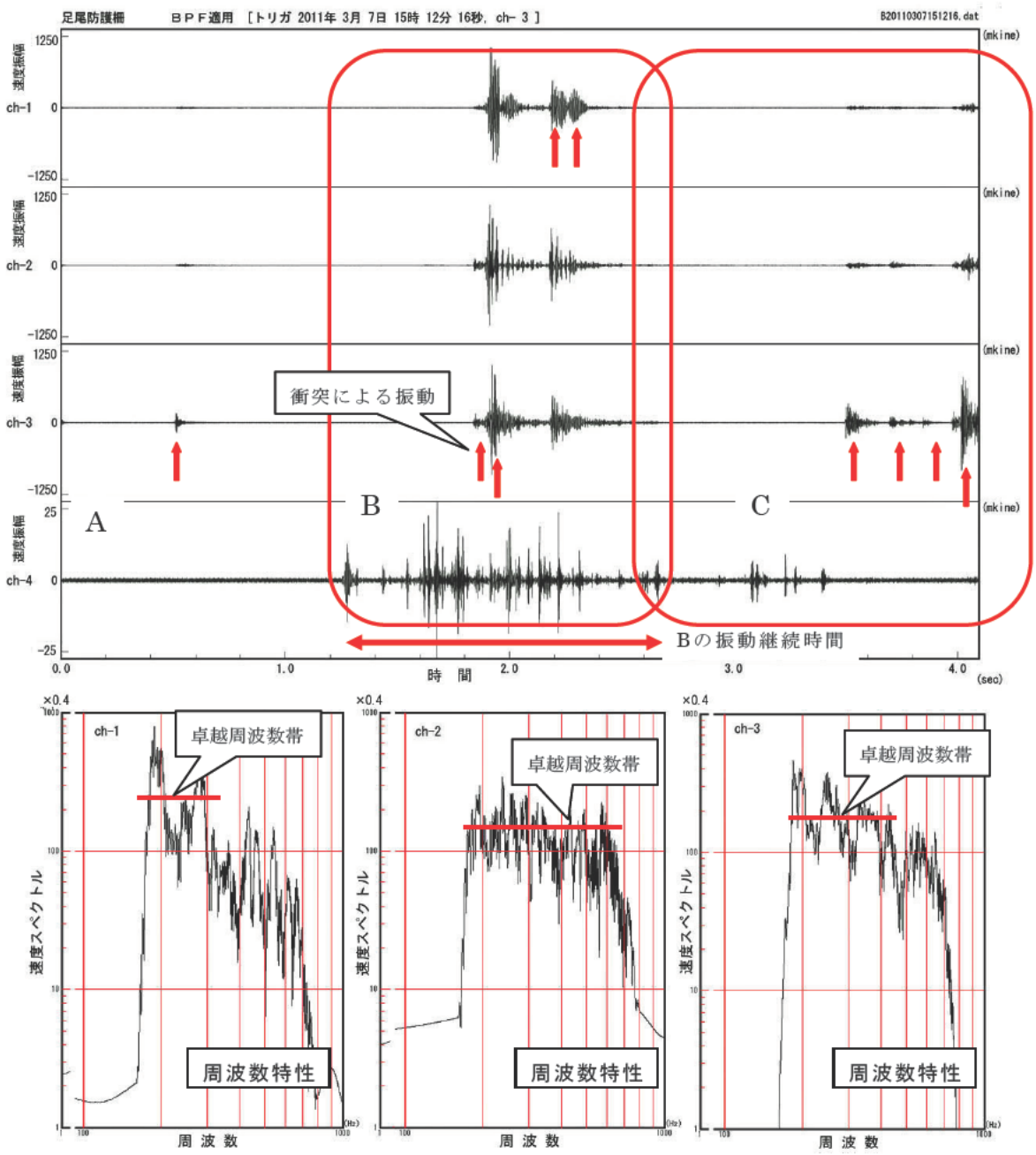


図 4.46 主な落石波形（2011/03/07 15:12:16）

・観測期間中最も大きな振幅値を示した落石である。

・岩盤(ch-4)と防護柵(ch-1～3)の波形から、落石は 3 つの群（A，B，C）から成り立っていたと推定される。このうち，A は相対的に小さな岩塊である。

・図4.41に示した方法により、衝突位置は SP3と推定した。

・ch.2 では、200Hz～600Hz の帯域でほぼ同じ程度の値であるが、ch.1 のピークは概ね 180Hz～200Hz、ch.3 では概ね 180Hz～350Hz がピークである。

⑤ 東北地方太平洋沖地震時に発生した落石波形＞

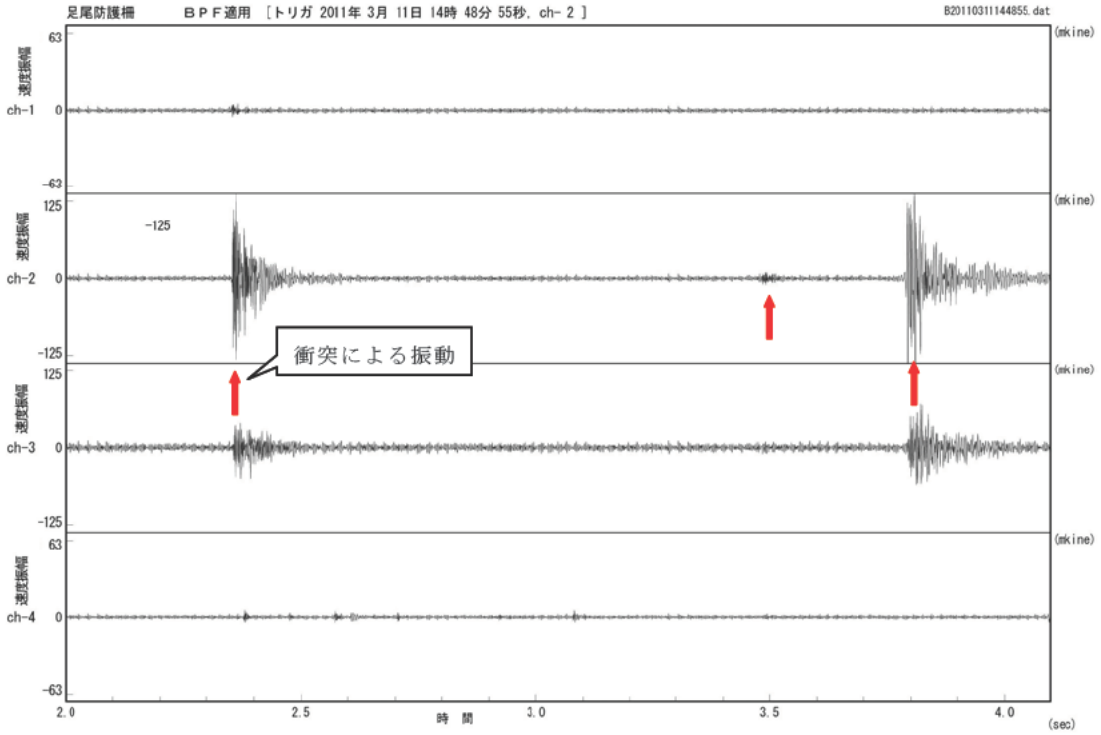


図 4.47 東北地方太平洋沖地震時に発生した落石波形（2011/03/11 14:48:55）

・検知システムの時計は必ずしも正確ではないが、東北地方太平洋沖地震の発生直後に落石を 5 回検知した

主な落石の周波数特性から、以下のような傾向が明らかとなった。

仮設防護柵に設置した地震計で観測した落石振動の周波数は、落石によってある程度のバラツキが存在するものの、概ね 180Hz～350Hz にピークが 1 つあるいは複数存在するため、この周波数帯を使用するならば「確実に落石による衝突振動を検知できる」ことが確認された。

＜検証期間における落石イベント＞

表4.7は、システムⅡによる落石イベント数である。

表4.7 システムⅡによる落石イベント数

センサー	検知数	鋼矢板
ch1	2	119
ch2	69	
ch3	48	
ch4	16	ー
合 計	135	119

＜鋼製横矢板で検知した落石振動の傾向（周波数）＞

図4.48 は、鋼製横矢板で検知した全ての落石振動の卓越周波数の分布状況である。

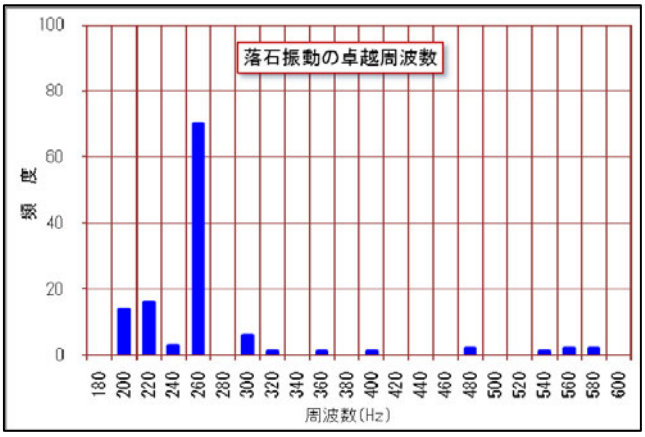


図 4.48 鋼製横矢板で検知した落石振動の卓越周波数

・最も多く検出した卓越周波数は 260Hz 帯であり、検知総数 119 波形に対する比率は 59%であった。次いで，220Hz 帯及び 200Hz 帯が多くそれぞれの比率は 13%と 12%であった。

・数%の 240Hz 帯を加えると、200Hz 以上 300Hz 未満の卓越周波数の比率は 85%以上となって、検出した落石振動の大半を占めていることから、検知センサーとして採用する周波数帯を、200Hz～400Hz ないしは 200Hz～500Hz に限定できる可能性がある。

＜鋼製横矢板で検知した落石振動の傾向（振幅値）＞

足尾の鋼製横矢板で検知した落石振動で、各振動の最大振幅のうち最も小さな値は約4mKine であり、最も大きな値は約1,420mKine（1.4Kine）であった。図4.49 は、これらの最大振幅値を使用して求めた「最大振幅値－累積頻度曲線」である。なお、最大振幅値については、対数グラフ上で整数となるようにクラス分けを行っている。

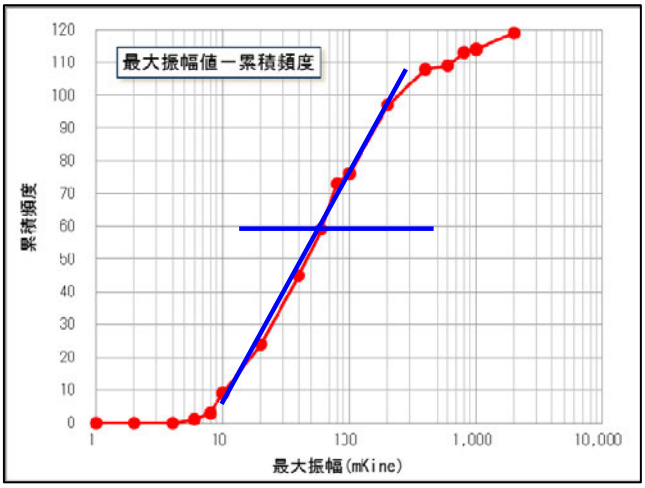


図 4.49 最大速度振幅と検知した累積頻度の関係

・累積頻度の中央値は約 60mKine であった。
・速度振幅値で 10mKine から 200mKine の間では、最大振幅の対数と検知個数の間にほぼ直線の関係が存在するようである。

＜鋼製横矢板で検知した落石振動の傾向（振動エネルギー）＞

「最大振幅×継続時間」で計算される値を振動エネルギー（E）と定義づけ、鋼製横矢板で検出された崩落振動の振動エネルギーと累積頻度の関係を図4.50 に示す。

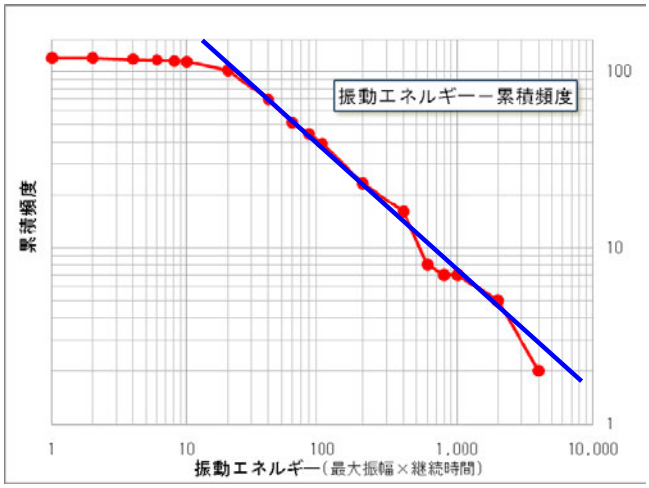


図 4.50 鋼製横矢板で検知した落石の振動エネルギーと検知累積頻度の関係

・振動エネルギーの 20～4,000 の間では、ほぼ直線的な関係が得られている。
・振動エネルギーが 4,000 を超える落石の検知数が少なくなっているが、これは、観測期間が短いために発生（検知）に至っておらず、今後観測を続けることによって大きな崩落による振動が検知される可能性が考えられる。
・振動エネルギーが 20 より低い落石は、発生個数が極めて多いことが予想されるが、「仮設防護柵まで届かない」あるいは「発生する振動の大きさがノイズ以下である」のいずれかであると考えられる。

＜落石イベントの時間的変化＞

図4.51と図4.52は、1時間ごとに集計した全ての落石頻度と累積数のグラフである。

原因不明の停電とシステム停止のため、平成23年1月12日～2月22日の間と、4月11日以降は落石イベントデータが無いので、グラフはこの間を除いた2つに区分してある。

なお、参考のためアメダス足尾での時間雨量も併記した。

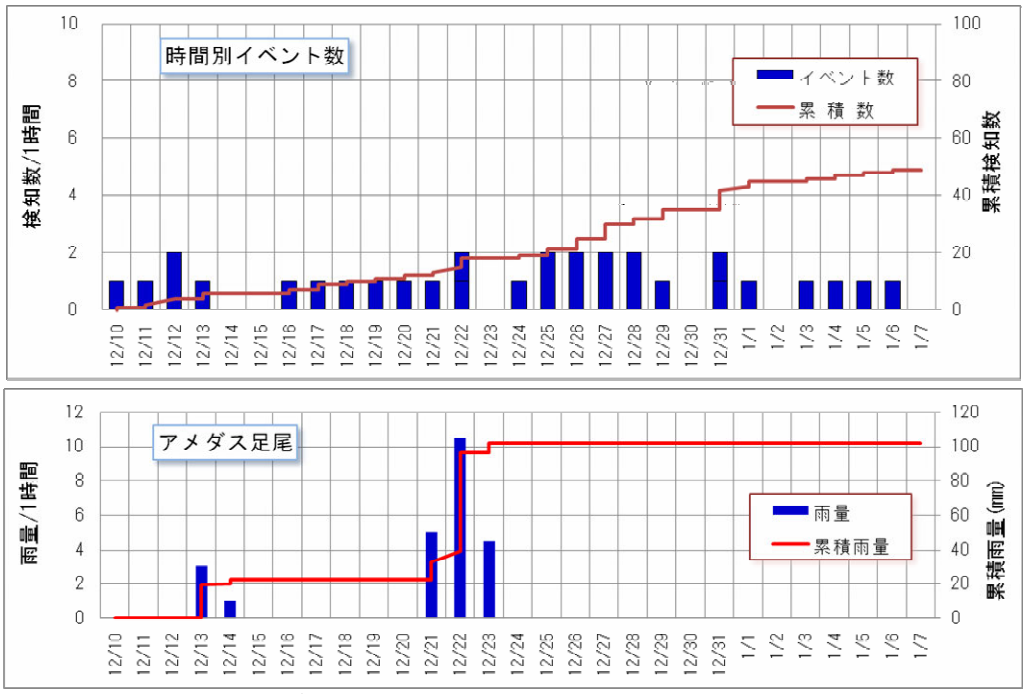


図 4.51 1時間ごとに集計した落石の頻度と累積数（12/10～1/7）

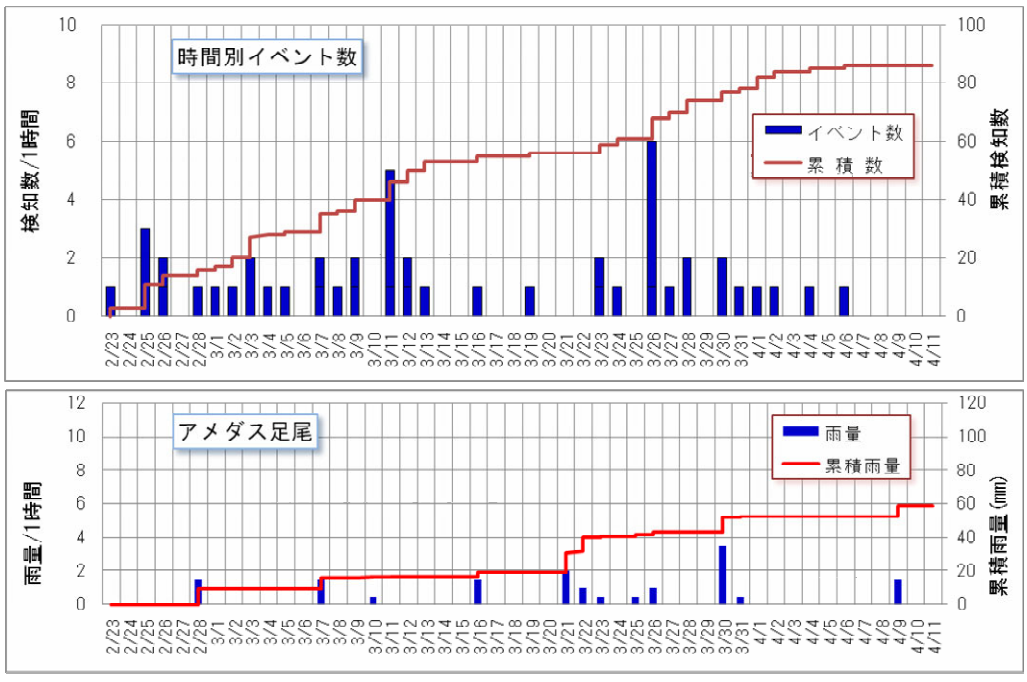


図 4.52 1時間ごとに集計した落石の頻度と累積数（2/23～4/11）

・4 月 7 日から 11 日の午後に崩落検知システムが停止するまでの間、空電やその他のノイズは検知したが、落石によるイベントは検知しなかった。
・3 月 26 日に 1 時間に 6 個の落石を検知したが、雨量はわずかであって両者に明瞭な関係は見られなかった。
・雨量に影響を受けたと思われるものは 12 月 22 日である。ただし、時間当たりの検知数（イベント数）は 2 個であるが、この 2 個という値は他の時間帯にも数多く存在するため、確実に雨の影響とは断定できない。
・3 月 11 日の時間別検知数が多いのは、東北地方太平洋沖地震による揺れの影響である。

＜落石振動エネルギーの時間的変化＞

図4.53 は、1時間ごとに集計した全ての落石の振動エネルギーと累積値のグラフである。

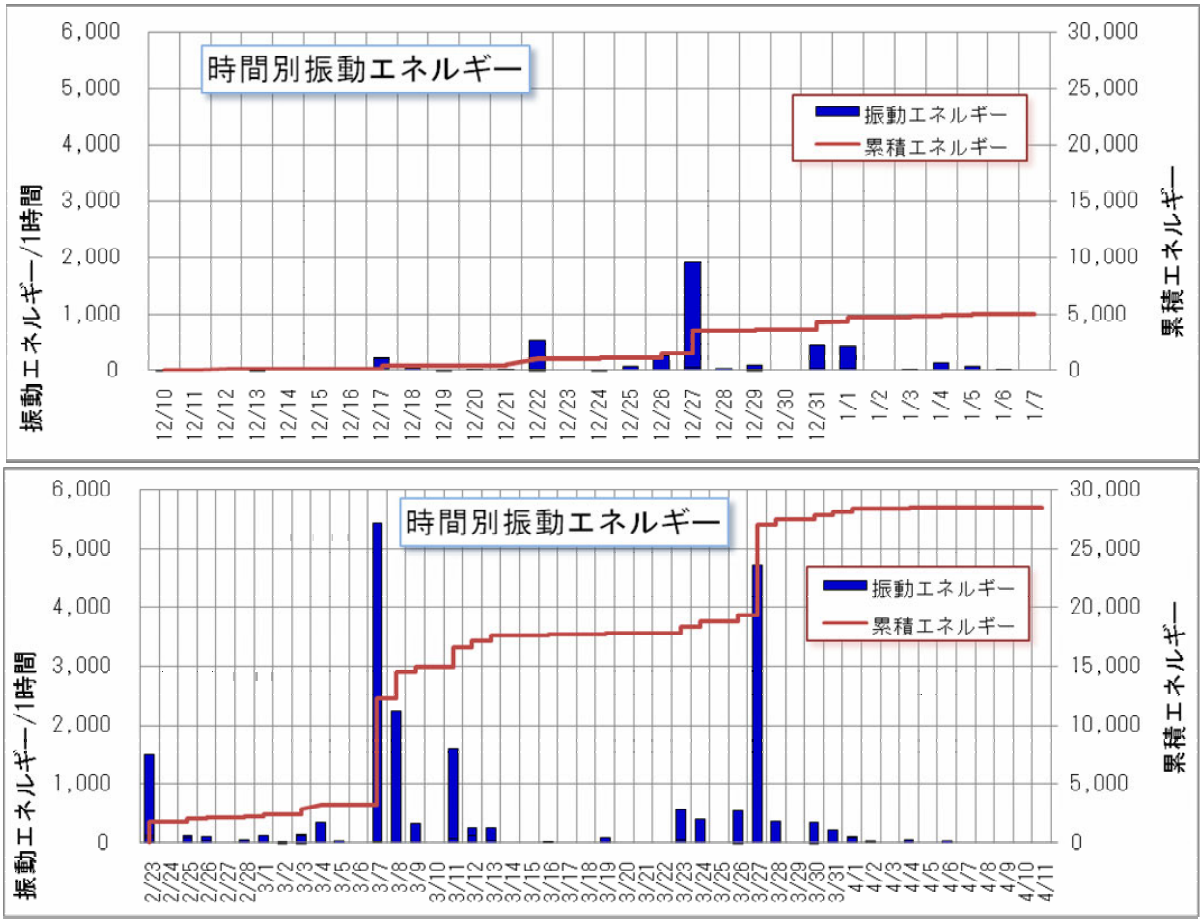


図 4.53 1 時間ごとに集計した落石振動エネルギー

・時間別に集計した落石イベントのグラフ（図4.53 上段）は、落石発生（検知）数のみであるが、振動エネルギーのグラフ（図4.53　下段）では、ある程度落石の規模が反映されているようである。

・観測期間中最も振動エネルギーが大きい落石は、3 月 7 日と 3 月 27 日に発生し、次いで 12 月 27 日に発生した。
・3 月 7 日の場合、アメダス足尾では 6mm の雨量を観測しているが、雨量の値から見てその影響であるか偶然であるかは判然としない。

＜落石の推定衝突位置＞

事前基礎実験で実施した振り子方式衝撃実験で求めた「衝撃位置－平均速度振幅比」のグラフを使用して、落石が衝突した鋼製横矢板を推定した。結果を図4.54に示す。

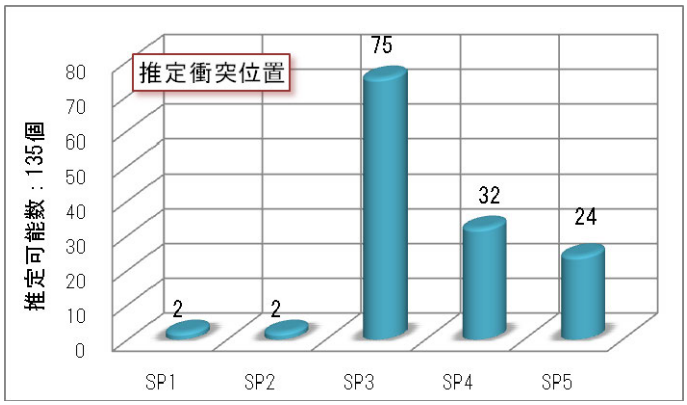


図 4.54 落石の推定位置

・圧倒的に SP3 が多く、次いで SP4 と SP5 が多い結果が得られた。
・SP3～SP4 における推定衝突位置は、監視カメラで確認された衝突位置とほぼ同じ結果が得られたが、SP1 と SP2 での推定衝突位置は異なっていた。これは、システムⅡの検知レベル（トリガーレベル）が、システムⅠのそれよりも相対的に大きく設定されていたため、SP1 と SP2 に衝突した落石を検知しなかったものと考えている（システムⅠのイベント数は 200 を遙かに超えている）。

＜落石の推定衝突位置の検証＞

表4.8に示す落石の推定位置の精度は、監視カメラによって確認された鋼製横矢板の位置を元にして算出した結果であって、1スパン離れている場合は「△」、2スパン以上離れている場合は「×」とし、それ以外は「○」とした。

表 4.8 落石の推定位置精度

種　類	個　数	比　率	平均振幅	備　考
○	39	72.2%	255.3	
△	11	20.4%	90.3	隣のスパン
×	4	7.4%	56.3	2スパン離れ
合　計	54	100.0%	（mKine）	

平均振幅とは各最大振幅値を平均した結果

・精度の計算に使用した検知数が少ないのは、同時に監視カメラで確認できた数が少なかったためである。
・1 スパンの誤差を許すならば 90%以上の正答が得られている。
・精度と平均振幅値には明瞭な相関があり、精度良く位置を推定できる落石にはある規模（大きさ：質量）以上が必要であることが確認された。

＜落石の推定質量（参考データ）＞

事前基礎実験で実施した振り子方式衝撃実験で求めた「SP4における鉄球質量－平均速度振幅」のグラフを使用して、落石の質量を推定した。 使用した検知センサーは全てch3のみである。

ただし、落石が鋼製横矢板に衝突する時の速度（衝突速度）を考慮していないので、あくまでも参考データである。 落石の推定質量に併せ、監視カメラによって推定された落石の質量を併記した。

表 4.9 SP4 における落石の推定質量

No.	検出日時		使用 CH	最大振幅 mKine	落石質量 （推 定）	落石質量 （TVカメラ）
9	2010/12/17	12:37	3	35	0.1kg以下	－
10	2010/12/18	10:24	3	90	0.2kg以下	－
15	2010/12/22	00:34	3	32	0.1kg以下	－
27	2010/12/27	12:30	3	174	0.5kg	10個以上
28	2010/12/27	12:36	3	648	10kg	φ20mm以上
44	2011/1/1	10:19	3	211	0.5kg	－
51	2011/02/23	11:25	3	45	0.1kg	φ5mmぐらい
66	2011/03/01	08:35	3	328	3kg	φ10mm～
80	2011/03/07	14:31	3	1,201	50kg	φ20～30。SP4破損
87	2011/03/09	11:10	3	123	0.5kg	φ5～10mm
89	2011/03/10	15:01	3	161	0.5kg	φ3～5mm
95	2011/03/11	15:18	3	368	4kg	φ10mm前後
118	2011/03/27	03:16	3	1,225	50kg	カメラ停止
128	2011/04/01	09:36	3	59	0.2kg	φ5mm以下
130	2011/04/01	13:15	3	454	5kg	φ5～10mm
		注 推定衝突位置は全てSP4である				

・システムⅡで最も規模の大きかった落石は、3 月 7 日の 14 時 31 分と 3 月 27 日の 3 時 16 分に検知した振動であった。推定質量はいずれも 50kg 前後と推定される。
・3 月 7 日 14 時 31 分の落石は、監視カメラの映像によると SP4 の鋼製横矢板を変形させるほどの規模であった。
・3 月 27 日の 3 時 16 分の落石については、監視カメラが停電のため機能を停止していたことから衝突時の状況は不明であるが、3 月 7 日の衝突を考えると、鋼製横矢板に対してかなりのダメージを与えている可能性がある。

＜検知システムの故障対応＞

開発中の崩落検知システムが検証実験開始時までに完成しなかったため、やむを得ず代替機を使用したが、部品の故障により2011年4月11日にシステムが停止した。

代替機には定時チェックの結果や振動検出の結果をe-mailで送信する機能があり、管理パソコンでそれを受信することによって故障を知ることができる。しかし、検証実験を行った足尾現地では、通信機能を使用できなかったため、実験終了まで4月11日の故障がわからなかった。

崩落検知システムが故障した場合には、早期確認と復旧が重要であるため、実際に崩落検知システムを運用する場合は通信環境を整備することが最重要事項である。

一方、通信環境が整備されていない場所では、1日に1回程度監視員を巡回させて崩落検知システムが正常に動作しているか確認することが望ましい。

(4) 検証実験のまとめ

システムⅡに内蔵されている波形パラメーター自動抽出機能により、振動の検出時刻、検出ch、各chの最大振幅、検出chの卓越周波数と継続時間、波形種別（落石、発破、自動車等）を自動的に抽出した。

上記の各パラメーターの中から最大振幅と継続時間から「振動エネルギー（E）」を計算し、1時間ごとの経時グラフを作成した。

事前基礎実験（振り子方式衝撃実験）から算出した「衝撃位置－平均速度振幅比」のグラフを使用して、落石が衝突した鋼製横矢板を推定した。

事前基礎実験（振り子方式衝撃実験）から算出したSP4での「鉄球質量－平均速度振幅」のグラフを使用して、落石の質量を推定してみた。

速度型崩落検知システムによる検証実験結果を、以下のようにまとめた。

＜落石の周波数特性＞

- 200Hz 以上 300Hz 未満の卓越周波数の比率が 85%以上であることが判明した。
- 崩落検知センサーとして採用する周波数帯を、200Hz～400Hz ないしは 200Hz～500Hz に限定できる可能性がある。

＜落石の振幅特性＞

- 各落石振動の最大振幅値をまとめると, もっとも小さな最大振幅値は約 4mKine であり、最も大きな最大振幅値は約 1,420mKine（1.4Kine）であった。 なお、累積頻度の中央値は約 60mKine であった。 （注：最大振幅値とは、1 つの落石振動波形（1 イベント）の中で最も振幅の大きい値のことであり、ピーク値と呼ぶこともある。）
- 最大振幅値と継続時間の積を「振動エネルギー」と定義づけたが、振動エネルギーの値で 20～4,000 の間はほぼ直線的な関係となっており、落石の発生予測に利用できる可能

性がある。

＜落石イベント及び振動エネルギーの時間変化＞

・1 時間ごとのイベント発生数を使用した時間別頻度グラフは、振動の検知数のみが反映され落石の規模そのものは含まれていない。

・最大振幅×継続時間から計算する振動エネルギーを使用した時間別グラフは、イベント数ではなく、1 時間ごとに積算した振動エネルギーの値をグラフ化するものであるため「落石の規模」をある程度反映できる。

・振動エネルギーのグラフより、検証実験期間中、3 月 7 日と 3 月 27 日に最も大きな落石が発生し、次ぐ規模の落石は 12 月 27 日に発生したことが確認された。

＜落石の推定衝突位置＞

・監視カメラによる検証結果から､落石の推定位置精度は1スパンの誤差を許すならば90%以上であり、位置の推定精度は極めて高いと評価できる。

・ただし、精度と平均振幅値には明瞭な相関があり、精度良く位置を推定するためにはある程度以上の落石の規模（大きさ：質量）が必要であることが判明した。

5.　道路管理ツールとしての運用方法の提案

5.1　システム運用の考え方

本システムは、落石の発生傾向から斜面変動の前兆を把握し、仮設防護柵で対応不能な斜面崩落等による被害を回避することを目的として運用が可能である。

＜解説＞

仮設防護柵は、斜面等の工事に伴う小規模な飛石や落石から通行者・通行車両を防護する目的で設置されており、施工期間や設置範囲が限定された仮設構造物であるため斜面対策としての効果を見込むことは困難である。一方、斜面内に地すべり土塊や緩み岩塊などの周囲より安定度の低い部分が存在する場合、落石の発生傾向から斜面変動の前兆を把握できる可能性がある。

本システムは、仮設防護柵に設置したセンサーによってこうした前兆を把握し、道路管理者が斜面変動による被害を回避するための判断を支援することを目的とした運用を目指している。

仮設防護柵の機能は、飛石・小落石といった比較的リスクが小さい（発生頻度大　被害の大きさ小）現象を対象としており、本システムは防護柵の機能を超過する現象のうち、小規模な前兆現象を伴うものを事前に検知して通行を遮断することで、広い意味で施設機能を補うものといえる。従って、前兆現象を伴わない崩落や、前兆現象はあっても個々の落石が大きい場合等には対応することができない（図5.1）。

また、前述のとおり仮設防護柵には斜面対策の効果は期待されていないため、仮設防護柵の機能を越える可能性のある現象(大規模な落石、マスとしての斜面不安定化現象)が具体的に把握された時点で、現象に応じた応急対策や監視体制をとることを導入の前提条件とする。

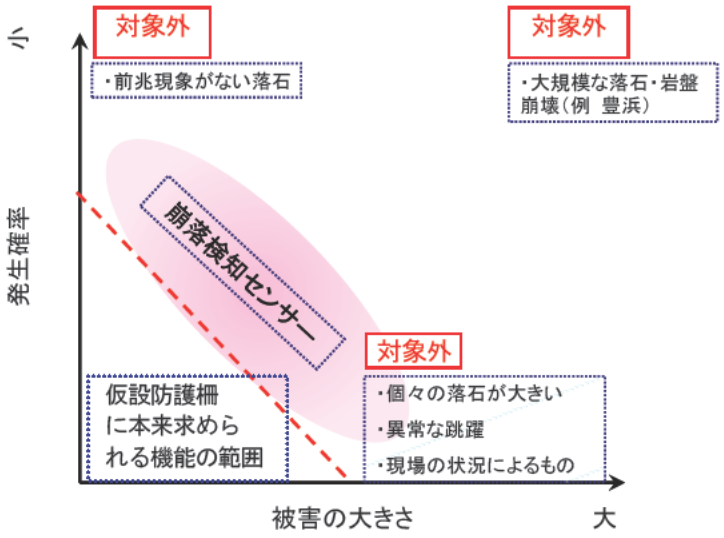


図 5.1　崩落検知センサーによる前兆把握の対象となる現象とリスク概念図

5.2　目安値の設定について

5.2.1　設定の手順

検知した落石データから警戒あるいは通行遮断等の判断を行うための目安値は、①現地確認、②基本試験・運用試験、③目安値の設定・検証、④実運用・見直し　を経て設定することを基本とする。また、観測データが蓄積された場合、目安値の見直しを行うものとする。

＜解説＞

落石検知センサーでは、仮設防護柵に衝突した落石をイベントとして検知するが、これらの発生状況から仮設防護柵の機能を上回るおそれのある現象の前兆を判定し、警戒や通行遮断等、通行者の安全を確保するための行動をどのタイミングで取るのかが課題となる。このため、本システムの運用に際しては、定常状態を逸脱した可能性のある落石データを抽出するための目安値設定を行う。目安値を設定するための手順は図 5.2 に示す流れを基本とする。

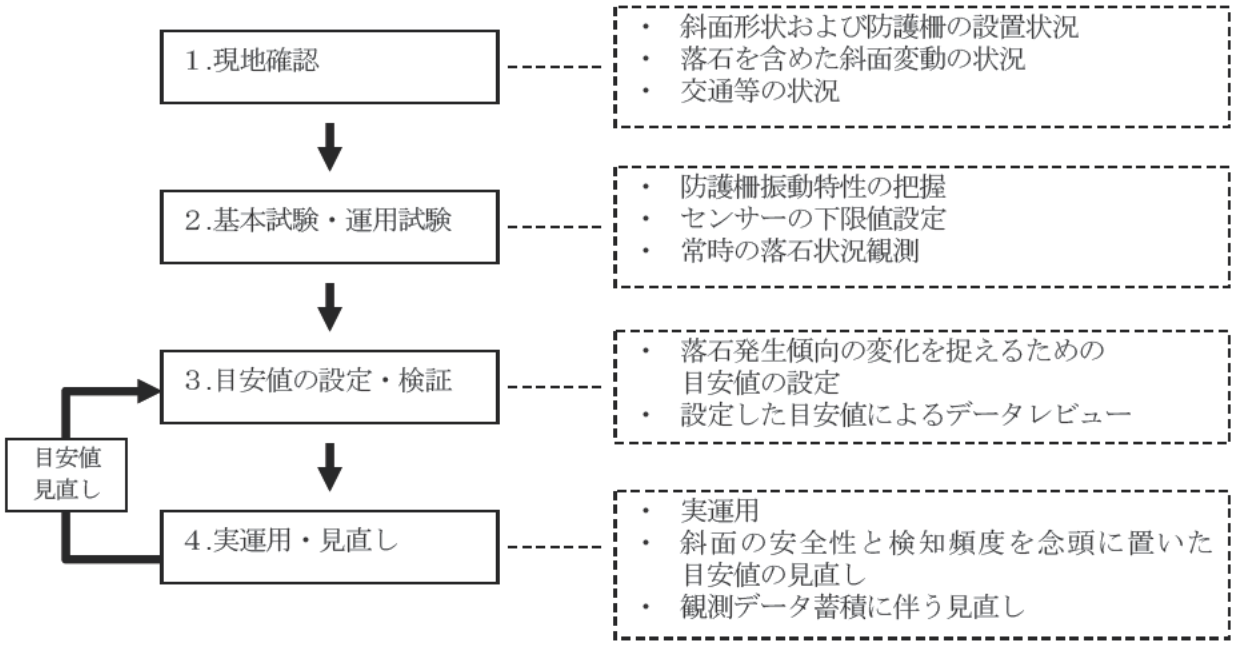


図 5.2　目安値設定の手順

5.2.2　現地確認

現地確認の段階では、斜面形状や仮設防護柵の設置状況、落石を含めた斜面変動の状況を確認する。電源の有無などシステム設置に関連した状況についても現地で確認する。

＜解説＞

本システムの運用に先立って、計器を設置する仮設防護柵、落石が想定される斜面、落石や崩壊によって被災のおそれのある道路周辺の状況等を現地で確認する必要がある。4.2.2.で述べたとおり、現地踏査による諸条件の確認において、調査・検討すべき主な項目は以下のとおりである。

- 小規模な崩壊や落石の発生箇所と崩落現象の想定
- 崩落検知システムの設置可能場所の確認
- 自動車の交通量と種類や道路面状況の確認
- 復旧や道路工事等による影響の確認
- 監視カメラの設置位置と監視範囲の確認（オプション）

このうち崩壊現象の想定やシステムの設置箇所を把握するために必要な現地で確認する具体例として以下の事項が挙げられる。

(1) 斜面形状及び仮設防護柵の設置状況

・斜面　：形状及び高さ

・仮設防護柵：設置範囲・方向・高さ、ポケットの状況、設置状況

(2) 落石を含めた斜面変動の状況

・落石等：表層の風化・緩み状況、既往落石の規模・発生位置、量、到達範囲、落下経路

この時点での確認の主眼は、仮設防護柵が安全に機能しうる状態にあることである。仮設防護柵の機能を上回る落石の頻発や、地表現象等から大規模な斜面変動の発生徴候が認識された場合は、応急対策や、本システム以外の計器（伸縮計など）も含めた監視体制の再構築が必要である。

また、斜面変動の徴候は無いものの、防護柵の設置状況や斜面形状・既往落石の発生状況から通行者に危険が及ぶおそれがあると判断された場合もシステム運用前に対応が必要である。具体的には表 5.1 のような事項に十分注意する必要がある。

なお、システム自体の設計に必要な交通の状況や電源などの状況については 4.2.2.を参照にされたい。

表5.1　現地確認のポイント

区　分	着 目 点	確　認　内　容	要 確 認 ポ イ ン ト
仮設 防護柵の 設置要件	小規模な 飛石・落石の 防護機能	標準的な材料・規格の採用 →①	・発生範囲に対する十分な設置延長 ・支柱・板材の材料と規格・寸法 ・根入れ長 ・特殊な設計条件の有無 ・設置方法（根入れ部の処理、固定の方法、配置等）
斜面 変動の タイプ等	想定される 落石	発生位置・規模(エネルギー) →②	・浮き石・転石の分布位置（斜面上及び既往落石） ・浮き石・転石の規模及び形状（斜面上及び既往落石） ・発生頻度（落石衝突痕の分布範囲・数量、崖錐・落石錐表層の安定度）
		落下経路 →③⑤	・沢状地の有無・分布状況及び植生の状況 ・凹凸の大小や分布（異常跳躍の可能性） ・崖錐・落石錐の形状・伸長方向
		落石材料・形状 →④	・単位体積重量 ・岩質 ・円摩度
		既設対策 →④	・落石の発生・転動あるいは防護柵への衝突を抑制するような法面保護工等の有無
	岩盤崩壊・ 地すべり等の 大規模な 斜面変動 兆候	変動タイプ →⑥	・周辺斜面を含めた既往の変動履歴（タイプ・規模・頻度） ・地形地質特性から現状で想定される変動形態
		現況の活動性・安定度 →⑥	・変動微地形の種別・規模・方向性と新旧 ・地表変状の種別・規模・方向性・新旧 ・現状の変動監視体制（監視手法と配置）
地形 地質と 防護柵 配置	柵高	想定落石跳躍高との比較 →③	・地形からみた設置位置周辺での想定跳躍高 ・既設柵もしくは路面への衝突痕の有無・位置
	防護柵への 想定衝突形態	柵への想定衝突方向・位置 →④	・既設柵に対する擦過痕の位置・方向 ・落石経路の形状による想定衝突位置の制約の有無
		柵背後のポケット →④	・崖錐・落石錐の規模・形状及び防護柵との離隔 ・ポケットの形状及び容量 ・サンドクッション等の有無・規模 ・既往の小崩壊発生事例（規模及び到達範囲）

①仮設防護柵の設置状況の確認

…本来仮設防護柵には小規模な落石や飛石の防護機能のみが期待されている。本システムのセンサーはこうした仮設防護柵に設置する仕様であり、現地の長期実証試験もこうした仮設防護柵を対象に実施している。このため、センサーを設置する仮設防護柵の具体的な設置状況（設置延長、規格・寸法、根入れ長、支柱・横材の固定方法等）が一般的であることを確認する。一般的でない場合は、基本試験の実施で対応が可能か等の確認を行う。

②仮設防護柵機能を超過する落石有無の確認

…本来仮設防護柵には小規模な落石や飛石の防護機能のみが期待されている。規模や斜面上の分布位置により、仮設防護柵の機能を明らかに超過するエネルギーを持つ不安定な浮き石等については、安定度を確認の上除去等の必要な対応を検討する。

③仮設防護柵の規模・範囲の確認

…落石発生箇所下方の地形条件によっては、凹地沿いに落石の転動経路が限定される場合や、局所的に大きな跳躍高が発生する場合がある。設置範囲が不足する場合には必要な対応を取る。

④落石検知の正確性の確認

…岩質・形状によっては、同程度の規模(体積)の落石であっても仮設防護柵に衝突する際のエネルギーが大きく異なることが想定される。また、斜面形状等によって、落石の大半が防護柵の壁面に正対する方向から大きくずれて衝突することが予想される場合がある。この際にも、検知されるエネルギーが落石規模を正確に反映しないことが想定される。こうした特殊な条件下の現場では、基本試験時に必要に応じて現場の落石を利用したケースや壁面に対して斜交する方向からの衝突ケースも加え、しきい値の設定や落石イベント解析の際の参考とする。

一方、既設対策が部分的に施工されている斜面では、検知の対象とする落石が仮設防護柵に到達しないケースも想定され、注意を要する。

⑤適用範囲外の外力等の確認

…落石や小崩壊が頻発し、落石錐が短時間に形成されるような箇所、あるいは明瞭な落石錐がすでに形成されているような箇所では、防護柵山側のポケット容量が短時間内に失われ、仮設防護柵への適用範囲外の土圧の作用や、柵の上部への落石衝突によって仮設防護柵が破損することが想定される。このような場合は崩土除去によるポケット容量の確保等、別途必要な対応をとる。

⑥大規模斜面変動の兆候の確認

…仮設防護柵の機能を上回る斜面変動の兆候が明らかな場合には本システム単独での適用は行わない。特に最近の活動兆候が明瞭に確認される場合には、応急対策を含め必要な対応をとる。

また、トップリングや剥離性崩壊のように、斜面変動のタイプによっては地山と移動体の接地面積が小さく、随伴現象の頻度が相対的に小さいことが予想され、注意を要する。

5.2.3　基本試験・運用試験

現地に設置した仮設防護柵の特性を踏まえた検知を行うため、センサーの補正を行う基本試験を実施する。また、ある程度の期間を設けた運用試験を行い交通振動等のノイズを把握するものとする。

＜解説＞

検知に使用するセンサーは加速度型センサー、速度型センサー共に現地に設置した仮設防護柵の特性に合わせた補正を行う。そのため、鉄球等を用いた基本試験を実施する。また、交通振動などのノイズ等、設置場所によって多種多様な影響が想定されることから、運用を行いながら調整を実施することが望ましい。

主な留意点を以下に示す。

（1）仮設防護柵上でのセンサー感度の確認

・仮設防護柵の様々な箇所において衝突試験を行い、センサーが感度を有する範囲の広がりと特性を確認する。

（2）センサーの検知範囲(性能)の設定

・検知の頻度、落石の特徴を考慮して設定する。

・ある程度の期間を設け観測する。

（3）ノイズ

・交通振動など発生が予想される振動の大きさや頻度等を確認する。

・ある程度の期間を設け観測する。

これらの基本試験の詳細は 4.3.2 に記載している。また、センサー以外の方法で落石の実態を把握する場合は、カメラ（マイク）等による監視を併用することが望ましい。

5.2.4　目安値の設定・検証

斜面変動の前兆現象検知のための目安値は、判定期間と落石検知頻度の組み合わせにより設定し、一定期間のデータを用いて設定の妥当性を検証することを基本とする。

＜解説＞

(1)　目安値設定の考え方

前兆の見落としが無いよう、ある時点から遡る判定期間を設け、判定期間と落石頻度の組み合せによって前兆検知のための目安値を設定する。

通常、落石は個々の浮石、転石の存在状況（安定性）がランダムであるため、落石の分布する位置や落石の大きさにはよらず、外的要因の変化によって安定性を保持できなくなったものから落下すると考えられる（図 5.3）。

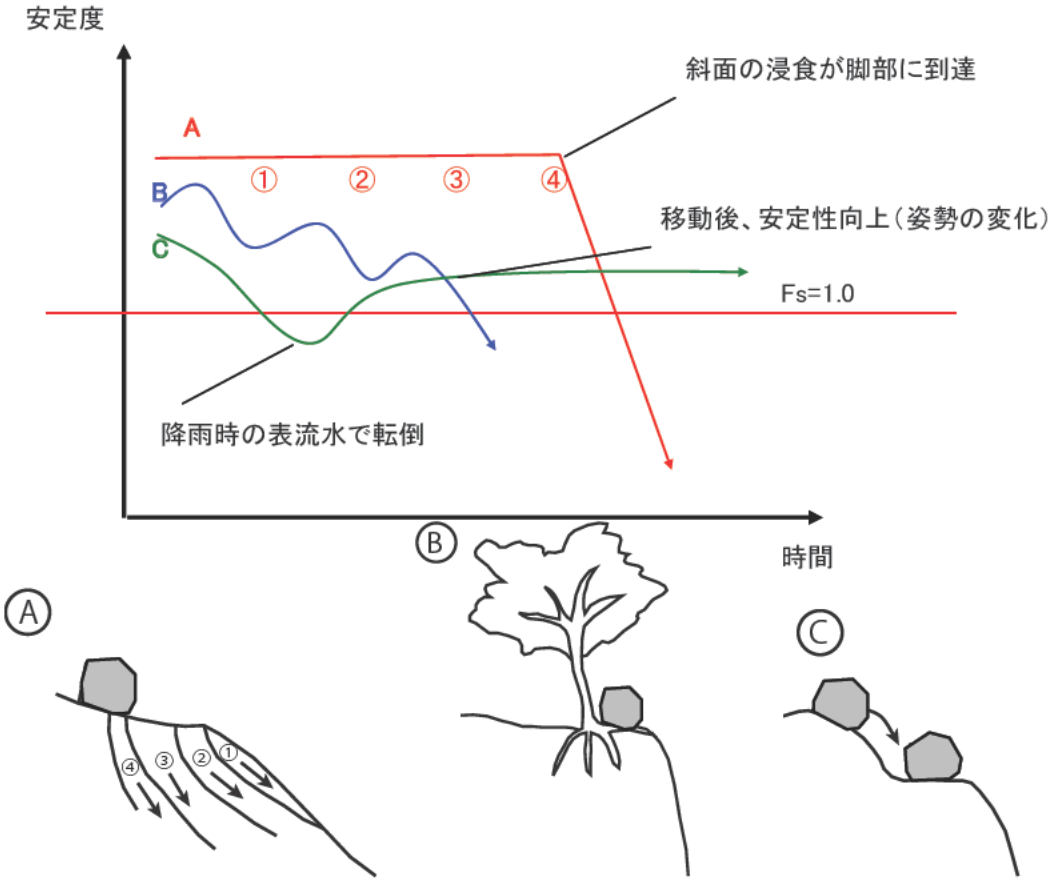


図 5.3　外的要因の変化による落石発生のイメージ

しかし、浮石・転石が分布する斜面の一定範囲内に大きな外的要因の変化があった場合は、この範囲内の浮き石・転石の安定性が低下し、多くの落石が発生する可能性がある。

この「大きな外的要因の変化」は、通常の斜面では気象や季節の変化によって発生し、斜面全

体が影響を受けるが、地すべりやクリープ等の斜面変動が発生すると、移動体の周辺(特に外周部)の浮き石や転石がその運動機構によって大きな影響を受けると考えられる。この結果発生する落石頻度の増加を斜面変動の前兆現象として検出するため、以下の手順で「目安値」を設定するものとする。

目安値①　　通常の状態での落石発生傾向からの逸脱
目安値②　　特定範囲での比較的短期間内での落石頻度変化（増加）

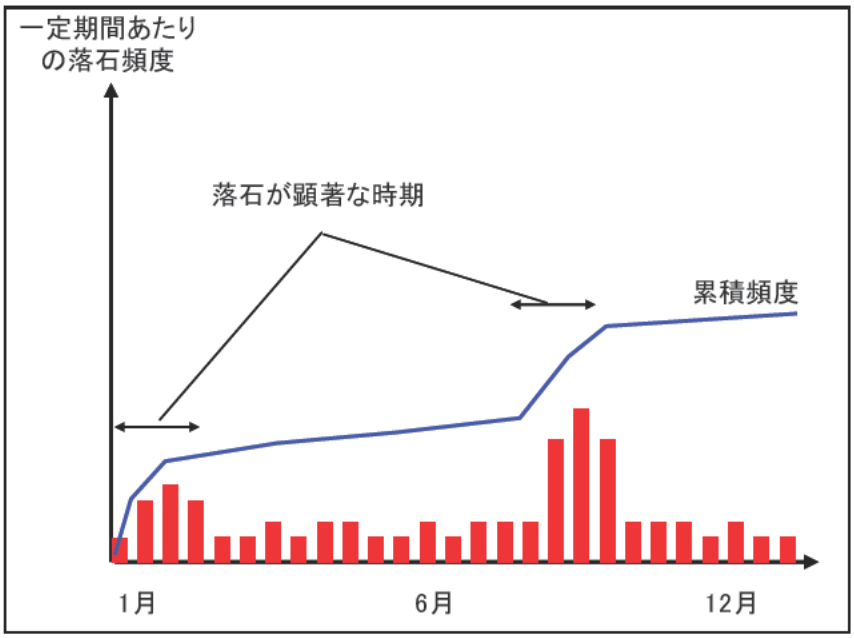


図5.4　通常状態での落石頻度とその傾向からの逸脱イメージ

①については、年間を通じた落石傾向を概観し、落石が活発な期間における発生頻度を把握しておき、2～3 日ないし 1 週間程度のスパンで通常状態からの逸脱を検知しようとするものである（図 5.4）。

②については、斜面変動が活発化した場合、落石頻度が通常より高くなることを念頭に、数時間内の単位時間あたりの落石発生頻度が急増する傾向を検知するものである。

これとは別に、規模(エネルギー)の大きな落石は、通行者に直接被害を与えるおそれがあるため、仮設防護柵の機能を明らかに超過すると判定された時点で撤去・小割等の必要な対応を検討することとする。

(2)　計測結果による目安値の設定例

ここでは、システム設置後の計測結果から実際に目安値を設定した事例について紹介する。目安値を設定する基礎データとなった観測結果を**図 5.5** に示す。

観測結果から試験運用期間に相当する１ヶ月間内は落石の累積傾向から大きく３期に区分され、中間の 12/25～1/1 間はやや落石発生頻度(期間内のイベント発生回数）が高いことが読み取れる。特に 12/25～1/1 の間は、前後の期間より明らかに発生頻度が高く（累積曲線の勾配が大きい)、大規模な斜面崩壊に伴う落石の累積事例のように、明瞭な累積傾向の変化点（緑の直線と交差）が認められる。また、比較的規模の大きい２回の落石もこの期間内に検知されている。これらの特徴を短期（数時間)、中期（日）で把握できるように目安値を設定した。

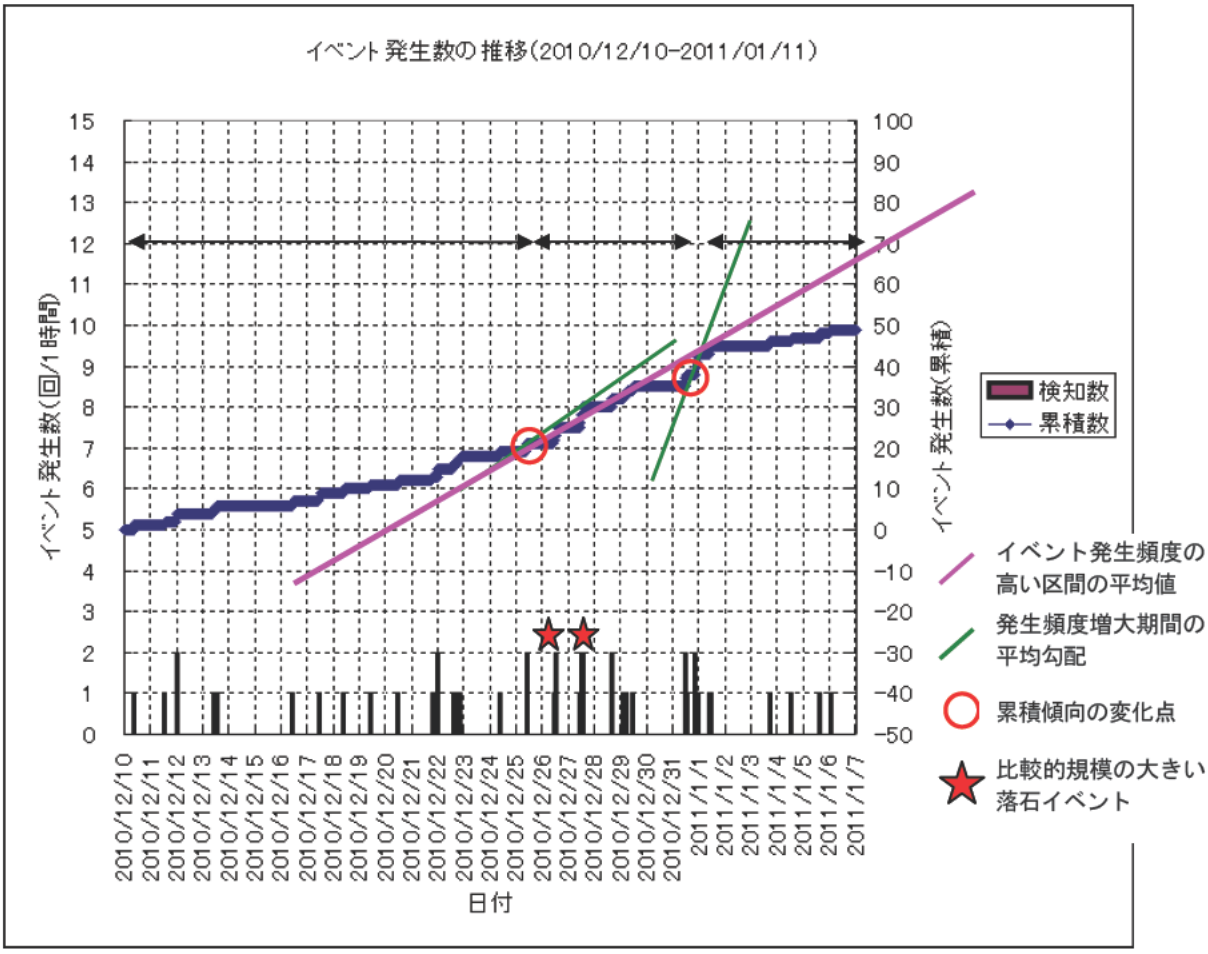


図 5.5　落石が活発に発生する時期の抽出

観測結果を基に①通常の状態での落石発生傾向からの逸脱、②特定範囲での比較的短期間内での落石頻度変化（増加）の観点から表 5.2 に示す目安値を設定した。また、設定時の検討材料を図 5.6 に示す。

表 5.2　大規模な変動の前兆検知のための提案目安値

種別	目　的	設　定　(案)
①　24 時間単位	要注意期間の抽出：約１日単位の増加傾向	4 回／先行 24 時間
②　 6 時間単位	要注意期間の抽出：急激なイベント数増加	4 回／先行　6 時間

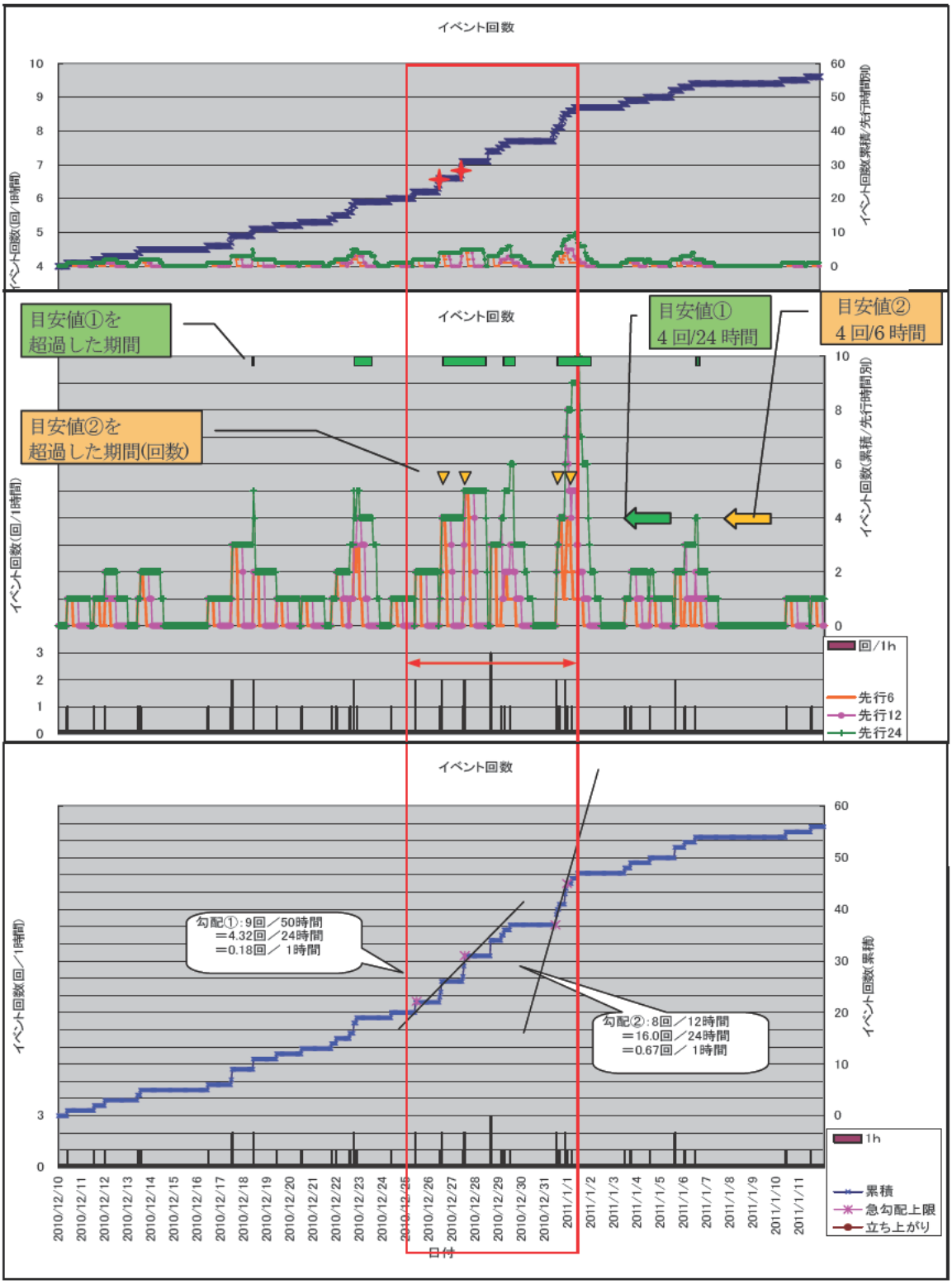

イベント回数
イベント回数(回/1時間)
イベント回数(累積/先行時間別)
目安値①を
超過した期間
目安値②を
超過した期間(回数)
目安値①
4 回/24 時間
目安値②
4 回/6 時間
回/1h
先行6
先行12
先行24
勾配①：9回／50時間
＝4.32回／24時間
＝0.18回／ 1時間
勾配②：8回／12時間
＝16.0回／24時間
＝0.67回／ 1時間
イベント回数(回／1時間)
イベント回数(累積)
1h
累積
急勾配上限
立ち上がり
日付

図 5.6　目安値の検討

(3)　目安値の検証

一度設定した目安値は、有効性と課題を検証するものとする。目安値検証の際の留意点は以下のとおりである。

- 目安値の設定のためのデータ量を確認する（落石数が極端に少ないと目安値設定は困難）。
- 検知の目標とするイベントを決定する（振動エネルギーが相対的に高いイベント等）。
- 検証の際にイベントが地震などの外力を受けていないか確認する。
- 頻度や検知期間を変更した複数の目安値を検証する。

5.2.5　実運用・見直し

実運用における検知状況に応じて、目安値の見直しを行うことを基本とする。なお、検知の傾向に合わせ必要に応じて現地における調査を行う。

＜解説＞

本システムは試用段階であり、対象とする現象の特徴も考慮して実運用後に目安値の見直しを行うことが望ましい。特に以下の場合は現地調査等を実施し、調査結果を踏まえた目安値の見直しを検討する。

（1）データの蓄積

- 運用後、現地における落石のデータが蓄積されることから、検知の状況に応じて落石の発生日時や気象などの関係を分析し目安値を再検証する。

（2）検知が少ない場合

- センサー等の機器の動作状況を確認
- 現地状況の確認
  - 仮設防護柵山側の落石状況
  - 検知している落石の特徴
  - 検知していない落石の特徴

（3）検知が多い場合

- 現地踏査の実施
  - 斜面の状況
  - 周辺の状況変化
  - 検知している落石の特徴
  - 斜面が不安定化している可能性があるため、安全に留意する。
- データの確認
  - 検知の周期性の確認
  - 地震や発破など周辺で発生したイベントの確認

5.2.6　目安値設定時の留意点

目安値は十分に余裕を持った設定を行うことが望ましい。

(1)　落石検知による崩落予知の課題

本システムは、ごく小規模の落石・飛石の防護機能のみが期待されている仮設防護柵に、様々な規模の落石が複数回衝突する事象を計測の対象とし、現況では存在が認識されていない大規模な斜面変動の前兆を、落石を通じて間接的に捉えようとするものである。したがって、現場での注意喚起や通行規制の判断に使用する落石発生頻度の目安値については、十分に余裕を持った設定を行うことが望ましい。

斜面変動の前兆を、落石を介して把握する場合には、**図 5.7** の課題がある。現地確認時の課題については　**5.2.2**　現地確認　に示した。

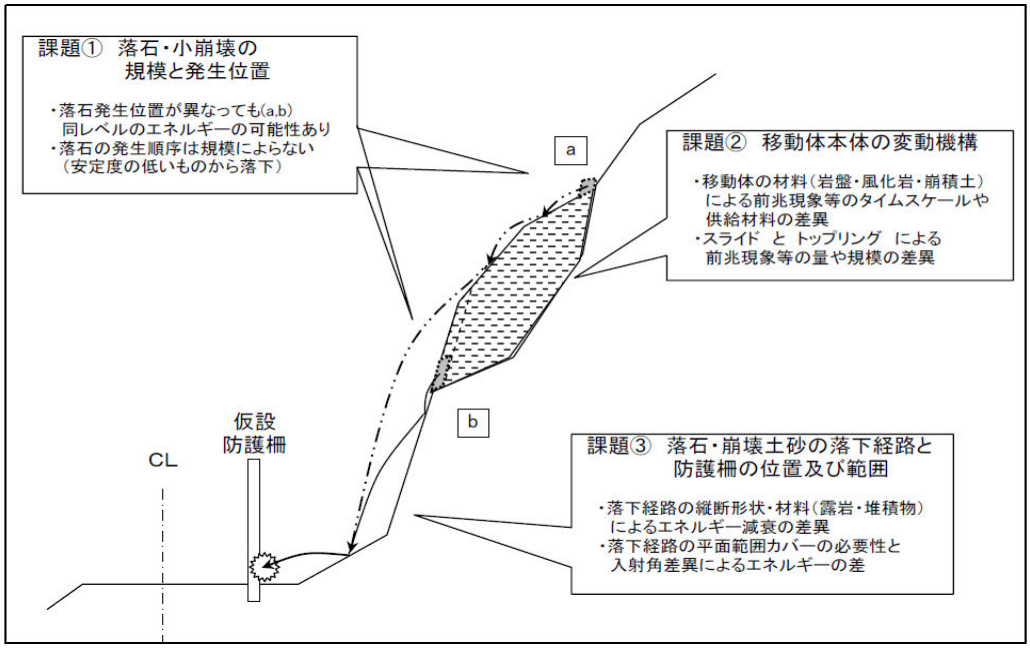


図 5.7　落石発生によって斜面変動の前兆を把握する場合の課題

(2)　目安値設定時の課題と留意点

目安値の設定には、落石検知が安全かつ正確な状態で実施できることが前提である。

このため、まず仮設防護柵の機能を上回る不安定な浮き石が無いことと、落石発生を抑制するような要因が現地に無いことを確認する必要がある。また、落石が実際に斜面変動の前兆であることが確認された場合には、移動体本体の変動機構に応じた適切な応急対策や監視体制の再構築を行う必要があるが、応急対策に伴って落石検知による前兆把握が困難になる場合も想定される

ので注意が必要である。

次に、目安値とする落石イベントの頻度であるが、伸縮計で計測される移動体の速度のような連続データとは異なり、基本的に個別データの集合である。このため、設定例に示したように複数の単位時間内のイベント数を比較し、大きな傾向の変化と急激な変化双方を抽出できるよう慎重に設定する必要がある。

また、目安値は落石の発生頻度で設定するが、課題①や③に示したとおり、仮設防護柵位置で検知されるエネルギーの大きさ(イベントの規模)の評価については、仮設防護柵そのものの安定性に直結するため、想定される現象を十分に検討しておく必要がある。

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4250 January 2013

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305－8516 茨城県つくば市南原1－6 電話029－879－6754