

国道 279 号易国間地区における道路防災の取り組み

三嶋 昭二・能見 忠歳・佐藤 史・馬 貴臣・辻 雅規
野口 礼人・山本 益男・山田 隆宏・宮良 圭一

Field monitoring on detection of rock fall and its use for road traffic safety warning system — a case study at the Ikokuma district, Route 279 —

Shouji Mishima, Tadatoshi Noumi, Osamu Satoh, Guichen Ma
Masaki Tsuji, Norihito Noguchi, Masuo Yamamoto
Takahiro Yamada, Keiichi Miyanaga

Abstract

At the Ikokuma district where is face toward the Tsugaru Strait of the Shimokita peninsula, Aomori prefecture, it becomes for transportation to be thread and results sometimes severe traffic accidents due to frequently occurrence of rock mass fallings from steeply inclined cliff with 80 meters to 140 meters high, along the national route 279. In order to prevent these threads, two sort of countermeasure are employed. First is direct approach to prevent rocks falling on the road. Steel fence, ring net and so on are set up along the road side cliff slope. Second one is early warning system for controlling the traffic to prevent human and vehicle damages. In this paper, we discuss on about measurement system for detection of rock movement and its use to warning system.

Route 279 locates between shore line and marine terrace which made of welded tuff. Columnar open joints developed well can be found on the steep cliff slope of the terrace. These joints cause instability of the slope and result rock mass falling. We specify 21 locations as concern rock mass, then instabilities of these mass evaluate by means of microtremor measurement and geological judgment. According to these survey, we judged 11 locations as especially instable, fall-threatened rock mass. According to these site specification, we develop rock-fall monitoring and warning system. Monitoring system consists of rock movement sensor covered over slope through tension meter combined with meshed wire rope, and of extensometers for individual rock mass mentioned above. In addition, rock-fall detection sensors are installed on the rock protection wall along the road. In the warning system, transportation would be restricted or shut completely in the case of abnormal signals came up by monitoring system. During three years operation of these systems, there was a case that prediction of rock falls completed successfully, and then warning system was able to avoid traffic accident because of well traffic regulation. This success suggests also importance that the cooperation with administrations and liaison might be functioned.

Furthermore, we conduct rock fall simulation on rock mass rolling down along steep slope. In this simulation, collision damping coefficients are identified through reevaluation of previous falling record and field survey. Results from simulation reflect to summary for proposed rock protection methods and their effectiveness.

Key word: microtremor measurement, rock-fall monitoring and warning system, tension meter, extensometer, cooperation of administrations and liaison, rock fall simulation

(要 旨)

青森県下北半島の津軽海峡に面する国道279号易国間地区では、比高約80～140mの急崖部からの落石が多発し、その一部は通行車両に被害を及ぼしている。この対策としてハード対策・ソフト対策が進められており、本論文ではその内ソフト対策について述べる。

急崖部は柱状節理が発達する溶結凝灰岩からなり、節理等の割れ目が開口するなど全体が不安定な状況にある。現場で選定した21箇所箇所の岩塊に対して常時微動計測を実施した結果及び地質観察から、11箇所を特に不安定な岩塊と判断した。

ハード対策が完成するまでのソフト対策として道路斜面監視システムを構築した。急崖部では面的計測として格子状のワイヤーロープと張力計を組み合わせたセンサーを用い、特に不安定と判断した個別岩塊については、伸縮計等の個別計測を実施した。道路沿いの落石防護柵には落石検知センサーを設置した。このシステムを約3年間運用した結果、落石の前兆現象を捉えて道路の通行規制を行うことで災害を未然に防止した事例があった。このシステムの運用では行政機関等を含めた連絡会が有効に機能した。

加えて、落石シミュレーションでは、既往の落石記録を用いて衝突減衰係数の同定解析を行い、計画対策工の効果を評価した。

キーワード：常時微動計測，道路斜面監視システム，面的計測，張力計，個別計測，連絡会，落石シミュレーション

1. はじめに

道路沿いの斜面における落石や岩盤崩壊は、平成元年福井県越前岬での岩盤崩壊による15名の死亡事故、平成2年徳島県鳴門での落石による3名の死亡事故、平成8年北海道豊浜トンネルでの岩盤崩壊による20名の死亡事故等、甚大な被害を生じる可能性が高い。この対策として、各種の斜面安定対策工が施工されているが、要対策箇所が多いことや施工困難な箇所もあってソフト対策が重要視されている。落石や岩盤崩壊による被害を低減するためのソフト対策として、岩盤モニタリングの現地適用性の可能性や限界、岩盤崩壊予測手法についての多くの研究が進められている(財)道路保全技術センター 2003¹⁾、門間他2002²⁾。しかし、実際にその前兆を捉え、その変位状況等から事前交通規制に至った事例は少ない。

そのような中、当地区では、延長約2.7kmにわたって断続的に分布する岩盤斜面からの落石や岩盤崩壊を対象にした道路斜面監視システムを構築し、斜面の不安定化の前兆を捉えたり落石を検知した場合に、自動的に遮断機を下ろし、交通を規制する仕組みを導入した(木村他2005³⁾)。遮断機が下りた場合、道路管理者は直ちに現地に急行し、現地確認・種々の対応を行うことになる。しかし、現地まで最速で約1時間かかるため、道路管理者が到達するまでの間は役場をはじめ地域の関連機関との連携で、迅速な対応ができるようにしている(野口他2005⁴⁾)。

一般に、岩盤斜面の計測法では、岩盤変位計・伸縮計・地表面傾斜計・光波測距・張力計・光ファイバーセンサー(伸縮・振動・温度などによる光の損失や乱れ等を利用)・AEセンサー等あり、落石や岩盤崩壊の検知センサーとしては、破断センサー・振動センサー等がある。

当地区では、これらの中から平成16年時点で現場に最適と判断した計測機器を導入した。

本論文では、事前の地質調査をはじめ、システム稼動3年を経過するモニタリングで得られた落石前兆事例(木村他2005⁵⁾、能見他2006⁶⁾、能見他2007⁷⁾)を含め、これまでの取り組みを紹介する。

財政難でコスト縮減が求められる時代において、岩盤斜面の対策工を直ちに実施できない場合がある。このような場合、対策工が実施されるまでモニタリングにより道路の安全を確保していくことも重要である。

2. 道路斜面監視システム構築の経緯

国道279号易国間地区は、青森県下北郡風間浦村易国間から桑畑に至る延長2.7kmの区間であり(図-1)、国道は津軽海峡沿いに標高5～10m付近を通過している。当地区の斜面は、道路からの比高80～140m付近に溶結凝灰岩からなる急崖が断続的に分布し、急崖下の斜面には溶結凝灰岩の転石及び下位層の凝灰角礫岩中の礫の浮石が分布する(図-2)。比較的落石の多い斜面と

表-1 国道に影響を与えた落石

Table. 1 History of rock falls which affected traffics of route 279.

番号	落石日	落石及び主な被害状況
1	S58. 5. 26	約300トンの岩塊が国道に崩落し、片側一車線通行止め。
2	H13. 11. 3	高さ約40mの斜面から大きさ約1.4mの転石が国道に落下し、通過中の車両に被害。
3	H15. 5. 1	約170トンの岩塊が道路上に落下し、道路を封鎖。

して知られている。

国道279号易国間地区において、国道の交通に影響を与えた落石（平成15年12月現在）を表-1に示す。

これらの落石は、図-2に示した①ゾーンの急崖から発生した岩盤崩壊等による落石と②ゾーン付近に分布する凝灰角礫岩中に含まれる礫や①ゾーン地点から供給された転石の不安定化による落石に分かれる。表-1に示した1番及び3番は①ゾーンから、2番は②ゾーン下部からの落石である。

2番の事例では通行中の車両に当たる被害が発生し、本地区の危険性が指摘され始めた。

その後、平成15年5月1日に発生した落石（3番）は道路上に飛び出し、道路を封鎖した。道路上に横たわった落石の規模は、6m×4m×3.5mである。擁壁背面には、同程度の規模の落石が2個停止している状態であった。通行車両及び通行者はなく、幸いにも人身事故には至らなかった。この落石によって、本地区の危険性が広く知られるようになり、本格的な落石調査・対策工（ソフ

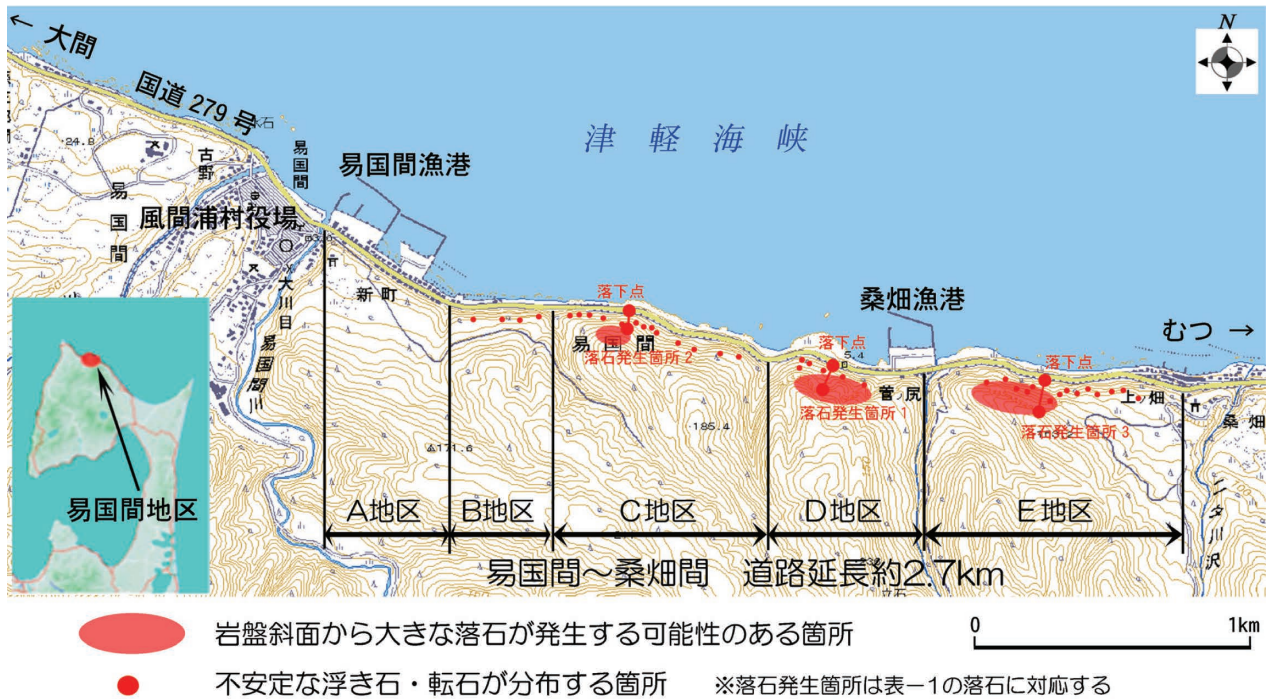


図-1 易国間地区位置図

Fig. 1 Location of Ikokuma area.

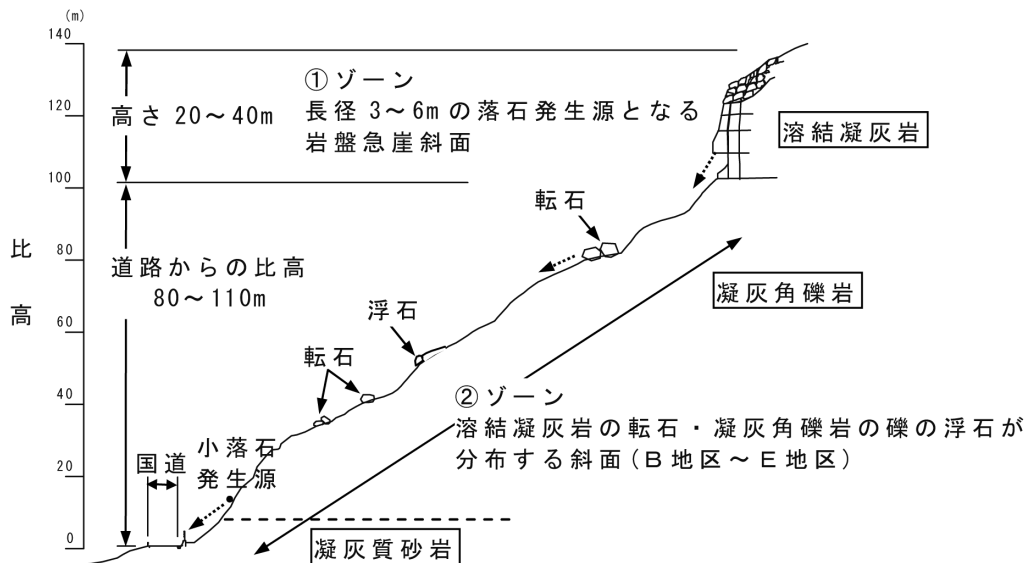


図-2 当地区の模式断面図と落石発生箇所

Fig. 2 Schematic sectional view of the slope of Ikokuma area and location where the rocks fall.

ト・ハード) の検討を行うことになった。

3. 地形地質
3.1 地形

易国間地区がある下北半島は、青森県の北東部に位置し、三方を津軽海峡、平館海峡、太平洋に囲まれている。下北半島北西部は標高700m級の下北山地・恐山火

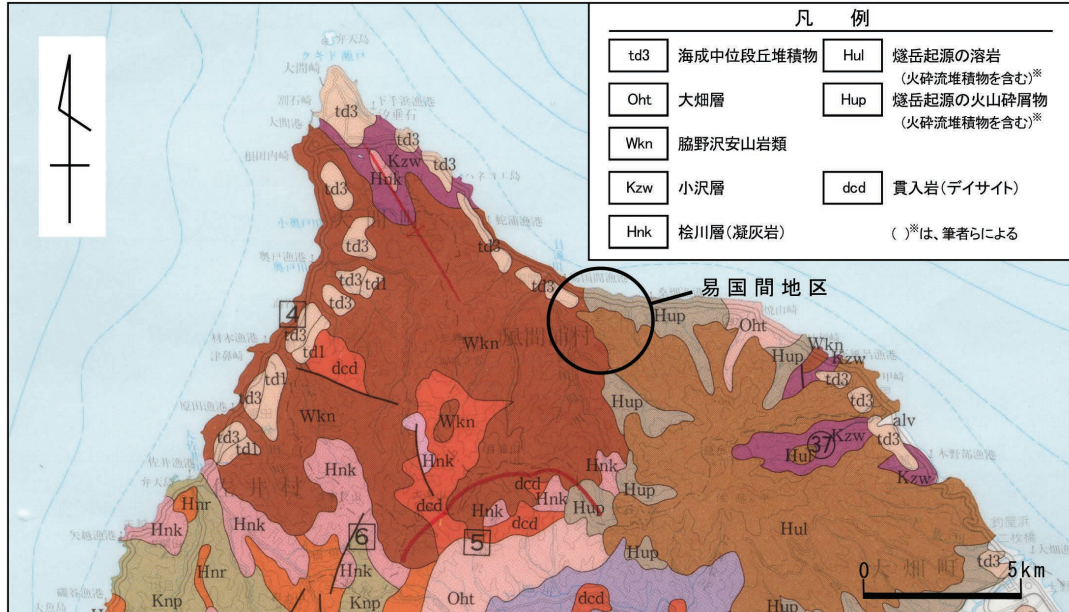

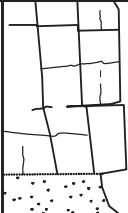
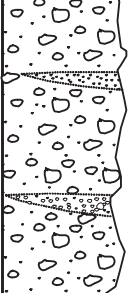



図-3 調査地周辺の地質図 (縮尺 1:200,000) (青森県地質図,1998,青森県より抜粋)

Fig. 3 Geological map of the investigation area (scale 1:200,000). (quoted from the geological map of Aomori prefecture, 1998)

表-2 当地区の模式層序表

Table. 2 Schematic sequence of the geology of the Ikokuma area.

地質時代	地層名	構成地質	模式柱状図	記事
第四紀	崖錐堆積物	礫・砂		沢沿い、斜面下部に分布する土砂。
	段丘堆積物	礫・砂		斜面中腹及び上部の緩斜面を形成する。玉石を含む。
	易国間火砕流堆積物	溶結凝灰岩		高角度の柱状節理が発達した硬質な岩盤である。しばしば急崖を形成し、大岩塊の浮石となりやすい。 下部に軟質な低溶結部を伴い、差別浸食により、上部硬質部がオーバーハングとなる。
		凝灰角礫岩		硬質な礫と凝灰質な基質からなる軟岩である。 しばしば、固結度の低い砂岩・礫岩を挟有し、この部分の差別浸食により、浮石化する。
新第三紀	大畑層	凝灰質砂岩		軽石を含む軟質な砂岩を主体とし、礫岩を伴う。露頭は容易に崩せる程度の固結度である。

山・燧岳火山等の山地からなり、海岸では急斜面の海食崖が発達し、平野や段丘の分布は限られている。津軽海峡に面する易国間地区は、燧岳の北西約6～8km、燧岳から続くなだらかな地形の端部に位置する海食崖の急斜面が連続する地区である。

この地区の斜面を主な沢で区切ってA地区～E地区まで5区分した。この中でもC地区～E地区は道路からの比高約80～140mに高さ20～40mの急崖を形成する岩盤斜面が分布する。

3.2 地質

当地区周辺の地質は、新第三紀鮮新世大畑層、第四紀後期の燧岳火山噴出物、海成段丘堆積物、崖錐堆積物等から成る。周辺の地質図を図-3⁸⁾に示す。この図から分かるように、当地区に分布する地質は燧岳火山噴出物のうち易国間火砕流堆積物(梅田1992⁹⁾)である。

当地区の模式層序表を表-2に示す。当地区は、下位から凝灰質砂岩・凝灰角礫岩・溶結凝灰岩からなり、キャップロック構造を呈している。

前述したC地区～E地区の岩盤急崖斜面には、硬質で柱状～塊状をなす溶結凝灰岩が分布し、割れ目の緩みが顕著に認められる。また、斜面中間部には凝灰角礫岩が分布し、その岩層中に含まれる礫が浸食作用により浮石化している状況にある。

3.3 斜面状況

3.3.1 岩盤斜面の状況

当地区は、道路からの比高80m～110mを境として上部斜面に溶結凝灰岩が分布し、下部斜面には凝灰角礫岩および凝灰質砂岩が分布する。これらの境界部には溶結凝灰岩の低溶結部を伴う。

上部斜面を構成する溶結凝灰岩は、高角度(80～90°)



写真-2 E地区 オーバーハング部
Photo 2 Over hanged slope in E area



写真-3 D地区 湧水箇所の状況
Photo 3 Spring of ground water spring in D area.



写真-1 E地区 溶結凝灰岩露頭
平成15年5月1日の落石発生地点
Photo 1 Outcrop of welded tuff in E area. (The rock fall has occurred in May 1, 2003.)



写真-4 E地区 中間斜面の浮石
Photo 4 Loose part of rocks in E area.

の柱状節理が約2~3m 間隔で発達する(写真-1)。これらの柱状節理は、谷部では概ね密着しているが、尾根部では緩みによる開口(平均2~5cm, 最大約30cm 幅)が認められる。

また、溶結凝灰岩と下位の地層との境界では恒常的に湧水が認められ、比較的軟質な下位層の浸食が進むために、上部の溶結凝灰岩からなる急崖斜面はオーバーハングが発達する(写真-2)。湧水は地層境界が周辺より低い箇所にて特に顕著である(写真-3)。

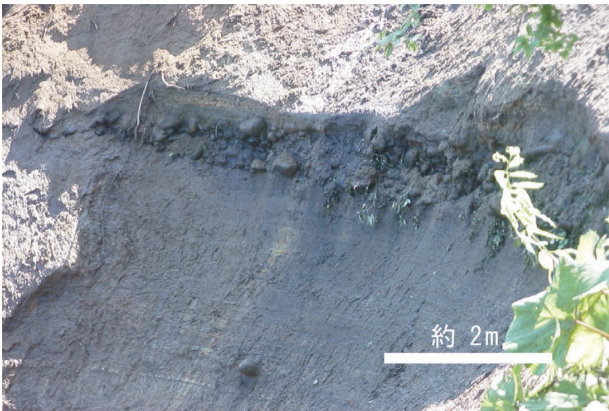


写真-5 E地区 凝灰質砂岩
Photo 5 Tuffaceous sandstone in E area.

3.3.2 岩盤斜面の下方斜面の状況

道路からの比高80~110m より下方の斜面は、凝灰角礫岩及び凝灰質砂岩が分布する。凝灰角礫岩の硬質部が分布する箇所にて局部的に60~70° の傾斜を示すものの、平均的には35° 前後の傾斜となっている。斜面上には溶結凝灰岩の転石や浮石化した凝灰角礫岩が多数分布する(写真-4)。最下位に分布する凝灰質砂岩は、固結度の低い軟岩である(写真-5)。

3.3.3 転石の分布

過去に発生した落石、すなわち斜面や海岸の転石の分布状況をE地区についてまとめた結果を図-4に示す。これは、道路から山側の長径1m以上、海側の長径2m以上の転石の分布を調査した結果をまとめたもので、道路より山側に509個、海側に153個確認した。海岸の転石状況を写真-6に示す。

これらを統計処理した結果、頻度の高い転石の大きさは2.4m × 2.0m × 1.2m という結果となった。

また、長径2m 以上のものを抽出して転石の個数とその位置関係から、総数と斜面側の転石数の比は0.55であり、落石の半数以上が道路上方斜面で堆積することがわかった。

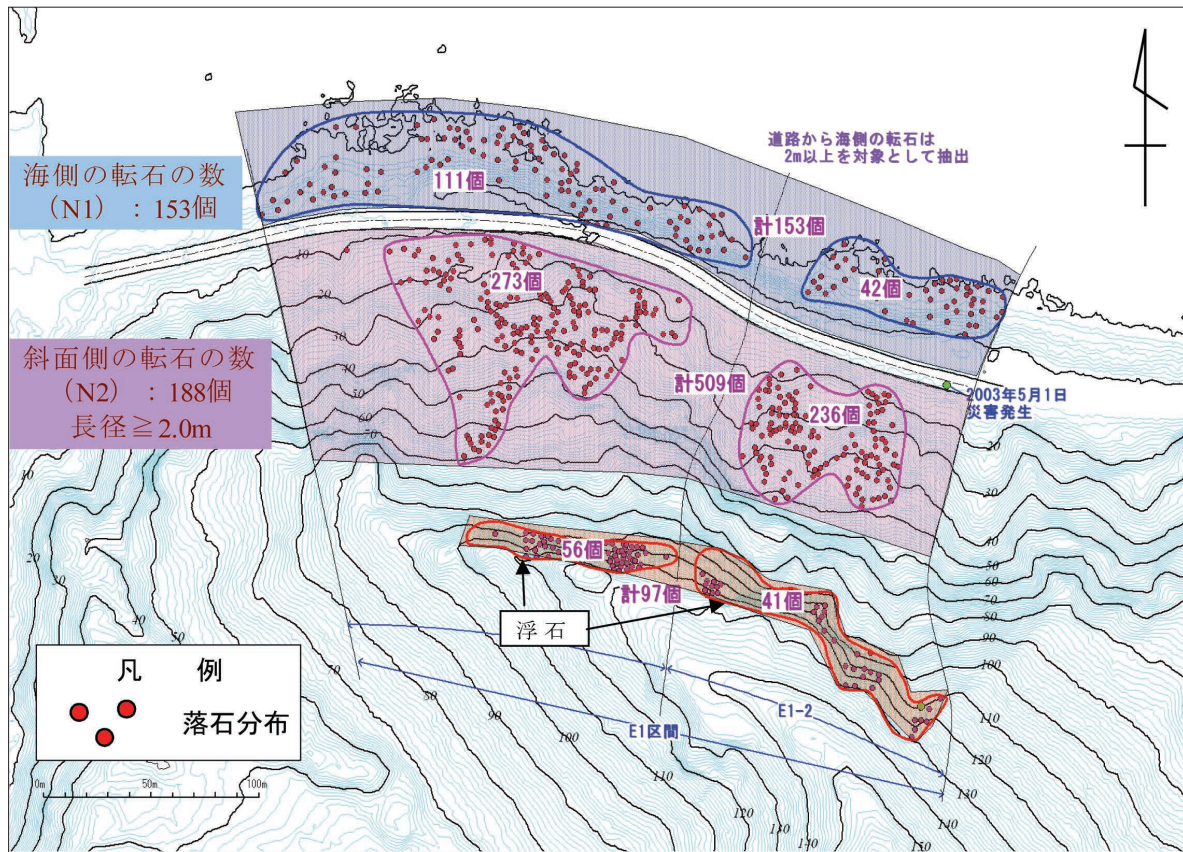


図-4 E地区転石分布図
Fig. 4 Distribution map of the boulder stones in E area.



写真-6 海岸の転石状況
Photo 6 Boulder stones at seashore.

質層の浸食が進み、硬質な溶結凝灰岩が突き出したオーバーハングとなっている箇所が多数認められる。

図-5に当地区の岩盤急崖斜面における崩壊機構の一例を示す。すなわち、以下の①→②→③の現象が繰り返されることにより、落石の発生と急崖部の後退が進行していると考えられる。

- ①溶結凝灰岩の割れ目を通して供給される地下水が、下位の軟質層との境界に沿って湧水として流出するため、軟質部の浸食・流出が進み、オーバーハングが形成され、急崖が不安定化する。
- ②下位の軟質層の局部破壊によりオーバーハング部の岩塊の変位増大や割れ目の拡大が生じ、オーバーハングがさらに進展する。その結果、溶結凝灰岩の緩みが拡大し、岩盤表面の浮石化が進む。
- ③浮石化した部分や緩み領域から落石が発生し、さらに地山内部に緩みが拡大する。

4. 崩壊機構

上部斜面の急崖は、柱状節理の発達する溶結凝灰岩からなり、節理や割れ目が大きく開口し、表層の緩みが顕著である。

溶結凝灰岩の下位には、軟質ながら割れ目の少ない溶結凝灰岩低溶結部及び凝灰角礫岩が分布し、地質境界沿いで湧水が認められる。このため、溶結凝灰岩直下の軟

崩壊形態としては、崩落・滑落・トップリング・座屈が発生しているものと考えられる。

なお、崩壊の誘因としては、表-1の番号1の落石は日本海中部地震、番号2は降雨時であり、地震や地下水の作用が上げられる。なお、番号3は、誘因が明確となっていないが、オーバーハングが進展していたことがわかっている。また、凍結融解の影響も考えられる。

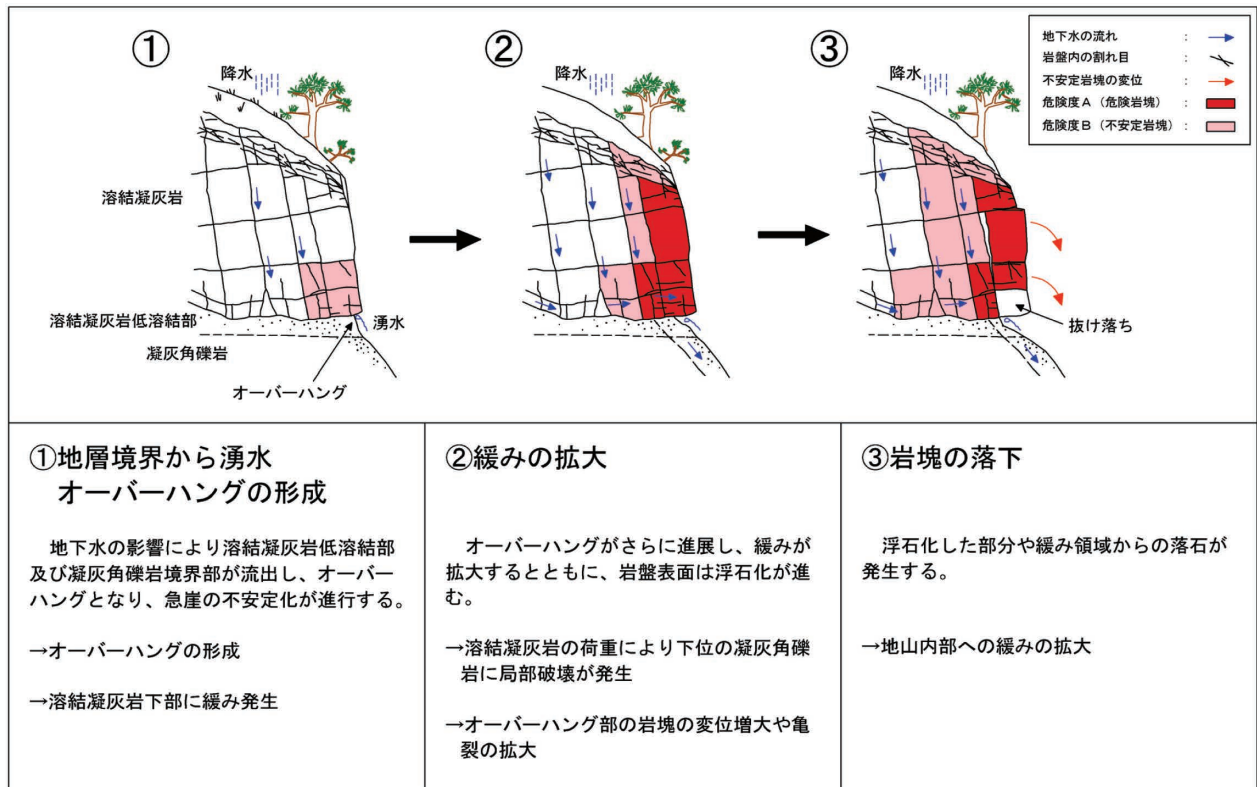


図-5 崩壊機構 (一例)

Fig.5 Proposed mechanism of the rock falls (Typical case).

5. 個別岩塊の安定性評価

急崖部の目視観察で安定および不安定と判断した岩塊をC地区・D地区・E地区で21岩塊選定し、それらについて常時微動計測を行い、岩塊の安定性を定量的に評

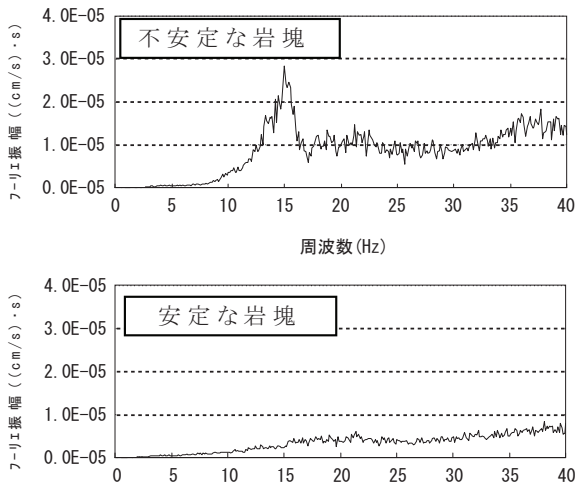


図-6 スペクトルの出力例

Fig. 6 Typical amplitude spectrum of microtremor observed on stable or unstable rock mass.

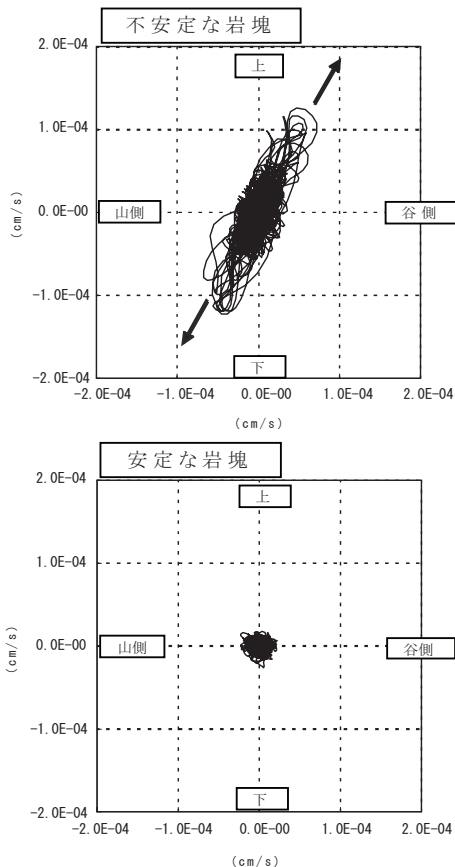


図-7 振動粒子軌跡の出力例

Fig. 7 Typical particle motions observed on stable or unstable rock mass.

価した。

測定・解析については、浅井他(2005)¹⁰⁾にしたがって実施した。ここでは、データ取得後の解析について述べる。

5.1 常時微動計測データの解析方法

取得した常時微動計測データについて、下記の内容で解析を行った。

①振動(速度)波形の出力

3成分(南北, 東西, 上下方向)の計測データについて、ノイズ除去等の適切な処理を行い、波形記録を出力する。

②周波数分析によるスペクトル及びスペクトル比の出力

振動波形記録に対してフーリエ変換を行い、周波数スペクトルを出力する(図-6)。さらに、入力基盤と考えられる安定岩盤のスペクトルとその他の計測点のスペクトルとの比を求め、安定岩塊と不安定岩塊との間で、どのような周波数の振動が増幅されているのかを整理する。

なお、目視観察により岩塊の安定性は、以下の状況である。

- ・ 安定岩塊は、崖上でも割れ目が密着し、背後・左右岩塊と一体化している。
- ・ 不安定岩塊は、割れ目が開口し、背後・左右岩塊と分離している。

③振動粒子軌跡(オービット)の出力

振動波形記録をもとに、2次元平面内での軌跡を示す振動粒子軌跡を求め、出力する(図-7)。

④累積振幅の出力

振動による仕事(振動エネルギー)に対応すると考えられる累積振幅について、波形記録を積分することにより求める。安定岩塊に対して、不安定岩塊は相対的に大きく振動する。

⑤解析結果の評価

常時微動解析結果をもとに、岩塊ブロックの振動特性をまとめ、本地区における相対的な岩塊ブロックの安定性(周辺岩盤との密着性)について評価する。

5.2 常時微動解析結果

解析結果図における各成分は次のとおりである。

- ・ 東西方向：水平動成分のうち斜面方向と直交する方向(ほぼ国道279号線と平行)
 - ・ 南北方向：水平動成分のうち斜面方向
 - ・ 上下方向：上下動成分
- を示している。

測定岩塊数が多いため、ここではD地区を代表させて各図を示す。

1) 波形記録(速度波形)の出力

車両走行振動の波形記録を図-8に示す。同図の縦軸は速度振幅(kine: cm/s)であり、横軸は時間(秒)である。

各計測点の波形記録を相対的に比較すると次のとおりである。

- ・安定岩塊の計測点D5では、振動の振幅が小さい。
- ・その他の計測点では、振動の振幅が比較的大きい。

2) 周波数分析によるスペクトル及びスペクトル比の出力

D地区の計測点で得られた車両走行振動のフーリエスペクトルを図-9に示す。

安定したフーリエスペクトルを求めるために、車両走行振動20波分(1波の記録時間長8.19秒×20=163.8秒)のデータを重ね合わせて平均化した。同図の縦軸はフーリエ振幅(kine・Sec)であり、横軸は周波数(Hz)である。

各計測点のフーリエスペクトルを相対的に比較すると、計測点D5では、フーリエ振幅が小さく、かつ平坦な形状のスペクトルパターン(卓越する周波数は認められない)を示すため、安定岩塊であると考えられる。

次に、この入力基盤と考えられる安定岩塊(計測地点5)のスペクトルとその他の計測点のスペクトルとの比を求め、図-10に示した。

同図の縦軸はフーリエスペクトル比(倍率)であり、横軸は周波数(Hz)である。各計測点のフーリエスペクトル比を相対的に比較すると、次のとおりである。

- ・計測点D3のスペクトル比は、明瞭な卓越周波数は認められず、いずれの周波数においても1~2倍程度の倍率である。
- ・計測点D2、D4では、比較明瞭なピークがみられ、特有の周波数が4~6倍程度増幅されている。
- ・計測点D1では、明瞭なピークがみられ、特有の周波数が6~8倍程度増幅されている。

3) 振動粒子軌跡(オービット)の出力

振動波形記録から振動粒子軌跡(オービット)を求め図-11に示した。

各計測点における岩塊の揺れの方向を南北-東西(水平面)、東西-上下(正面)、南北-上下(断面)の3平面について表現した。同図の縦軸、横軸ともに速度振幅(kine)である。水平面は、岩塊の揺れを上から眺めた平面図で、正面は、岩塊の揺れを谷側から眺めた正面図を表し、断面は、岩塊の揺れを東側(むつ側)から眺めた断面図となる。

各計測点の振動粒子軌跡を相対的に比較すると次のとおりである。

- ・計測点D3、D5では、どの平面においても軌

表-3 車両走行振動累積振幅比

Table. 3 Raito of the accumulated amplitude of vibration caused by traffics.

常時微動計測点	車両走行振動累積振幅比 安定岩塊D5との比 (3成分合成値)
D1	2.73
D2	1.81
D3	1.02
D4	1.87

跡の幅が小さく振動の方向はランダム(円形)で、特有の方向性が認められない。

- ・計測点D1、D2、D4では、軌跡の幅は比較的大きく、軌跡に方向性がみられる。

4) 累積振幅の出力

振動による仕事(振動エネルギー)に対応すると考えられる累積振幅について、波形記録を積分することにより求めた。求められた各計測点における累積振幅値を安定岩塊の累積振幅値で割り、各計測点における累積振幅比を求めた。これを表-3に示す。なお、同表における累積振幅比は3成分の合成値であり、車両走行振動20波分の平均値である。

5) 解析結果の評価

ここでは、C地区・D地区・E地区を対象にし、常時微動解析結果を評価し、表-4に示す。評価にあたっては、累積振幅比・スペクトル比・振動粒子軌跡を用いた。

この結果、「最も不安定・不安定」と評価した箇所が8岩塊、「やや不安定」としたのが4岩塊、「ほぼ安定・安定・最も安定」としたのが9岩塊である。

表-4 常時微動計測結果一覧

Table 4 Table of the results of microtremor surveys.

計測地区	常時微動計測点	累積振幅比 (振動の振幅)	スペクトル比 (特有の卓越ピーク、増幅倍率)	振動粒子軌跡 (振動の方向性)	解析結果から推定される岩塊の安定性
		※1安定岩盤との比	※1安定岩盤との比		
C	C1	2.74:大	明瞭なピークあり(7Hz付近) 増幅倍率:大(10~15倍)	方向性なし	不安定
	C2	1.67:中	明瞭なピークなし 増幅倍率:小(1~3倍)		
	C3	2.40:大	明瞭なピークあり(14Hz付近) 増幅倍率:大(約13倍) 上下動でも大	方向性あり	不安定
	C4	1.66:中	上下動でややピークあり 増幅倍率:中(約5倍)		
	C5	1.12:小	明瞭なピークなし 増幅倍率:小(1~2倍)	方向性なし	安定
	C6	1.79:中	特に上下動で明瞭なピークあり(15Hz付近) 増幅倍率:大(約12倍)		
	C7	1.81:中	明瞭なピークあり(10,15Hz付近) 増幅倍率:中(約7~10倍)	方向性なし	やや不安定
	C8	累積振幅:小	スペクトル振幅:小 明瞭なピークがなくフラットな形状		
D	D1	2.73:大	明瞭なピークあり(6Hz付近) 増幅倍率:大(6~10倍)	方向性あり (南北方向が卓越)	最も不安定
	D2	1.81:中	ややピークあり(6Hz付近) 増幅倍率:中(4~6倍)		
	D3	1.02:小	明瞭なピークなし 増幅倍率:小(1~2倍)	方向性なし	安定
	D4	1.87:中	ややピークあり(7~9Hz付近) 増幅倍率:中(約4倍)		
	D5	累積振幅:小	明瞭なピークがなくフラットな形状	方向性なし	最も安定
E	E1	3.12:大	明瞭なピークあり(11Hz付近) 上下動でもピークあり 増幅倍率:大(10~30倍)	方向性あり (東西方向が卓越)	最も不安定
	E2	2.86:大	明瞭なピークあり(10Hz, 13Hz付近) 上下動でもややピークあり 増幅倍率:大(7~10倍)		
	E3	3.08:大	明瞭なピークあり(5Hz, 10Hz付近) 増幅倍率:大(10~15倍)	方向性あり (南北方向が卓越)	最も不安定
	E4	1.52:中	ややピークあり(9Hz付近) 増幅倍率:中(約1~4倍)		
	E5	1.52:中	ややピークあり(10Hz付近) 増幅倍率:中(約1~5倍)	やや方向性あり	やや不安定
	E6	1.54:中	ややピークあり(10Hz付近) 増幅倍率:中(約1~5倍)		
	E7	1.30:小	ややピークあり(10Hz付近) 増幅倍率:中(約1~5倍)	方向性なし	ほぼ安定
	E8	累積振幅小	スペクトル振幅:小 明瞭なピークがなくフラットな形状		

※1: C地区ではC8、D地区ではD5、E地区ではE8

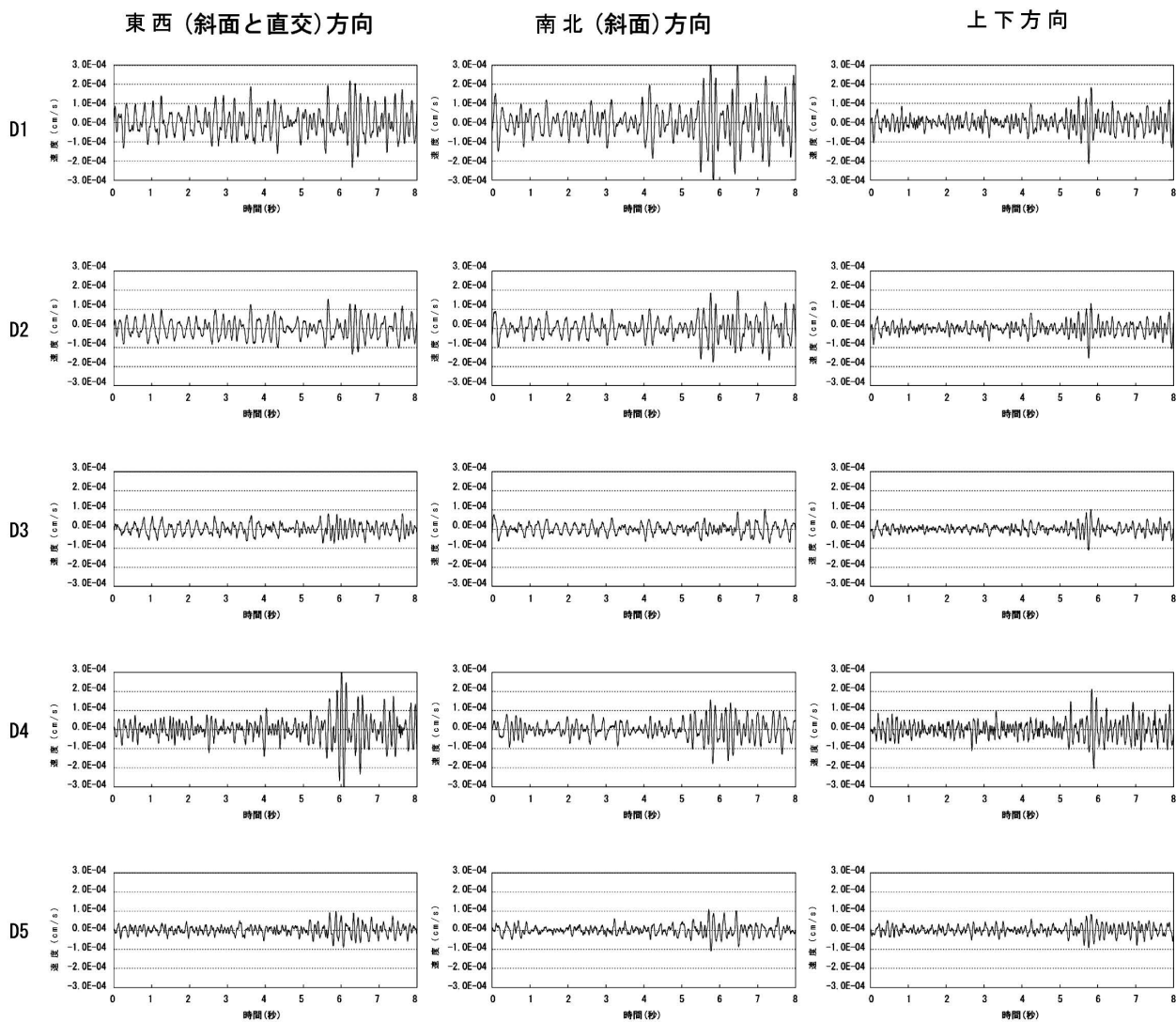


図-8 振動波形記録例 (D 地区 車両走行振動)

Fig. 8 Typical waveforms of the vibrations caused by traffics in D area.

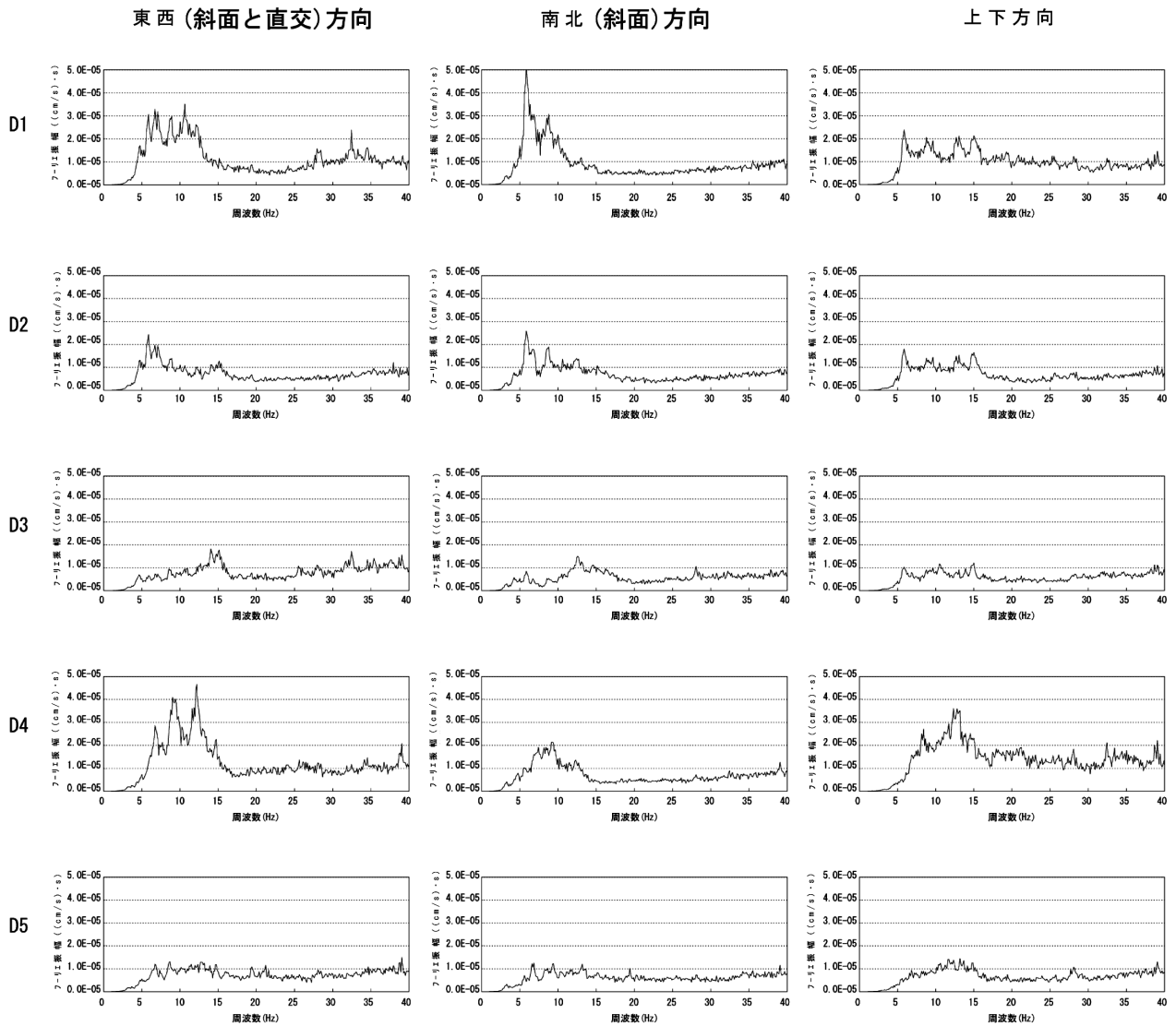


図-9 フーリエスペクトル一覧図 (D地区 車両走行振動)
 Fig. 9 Fourier amplitude spectrums of the vibrations caused by traffics in D area.

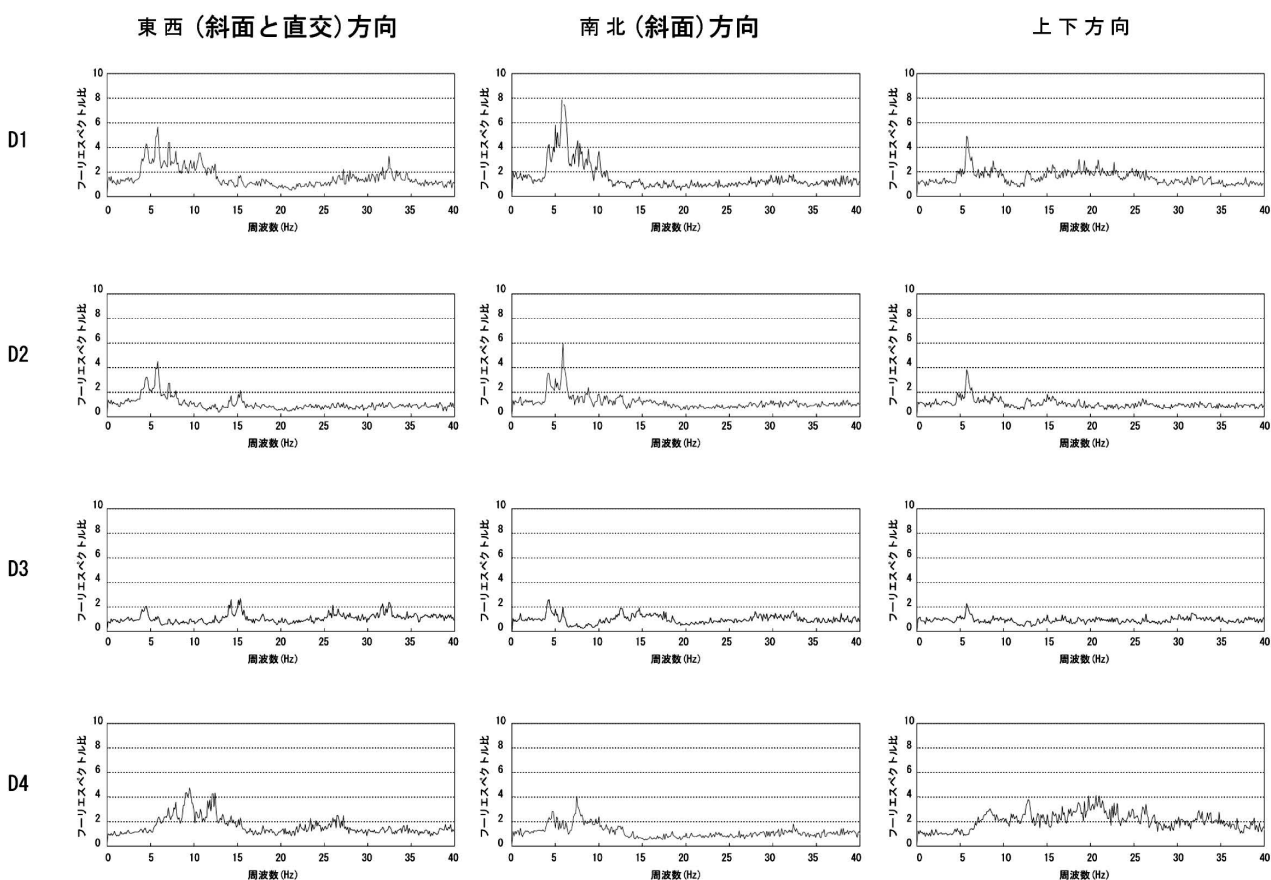


図-10 フーリエスペクトル比一覧図 (D 地区 車両走行振動)

※計測点 D 5 のフーリエスペクトルとの比, 図の縦軸は倍率である

Fig. 10 Amplitude spectrum ratio of traffic noise in D area.

* Ratios at each point is referred with D5, and vertical axis show magnification factor.

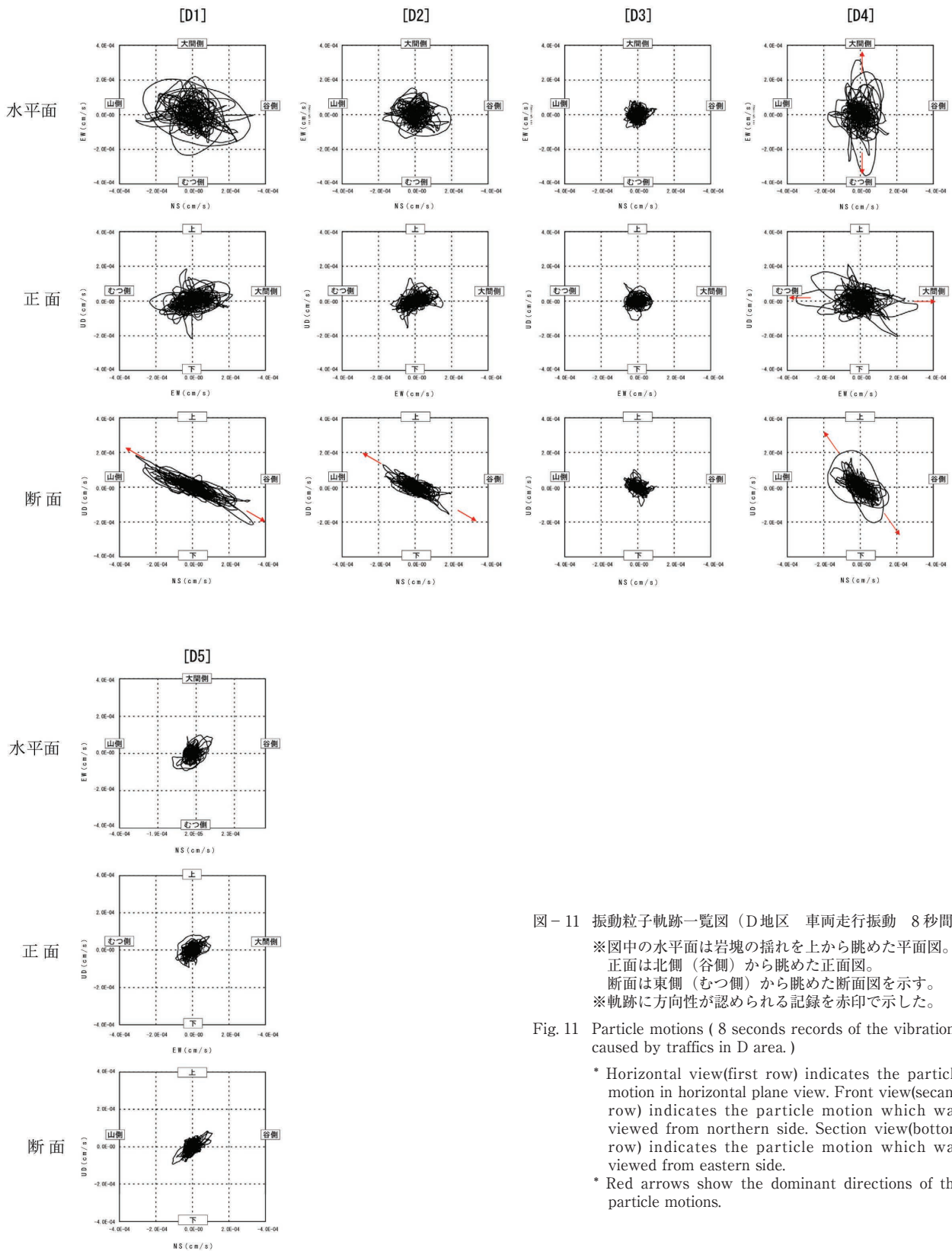


図-11 振動粒子軌跡一覧図 (D地区 車両走行振動 8秒間)

※図中の水平面は岩塊の揺れを上から眺めた平面図。

正面は北側(谷側)から眺めた正面図。

断面は東側(むつ側)から眺めた断面図を示す。

※軌跡に方向性が認められる記録を赤印で示した。

Fig. 11 Particle motions (8 seconds records of the vibrations caused by traffics in D area.)

* Horizontal view(first row) indicates the particle motion in horizontal plane view. Front view(second row) indicates the particle motion which was viewed from northern side. Section view(bottom row) indicates the particle motion which was viewed from eastern side.

* Red arrows show the dominant directions of the particle motions.

6. 落石シミュレーション

落石対策工を合理的に設計するためには、落石の跳躍量や速度等を正確に把握する必要がある。一般に、落石の衝撃力やエネルギーは落石対策便覧（社）日本道路協会、2000¹¹⁾）に示される経験式から求められる。しかし、この経験式では、落石と斜面の衝突や摩擦による速度の変化及び斜面の詳細な地形を考慮できない。

そこで衝突時のエネルギー損失モデルを取り入れた改良型の DDA 解析（Ma et al., 2004）¹²⁾）によって落石エネルギーや跳躍量を求めた。

本解析に当たっては、図-12 に示す流れで進めた。

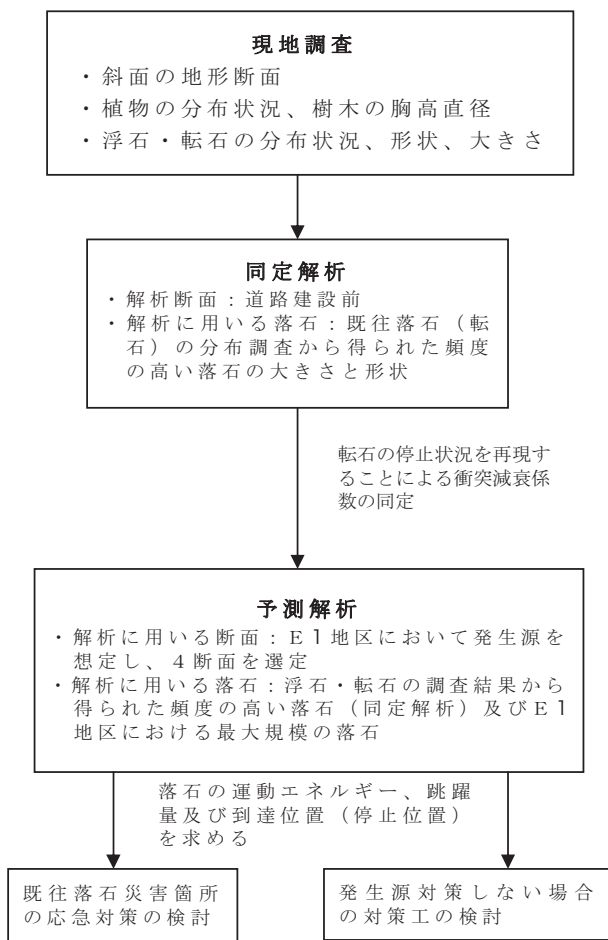


図-12 落石シミュレーションの流れ
Fig. 12 Framework of the rock fall simulation.

6.1 落石調査

図-13 に現地調査で得られた転石（既往落石）の分布状況を、図-14 に 2003 年に発生した落石の経路の断面図を示す。現地調査結果の概要を示す。

- ・ 転石分布から落石の堆積域は標高0~70mである。落石の総数は341個であり、その内訳は国道より海側

で (N1 = 153), 国道より斜面側で (N2 = 188) である。

- ・ 頻度の高い落石の寸法は 2.4 × 2.0 × 1.2m であり、最大のものは 5.8 × 4.3 × 2.8m である。

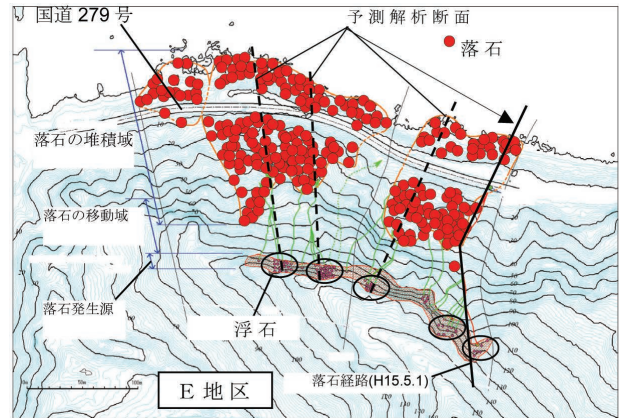


図-13 落石の分布と解析断面位置
Fig. 13 Distribution of fallen rocks and the location of interpreted sections.

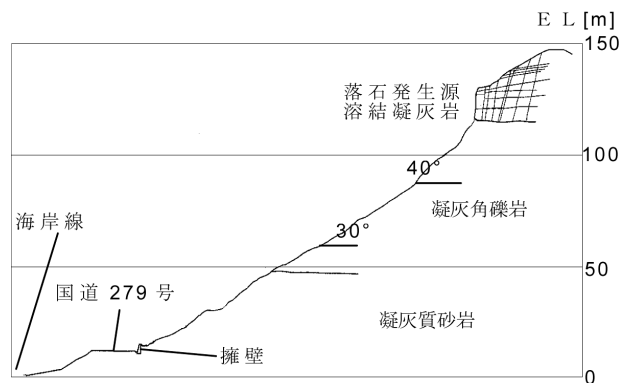


図-14 平成 15 年の落石経路断面
Fig. 14 Section view along the rock falls which occurred in 2003.

表-5 物性及び解析条件
Table. 5 The physical properties of rocks, and parameters for the simulation.

項目	落石	斜面
ヤング率 E (GPa)	34	0.1
ポアソン比 ν	0.2	0.3
単位体積重量 γ (KN/m ³)	24	19
時間間隔 (s)	0.001	—
衝突減衰係数 β	一様乱数 (0-1)	—
角度 (°) ※	一様乱数 (1-360)	—
計算ケース	200 回	—

※落石の落下開始点における落石の形状を考慮した初期の角度

6.2 衝突減衰係数の同定

衝突減衰係数 (β) の同定は、現地調査で得られた落石分布状況を再現することにより行った。同定解析は、衝突減衰係数を0~1の一様乱数とし、200回試行した。同定解析には、頻度の高い落石 (2.4 × 2.0m) を用い、解析断面は2003年に発生した落石の経路を用いた (図-13及び図-14)。物性および解析条件を表-5に示す。

同定解析で得られた落石の軌跡を確認すると $\beta = 0.7$ の場合、落石は斜面の中部で停止し、 $\beta = 0.1$ の場合、落石は海岸で停止し、 $\beta = 0.02$ の場合、落石は停止しない。これらのことから、落石は小さい衝突減衰係数ほど移動距離が大きくなる事が分かる (図-15)。

現地調査で得られた落石の分布範囲と解析で得られた落石の停止位置を比較すると、 $\beta = 0.7$ と 0.1 の場合は実際の落石の分布範囲に収まるが、 $\beta = 0.02$ では実際の落石分布を説明できない。そこで、 β の下限値を0.04とし、 β の範囲を0.04~0.8として解析した。解析で得ら

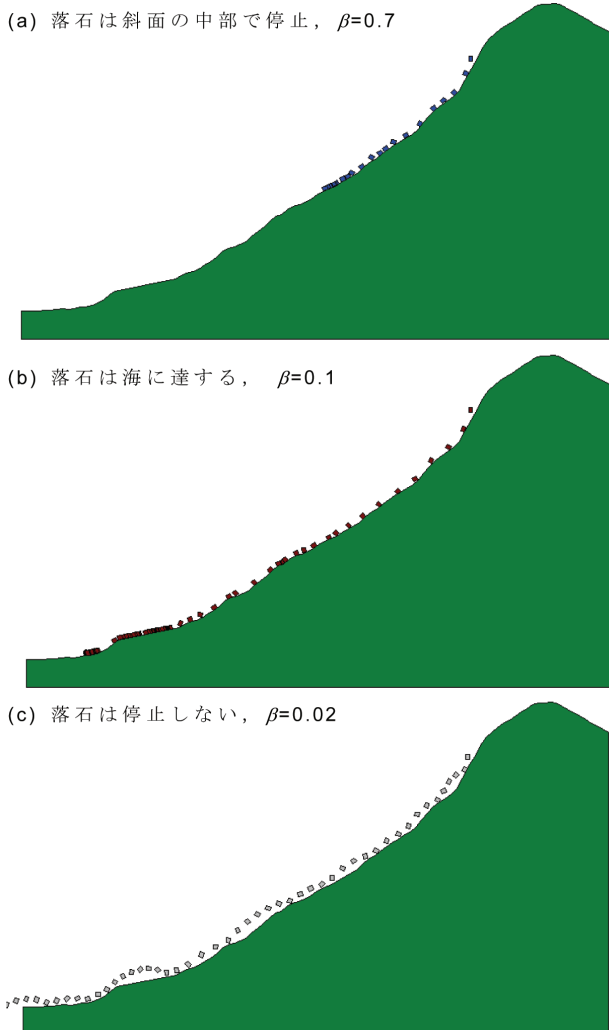


図-15 シミュレーションにより得られた落石軌跡
 Fig. 15 Result of the rock fall path by the rock fall simulation.
 a) case for collision damping coefficient $\beta = 0.7$
 b) $\beta = 0.1$, c) $\beta = 0.02$

れた n_1 / n_2 (n_1 : 国道上を横断した落石の数73, n_2 : 国道の斜面側に停止した落石の数84) の値は、現地調査で得られた $N1 / N2$ (153/188) とほぼ一致する結果となった (図-16)。

この結果から、衝突減衰係数 β を0.04~0.8に設定し、予測解析を実施した。

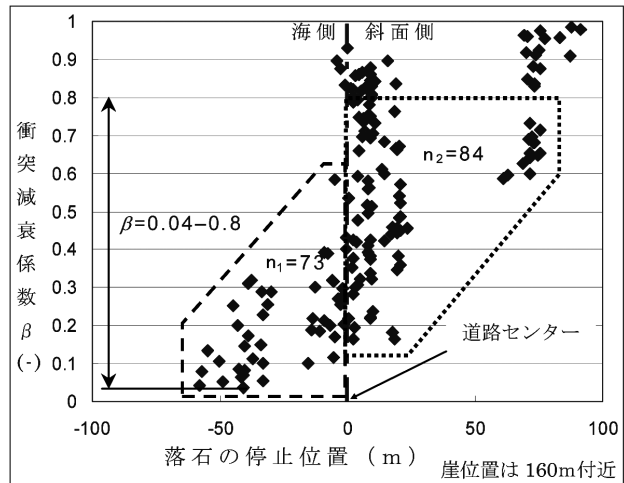


図-16 シミュレーションにより得られた落石軌跡
 Fig. 16 Correlation between simulated rock stop position and assumed collision damping coefficients.

6.3 対策工設計への適用

予測解析は4つの解析断面 (図-13) と2種類の落石を使用して8ケース行った。解析断面は斜面の高さと形状を考慮して設定し、落石の大きさは現地調査で得られた頻度の高い落石 (2.4 × 2.0m) と最大の落石 (5.8 × 4.3m) である。各予測解析ケースでは、衝突減衰係数を0.04~0.8の一様乱数として200回計算した。

最大落石を用いた落石シミュレーション結果の例を図-17に示す。断面には、落石対策工として落石防護土堤を加えた。断面中の○印は、災害復旧工事によってできた平場を示す。

落石軌跡では斜面の凹凸などによって跳躍量が変わることが分かる。落石速度は最大で20 m/sを超えるものがある。落石停止位置については斜面途中が128個・擁壁背面が43個・ポケットが15個・落石防護土堤を超えた個数が14個 (7%) であり、一定の対策効果があることを確認した。

7. 道路斜面監視システムの構築

これまで述べてきたように当地区には、不安定な岩塊や転石等が多数分布するため、対策工が完成するまでに多くの時間が必要になる。このため、それまでの間のソフト対策として道路斜面監視システムにより、道路の安

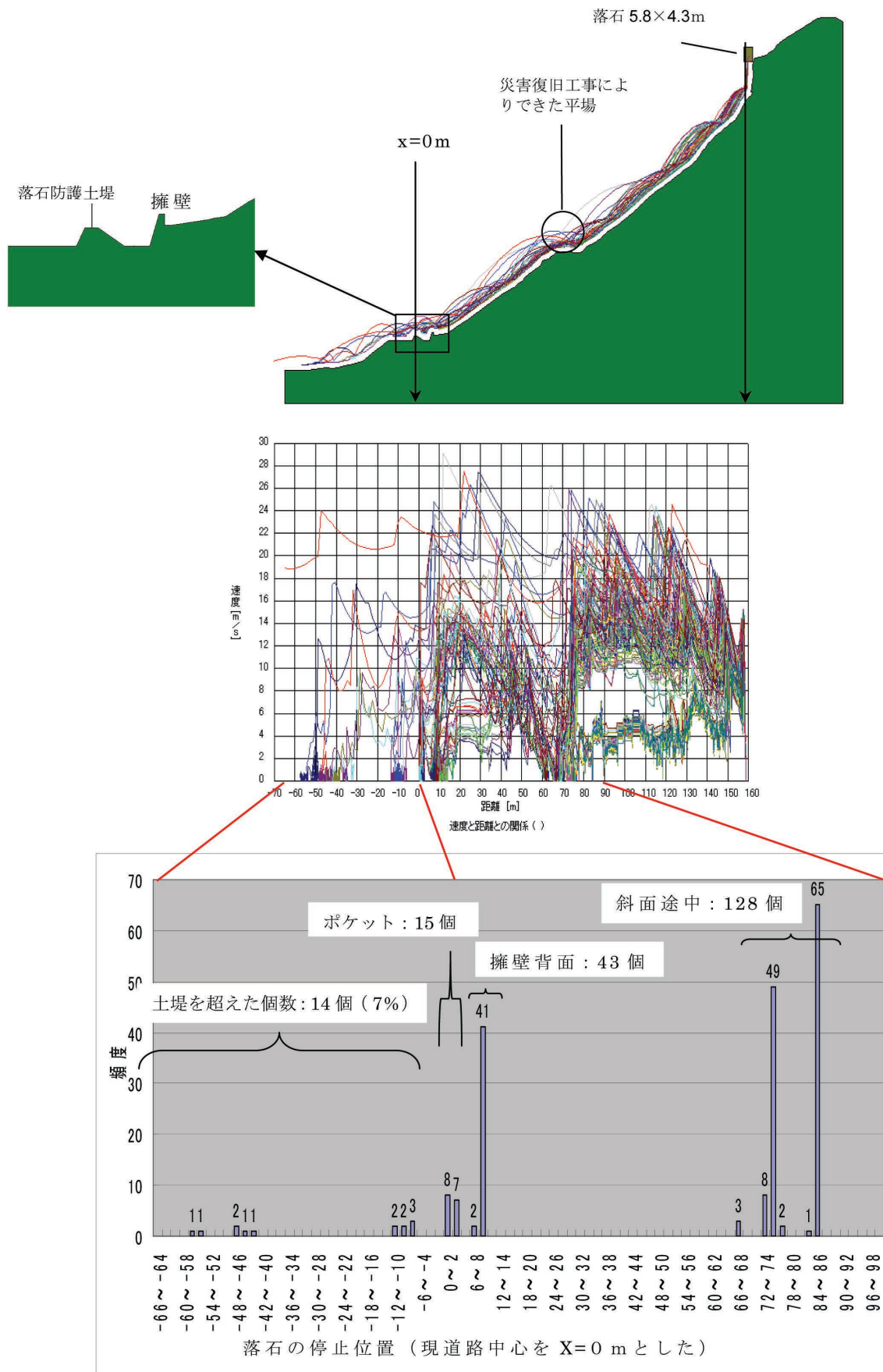


図-17 改良型 DDA 解析を用いた予測解析結果

Fig. 17 Summary of modified DDA simulation including supposed countermeasure work (embankment and protection wall).

全を確保することになった。

7.1 道路斜面監視システムの概要

道路斜面監視システムの構築においては、落石の前兆を把握した場合や落石発生の場合等に迅速に対応し被害を最小限に止めることを目的として以下の点を考慮した。

- ① 落石の前兆を捉えること
- ② 道路脇の落石防護柵に達した落石を検知できること
- ③ あるレベルに達した場合は、電話通報システムにより、道路管理者などへ直ちに通報すること
- ④ 落石の危険が高まった時及び落石を検知した場合は、直ちに遮断機が自動的に作動すること

- ⑤ 道路状況が画像でリアルタイムに把握できること
- ⑥ Web 配信により、広範囲の人々へ情報発信ができること
- ⑦ 道路管理者等との情報の共有化
- ⑧ 落石の予見や発生した場合等に迅速に対応し被害を最小限に止めること

これらを考慮したシステムの概要図を図-18に示す。

7.2 計測方法

7.2.1 計測方法の検討

岩盤斜面の観察や常時微動計測の結果、溶結凝灰岩は

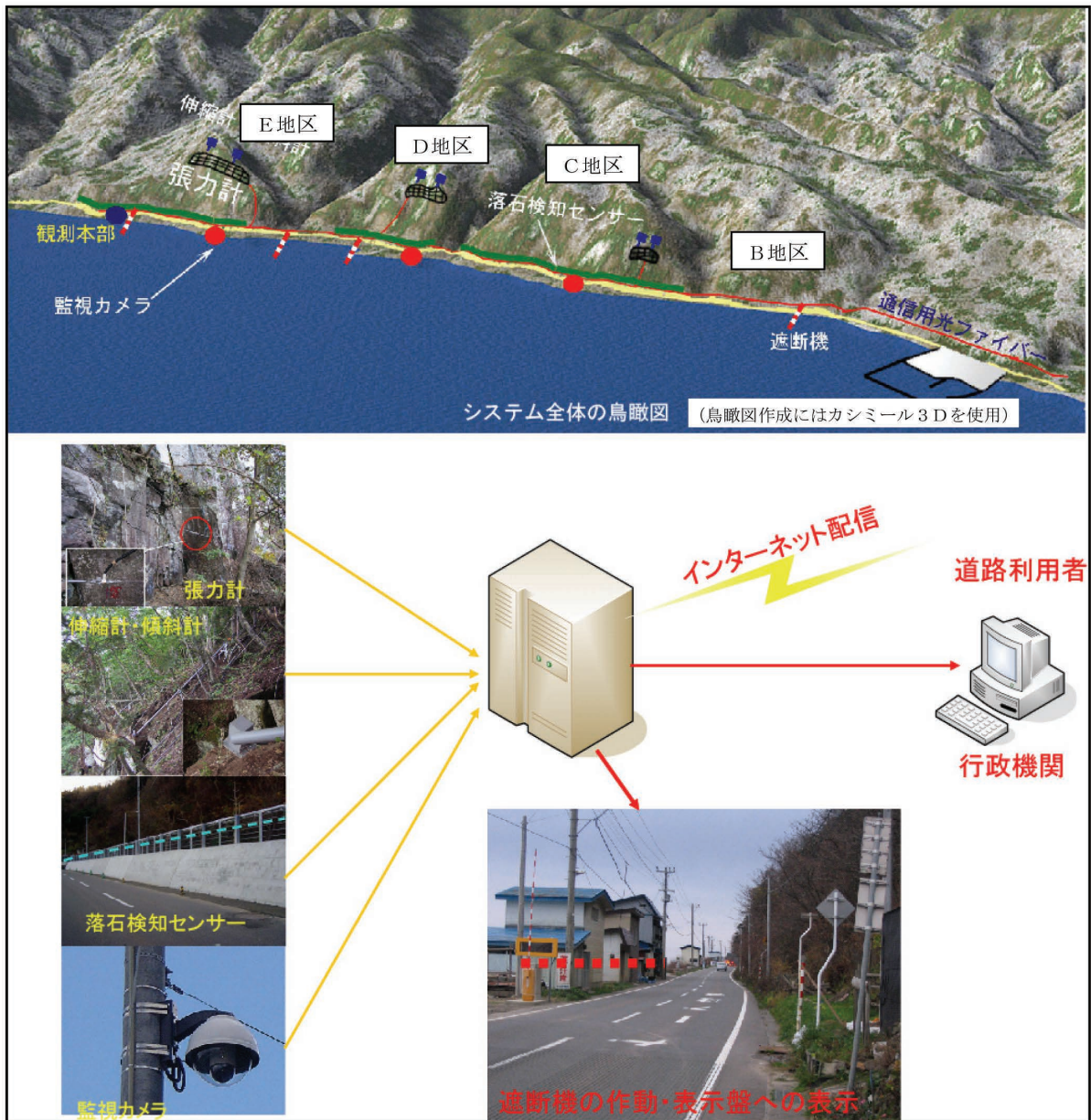


図-18 道路斜面監視システム概要

Fig. 18 Schematic diagram of the slope monitoring system of the road.

柱状節理が発達し、多数の不安定岩塊が分布しており、どこからでも落石が発生する可能性が高いと判断した。

このため、計測方法として、岩盤斜面全体の変動を面的に捉える計測（面的計測）と個別岩塊の変動を捉える計測（個別計測）が必要であると判断した。また、下部斜面の転石の落下や急崖部の計測で捉え切れない落石が想定されることから、検知センサーを道路沿いの落石防護柵に設置することにした。

7.2.2 面的計測方法

この計測方法には、光ファイバーセンサーによる方法、ワイヤーロープと張力計を組み合わせた方法を検討した（表-6）。

光ファイバーセンサーは、落雷の影響が無く、信頼性が高いことなど有利な点も多いが、当地区の岩盤斜面は凹凸が大きく、光ファイバーをキンクさせないで設置することは困難であることなどから、採用を断念した。

このため、ワイヤーロープと張力計を組み合わせた方法を採用した。

この方法は、落雷の影響を受けるため信頼性がやや低いなど不利な点があるものの、ワイヤーロープを格子状に連結することで、面的な変位をワイヤーロープで感知することが可能になるなどの利点がある。

このワイヤーロープ付張力計は、図-19に示すように横方向に約3m間隔・縦方向に約3~10m間隔でワイヤーロープを張り、横方向のワイヤーロープに上下間隔約6m毎に張力計を設置した。縦方向のワイヤーロープは横方向のワイヤーロープの間隔を保持させるために設置した。

ワイヤーロープの配置は岩盤斜面のスケッチ図をもとに策定した上で、現地状況に応じて設置した。

ワイヤーロープに初期張力を持たせるために、張力計を設置したワイヤーロープのすべてにターンバックルを設置した。初期張力は、ワイヤーロープのたるみをと

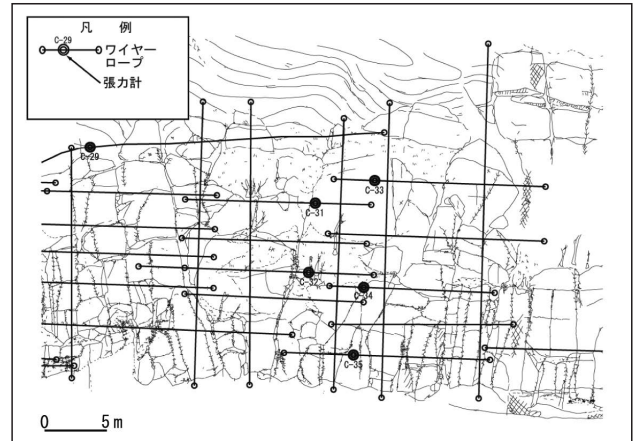


図-19 面的計測の配置図

Fig. 19 Distribution of rock fall detection tension meters.

るための荷重と今後の岩盤の変位を把握するために、約10kNの荷重とした。

なお、このような計測では温度による影響が大きいため、温度計も設置した。各地区で設置した張力計と温度計の数量を表-7に示す。

表-7 張力計と温度計の設置数量

Table. 7 Number of the tension meters and thermometers that were used in the survey area.

地区	機器	
	張力計	温度計
C地区	9基	5基
D地区	27基	7基
E地区	40基	12基
計	76基	24基

表-6 面的計測機器の比較表

Table. 6 Comparison between an optical fiber monitoring system and a tension meter monitoring system.

計測機器	長 所	短 所	判定
光ケーブルセンサー	<ul style="list-style-type: none"> ケーブルを長距離にわたって敷設することが可能である 落雷の影響が無く、信頼性が高い さびや腐食が無く、耐久性が高い 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤斜面の凹凸が大きく、光ファイバーをキンクさせないで設置することが困難である 測定レンジが狭く、大変位が測定できない 短時間（秒間隔）での測定が困難である 	△
ワイヤーロープ付張力計	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤斜面の凹凸の大きいところでの施工が可能である ワイヤーロープを格子状に連結することで、面的な変位をワイヤーで感知することができる 測定レンジが広く、大きな変動まで測定できる 短時間（秒間隔）での測定が可能である 	<ul style="list-style-type: none"> 落雷の影響を受け易いためるため、信頼性がやや低い 	○

7.2.3 不安定岩塊の個別計測

常時微動計測等により、特に不安定と判断した岩塊については、面的計測の他に個別の計測を行った。

個別計測で用いた計測機器は、伸縮計・傾斜計・亀裂変位計であり、各地区に設置した数量を表-8に示す。

表-8 個別計測の設置数量

Table. 8 Number of the extensometers, inclinometers and crack meters that were used in the survey area.

地区	機器	伸縮計	傾斜計	亀裂変位計
C地区		3基	3基	—
D地区		3基	3基	—
E地区		6基	3基	5基
計		12基	9基	5基

7.2.4 落石を検知する計測

急崖部及び下方斜面からの落石を検知するために、道路際の落石防護柵に破断センサーと振動センサーを設置した。落石検知システムの概要図を図-20に示す。

振動センサーは、21m間隔を標準に104個設置した。振動センサーが検知する振動の強さは現地実験を行い設定した。各センサーとも1ブロックを約200~250mとして10ブロックに検知区間を分け、ブロックごとに独立した信号を出力することで検知したブロックを識別できるようにした。

落石を検知した場合、Do Pa 網を利用し観測本部に発信する。

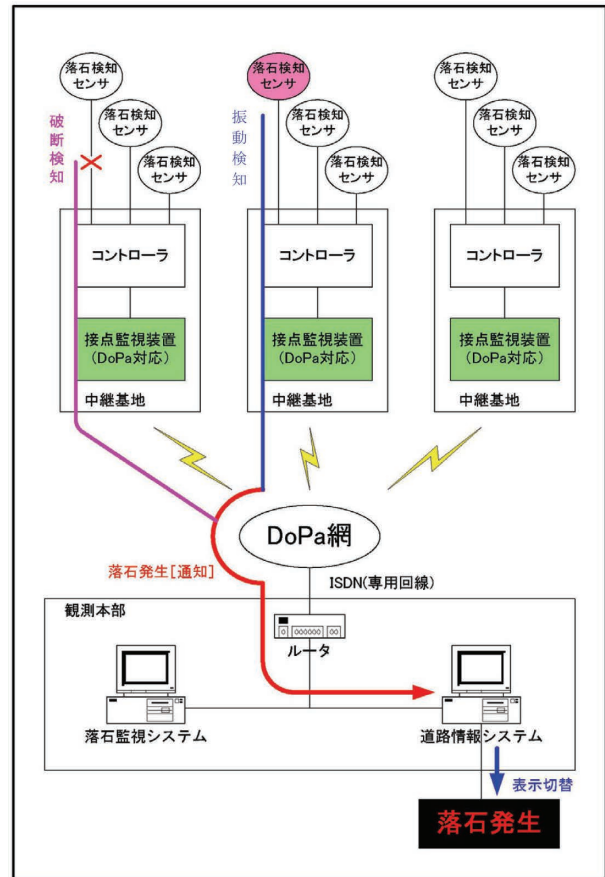


図-20 落石検知システム概要

Fig. 20 Schematic diagram of the rock fall warning system.

8. 計測事例と管理基準の設定

本地区に設置した道路斜面監視システムは、平成17年3月～平成17年5月までの試験運用を経て、平成17年6月から本格運用を行った。

運用中において、落石の前兆現象を3回捉えることができた。これらの事例を以下に紹介する。

8.1 計測事例

8.1.1 落石を捉えた事例

本事例は、写真-7に示す岩塊が崩落するまでの21日間のデータを捉えることができたものである。その際の記録を図-21に示す。なお、張力計は、気温差による変動が認められるものの、伸縮計の動きに連動して張力が増加した。岩塊の変位が増加して崩落した岩塊は、崩落する可能性が高い岩塊と調査時から判断し、張力計以



写真-7 D地区で崩壊した岩塊（左側が崩壊前、右側が崩壊後）

Photo 7 Collapsed mass of rock in D area. (Left: Before collapsed. Right: After collapsed.)

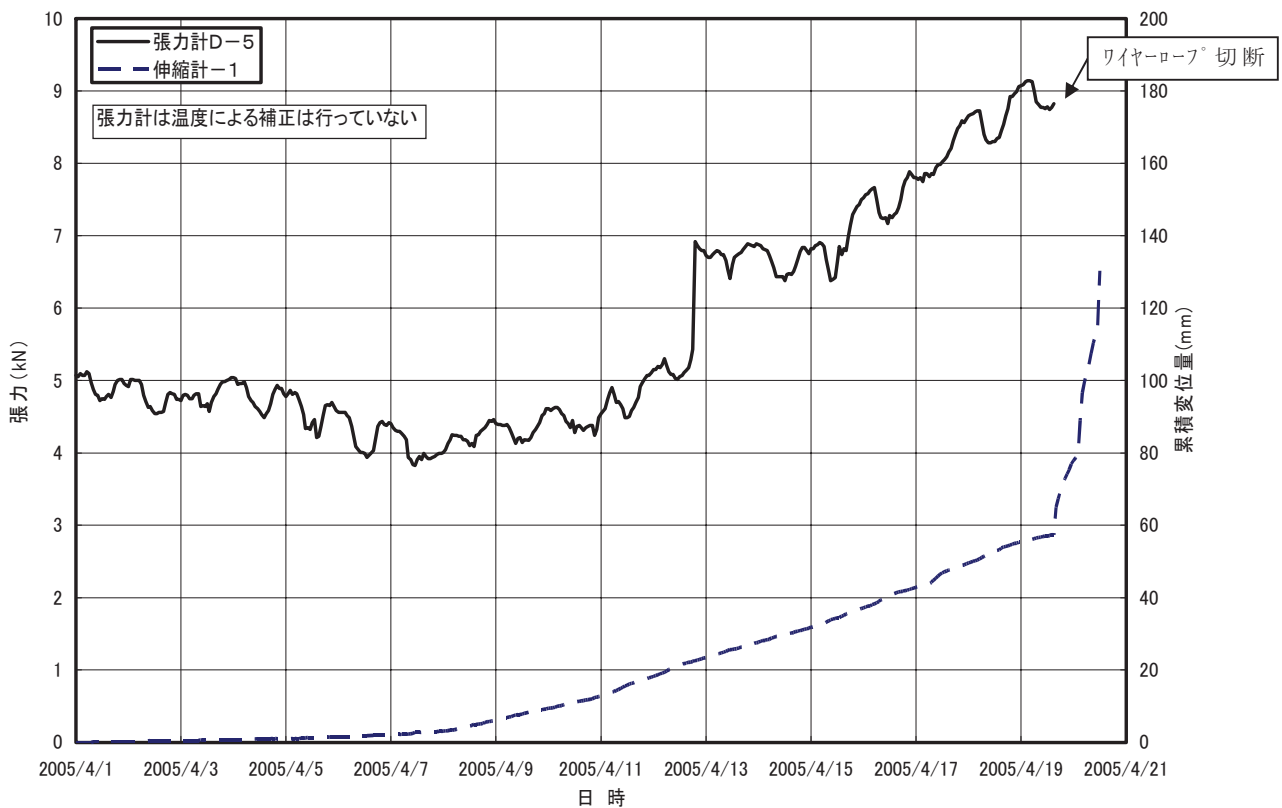


図-21 落石現象を捉えた測定記録

Fig. 21 Record of tension meter and extensometer at the actual rock fall.
Both sensors respond to movement preceding rock fall.

外に伸縮計・傾斜計を設置していた。設置したワイヤーロープが切断されたため、張力による記録は4月19日午後3時までとなっている。

ただし、伸縮計は岩塊の落下までのデータが得られ、3次クリープが確認できた。

8.1.2 落石現象の判断が困難な事例

写真-8は、この事例の岩塊の崩落後の写真である。その時の計測結果を図-22に示す。計測結果と現地状況から、落石はほぼ垂直落下的に崩落したと考えられ、その現象は約30秒以内の時間で発生している。

図-22に示す張力値のピーク時の現象から次の計測までの間(約15秒間)に岩塊は崩落している。この事例のように、抜け落ちるような形で短時間に落下するケースではワイヤーロープに荷重がかからないので、落石現象を判断することが困難である。ワイヤーロープの配置に工夫を要することが明らかになった。



写真-8 落石前兆現象を捉えられなかった落石跡

Photo 8 View of the slope which did not show preceding movements prior the fall(see also Fig.22).

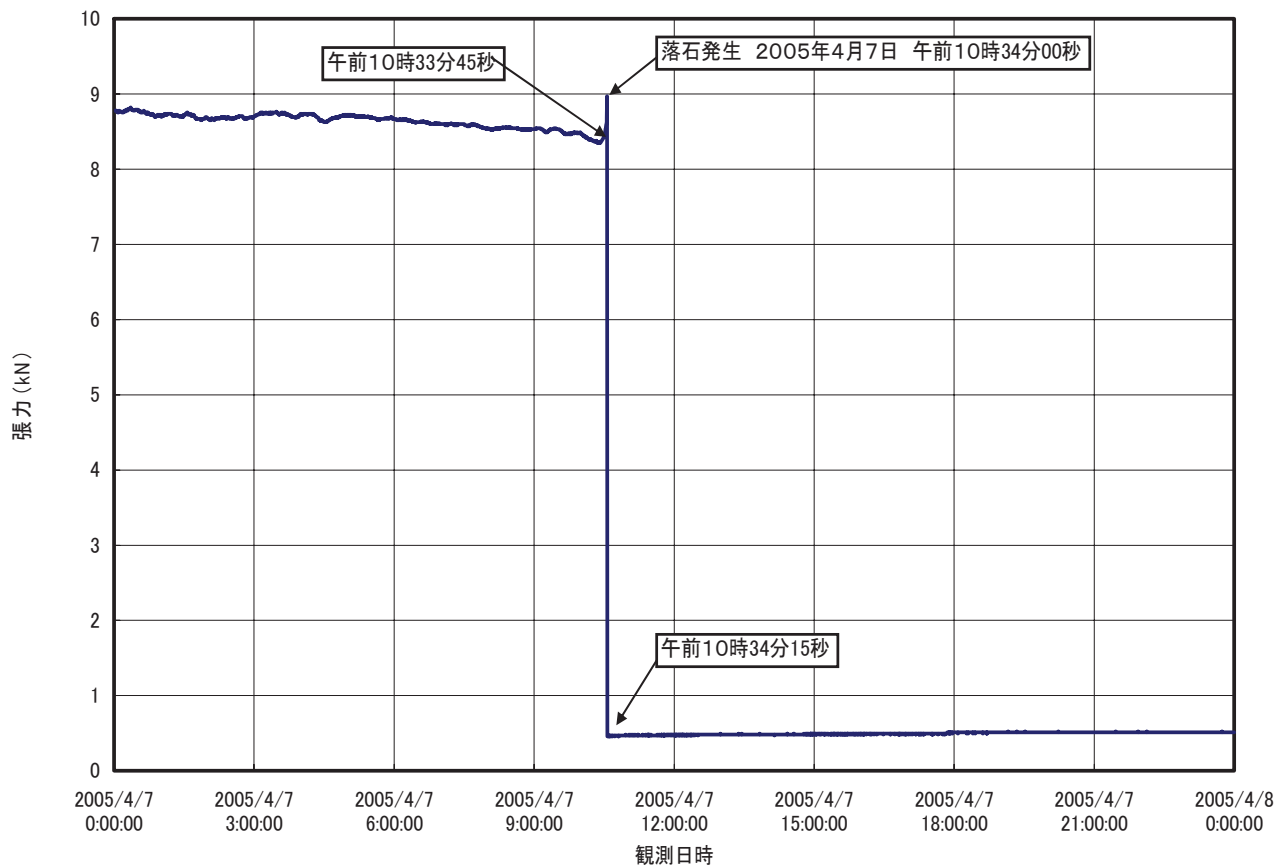


図-22 落石現象を捉えられなかった測定記録

Fig. 22 Record of the tension meter rock fall without preceding rock mass movement.

8.1.3 落石現象の判断が困難な事例

E 地区の亀裂変位計 (E-2) は、図-23 に示すように、他地点と同様に温度の上昇に伴い、割れ目が閉じる方向に変位していたが、5月中旬からは変位が逆転し、

割れ目が開口する傾向となり、6月27日で0.3mm以上の変位を示した。その後も変位が進行し、7月21日には3mm以上の変位となったため、落石の可能性が高まったと判断し、本岩塊の除去を実施した。

岩塊の状況を写真-9 に示す。

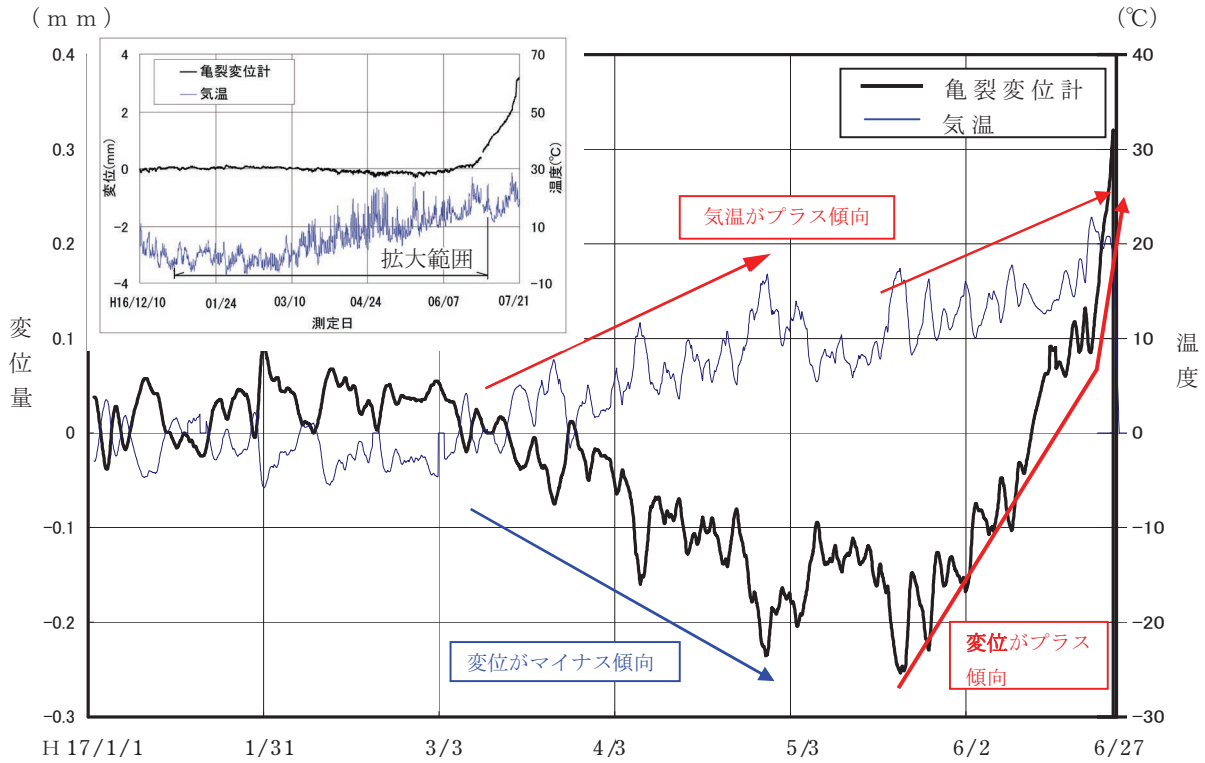


図-23 亀裂変位計 (E-2) の経時変化図

Fig. 23 Abnormal rock movement detected by crack meter and thermometer (at E-2).

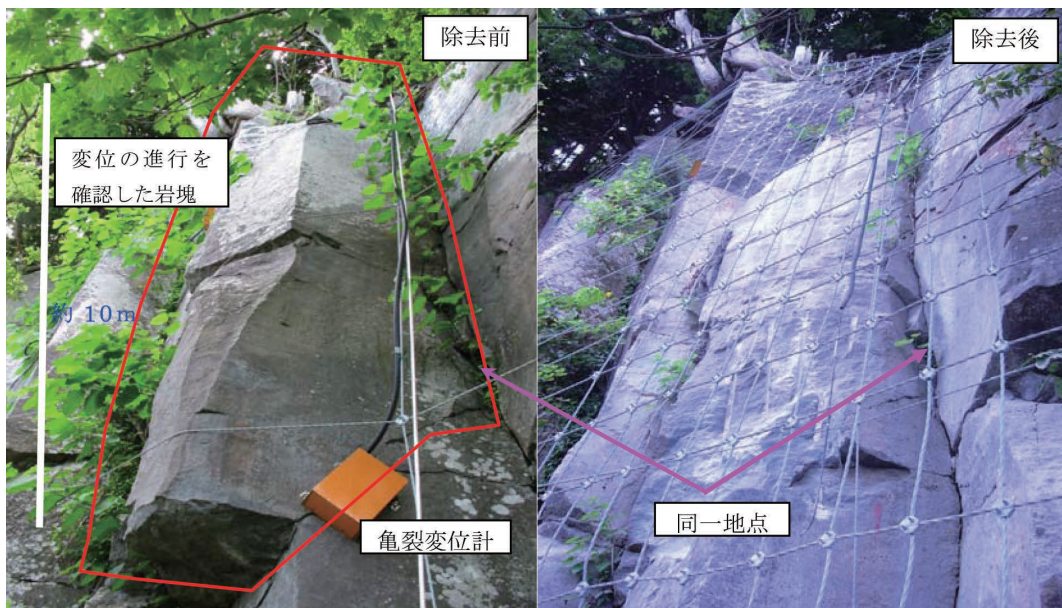


写真-9 亀裂変位計 (E-2) で変位の進行を確認した岩盤状況 (除去前と除去後)

Photo 9 View of the rock mass which was monitored its displacement by the crack meter (at E-2). See also Fig.23. (Left: Before the rock mass was removed. Right: After the rock mass was removed.)

8.1.4 誤動作の事例

これまで計測してきた中で、自然現象に起因した誤動作（遮断機が下りる）を5回経験した。その原因は、表層崩壊（倒木）・強風による木の揺れ・倒木・落雷である。落雷以外では、急崖部の肩付近などに茂った樹木の影響を大きく受けた。

表-9 自然現象に起因した誤動作の事例

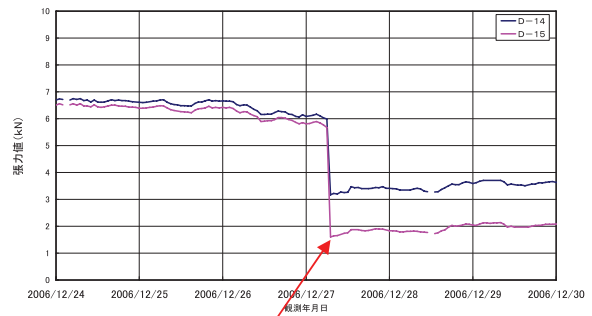
Table. 9 Typical malfunction alerts caused by natural phenomena.

日時	発生箇所	センサー	原因
H17. 6. 12	C地区	伸縮計 傾斜計	表層崩壊（倒木）
H17. 10. 8	E地区	張力計	強風による木の揺れ
H17. 10. 9	D地区	張力計	強風による木の揺れ
H18. 12. 27	D地区	張力計	倒木
H19. 6. 6	D地区	振動検知	落雷

平成18年12月27日に発生した事例を以下に示す。

当日午前6時28分30秒に、D地区の張力計D-14・D-15の瞬間変動が管理基準に達し、遮断機が作動した。現地確認の結果、倒木がワイヤーロープや張力計を直撃していることが判明した（写真-10）。当時の雨量と風速から判断すると、風雨により倒木が発生したと考えられる（図-24）。

張力計D-14・15の変動



発生時刻 12月27日
午前6時28分

累積雨量・最大風速

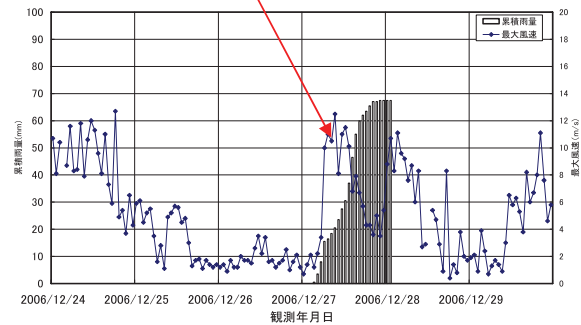
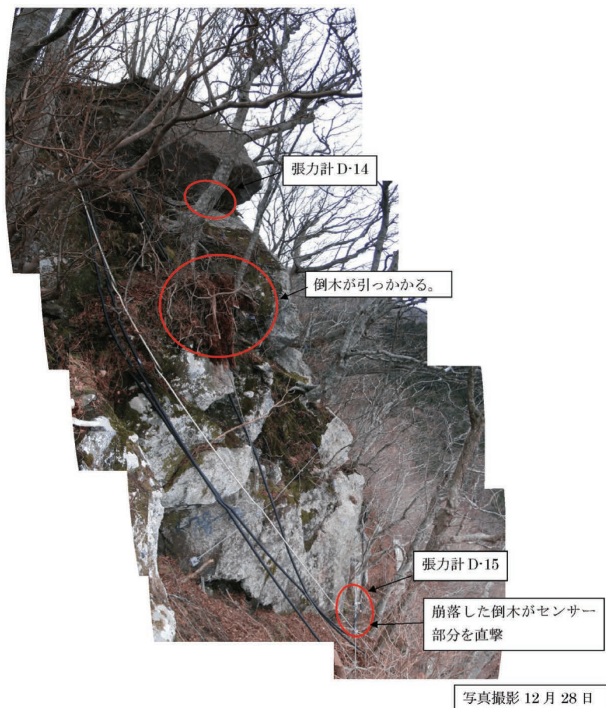


図-24 誤動作前後の張力計の変動値及び累積雨量・最大風速

Fig. 24 Displacement, accumulated precipitation and maximum wind speed before and after the malfunction due to fallen tree was occurred.



写真撮影 12月28日

写真-10 倒木と張力計の位置

Photo 10 The tension meters which was triggered by the tree fallen.

8.2 管理基準の設定

前述の落石現象と計測記録から、本地区の特徴としてクリープ的な動きが検出される場合と瞬間的な変動のみ検出される場合のあることが判明した。後者の抜け落ちるような垂直落下の落石現象に対しては、落石の前兆を十分に捉えることができなかつたが、張力値が急激に低下する現象から、落石発生の検知と解釈することができ

ると考え、このような事態も管理基準値に取り込むことにした。

そこで継続的な変位・変動がみられる場合と瞬間的に変動する場合の2つの事象を前提に、計測記録や既往文献等を参考にして、表-10に示した管理基準値を作成した。また、管理基準値に関連した張力変動の例を図-25に示す。

表-10 管理基準値と道路管理者の態勢

Table. 10 Criteria of the level of warning and its preparation for the road managing.

道路管理者の態勢	観測計器			
	張力計	伸縮計	傾斜計	落石検知センサー
注意態勢 (1日3回のデータ確認など)	一団の群れの動きとは別に目立った動きを示した場合	・0.1mm/日以上で3日間連続して増加傾向を示した場合 ・0.5mm/日以上で増加した場合	・0.1分/日以上で3日間連続して増加傾向を示した場合 ・0.5分/日以上で増加	—
警戒態勢 (24時間態勢の監視など)	測定値が+2kN以上	3mm/日以上で増加した場合	4分/日以上で増加	—
通行規制 (自動遮断など)	測定値が+3kN以上、瞬間変動が±1.5kN以上に達した場合	・10mm/日以上で増加した場合 ・2mm/時以上で増加した場合	・10分/日以上で増加した場合 ・2分/時以上で増加した場合	直径20cm、重さ10kg 斜面勾配60度、等価摩擦係数0.05の場合、落石発生高さ地上15mのエネルギーに相当する岩塊以上を検知

* : 正時毎の24時間時間変異量を示す。

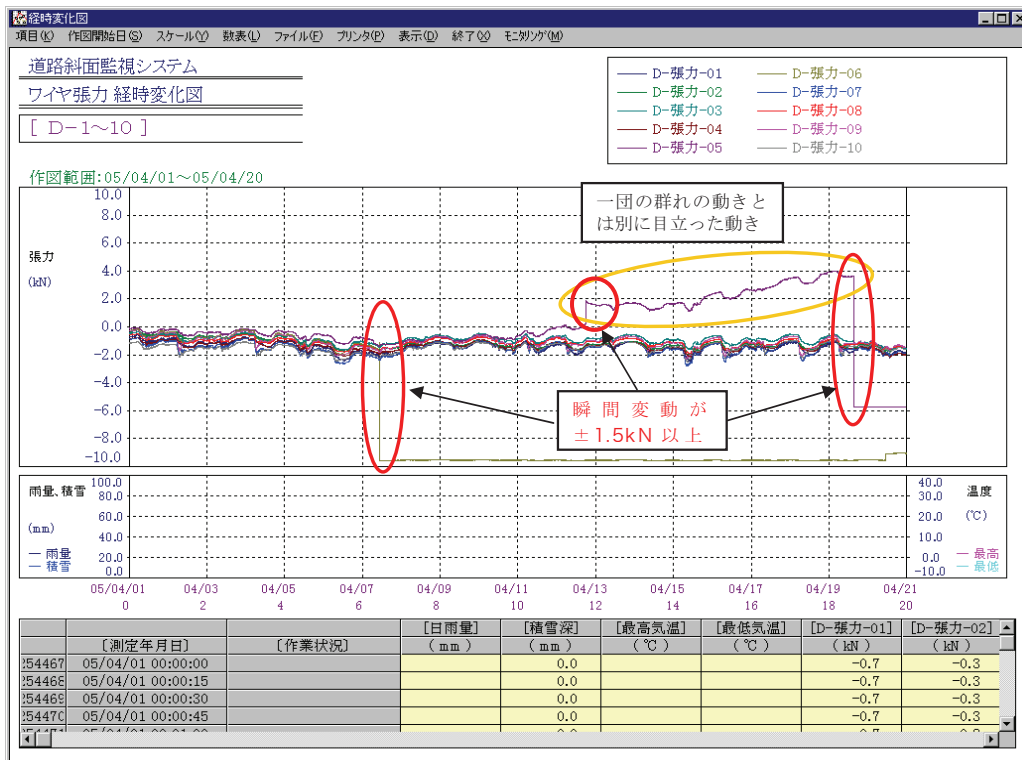


図-25 張力変動と管理基準値に関わる記録例

Fig. 25 Screen shot of warning system which shows the abrupt change and distinct behaviour of the tension over the criteria of the warning level.

9. 連絡会の活動

9.1 連絡会の設立

道路斜面監視システムを設置した風間浦村易国間地区は、道路管理者である青森県下北地域県民局地域整備部（むつ市）から車で約1時間の距離にある。落石等の緊急時には道路管理者の現地到着に時間がかかることから、その間の現地の混乱を避けると同時に、現地の正確な情報を速やかに入手するため、地域整備部では、早くから風間浦村との連携・協働の必要性を認識し、段階的プロセス（事前検討→意見調整）を経て、連絡会を設立し運営した。連絡会の基本理念・構成メンバー・役割分担は図-26のとおりである。また連絡会設立までの経緯と設立後約1年間の活動状況を図-27に整理した。

9.2 緊急時に有効に機能した連絡会

道路斜面監視システムで得られた計測記録から落石の危険性が確認されたため、平成17年4月19日夕方から対象地区を全面通行止めとしたところ、翌4月20日11時過ぎに落石が発生した。この落石は斜面途中で停止し

たため、道路施設への被害は幸いにもなかった。この全面交通止めた約21時間の間、大きな混乱もなく対応が行われた理由として次の事項があげられる。

- ①事前に管理マニュアルが整備され、それに基づいた訓練によって、関係者が当システムのしくみと緊急時における各自の役割を認識していたこと
- ②検討プロセスの中で、県と村の間に抵抗なく話し合える人間関係が構築されていたこと
- ③連絡会設立前の準備段階で、県内部での基本理念等の整理、県と風間浦村との十分な意見調整が行われており、連絡会の正式な立上げ後、会が毎回スムーズに運営できたこと

本事例のように道路管理者が短時間に災害現場に行くことができない場合、こうした「地元協議会」的組織によるパートナーシップの構築が「道路防災のソフト対策」として非常に有効であると考えられる。また、連絡会のその後の活動として、1回/年の定期や臨時の連絡会を開催し、情報を共有するとともに、意識の維持に努めている。しかし、倒木や落雷等に伴う誤作動により、現場対応される風間浦村の職員ほかの方々には多くの負担を掛けているのが実情である。

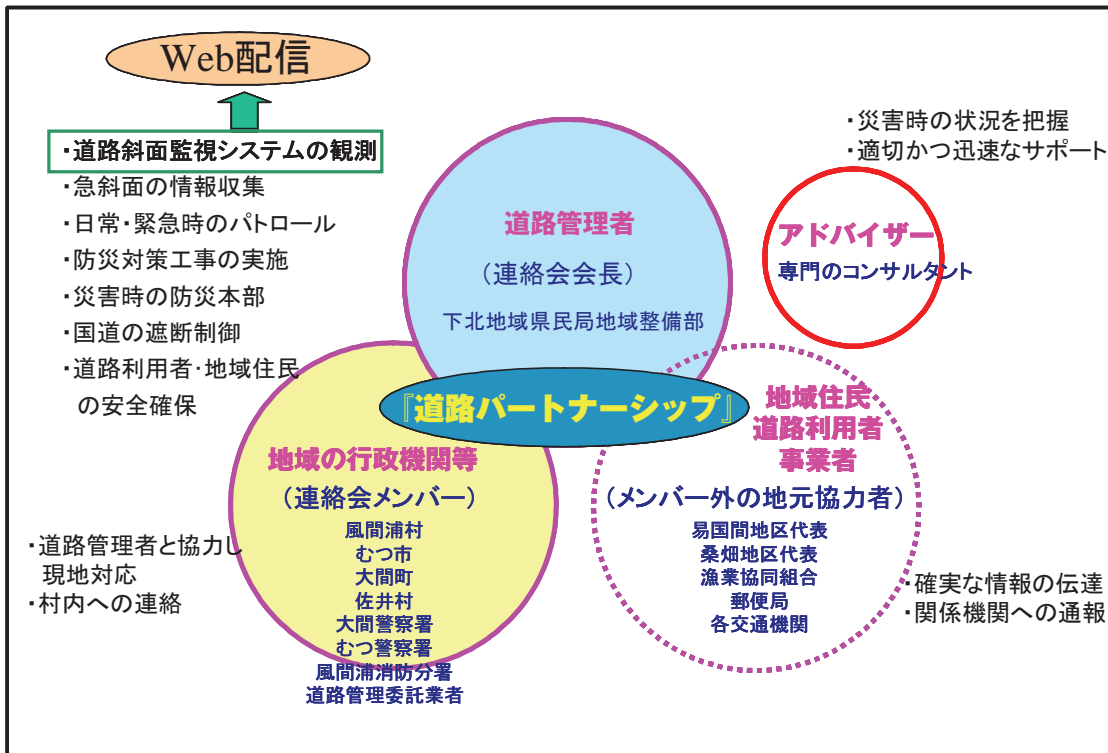


図-26 国道279号道路防災管理連絡会の理念と体制

Fig. 26 Disaster prevention committee of route 279 and its policy and members' role.

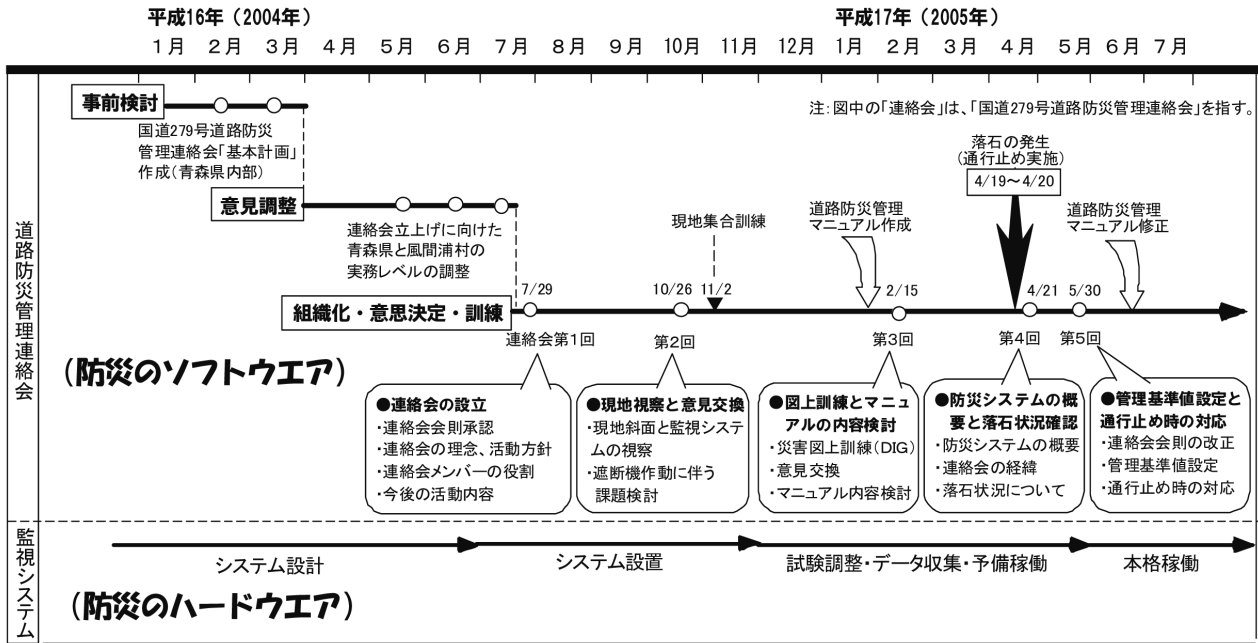


図-27 連絡会の活動経緯

Fig. 27 Activity of Disaster prevention committee of route 279.

10. 終わりに

当地区でこれまで行ってきた道路防災の取り組みについて、個別岩塊の安定性評価(常時微動測定)、落石シミュレーション、道路斜面監視システムを中心に紹介してきた。

平成17年4月20日に発生した落石は、特に不安定な岩塊と判断した岩塊であり、個別計測を行ったことよりの確な判断ができた。また、そのときの対応では連絡会が有効に機能した。

格子状のワイヤーロープを用いた張力計での測定は、我々にとって初めての試みであったが、岩塊の変動を概ね把握できたと考える。当地区のような大規模な岩盤斜面でどこから落石してもおかしくない箇所においては、有効に機能するセンサーと考える。但し、倒木や強風による木の揺れの影響を排除することが困難なこと、落雷による誤作動の発生しうる欠点もある。

今後は、当システムの経験を踏まえ、より安定したシステムを構築し、的確な変位の把握と検知ができるようにしたいと考える。

なお、当地区では、発生源対策として急崖部の岩塊除去などの対策工を平成18年度から本格的に進めており、計測機器が減少しつつある。

11. 謝辞

本論文は、青森県および電源開発株式会社の共同研究で得られた成果に基づき作成したものである。

青森県県土整備部道路課、下北地域県民局地域整備部、電源開発(株)技術開発センター茅ヶ崎研究所の関係各位に多くの支援と指導を頂いた。また、非常時の対応においては風間浦村長を始め多くの職員、大間警察署、むつ警察署、その他多くの方々の協力を得た。

システム構築に当たっては、技術本部の上野将司技師長、安藤伸部長からの多くの助言を頂いた。

ここに記して、上記の方々に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 財道路保全技術センター(2003):岩盤斜面モニタリング要領(案)
- 2) 門間敬一, 小野田敏, 落合達也, 荒井健一, 網木亮介, 浅井健一(2002):岩盤崩壊モニタリング箇所での転倒崩壊に至るまでの変位挙動の実事例, 地すべり, 第39巻第1号, pp.62-69
- 3) 木村龍人, 三宅淳一, 山本益男, 佐藤史, 三嶋昭二(2005):国道279号易国間地区 道路斜面監視システムについて, 全地連技術e-フォーラム2005仙台
- 4) 野口礼人, 井出修, 三嶋昭二, 能見忠歳, 木村龍人(2005):国道279号斜面監視システムを活用した道路防災管理連絡会の活動, 第24回日本自然災害学会学術講演会講演概要集, pp.199-200
- 5) 木村龍人, 三宅淳一, 能見忠歳(2005):国道279号における防災システムが捉えた落石現象,

第26回日本道路会議

- 6) 能見忠歳, 三嶋昭二, 佐藤史, 山本益男, 山田隆宏, 木村龍人, 多田康一郎(2006):張力計を用いた落石監視システムの開発とその有効性について, 第41回地盤工学研究発表会
- 7) 能見忠歳, 三嶋昭二, 佐藤史, 山本益男, 山田隆宏, 小笠原健一, 熊崎直樹(2007):続報 張力計を用いた落石監視システムの開発とその有効性について, 第42回地盤工学研究発表会
- 8) 青森県(1998):青森県地質図
- 9) 梅田浩司(1992):下北半島, 燧岳火山の地質と岩石記載, 岩石鉱物鉱床学会誌, 87, pp.420-429
- 10) 浅井健一, 藤澤範和, 小山内信智, 西本晴男(2005):振動計測による岩盤斜面不安定ブロック抽出手法の検討, 土木技術資料, Vol 47 NO.4, pp.48-53
- 11) (社)日本道路協会(2000):落石対策便覧
- 12) G.Ma, A.Nakanishi, S.Ueno, S.Mishima, S. Nishiyama, Y.Ohnishi (2004)
: Study on the applicability of rock simulation by using DDA Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS