

新島における鋼製落石防護壁の落石による破壊性状調査

COLLAPSE OF STEEL ROCK BARRIERS IN NIJIMA ISLAND

井上 昭一*, 西田 陽一**, 吉田 博***, 大原 常浩****, 岡本 彰*****

Syouiti INOUE, Youiti NISHIDA, Hiroshi YOSHIDA, Tsunehiro OHHARA, Akira OKAMOTO

*工修 (株) プロテックエンジニアリング 技術開発部長 (〒950-0971 新潟市近江 155 番地 5)

** (株) プロテックエンジニアリング 技術開発部設計課長 (〒950-0971 新潟市近江 155 番地 5)

***工博 吉田構造工学研究所 代表 (〒932-0102 富山県小矢部市水島 561)

****東京都総務局大島支庁新島出張所 主任 (〒100-0402 東京都新島村本村 6-4-24)

***** (株) フォレストック 環境防災部長 (〒181-0013 東京都三鷹市下連雀 3-22-5)

キーワード：落石防護壁，破壊性状，エネルギー吸収能

(Rock Barrier, Collapse Characteristic, Energy Absorption Capacity)

1. まえがき

2000年6月26日からの一連の三宅島～新島・神津島近海にかけての地震活動において、2000年7月15日10時30分に新島・神津島付近では最大の地震(M6.2)が発生した。この地震により、新島では各所で大規模ながけ崩れが発生し、落石防護施設が破壊し、道路交通網に多くの被害を与えた。

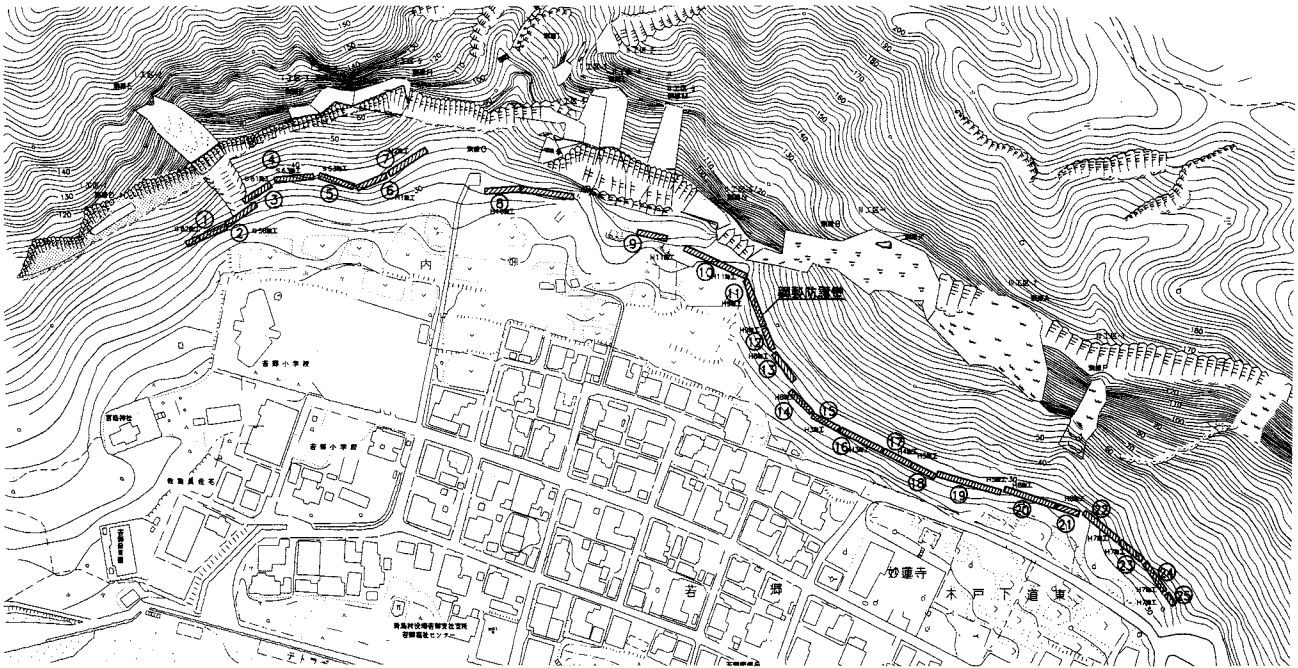
新島北部の若郷地区では、がけ崩れにより直径約1.5m～2.5mの多数の岩塊が落下した。当地区では、住宅および道路を防護するための鋼製落石防護壁が延長約520m設置されていたが、長さ約10m、幅約6m、高さ約4mの大岩塊が落下した延長約12mの防護壁が完全に破壊し、直径約3mの数個の落石が衝突した延長約6mも破壊した。しかし、それ以外の部分では、局所的な変形または破壊がみられるものの、防護壁は落石を停止させることができた。

本報告では、若郷地区の鋼製落石防護壁の被害調査結果を述べるとともに、落石シミュレーションにより防護壁が受けた落石エネルギーを推定し、数値解析により防護壁の挙動を推定し、調査結果との比較検討結果を示す。

2. 被害状況の概要

新島は、後期更新世から完新世に活動した10数個の単成火山から成っている。これらの標高は100～400mで山頂部に特徴的な平坦面を有する台地状の流紋岩質の溶岩円頂丘群で、南北方向に連なっている。また、山頂平坦面の直下は50～70°の急斜面となっている。特に北部若郷地区には、島の北端数百m沖で活動したとされる若郷火山の玄武岩質ベースサージ堆積物が堆積している。流紋岩溶岩円頂丘は、しばしば流理や節理が発達し、しわに沿ってわれ易くなっている。

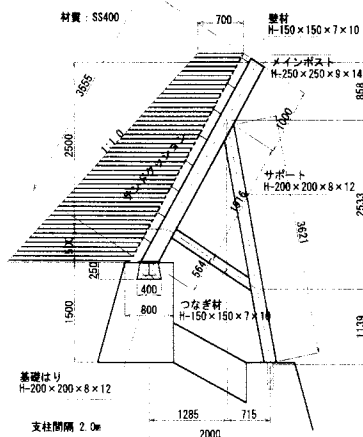
2000年6月26日に発生した地震では、溶岩



図—1 防護壁の設置状況

スパンは2.00mであり、主な設計条件は以下のとおりである。

- (1) 落石質量 : $M = 870\text{kg}$
- (2) 落石の直径 : $\phi = 86\text{cm}$ (球体と仮定)
- (3) 換算落下高さ : $H = 40\text{m}$
- (4) 作用衝撃力 : $P = 400\text{kN}$



図—2 主な防護壁の断面図

円頂丘の山腹の不安定な露岩部の各所から比較的新鮮な流紋岩の岩塊が剥離・崩落した¹⁾。これにより、本村と若郷地区を結ぶ唯一の道路が約5.8kmにわたって通行止めとなった。

3. 若郷地区における防護壁

若郷地区には合計25基、総延長約520mのλ型鋼製防護壁が昭和58年より平成7年にかけて順次設置されてきた。設置状況を図—1に示す。図中、○内の数値は防護壁の番号を示す。また、主な防護壁の断面図を図—2に示す。

4. 防護壁の被害状況

防護壁の被害は、大別して以下の4タイプである。

(1) 完全破壊

大岩塊の通過により防護壁の数スパンが完全に破壊したもの。

長さ10m、高さ4m、幅5mの大岩塊が、標高差約100mから落下し、防護壁⑪～⑫にかけて、6スパン12mが完全に破壊した(写真—1)。また、直径約3mの岩塊数個が防護壁⑮に衝突し、12スパンの内3スパンが完全破壊した。

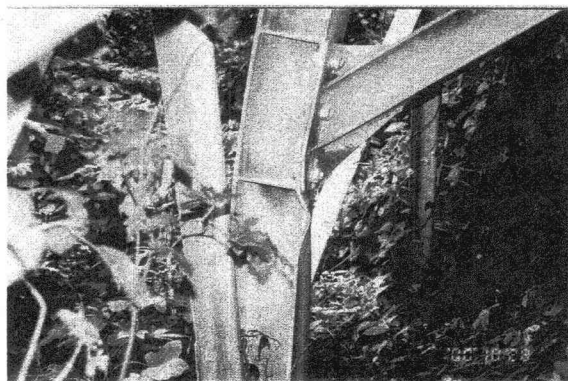
(2) 支柱の屈曲

直径1.5m～2mの岩塊が防護壁の主構付近のサンドクッション上に衝突し、その近傍のサポート材が連結材との結合部で局部座屈した(防護壁⑭、⑮)

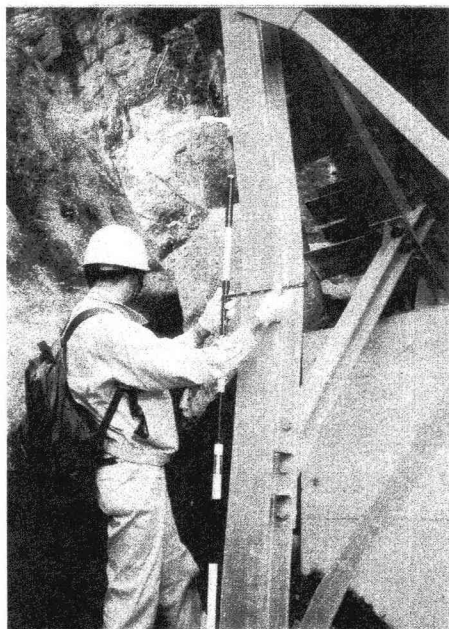
(写真—2)。しかし、落石は停止した。また、サンドクッション上に衝突した岩塊により、端スパンの



写真—1 完全破壊した防護壁⑪～⑫



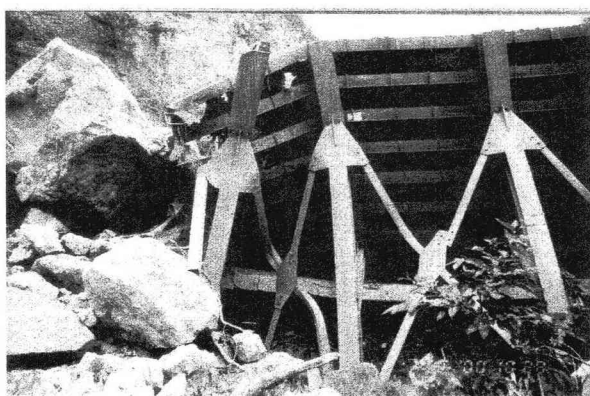
写真—2 座屈したサポート材



写真—3 屈曲したサポート材

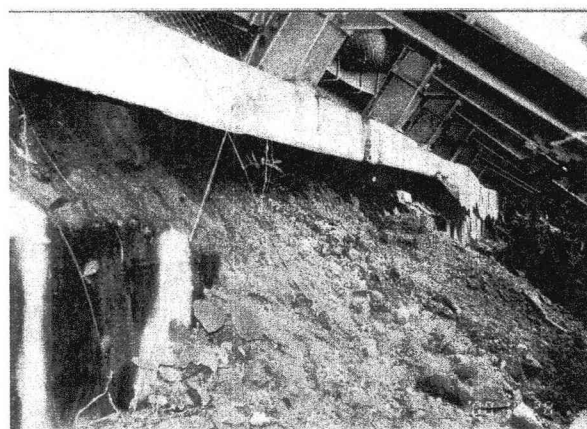


写真—4 屈曲した壁材



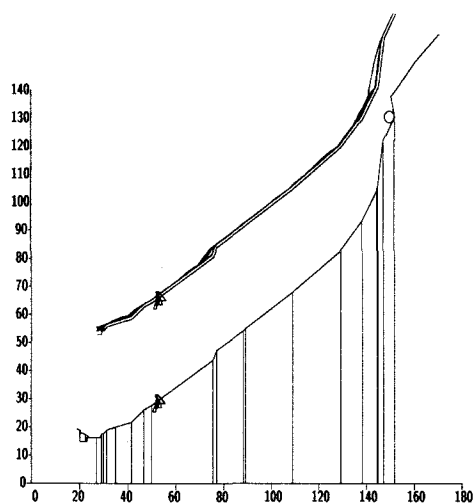
写真—5 座屈したブレース材
外側のサポート材が屈曲した（防護壁①，⑨）（写真—3）。

（３） 壁材の屈曲および壁材の固定ボルトの破断
直径 1.5m～2m の岩塊が防護壁のスパン中央付近



写真—6 破壊した基礎コンクリート
のサンドクッション下方に衝突し、壁材が屈曲した（防護壁⑨，⑩，⑭）（写真—4）。また、スパン中央付近のサンドクッション上方に衝突した場合には、壁材と主構の連結ボルトが切断され、はずれたり垂れ下がったりしたものが見られた（①，⑧，⑭）。

（４） ブレース材の破断
完全破壊したスパンに隣接するスパンで、主構の



図—3 落下軌跡のシミュレーション

ブレース材の一方が引張破断し、他方が圧縮座屈していた（防護壁⑪～⑫、⑮）（写真—5）。

（5）コンクリート基礎の破壊

メインポストの下端はベースプレートを通じて基礎はり（H200×200×8×12）にボルト結合されている。天端幅 80cm の基礎コンクリートには、この基礎はりが収まるように連続した箱抜きがされており、防護壁を架設後に箱抜き部分がコンクリートで充填され、基礎コンクリートに固定される構造になっていた。しかし、落石が衝突したほとんどの防護壁では、基礎コンクリートの箱抜きされた海側部分が欠けて飛ばされていた（写真—6）。

これは、防護壁に落石が衝突するとメインポスト下端には海側への水平力が発生し、基礎はりがコンクリートを破壊して海側に移動したものと思われる。基礎はりの最大残留変位は、約 20cm であった（防護壁⑪）。

5. 防護壁の破壊耐力の推定

5. 1 落石エネルギーの推定

総数 25 基、総延長約 520m の防護壁のうち、完全に破壊した部分は防護壁⑪～⑫の 6 スパン 12m および防護壁⑮の 3 スパンのみであった。その他の箇所では直ちに破壊につながるような損傷は見られなかった。しかし、防護壁の背面（山側）には直径 $\phi 4.5\text{m}$ （防護壁⑩）や一辺が 3.5m の立方体の大岩塊が衝突した形跡があり、また、直径 $\phi 1.5\text{m} \sim 2\text{m}$

表—1 土の物性値

内部摩擦角	38.4°
粘着力	2.0kN/m ²
縦弾性係数	210,000kN/m ²
せん断弾性係数	81,000kN/m ²
ポアソン比	0.3
単位体積重量	14.5kN/m ³

の無数の岩塊が防護壁の背面に堆積している部分もあり、ほとんどの落石を停止させていることが明らかになった。

そこで、岩盤が崩落する以前の代表的な断面を用いて落石の落下軌跡のシミュレーションを行った。

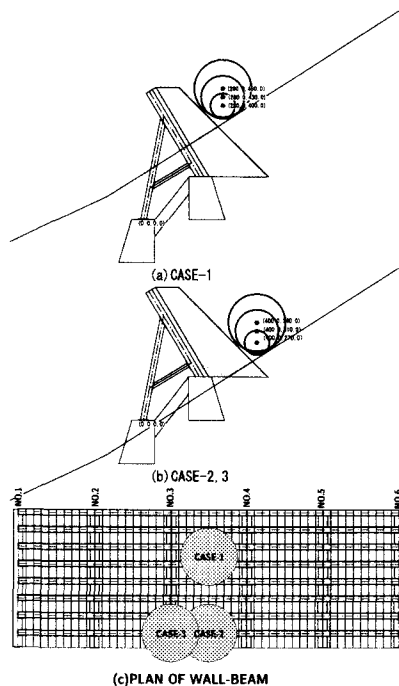
図—3 に落下経路の断面図と直径 $\phi 2.0\text{m}$ （重量 106.8kN）の 20 回分の落石軌跡を示す。防護壁への衝突位置の平均値は、地盤面から 1.062m であり、平均値+2×標準偏差は 1.134m であった。また、衝突時の落石エネルギーは、507.3kJ であり、平均値+2×標準偏差は 1042.8kJ であった。岩盤が崩落後の断面における落下軌跡のシミュレーションでも、ほぼ同一の結果が得られた。

5. 2 衝撃応答解析

（1）解析条件および解析モデル

落石軌跡シミュレーションの結果より、落石の大きさにより多少の相違はあると思われるが、岩塊が防護壁に衝突するときの速度は、等価な鉛直落下に換算して最大 $H=10\text{m}$ 程度の速度と見ることができる。また、地盤面からの衝突高さもほぼ岩塊の半径程度である。そこで解析では図—4 に示すように崩壊後の斜面(CASE-1)と崩壊前の斜面(CASE-2,3)より上方に、直径 2.0m、1.5m および 0.86m の 3 種の球が衝突するものとして、そのときの挙動の解析を行った。

解析には LS-DYNA を用い、防護壁の 6 主構およびサンドクッションを図—5 のように要素分割した。サンドクッションはソリッド要素とし、主構は非弾性はり要素（ $\sigma_y=240\text{N/mm}^2$ ）に、ブレースは引張には抵抗するが圧縮には抵抗しない非弾性はり要素とした。



図—4 落石の衝突位置

解析に用いたサンドクッションの物性値を表—1に示す. 使用する物性値の妥当性を確認するために, 幅 2.0m×2.0m, 厚さ 1.0m の土槽にサンドクッション材を投入し, 締め固めた後に 5kN の重錘を高さ 1m, 5m, 10m および 20m から落下させ, 重錘加速度および底面土圧などを測定した. 一方, これらの物性値を使用して LS-DYNA による解析を行った. サンドクッションの破壊基準には Drucker-Prager 基準を, 降伏関数として式(1)を使用した.

$$\phi = J_2 - (a_0 + a_1 p + a_2 p^2) \quad (1)$$

$$\text{ここに, } p = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z), \quad J_2 = \frac{1}{2}S_{ij}S_{ij}$$

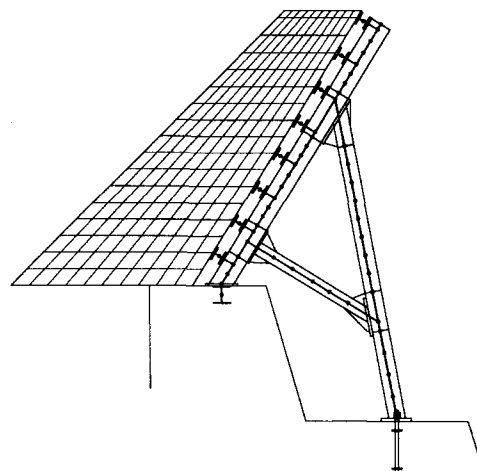
$$a_0 = k^2, \quad a_1 = 6\alpha k, \quad a_2 = 9\alpha^2$$

$$\alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3(3-\sin\phi)}}, \quad k = \frac{6c \cos\phi}{\sqrt{3(3-\sin\phi)}}$$

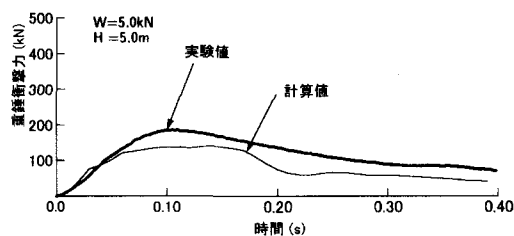
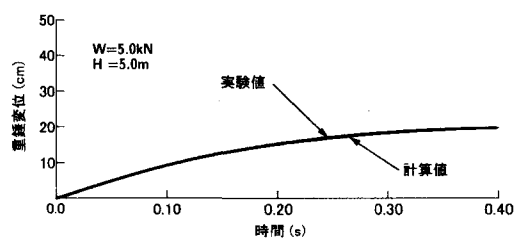
図—6に落下高さ 5m の場合の重錘衝撃力 (加速度×質量) および重錘変位 (加速度の2重積分値) の経時変化の実験値と解析値の比較を示す. 他の落下高さに対してもほぼ同様の結果を得た. これより, これらの土の物性値および構成則を解析に適用することが可能と判断される.

(2) 解析結果

前述のとおり, メインポストの下端は基礎ばりに



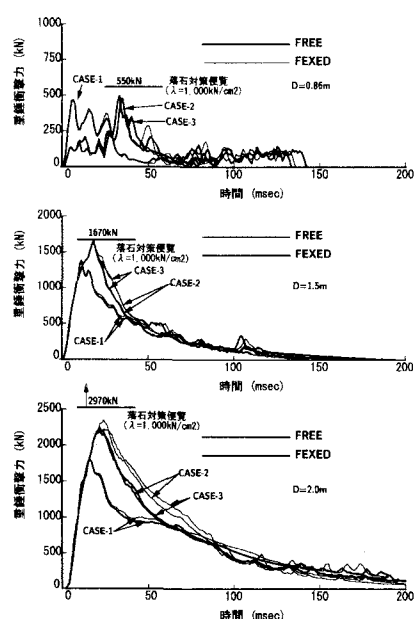
図—5 要素分割



図—6 重錘衝撃力および変位の経時変化 (土槽) 固定され, 基礎ばりは箱抜きされたコンクリート基礎上に埋め込まれている. しかし, 落石により基礎コンクリートの箱抜き部が破壊しているので, メインポストの下端の支持条件を水平に可動 (Free) とした場合と完全固定(fixed)の場合の2通りについて計算した.

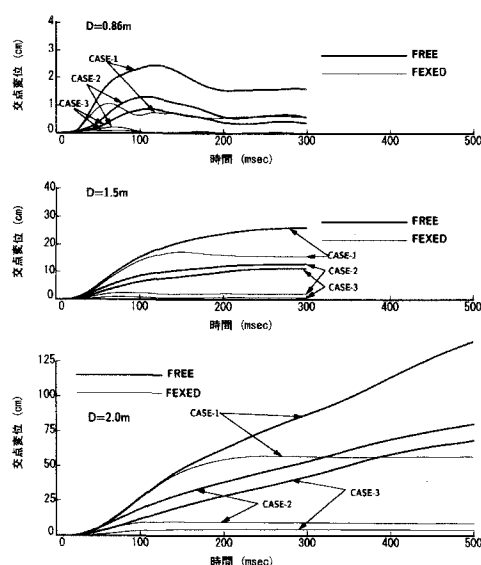
図—7は, 重錘衝撃力の経時変化を示している. 図中に, 落石対策便覧の値 ($\lambda=1,000\text{kN/cm}^2$) も示されている. 落石径が $D=0.86\text{m}$ および $D=1.5\text{m}$ の場合には, 重錘衝撃力の最大値は落石対策便覧の値に近いが, $D=2.0\text{m}$ では, かなり小さくなっている.

また, $D=0.86\text{m}$ の場合を除いて, 防護壁の上方に



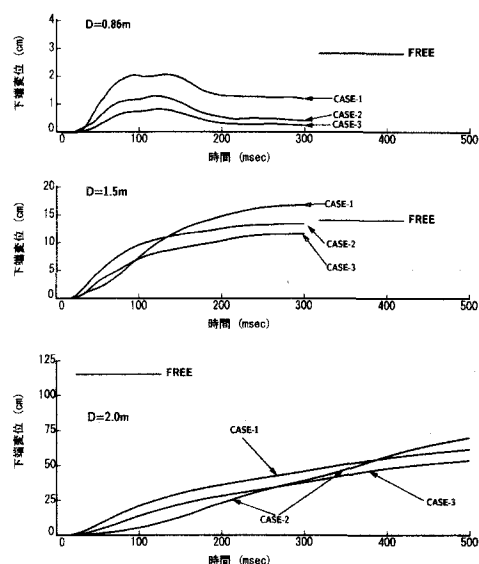
図—7 重錘衝撃力の経時変化

衝突する場合の方が衝撃力は小さくなっている。メインポスト下端の支持条件が重錘衝撃力に及ぼす影響は小さい。



図—8 メインポストとサポートの交点変位の経時変化

図—8は、メインポストとサポートの交点変位の経時変化を示している。メインポストの下端に支持条件により交点変位に大きい差異が認められる。落石径が設計落石の径と等しい $D=0.86\text{m}$ の場合でも、メインポスト下端が水平方向に拘束されないときは、残留変形が発生する。落石径が $D=2.0\text{m}$ でメインポスト下端が水平方向に拘束されない場合には、変形



図—9 メインポスト下端の水平変位の経時変化

は時間とともに進行するが、下端が固定されている場合には、変形は収束している。

図—9は、メインポストの下端の水平変位が許容される場合の、下端の水平変位の経時変化を示している。これらの水平変位は、落石径が $D=0.86\text{m}$ および $D=1.5\text{m}$ の場合には、時間の経過とともに収束しているが、 $D=2.0\text{m}$ の場合には、収束することなく増加する。

図—7において、 $D=2.0\text{m}$ の場合の重錘衝撃力には、メインポスト下端の支持条件による差異は認められないが、重錘衝撃力が減衰した後の防護壁の変形状態が、構造物が破壊しているか、安定を保つかの判定に重要であることがわかる。

6. あとがき

本研究より、以下の結論を得た。

- (1) 本鋼製防護壁は、メインポスト下端が固定されておれば、落石径 $D=2.0\text{m}$ の場合、約 $1,000\text{kJ}$ の落石エネルギーに対応できる能力を有している。
- (2) メインポスト下端の水平変位が許容されている場合には、落石径 $D=1.5\text{m}$ の場合、約 500kJ の落石エネルギーに対応できる能力を有している。

参考文献

- 1) 伊藤雄二・伊藤克巳：2000年新島近海地震による斜面崩壊