

落石防護工の被害に関する実態調査

INVESTIGATION ON CURRENT STATES OF ROCKFALL DISASTERS

松尾 修*, 佐々木哲也**, 堤 達也***

Osamu MATSUO, Tetsuya SASAKI and Tatsuya TSUTSUMI

- * 建設省土木研究所動土質研究室 室長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)
- ** 建設省土木研究所動土質研究室 研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)
- *** 建設省大臣官房技術調査室 係長 (〒100-8944 東京都千代田区霞ヶ関2-1-3)

キーワード: 落石、落石防護工
(Rockfall, Countermeasure)

1. はじめに

山岳道路の多い我が国においては道路の落石対策は道路防災上の重要な課題の一つである。落石現象はさまざまな原因が複雑に関連しあって生じることが多く、その形態も複雑であり、依然として不明な点が多いのが実状である。

昭和58年に現場技術者が落石対策の設計、施工を行う上で参考となるように、それまでの知見をまとめた落石対策便覧¹⁾が発行された。その際、落石の実態調査が実施されている²⁾。以来15年が経過し、落石対策便覧を参考に設計、施工された防護工の数も増加していると考えられる。本報では最近の落石の発生状況、防護工の被害実態等を把握することを目的として全国調査を実施した結果を報告する。

2. 調査の概要

平成9年4～5月に、最近の落石の発生状況、及び落石防護工の被害実態等を把握することを目的に、落石防護工の被害実態に関する調査を実施した。調査は、建設省の各地方建設局及び北海道開発局管内の直轄国道を対象に行った。調査対象地点は、平成4～8年度に1)落石のために落石防護工に変状ない

しは被害のあった地点、および2)落石防護工に被害はなかったが質量100kg以上の落石があった地点、とした。調査項目は斜面、落石防護工および落石に関する情報である。

その結果、全国186地点のデータが集計され、そのうち17地点は岩盤崩壊、11地点は表層崩壊であり、通常規模の落石が発生した箇所は158地点、延べ落石発生回数は250回であった。

3. 調査結果

ここでは、実態調査の結果から、斜面状況、対策工、落石に関する項目について明らかになったことを述べる。ただし、今回の調査は全数調査ではなく、前章の条件にもとづき比較的大きい落石が発生した箇所を対象としているため、必ずしも全体の傾向を示したものではないことに注意する必要がある。

3.1 斜面の状況

図-1に斜面勾配の頻度分布を示す。ここで、斜面勾配は、落石発生位置と斜面下端までの平均勾配である。多くの落石が勾配40°以上の斜面で生じていることがわかる。

図-2は斜面の被覆状況の頻度分布を示す。樹木が繁茂している斜面は、全体の80%に達する。現地調査によると、樹木で落石が停止している場合も多く見られることから、落石運動に樹木が大きく影響していることが考えられる。落石運動に及ぼす樹木等の影響を考慮することが今後の課題と考えられる。

3.2 落石防護工の種類

図-3は158の調査地点に設置されていた落石防護工の種類を示す。単独の工種が用いられている箇所は全体の約60%で、複数の工種を組み合わせ用いている箇所は約40%であった。単独の工種ではロックシェッドと落石防護柵が多く、複数の工種では落石防護柵と防護擁壁の組み合わせが多いことがわかる。今回の調査ではロックシェッドが全体の約25%を占めているが、これは今回の調査が落石の詳細な記録が残っている箇所を対象としていること、ロックシェッド上の緩衝砂上では落石の痕跡が発見しやすいこと等が考えられ、落石防護工設置箇所全体の特性を示したものではないという可能性があることに注意する必要がある。

3.2 落石の発生状況

(1) 落石径、質量、落下高さ

図-4及び図-5に落石径及び落石質量の頻度分布をそれぞれ示す。ここで、落石質量は、落石の長径・短径・中径より推定した。図-4より、落石径0.4~0.5 mの落石の発生頻度が最も高いことがわかる。ただし、これ以下の径の落石の発生は現地調査で特定しにくいことが考えられることから、より小さい落石の発生頻度は実際にはもっと高かったことが推測される。しかしながら、落石径3m以上、落石質量10t以上の落石も全体の約5%に達している。

図-6に落石の落下高さの頻度分布を示す。これより、落下高さは60mまで幅広く分布し、60m以上の落石も10件生じていた。

(2) 落石の跳躍高さ

図-7に道路際の落石防護柵の位置における落石の跳躍高さの頻度分布を示す。ここで、跳躍高さは落

石防護柵の落石衝突の痕跡から推定した。これより、全体の87%が跳躍量3m以下となっていることがわかる。

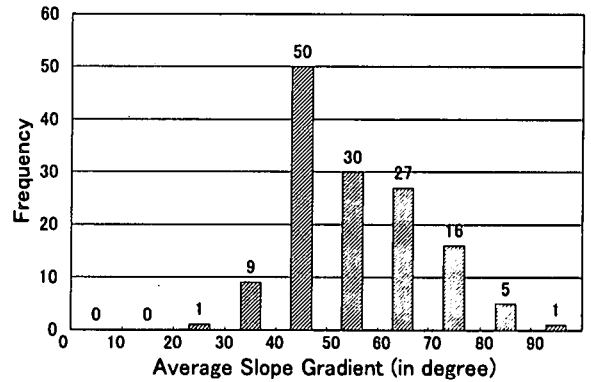


図-1 斜面勾配の分布

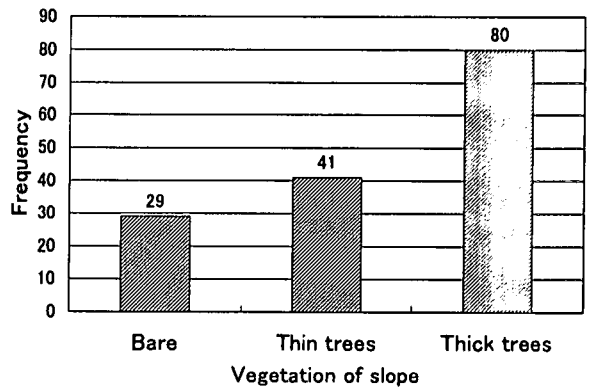


図-2 斜面の被覆状況

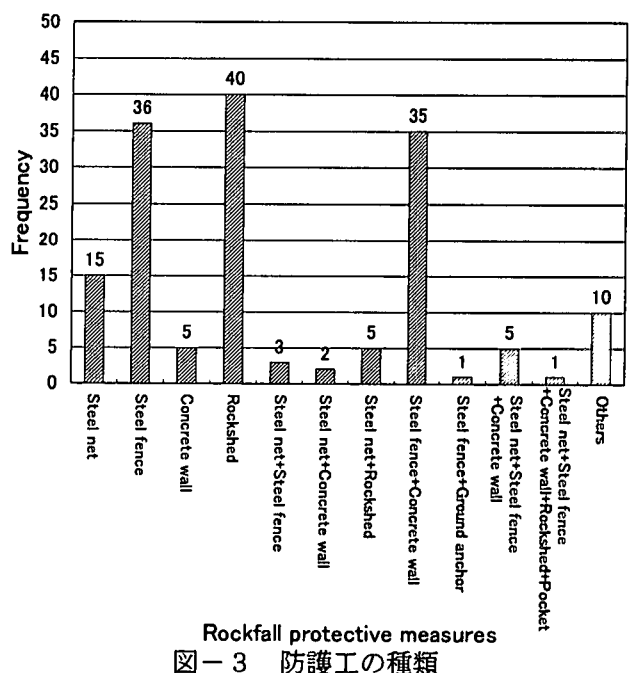


図-3 防護工の種類

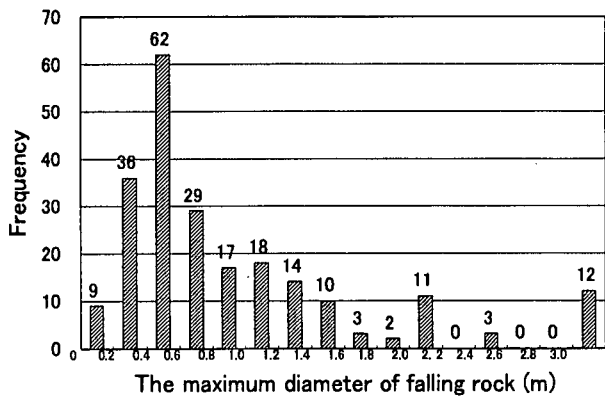


図-4 落石径の分布

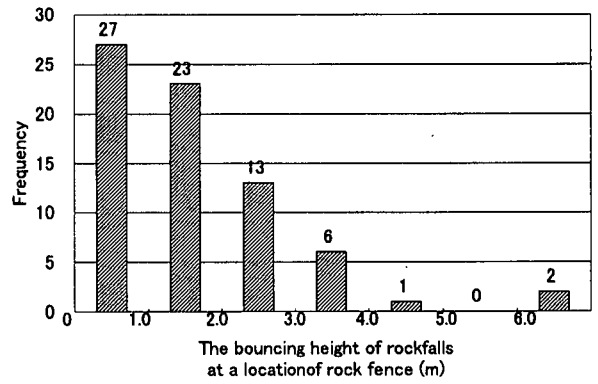


図-7 落石跳躍高さの分布

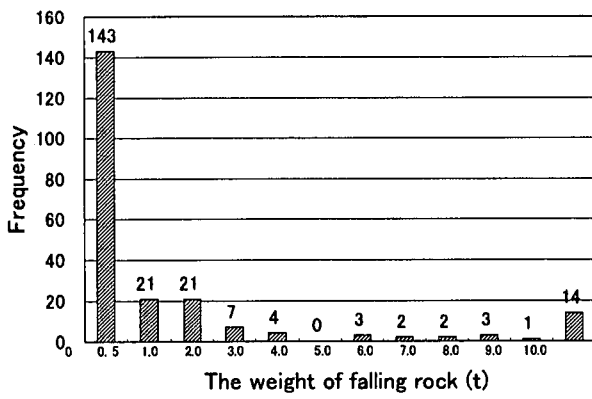


図-5 落石質量の分布

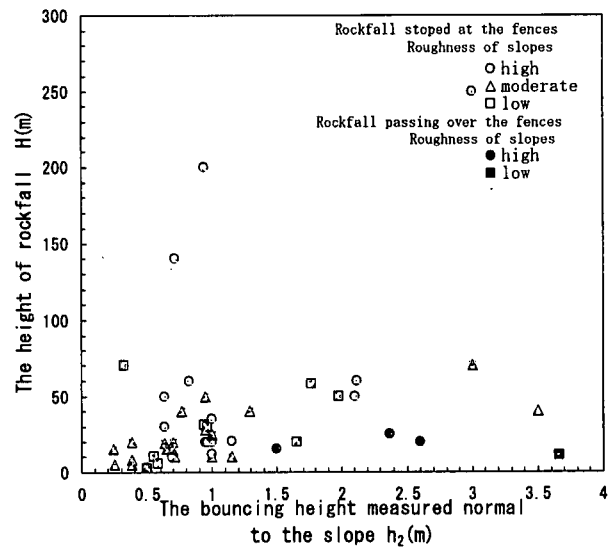


図-8 落石防護柵における落石の衝突位置の高さと落下高さの関係

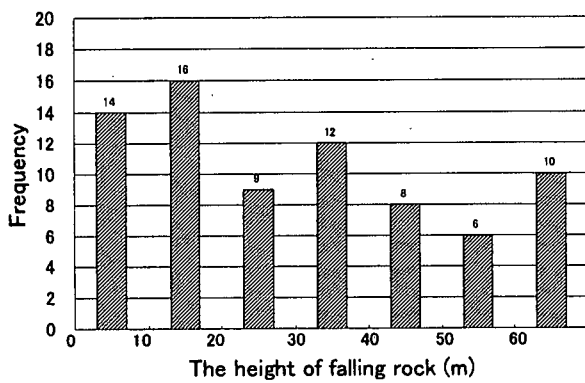


図-6 落石落下高さの分布

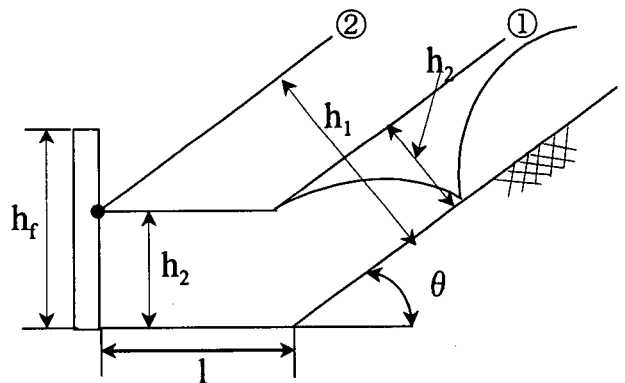


図-9 跳躍高さの定義

図-8に落石の落下高さ h_1 と落石跳躍高さ h_2 と関係を示す。ここで、跳躍高さは次式により求めた(図-9参照)。

$$h_2 = (l \cdot \tan \theta + h_1) \cos \theta \quad (1)$$

ここに、 h_2 ：斜面垂直方向の落石跳躍高さ

l ：平場の長さ

h_1 ：防護柵設置位置における落石衝突高さ

θ ：斜面の平均勾配。

ただし、式-1で求まる落石跳躍高さ h_2 が落石衝突高さ h_1 より大きい場合は、 $h_2 = h_1$ とした。また、落石が防護柵を飛び越えた場合の跳躍高さ h_2 は、次式のように落石防護柵の高さに1m加えた値と仮定した。

$$h_2 = h_f + 1(\text{m}) \quad (2)$$

ここに、 h_f ：落石防護柵の高さ。

図-8より全体の86%(42/49)が斜面垂直方向の跳躍高さ2m以下となっている。跳躍高さが2mを越えたもののなかで3つが落石防護柵を飛び越えて、落石が道路に達した。また、跳躍高さ2m以上のものは、落石の落下高さにあまり依存せず、斜面の凹凸の大きいものが5事例、中間のものが2事例あった。したがって、落石跳躍高さは、落石の落下高さによらず、多くの場合2m以下であると言えるが、斜面の凹凸が大きい場合、跳躍高さが2mを越える場合があると考えられる。

4. 落石防護柵の吸収エネルギーに関する考察

ここでは、落石防護柵の設計法及び落石の運動エネルギーの推定式の妥当性を検証することを目的に、被害事例を対象に落石エネルギーの逆解析を行い、設計落石エネルギーと比較した。ここでは、ワイヤロープ金網式落石防護柵を検討対象とした。

4.1 検討手法

(1) 落石防護柵の設計法の概要

「落石対策便覧」に示されている落石防護柵の設計手法では、防護柵の可能吸収エネルギーは以下のように表される。

$$E_d = E_R + E_P + E_N \quad (3)$$

ここに、 E_d ：落石防護柵の設計可能吸収エネルギー

E_R ：ワイヤロープの吸収エネルギー

E_P ：支柱の吸収エネルギー

E_N ：金網の吸収エネルギー

落石対策便覧では以下の2つのモードを仮定している：1)2本の支柱が先に降伏する場合、2)2本のワイヤロープが先に降伏する場合。1)の場合、支柱の許容変形角は 15° とし、2)の場合はワイヤロープを弾性範囲以内としている。金網の吸収エネルギーは、神戸大・菌原ダムの実験結果から25kJとしている。

(2) 実吸収エネルギーの算出法

落石防護柵のうち、その設計条件、落石発生・停止位置が判明した事例を対象に、落石防護柵の残留変形量の記録をもとに、前節の手法を参考にして実際に落石の衝突により吸収したエネルギー E_a を求めた。ただし、支柱の実傾斜角が 15° を越える場合は最大変位角 15° とし、ワイヤロープが伸びひずみ5%以上伸びる、あるいは破断した場合の場合は最大伸び量5%と仮定した。また、金網に変形が生じたものは吸収エネルギーを25kJと仮定した。算出法の詳細は文献3)を参照されたい。

(3) 落石の運動エネルギーの算出法

落石衝突位置での落石の運動エネルギー E_r を落石対策便覧に従い次式で求めた。

$$E_r = (1 + \beta)(1 - l \tan \theta) m \cdot g \cdot H \quad (4)$$

ここに、 β ：回転エネルギー係数(0.1とした)

μ ：等価摩擦係数

θ ：斜面勾配

m ：落石の質量

g ：重力加速度

H ：落石の落下高さ

ここで、等価摩擦係数は落石対策便覧を参考として現地の斜面状況に応じて設定した。

4.2 検討結果

図-10に、落石防護柵のうち、その設計条件、落石発生・停止位置が判明した事例について、落石防護柵により吸収したエネルギーの推定値と、式(4)

により求まる落石の運動エネルギーの関係を示す。図より、データにはかなりのばらつきが見られるが、式(4)で推定したエネルギーよりも実際の落石被害より推定したエネルギーのほうが大きくなるケースは少なく、式(4)による落石エネルギーの計算値は概ね安全側の値を与えていることがわかる。

落石防護柵の設計法の妥当性を検証するため、落石防護柵の被害の程度と落石エネルギーの相関を検討した。図-11に、落石防護柵の被害の程度とエネルギー比（発生した落石エネルギー E_r と設計吸収エネルギー E_d の比）の関係をプロットした。 $E_r/E_d > 1$ は設計荷重より大きいエネルギーの落石が生じたことを意味する。ここで、被害の程度は以下のように分類した。

- 軽微(very minor)：支柱の被害はなく、ワイヤロープのゆるみあるいは金網のゆるみが見られる
- 小破(minor)：支柱の傾斜が 30° 未満でワイヤロープのゆるみあるいは金網の破断が見られるが、落石は停止
- 中破(moderate)：支柱の傾斜が $30\sim 60^\circ$ でワイヤロープ破断あるいは網の破断が見られるが、落石は停止ないしはいくつかの落石の破片は道路に到達した
- 大破(severe)：支柱の傾斜が 60° 以上でワイヤロープ、網の破断が見られる。

同図より、落石防護柵の設計吸収エネルギー以上の落石が多く箇所で生じており、適切な設計落石エネルギーの評価が必要であることがわかる。設計落石エネルギー以下の落石では、防護柵の被害は小破以下にとどまっており、また落石を止めていることから、落石対策便覧の設計手法は概ね妥当と考えられる。ただし、設計吸収エネルギー E_d の最大10倍程度の落石が衝突しても、落石防護柵の損傷は小破にとどまっている。その原因として現行の落石エネルギー E_r の算定式は過大評価、設計吸収エネルギー E_d の評価式は過小評価していることが考えられ、全体としては現行設計法にかなりの安全余裕が含まれる結果となっていることが考えられる。

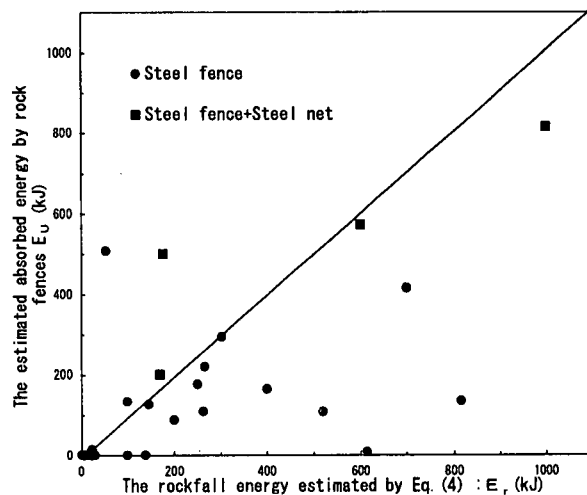


図-10 落石エネルギーの推定値と実際の落石防護工の被害から推定したエネルギーの比較

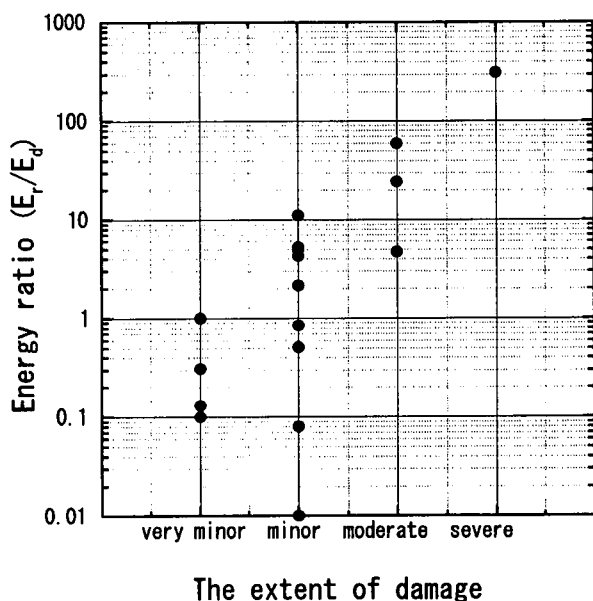


図-11 設計吸収エネルギー E_d と落石エネルギー E_r の比と被害の程度

5. 落石防護工の被害形態

ここでは、各種防護工の被害箇所を集計した結果判明した事項ないしは改善が望まれる事項について述べる。

①落石防護柵の場合、道路に到達する落石は防護柵の跳越、金網の破網、ワイヤロープのたるみによるものが多い。また、ワイヤロープ破断前にワイヤロープと支柱を固定するU型ボルトが破断するケースがいくつか見られた(図12参照)。

②落石防護網の裾部からの抜け落ちにより落石が道路へ到達する事例が多い。裾部を閉口するか、他の防護工（擁壁あるいは柵）と併用することが望ましい。また、覆式落石防護網では、落石の衝突により金網が破網する被害が見られた。覆式落石防護網の場合には、地山と防護網を密着させることが望ましい。

③落石防護擁壁は落石防護柵と併用されることが多いが、道路に到達する落石は落石防護柵を跳越する場合、擁壁本体コンクリートが欠損する場合、及び落石防護柵を破壊するケースが多く、擁壁本体の滑動・転倒はなかった。また、落石防護擁壁に落石が衝突し、コンクリートが欠損する事例（図-13参照）や落石防護柵の支柱基部のコンクリートが破壊する事例（図-14参照）が多く見られたので、落石が直接衝突する可能性がある場合は擁壁本体を鉄筋により補強し、また防護擁壁支柱基部コンクリートは補強鉄筋により強化することが望まれる。

謝辞

調査の実施にあたって御協力いただいた建設省道路局道路防災対策室、各地方建設局、北海道開発局の関係者各位に対し深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1)日本道路協会：落石対策便覧、1983.7.
- 2)佐々木康、谷口栄一、舟見清己：落石防護工の被害に関する実態調査（第1報）、土木研究所資料第1572号、1980.3.
- 3)松尾修、堤達也、佐々木哲也：平成9年度落石に関する実態調査報告書、土木研究所資料第3556号、1998.8.

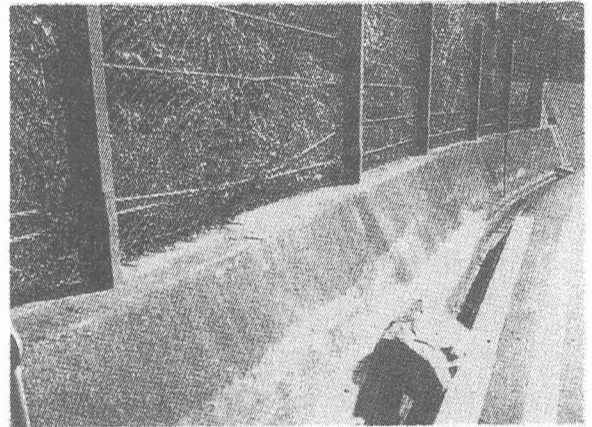


図-12 落石防護擁柵の被害状況

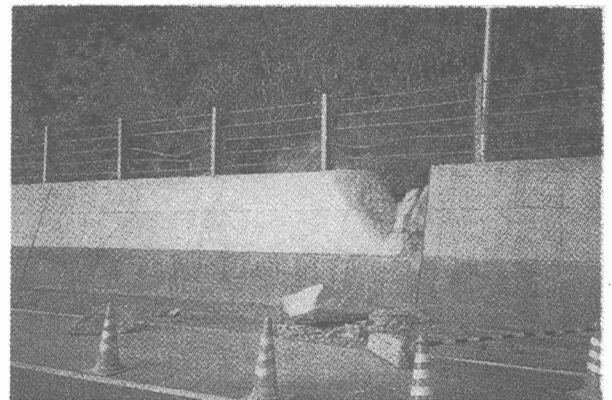


図-13 落石防護擁壁の被害状況

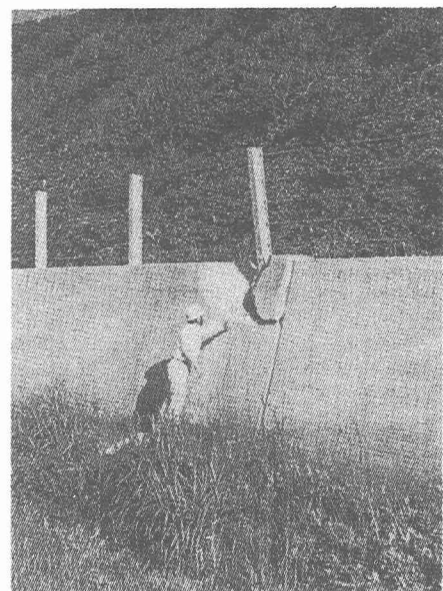


図-14 落石防護柵基礎の被害状況