

(11) 落石の発生に関する調査

建設省東北地方建設局東北技術事務所 土井 鐵徳

1. 調査目的

昭和58年に(社)日本道路協会より「落石対策便覧」が発刊されて落石等の防災関連事業に活用されてきているところであるが、同便覧はそれまでの研究成果の集大成にとどまっており、落石現象の実態や予測手法等に未解明な部分も多く、このため、経験によって工種選定や構造及び寸法などを決定している場合が多々あり、「便覧」の指針的整備が望まれているところである。本調査は近年、急速に進歩しつつある各種計測技術を応用して、落石現象の実態を把握するとともに、落石の素因・誘因及び予測に関して考察し、「落石対策便覧」改訂のための基礎資料を得ることを目的とするものである。

2. 過去の経緯

2. 1 昭和62年度の調査

2. 1. (A) 調査内容

調査箇所を山形県東根市関山字滝山地内、国道48号下り線無保護切土法面に選定した。調査内容は、約1カ月の間隔をあげた地上写真測量により、解析図化機で法面の図化およびメッシュでの三次元座標計測を行い、落石の位置、法面の変動と気象および土質性状等の相関を求めたものである。落石の日時は、週3回の建設省山形国道維持出張所のパトロール時による写真撮影で判定した。調査法面を写真-1に、地上ステレオ写真撮影見取図を図-1に示す。なお、昭和63年度に法面の熱映像調査を実施するため、それに先立って熱赤外線ビデオ撮影のためのカメラテストを実施した。

主な作業は次のとおりである。

- (1) 地上写真測量に先立ち、モデル標定用の基準点を設置した。
- (2) 地上写真測量は、昭和62年11月26日と12月25日の2回撮影した。
- (3) 撮影した写真をもとに、解析図化機によって精密法面平面図(縮尺1/50)の作成と、25cm間隔でメッシュデータ測定を行った。精密法面平面図には節理や転石、浮石、崖錐等、写真上で判読可能なものも全てを表現した。また、計測は格子点の他に、あらかじめ法面上にマーキングした点についても3次元座標値を計測した。メッシュデータからは断面図、景観図(鳥かん図)等高線図を自動描画した。落石の素因を把握するために法面およびその付近の地表地質調査を実施し、特に節理系について詳細に調査した。

- (4) 落石の誘因を考察する資料として気象資料を収集・整理した。



写真-1 調査法面

2. 1. (B) 調査結果

(1) 地形地質

対象法面は、乱川の支流の萱倉沢左岸斜面に位置し、北西方向に伸びる尾根の先端付近の北向き斜面にあり、比高約40mの自然斜面下部に位置する幅約30mの切土法面である。周辺は標高 900m前後の峰が続く山地部で、比高100m ~ 500mの急斜面が連続するV字谷状の地形を呈する。地質学的にグリーンタフ地域に属し、石英安山岩（1~2cm）を含む変質して淡緑色を呈する中硬質の粗粒凝灰岩（新第三紀中新世の関山峠層）が分布する。対象法面では節理が発達し、法面形状は節理系に規制されて凹凸が著しい。節理沿いに風化が進み、岩盤がゆるんで節理は開口気味である。法面の上部は土砂化した風化層が分布し、中部は岩盤が露出し、下部には法面の崩壊・落石などによって形成された崖錐が堆積している。法面中部の岩盤には5系統の節理の卓越方向があり、岩盤はこれらの節理系によって 30cm~150cm大の岩塊にブロック化している。図-2に法面の状況図を示す。

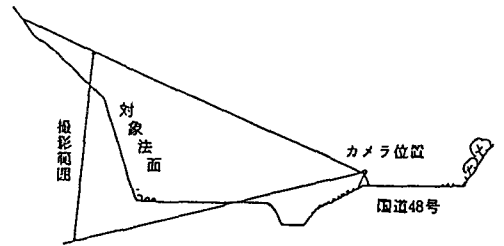
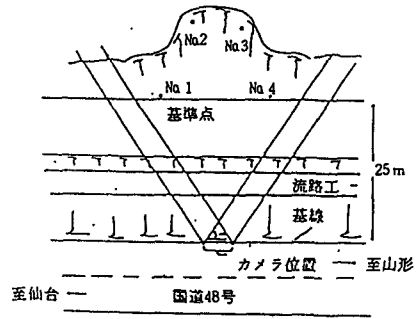


図-1 地上ステレオ写真撮影見取り図

(2) 図化・計測結果

精密法面平面図、断面図、景観図、等高線図を各2回作成し、比較した結果、割れ目の形状の変化や増加、転石の増減および断面形の「へこみ」「せり出し」「堆積」の変化が認められた。

(3) 落石と気象条件の相関

昭和62年12月24日~25日の間に2箇所の落石を確認できたが、この一ヶ月前からの気温は、最高気温が2℃~5℃、最低気温がほとんど氷点下であった。したがって夜間に法面表面の水分が凍結し、日中に融解する日が毎日続いていたことになる。落石の時期は、気温が急激に上昇した時期であり25日は最高気温が10℃、最低気温が2℃であった。この事より気象条件、特に凍結・融解が落石の一誘因であると考えられた。

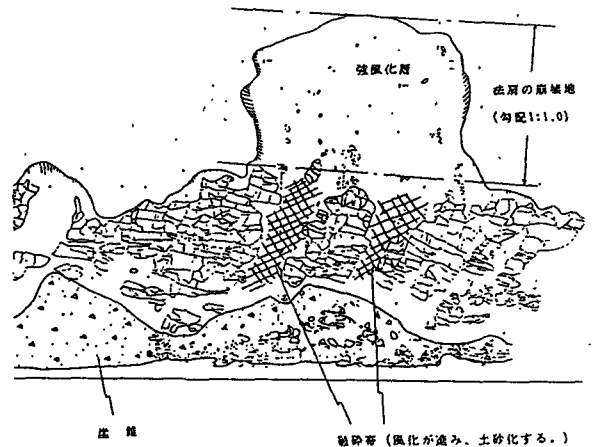


図-2 法面状況図

2. 2 昭和63年度の調査

2. 2. (A) 調査内容

昭和62年度に引続き、同様の観測を継続すると共に、新たに調査法面の熱映像解析調査と同調査箇所付近のモルタル吹付3法面において落石の軌跡調査を実施した。これらの調査を実施して①地上写真測量によってとらえられた落石の位置、法面の変動と気象との相関の把握、②熱映像観測による落石危険箇所の推定、③落石の軌跡の実態を把握した。その他岩石の吸水膨張率も把握した。

主な作業は次のとおりである。

(1) 地上写真測量の方法は昭和62年度と同様であり、4月、6月、8月、11月の4時期について行なった。

(2)熱映像解析調査は、法面の落石不安定箇所を法面の表面温度分布や温度変化によって把握しようと試みるものである。法面の表面温度は電磁波のうち遠赤外（熱赤外）領域の放射強度を測定することにより、遠距離から知ることができる。熱ビデオシステムは、図-3に示すように熱ビデオカメラにより熱赤外線のエネルギ強度を記録し、これをデジタル画像データに変換することによって温度や温度変化を画像解析手法を用いて解析するシステムである。調査は夏期と冬期の2回実施し、それぞれ法面温度の変化を把握するために、24時間内に5回の観測を行なった。これらの画像を重ね合わせて熱異常箇所を推定した。

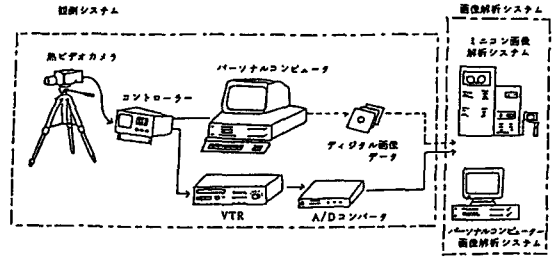


図-3 熱ビデオシステムの構成

(3)落石の軌跡調査は、国道48号の上り線モルタル3法面の上方の斜面に点在する不安定転石の除去工事の際に実施した。撮影する転石はあらかじめ寸法・形状を記録し、2台のカメラを一定の基線上に設置し、法面全体と基準点および時間計測装置が映るようにセットした後に転石を落下させ撮影した。フィルムを写真処理した後、写し込まれた時刻を基に、同時期の1対の写真を取りだし、解析図化機によって各瞬間の落石の座標を計測した。法面の形状も地上写真測量で計測しておき、正面図・側面図上に落石の各瞬間の位置をプロットしてゆき、落石の軌跡を求めた。また、落石の線速度と回転エネルギーを推定するため、ビデオカメラによって落石の回転やパウンドの状況がわかるように撮影した。図-4に落石の軌跡撮影概念図を示す。落石の軌跡実態の取りまとめは平成元年において実施した。

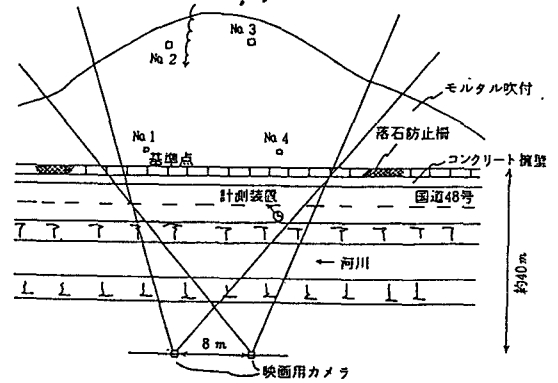


図-4 落石撮影概念図

2. 2. (B)調査結果

(1)4月初旬の落石により平面図上で右側法面が大きく変化するとともに下部に落石の堆積が認められた。また、断面図上でも昨年度と同様の「落石」「せり出し」「堆積」の変化パターンが認められた。さらにこの落石箇所は、昭和62年度の1回目、2回目の測量結果から、他の箇所よりも変化の大きかった2箇所であった事が判明した。

(2)落石と気象の相関

落石の著しかったのは積雪が消失した直後の4月上旬で、法面右側等で大きく落石した。その後10日前後にわたって落石源が拡大していることがパトロール写真により判明した。

(3)熱映像調査結果

4月に落石した箇所が、昭和62年度の行った熱映像調査のためのカメラテストの際のデータから、温度異常箇所であったことが判明した。

(4)岩石の吸水膨張率は、浸水後約24時間で飽和状態となり、最大値の0.02%(200×10^{-6})を示した。

このことより膨潤する粘土鉱物は少なく、吸水膨張率は小さいといえる。

2. 3 平成元年度の調査

2. 3. (A)調査内容

昭和63年度に引き続き、同様の調査を実施すると共に、岩石の試験・観測として岩石の比熱試験と岩石の

表面温度とひずみの関係の把握および落石の軌跡についてとりまとめた。図-5に全体の作業手順を示す。主な作業は次のとおりである。

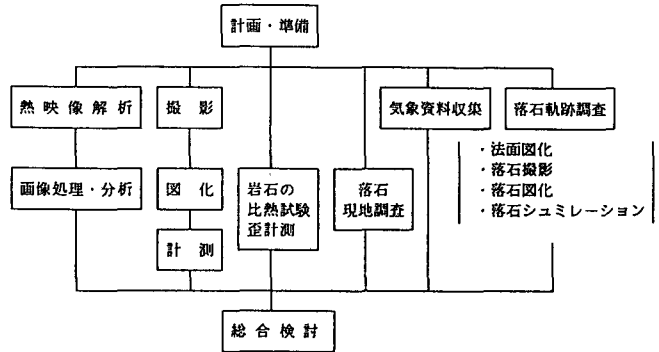


図-5 調査の作業手順 (H1)

(1)地上写真測量と熱映像調査を4月と8月の2時期行い、法面形状と熱異常箇所を総合し落石の危険箇所を推定した。

(2)岩石試験・観測は、岩石の比熱試験と法面の岩石5箇所にひずみ計を設置し、8月期の5回の熱ビデオ撮影時にそれぞれ歪を測定した。岩石表面の温度は熱映像調査によった。

(3)落石の軌跡やエネルギー量の実

態を解明するとともに落石のシミュレーションを行い作図した。落石のシミュレーションは土木研究所所有の落石シミュレーションプログラムⅡを使用した。このプログラムは、2次元平面内で落石運動を飛行・衝突・ころがり運動の3種類として、飛行中の落石は質点とし、衝突時およびころがり時には落石の剛体は球と仮定して回転による影響も考慮できるものであり、土木研究所の過去のデータより、斜面角度、反発係数、摩擦係数の標準偏差を求めて95%の信頼区間内で乱数を発生させて、1個の落石に対して30回シミュレーションを行ない、落石の跳躍軌跡を数値解析するものである。

2. 3. (B) 調査結果

(1)地上写真測量による変化状況と落石について第6回撮影時(S.63年11月22日)と第7回撮影時(H.1年4月19日)の間の変動箇所と第7回撮影時と第8回撮影時(H.1年8月22日)の変動箇所を調査した。後の調査結果を図-6に示す。断面図上

の変化は図-7のような変化状況が認められた。法面全体では、左～中央の変動が比較的小さく、右側の岩盤部分で変動が著しい。この付近は昭和63年度からも変動の大きい箇所で、変動の大きい範囲は経続して変動を続けている傾向が強い。断面図の一例として図-8に NO.117.25の断面図を示す。

(2)落石と気象の相関

4月から12月までの月1回の落石調査およびパトロール時の写真から落石の月日と数量を求め、気象データとの相関を考察した。これらの調査結果から次のことがいえる。3月上旬には調査法面は露出しはじめていたが、落石はこの融雪期に集中的に発生しており、3月6日頃、3月13日頃と確認された。

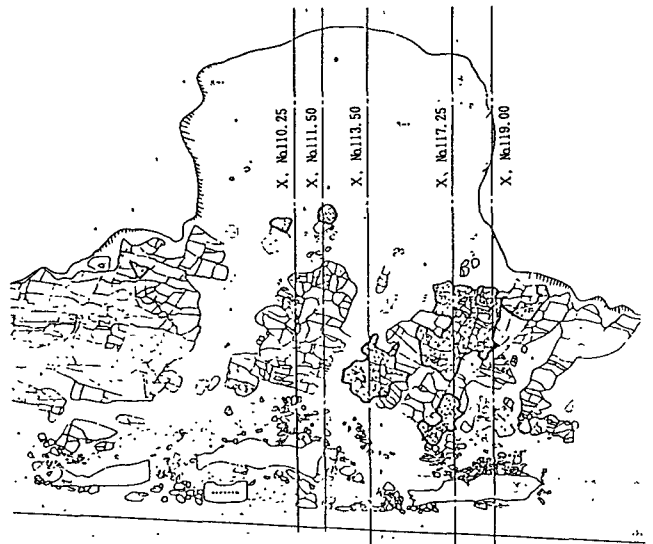


図-6 第7～8回撮影時変動箇所 ○：精密法面平面図上の変化箇所

4月27日の落石数量調査では径10～50cmの落石が184個確認された。これらの大半は3月上旬の融雪期に落下したものである。5月上旬には中央やや左の土砂化の進んだ箇所の小岩片の落下が確認できる。

この時期は降水量も少なく気象上の誘因は認め難いが、気温の上昇とともに草木類が伸びはじめ、この影響も小岩片の落下の一因と考えられる。6月19日頃には右側岩盤上部の岩塊群の落下が確認された。4月期の地上写真測量による断面図と8月期のそれとの比較により明瞭に変化がとらえられた(図-6)。6月も降水量は少なく、目立った気象上の誘因は認められないが、落下の直前の6月16日～17日に各20mm前後の降雨がありこれが落下の引金になった可能性がある。

夏から秋にかけては、径数cmの岩片の落下のみで、顕著な落下は発生していない。また、降水量が多かったのは8月6日の38mm、9月4日の53mm、9月19日の46mmである。このことは融雪時期に不安定化した岩塊は夏までにほぼすべて落下してしまっている可能性がある。最大風速と地震による落石の影響も調査したが、両者の相関は認められなかった。ただし、最大風速は4月に7m/sを記録するのが2日、地震は震度Ⅲを記録したのが3回あったが、ともに規模が小さく、回数も少なかったため落石の誘因まで至らなかったものと考えられる。

(3) 熱映像調査

1) 法面形状情報を加味した熱映像調査による落石発生懸念箇所の推定

昭和62年度からの調査により、今後落石が発生する岩盤ブロックは、背後の斜面と分断され遊離し、熱容量が小さく、周囲の岩盤より顕著な温度変化を示すと考えられた。よって、落石発生箇所の推定は、A)熱映像調査で、同時期異時間画像および異時期同時間画像を用い温度変化領域を抽出する。B)地上写真測量で得られたデータをコンピュータ処理して法面標高変化画像、亀裂変化画像、水平方面亀裂分布画像、法面変状画像を抽出する。C)A)、B)の画像をオーバーレイ処理し、D)温度異状箇所と地形要因との対応を分析して判定する。とした。

2) この調査手法を用いて判明した結果は次のとおりである。関係する画像を写真2～5に示す。

① 法面に向かって左側の岩盤ブロックでは、ブロック上部、中央、

下部にわたって温度変化領域が認められ、その分布パターンも他の岩盤ブロックに比べて大きい。しかし、標高変化画像では大きな変化は認められない。さらに、水平方向の亀裂は卓越するが、垂直方向の亀裂分布はそれに比べて少なく「すわりが良い」と考えられる。したがって比較的安定した箇所といえる。

② 法面中央の岩盤ブロックでは、その上部付近にかなりの規模で温度変化領域を識別できる。また、同箇所は標高の変化量も大きく、垂直ないしは斜交する亀裂が卓越し、さらに亀裂頻度も高い。したがって同箇所は落石発生の確率が高いと考えられる。

③ 法面に向かって右側の岩盤ブロックでは、その上部～中央部にかけて温度変化領域を識別することができる。この付近は、標高の変化量が多く、斜交する亀裂も多くかつ頻度も高い。さらにオー

変動状況の模式図	備考
	断面図 X, h=111.5 X, h=117.25等 X, h=117.25付近 6月19日頃落下した箇所
	断面図 X, h=111.25付近
	断面図 X, h=100.5 X, h=111.25 X, h=117.0等

図-7 断面図上の変化のパターン

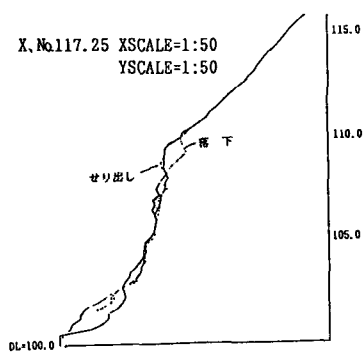


図-8 断面図上の変化の一例

バーハングした不安定な形状を示す。この岩盤ブロックでは落石の履歴をもち、同箇所は極めて落石発生の確率が高いと考えられる。

(4) 岩石の比熱・ひずみ量調査および熱映像調査の相関

整形された供試体の比熱は20℃において0.178cal/g℃で粗粒凝灰岩としては一般的な値を示す。岩石の表面温度と歪の関係では、温度の上昇とともに岩石は伸び低下とともに縮む相関が明瞭である。岩石の熱膨張率が一般に 10×10^{-6} 程度であるのに対し、80～100 $\times 10^{-6}$ と約10倍の値を示した。この原因を比熱試験結果とひずみ量調査から求めると次のように考えられる。

- ① 熱映像は、法面の温度分布を正確に反映している。
- ② 岩石は温度により熱膨張・収縮を繰り返す。
- ③ 岩石表面の風化部と風化していない内部では熱膨張率が風化部で大きい。

(5) 落石の軌跡調査

実際の落石の軌跡とシミュレーションによる落石軌跡を比較した結果を、図-9～12に示す。

1) 跳躍量と落下高さ

現場実験、数値実験ともに落下高さが大きくなるにしたがって跳躍量が増大する傾向が認められる。この傾向は数値実験結果の方が顕著で、落下高さ30m前後で跳躍量が4～8m余りに達する。一方現場実験結果では、落下高さ15m以下では跳躍量は2m以下にほぼおさまっており、落下高さ15mを越えると跳躍量にばらつきが大きくなり跳躍量が3～4mのものも多い。

2) 線速度エネルギーと回転エネルギー

現場実験・数値実験結果ともに、従来いわれているように、回転エネルギーは線速度エネルギーの1/10以下であることが示された。数値実験では、回転エネルギーは線速度とともに大きくなるのに対し、現場実験では線速度が増大しても回転エネルギーはある一定値以上にはならない傾向が見られる。これは、実際にはほとんど落石の回転が落下高さとともに増大せず、ある一定の回転数を越えないことを示すものと考えられる。

3) 落石速度と落下高さの関係

本調査結果と「落石対策便覧」の図1-10速度分布の上限値の比較について比較した。結果を図-13～14に示す。現場実験ではばらつきが多いが、数値実験ではばらつきなく表され、残存係数 α は約0.95となっている。この値を示している藪原Aの現場条件は、落石の形状が「角～丸」斜面の性質が「軟岩、凹凸大、立木なし」斜面の勾配が「55℃」であり、本調査法面の条件にかなり近いと言える。よって整合性のある結果と考えられる。

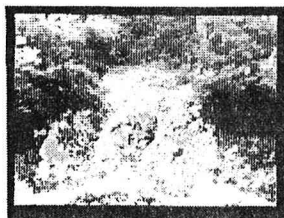


写真-2 温度変化領域画像
(S63.8.9.20:00とH1.8.10.19:30)

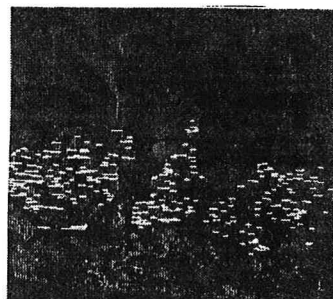


写真-4 水平方向亀裂分布画像



写真-3 法面標高変化画像
(S62.11(赤)～H1.8(青))

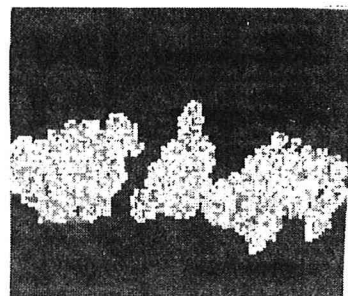


写真-5 亀裂頻度画像
(観度大:赤、黄～観度小:青、ピンク)

4. まとめ

本調査を実施して大きく別けて次の事が明かになった。

4.1 落石の発生機構

本調査箇所の落石の誘因は降雨の他、岩石の熱膨張、収縮、冬期の凍結、融解の繰り返し等の風化作用により、岩盤節理部、岩目部と岩石表面の亀裂の発生、拡大および融雪時の雪による岩石のひきずり落し、マトリック部の流失等があり、不安定化した箇所から融雪時の春先に集中して落石している。したがって、東北地方等の積雪寒冷地帯では、落石対策の設計や道路管理にあたっては、これらの事についても十分に検討を加える必要があると考えられる。

4.2 落石の予測手法

地上写真測量と熱映像解析を総合的にとりまとめる事によって、一定程度、落石の危険箇所を予測できた。したがって、今後はこの予測手法をさらに簡便で経済的にしていくことと、航空写真測量との組合せ方法や他分野への応用についても検討していく必要があると考えられる。

4.3 落石の軌跡調査

落下高さ15m以下では跳躍量は2m以下にほぼおさまっているが、落下高さ15mを越えると跳躍量にばらつきが大きくなり、跳躍量が3~4mのものも多い。落下高さと落石速度はばらつき

があるが、シミュレーションによれば、「落石対策便覧」とほぼ同様の結果となっている。又、落石の線速度が増大しても回転エネルギーはある一定値以上にはならない傾向にある。したがって、今後は跳躍量に対する調査とそれに対する対策を検討する必要があると考えられる。

5. 今後の計画

平成2年度は、調査最終年度として調査の継続と今まで具体的に示されていなかった積雪寒冷地帯の雪崩防止効果を含めた落石防護工等の落石対策についてもあわせてとりまとめを行う。

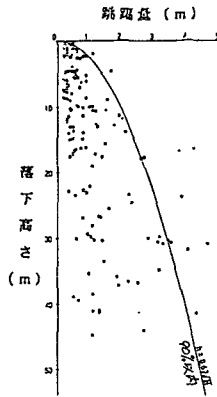


図-9 跳躍量と落下高さの関係 (全法面・現場実験)

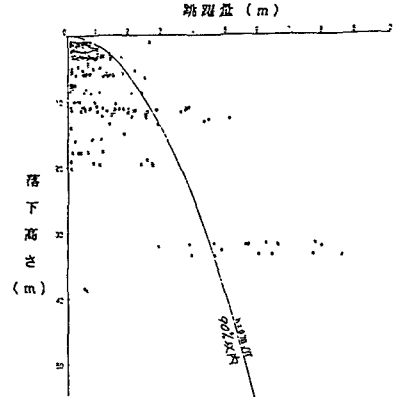


図-10 跳躍量と落下高さの関係 (全法面・数値実験)

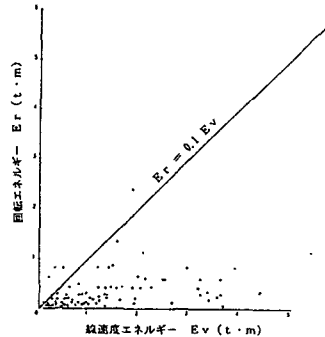


図-11 線速度 E_v と回転 E_r の関係 (全法面・現場実験)

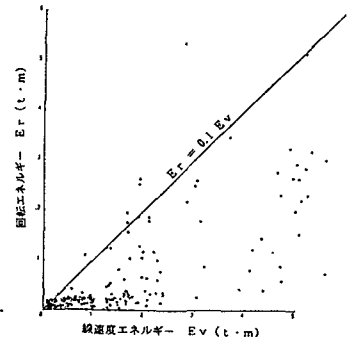


図-12 線速度 E_v と回転 E_r の関係 (全法面・数値実験)

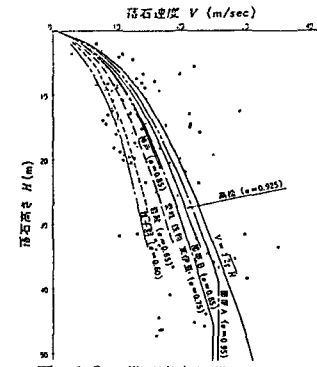


図-13 落石速度と落下高さの関係 (落石対策便覧との比較・全法面・現場実験)

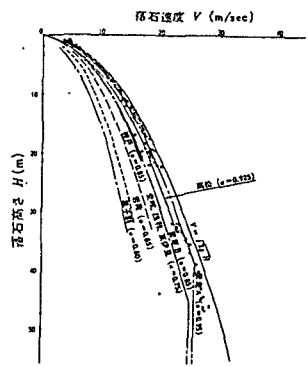


図-14 落石速度と落下高さの関係 (落石対策便覧との比較・全法面・数値実験)