

(2) 落石シミュレーションによる落石の立木の影響における一考察

A CONSIDERATION ON EFFECTS OF LIVING TREES
IN SIMULATION OF FALLING ROCKS

水上誠一*津田雅文**勘田益男***

Seichi MIZUKAMI, Masafumi TUDA, Masuo KANDA

*日本工営(株)北陸事務所 設計課長 (〒920-0051金沢市二口町160-15)

**日本工営(株)北陸事務所 技師 (〒920-0051金沢市二口町160-15)

*** (有)斜面防災研究所 代表取締役 (〒921-8062金沢市新保本4丁目4番地)

キーワード: シミュレーション解析, 立木, 吸収エネルギー
(Simulation Method, Living Trees, Absorbent energy)

1. はじめに

落石の落下実験はこれまで比較的立木の少ない斜面で行われているが, 実際の自然斜面で立木が多い場合はこれらの影響を考慮する必要が生ずる. そこで, 立木の影響が大きいと考えられる実斜面の落石に着目し, 落石シミュレーション解析によって照査した.

平成8年6月に発生した落石(重量12tf)は, スノーシェッド上方約90m(落差)より落下して, 立木に衝突した後スノーシェッド背面で停止した. 落石シミュレーションによって樹木の影響の有無の双方を検討し, 落石が立木に衝突する場合における運動エネルギーへの配慮方法の考察を行う.

2. 落石の状況

現状の道路にはスノーシェッドが設けられており, スノーシェッド背面の比高差約200mにわたる斜面には, 凝灰岩の露頭が約比高差100m付近上方に多いと見られ, 崩落の危険が高い状況であった.

平成8年6月に, この一部が崩落し, 立木への衝突を繰り返してスノーシェッド背面で停止した.

落石の形状はほぼ長方体として1.8m×1.3m×2.0mであり約12tfと推定した.

写真1は発生源付近の崩落後の状況であり, 写真2は停止した落石である.

また, 写真3に示すように立木は衝突によって折れている. 斜面の上半部には立木は少なく, 落石の跳躍運動による痕跡も見当たらないことから, 少な

くとも立木の多い下半部における跳躍運動によって立木が折れたと推定できる. 折れた立木の種別は図-2に示すように, 杉($\phi 15\sim 35\text{cm}$)が7本, 広葉樹($\phi 25\text{cm}$)が1本である.

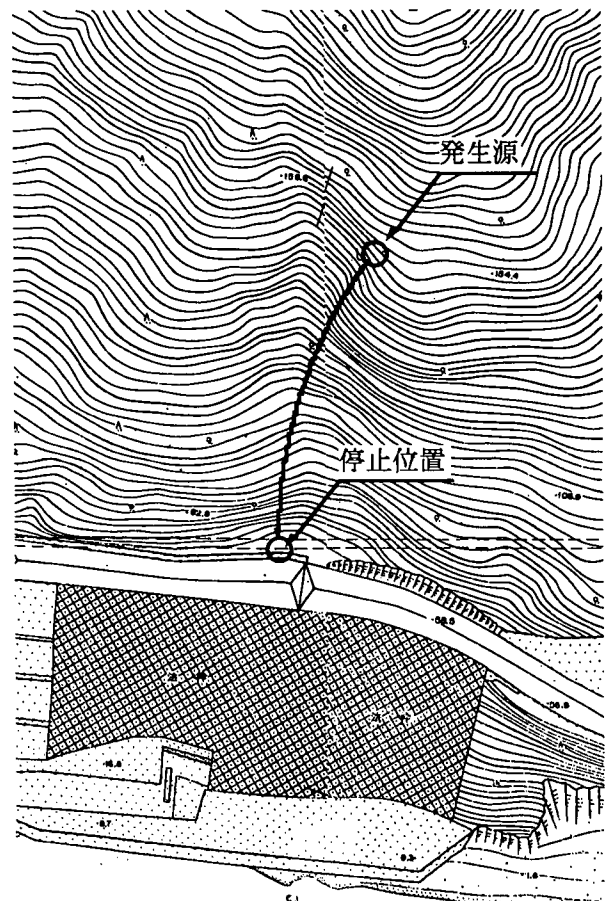
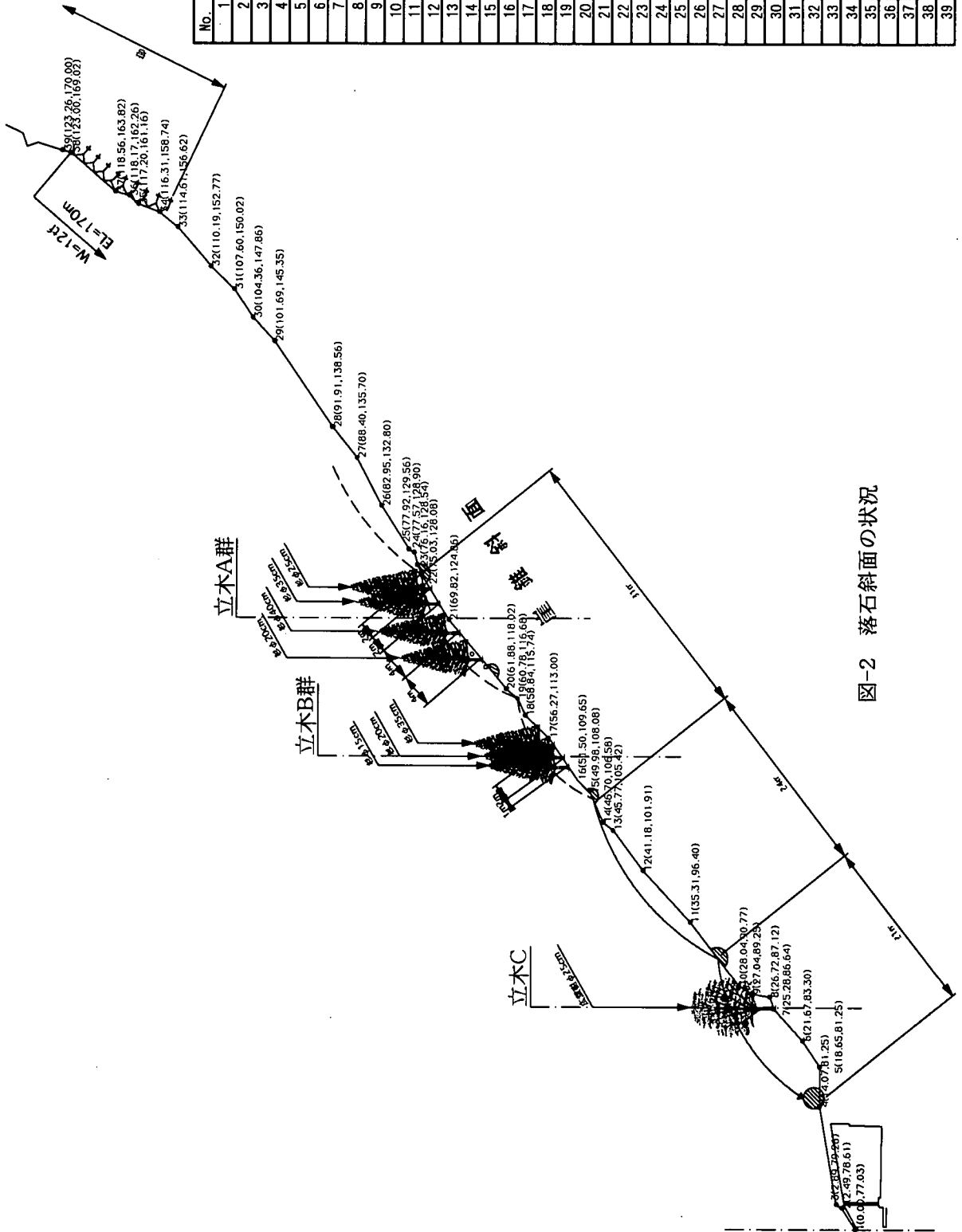


図-1 平面図 (S=1:2000)



| No. | X座標 | Y座標 |
|-----|--------|--------|
| 1 | 0.00 | 77.03 |
| 2 | 2.49 | 78.61 |
| 3 | 2.89 | 79.26 |
| 4 | 14.07 | 81.25 |
| 5 | 18.65 | 81.25 |
| 6 | 21.67 | 83.30 |
| 7 | 25.28 | 86.64 |
| 8 | 26.72 | 87.12 |
| 9 | 27.04 | 89.25 |
| 10 | 28.04 | 90.77 |
| 11 | 35.31 | 96.40 |
| 12 | 41.18 | 101.91 |
| 13 | 45.77 | 105.42 |
| 14 | 46.70 | 106.58 |
| 15 | 49.98 | 108.08 |
| 16 | 51.50 | 109.65 |
| 17 | 56.27 | 113.00 |
| 18 | 58.84 | 115.74 |
| 19 | 60.78 | 116.68 |
| 20 | 61.88 | 118.02 |
| 21 | 69.82 | 124.86 |
| 22 | 75.03 | 128.08 |
| 23 | 76.16 | 128.54 |
| 24 | 77.57 | 128.90 |
| 25 | 77.92 | 129.56 |
| 26 | 82.95 | 132.80 |
| 27 | 88.40 | 135.70 |
| 28 | 91.91 | 138.56 |
| 29 | 101.69 | 145.35 |
| 30 | 104.36 | 147.86 |
| 31 | 107.60 | 150.02 |
| 32 | 110.19 | 152.77 |
| 33 | 114.61 | 156.62 |
| 34 | 116.31 | 158.74 |
| 35 | 117.20 | 161.16 |
| 36 | 118.17 | 162.26 |
| 37 | 118.56 | 163.82 |
| 38 | 123.00 | 169.02 |
| 39 | 123.26 | 170.00 |

図-2 落石斜面の状況

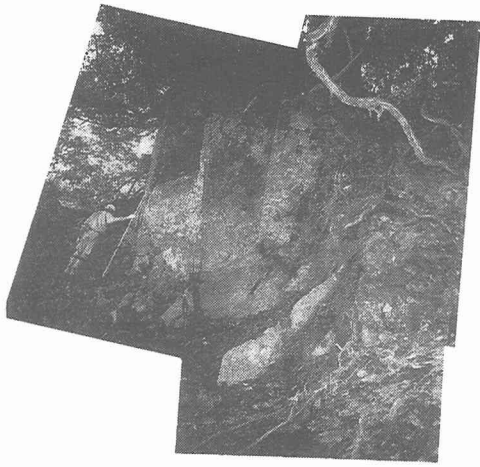


写真1 発生源の崩落跡

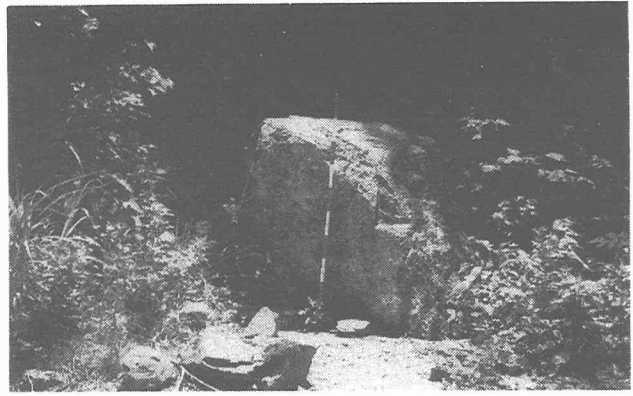


写真2 停止した落石

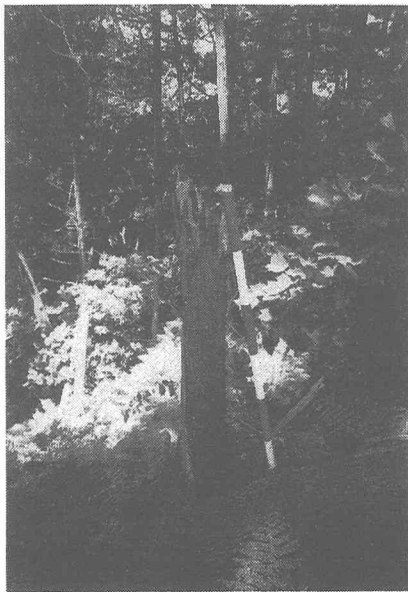


写真3 落石の衝突によって折れた立木 (1)



写真4 落石の衝突によって折れた立木 (2)

3. 立木による吸収エネルギー

立木による吸収エネルギーを定量的に算出することは困難であるが、実用的に木材に加わる衝撃力の例は野球のバット、ゴルフのウッドヘッド、登山のピッケルなどがある。衝撃実験には引張、圧縮、せん断、曲げ、硬さ等の各種の試験法があるが、JISZ2116において衝撃曲げ試験法のみ規定され、3点荷重式のシャルピー法を採用している。

シャルピー法によって求められた単位面積当りの衝撃曲げ吸収エネルギーを材種ごとに示す(表-1)。

曲げ吸収エネルギーは樹木の種類や状態によって異なるが、過去に行われた資料より、成長している樹木であることに配慮して比較的大きめの値を採用する。

したがって、立木を3群に分類したそれぞれの可能吸収エネルギーを表-2に示す。

表-1 各種材木の衝撃曲げ吸収エネルギー⁶⁾

| 材種 | 衝撃曲げ吸収エネルギー $\alpha \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$ |
|----------|--|
| すぎ | 0.20...0.35...0.60 |
| ひのき | 0.30...0.45...0.70 |
| あかまつ | 0.30...0.50...0.80 |
| くろまつ | 0.30...0.50...0.80 |
| えぞまつ | 0.30...0.45...0.75 |
| とどまつ | — |
| もみ | 0.20...0.40...0.75 |
| つが | 0.20...0.50...0.80 |
| ひば | 0.20...0.40...0.65 |
| さわら | 0.20...0.35...0.60 |
| からまつ | 0.30...0.45...0.70 |
| ぶな | 0.60...1.20...1.80 |
| なら(みずなら) | 0.80...0.90...1.00 |
| けやき | 0.70...0.90...1.20 |
| くり | — |
| しらかば | 0.90...1.30...1.50 |

表-2 立木の可能吸収エネルギー

| | | 衝撃曲げ吸収エネルギー | 可能吸収エネルギー |
|------|-----|--------------------------|--|
| 立木A群 | 杉 | 0.6kgf・m/cm ² | φ20cm-0.19 φ25cm-0.29 φ35cm-0.58 φ40cm-0.75 Σ=1.81tf・m |
| 立木B群 | 杉 | 0.6kgf・m/cm ² | φ15cm-0.11 φ20cm-0.19 φ35cm-0.58 Σ=0.88tf・m |
| 立木C群 | 広葉樹 | 1.0kgf/cm ² | φ25cm-0.29 Σ=0.29tf・m |

4. 落石シミュレーション解析

図-2に示す斜面形状を用いて落石シミュレーション解析を行った。落石シミュレーションは吉田らの解析手法²⁾を用いた。立木を考慮する場合と考慮しない場合について2ケース行い、立木の有無の影響について検討した。立木を考慮する場合は、各立木群において落石が通過した際に、可能吸収エネルギー分の速度を減ずることとした。

落石シミュレーション解析に用いた条件は表-3のとおりである。

落石シミュレーションは一般に250回行うが、立木の有無による停止する比率は以下のとおりである。

- 立木無し→139/250=55.6%
- 立木有り→147/250=58.8%

落石の規模が大きいため立木の有無による停止する比率の差異は予想したより小さいことが分かる。

また、スノーシェッド背面上を通過した落石の運動エネルギーの分布を図-4に示す。解析した250ケースの落石を100とした分布では、立木を考慮した場合が、立木を考慮しない場合に比べて全体的に落石エネルギー分布の超過率が下回ることが分かる(図-4)。

落石シミュレーションの主な係数は95%信頼区間を持つ正規分布より乱数にて用いているため、95%信頼区間中の落石エネルギーの上限値を比較する。また落石対策便覧の推定式より、

$$H' = \left(1 - \frac{\mu}{\tan(\theta)}\right)H$$

$$= \left(1 - \frac{0.35}{\tan(40)}\right) \times 90 = 52.5 \text{ m}$$

落石の運動エネルギーは、

$$E = W \cdot H$$

$$= 12.0 \times 52.5 = 630 \text{ tf} \cdot \text{m}$$

表-3 落石の運動ファクターと各種係数

| 運動形態 | 要因 | 要素 | 採用値 |
|-----------|-------------------------|---------------------------|---|
| 滑り運動 | 斜面の状況 | 摩擦係数(μ) | 実験データ(正規分布・乱数) μ=0.59(平均値) μ=0.09(標準偏差) |
| | 斜面の状況(斜面の凹凸、地盤ののり込み、植生) | 抵抗係数(C _r) | 実験実測値に基づくシミュレーションによる逆算 C _r =0.1 |
| 回転運動 | 斜面の形状 | 慣性半径(K) | 理論 |
| | 斜面の状況(斜面の凹凸、地盤ののり込み、植生) | 抵抗係数(C _r) | 実験実測値に基づくシミュレーションによる逆算 C _r =0.1 |
| 跳躍運動 | 空気抵抗 | 空気抵抗摩擦係数(a _r) | 理論 |
| 衝突運動 | 落下の速度 | 反発係数(e) 減衰係数(p) | 実験データ(正規分布・乱数) e=0.275(平均値) e=0.28(標準偏差) p=0.78(平均値) p=0.25(標準偏差) |
| 滑り運動 回転運動 | 落下の加速度 | 落下の加速度(a) | 理論 |
| 回転運動 跳躍運動 | 落石の形状 斜面の状況 | 限界速度(V _σ) | 実験データ(正規分布・乱数) V _σ =8.5(平均値) V _σ =2.5(標準偏差) |

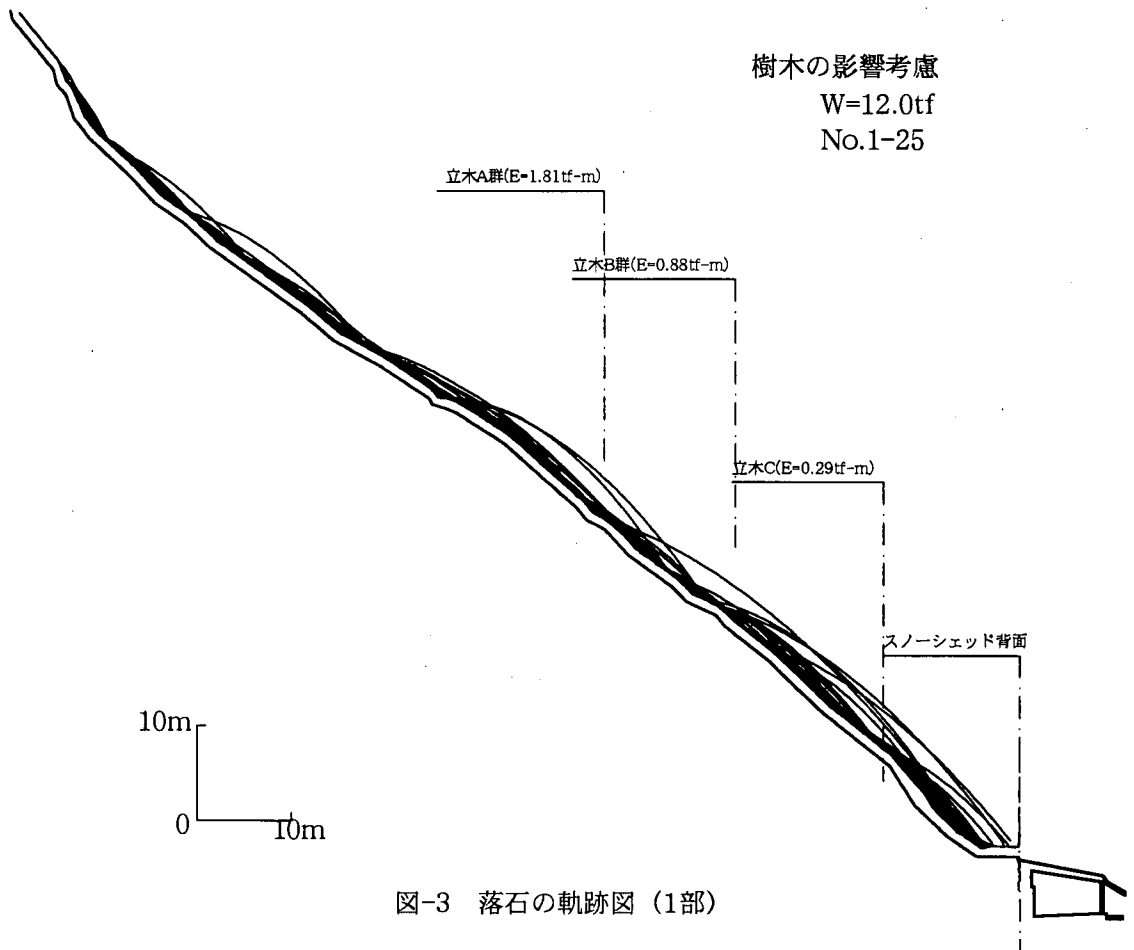


図-3 落石の軌跡図 (一部)

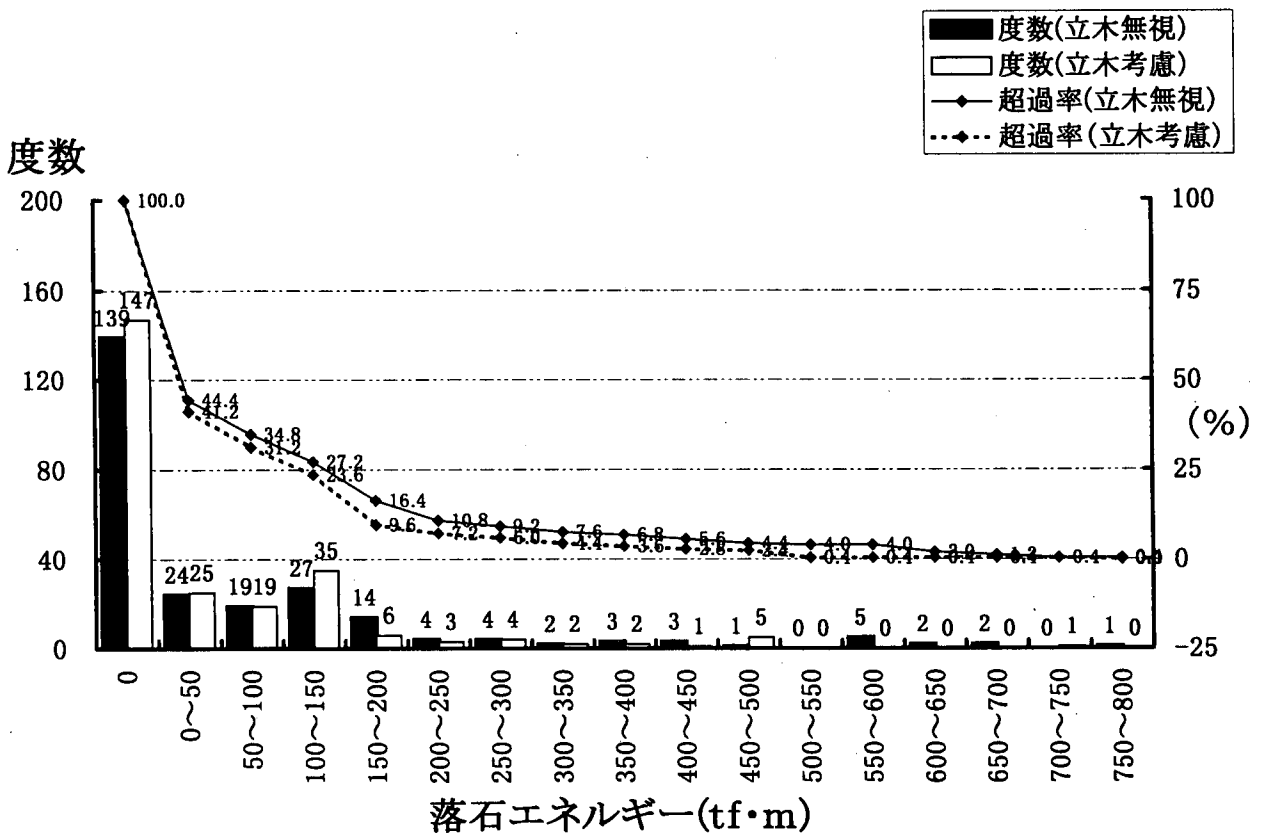


図-4 落石エネルギー分布表

ここに、 H ：換算落下高さ (m)

H ：斜面の落石 (m)

θ ：斜面の勾配 (°)

μ ：斜面の等価摩擦係数

この場合、斜面の等価摩擦係数 μ は落石対策便覧に記載されている最大値 (表-4) を用いる。

表-4 斜面の種類と等価摩擦係数 μ の値

| 区分 | 落石および斜面の特性 | 設計に用いられる μ | 実験から得られる μ の範囲 |
|----|------------------------------|----------------|--------------------|
| A | 硬岩, 丸状：凹凸小, 立木なし | 0.05 | 0~0.1 |
| B | 硬岩, 角状~丸状：凹凸中~大, 立木なし | 0.15 | 0.11~0.2 |
| C | 土砂・崖錐, 丸状~角状：凹凸小~中, 立木なし | 0.25 | 0.21~0.3 |
| D | 崖錐・巨礫混り崖錐, 角状：凹凸大~中, 立木なし~あり | 0.35 | 0.31~ |

表-5 落石の運動エネルギーの比較

| | | 落石の運動エネルギー |
|------------|-----|------------|
| 落石シミュレーション | 立木無 | 419tf-m |
| | 立木有 | 271tf-m |
| 落石対策便覧の推定式 | | 630tf-m |

5. まとめ

落石が落下する場合の立木による影響を実際の事例より、落石シミュレーションを用いて照査した。表-5に示す結果のように、立木の持つ可能吸収エネルギーは全体でも3tf-m程度と小さいが落石運動の減衰に大きく影響することが推測された。今回は立木の衝突による吸収エネルギーをシャルピー法による単位断面積当りの衝撃曲げ試験による値を用いたが、必ずしも妥当とは言えず、より精度の高い手法を用いることが課題である。さらに、立木の分布を事前に確率変動の要素としてシミュレーション解析に反映できれば、現地に適合したより精度の高い落石の運動形態の把握が可能になると考えられる。

最後にJISZ2116に記載された衝撃曲げ試験の内容について添付する。

12. 衝撃曲げ試験

備考 この試験は、長手方向が繊維方向に平行で荷重方向と垂直な場合について行う。

12.1 試験体 試験体は、横断面が正方形の柱体とし、その寸法は、正方形断面の一辺の長さを20mm、試験体の長さを300mmとする。

12.2 試験方法

12.2.1 スパンは240mmとし、98.0J {10kgf·m} の衝撃エネルギーを持っている衝撃ハンマーでスパンの中央を打撃する。支点と衝撃ハンマーの荷重頭の円筒又は半円筒の直径は30mmとする。

12.2.2 衝撃荷重面は、原則として柁目面とし、板目面又は追柁面の場合は木表から荷重を加える。

12.3 結果の計算 衝撃曲げ吸収エネルギーは、次の式によって算出し、有効数字3桁まで求める。

$$a = W_1 / bh$$

ここに、 a ：衝撃曲げ吸収エネルギー(J/cm²) {kgf·m/cm²}、 W_1 ：衝撃仕事量(J) {kgf·m}、 b ：試験体の幅 (mm)、 h ：試験体の高さ (mm)

12.4 記録 試験結果として、次の事項を記録する。

- (1) 衝撃曲げ吸収エネルギー
- (2) 樹種
- (3) 柁目面、板目面又は追柁目面の区分
- (4) 平均年齢幅
- (5) 密度
- (6) 含水率

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，'83.7.
- 2) 吉田博・右城猛・榎谷浩・藤井智弘：斜面形状を考慮した落石覆工の衝撃荷重の評価，構造工学論文集VOL.37A，PP1603~1615，'91.3.
- 3) 吉田博・榎谷浩・右城猛・柴田健次：落石覆工の設計の現状と合理的設計へのアプローチ，土木学会論文集421号-13，PP213~222，'90.9.
- 4) 吉田博・鈴木俊裕・右城猛・勘田益男：斜面上を落下するエネルギーの評価法，土木学会第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp134~139，'93.6.
- 5) 高橋徹・中山義雄：木材科学講座3物理，'95.3.
- 6) 日本木材加工技術協会：木材工業「日本産主要木材」，'54~'56