

現場のトラブルから学ぶ 落石対策の課題

平成22年9月24日(金) 名城大学・名駅サテライト

1. 技術の変遷
2. 落石の運動
3. 落石防護柵
4. 落石防護柵基礎と防護擁壁
5. ポケット式落石防護ネット

(株)第一コンサルタンツ
右城 猛



1. 落石対策工の技術基準の変遷

落石防護工の設置に関する調査研究報告書(1974年)



高松で現場落石実験(1980年) 四国技術事務所

落石対策便覧(1983年)



越前海岸岩盤崩壊事故(1989年)
豊浜トンネル岩盤崩壊事故(1996年)

落石対策便覧改訂版(2000年)



落石対策便覧に関する参考資料(2002年)(松尾修)
- 落石シミュレーション手法の調査研究資料 -

落石防護柵基礎の実験(2002年) 四国技術事務所
現場落石実験(2003年) 四国技術事務所
落石防護ネットの現地実験(2008年) 地盤工学会四国支部
落石防護柵の現地実験(2009年) 地盤工学会四国支部

落石対策便覧2回目改訂版(?)

2. 落石の運動

- 落石対策便覧の予測法
- トラブル事例
- 運動形態
- 等価摩擦係数
- 跳躍量
- 終端速度



1979年7月 一般国道33号 愛媛県上浮穴郡柳谷村

落石対策便覧による予測法

運動形態

すべり運動と見なす
(ハイムのそりモデル)

速度

$$V = \sqrt{2gH \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right)}$$

$$H \leq 40m$$

(40mで終端速度になる)

運動エネルギー

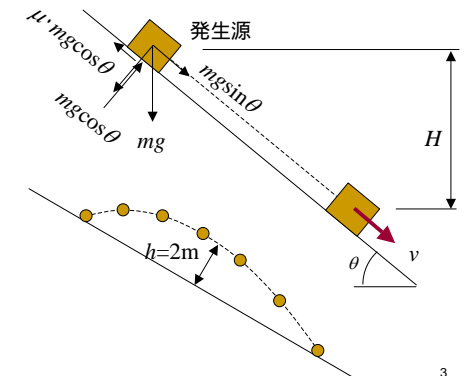
$$E = mgH \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right) (1 + \beta) \leq mgH$$

$$\text{回転エネルギー係数} \quad \beta = \frac{E_R}{E_v} \approx 0.1$$

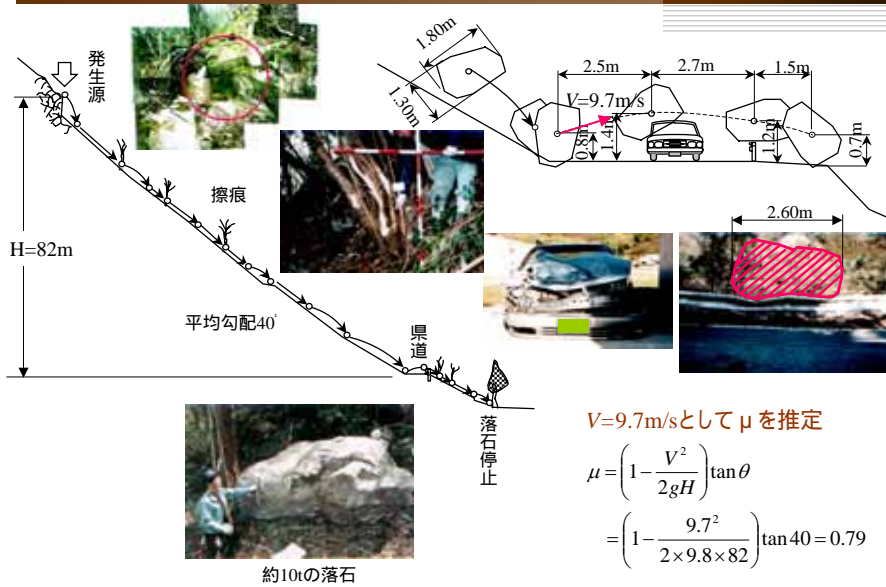
跳躍量 $h=2m$

等価摩擦係数 μ の値

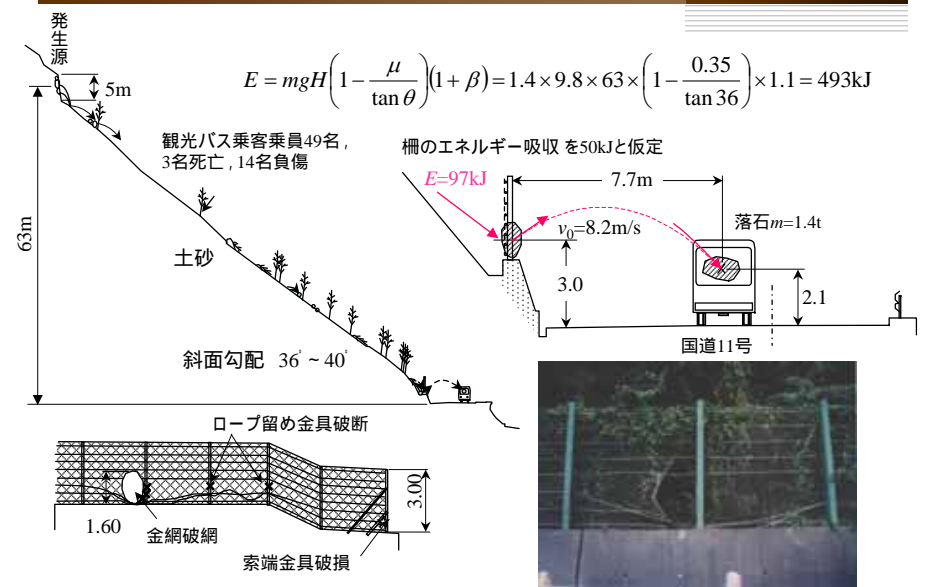
区分	落石形状	地質	凹凸	立木	μ
A	丸状	軟岩	小	なし	0.05
B	丸状~角状	軟岩	中~大	なし	0.15
C	丸状~角状	土砂, 崖錐	小~中	なし	0.25
D	角状	崖錐, 巨礫混じり崖錐	中~大	なし~あり	0.35



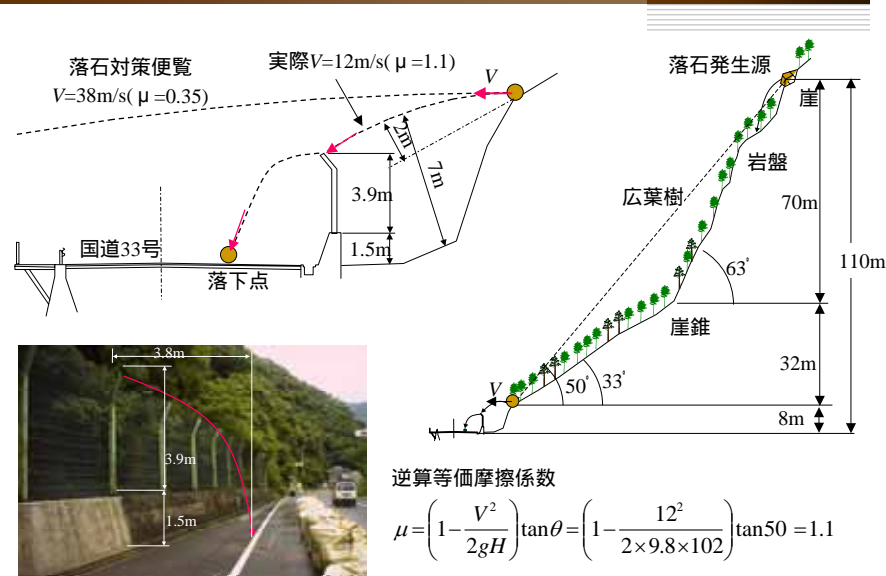
高知県道東洋安田線・北川村島1996年



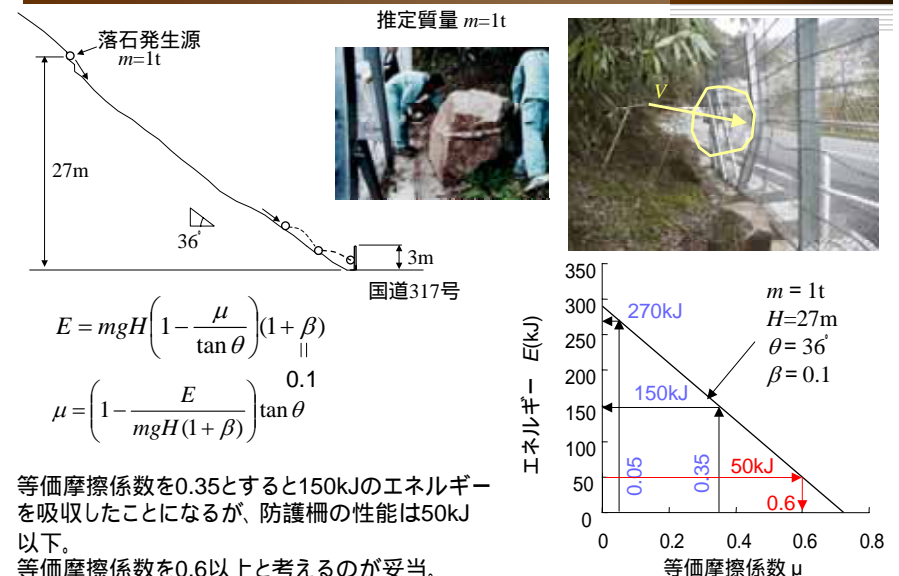
国道11号鳴門市北灘 1990年10月



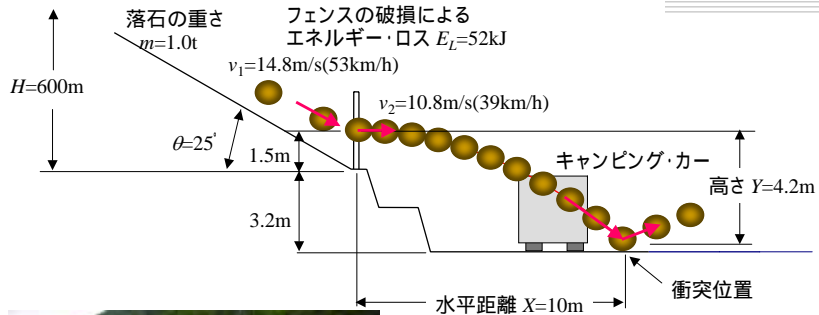
国道33号吾北村大渡 2003年5月



芸予地震による国道317号の落石 2001年

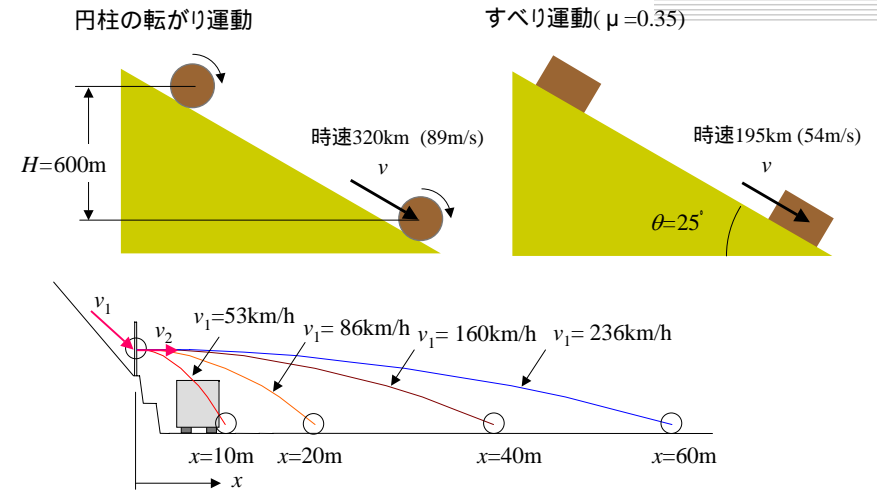


富士山五合目駐車場落石事故 2009年7月



$$\mu = \left(1 - \frac{V^2}{2gH}\right) \tan\theta = \left(1 - \frac{14.8^2}{2 \times 9.8 \times 600}\right) \tan 25 = 0.46$$

運動力学から導かれた落石の速度とエネルギー



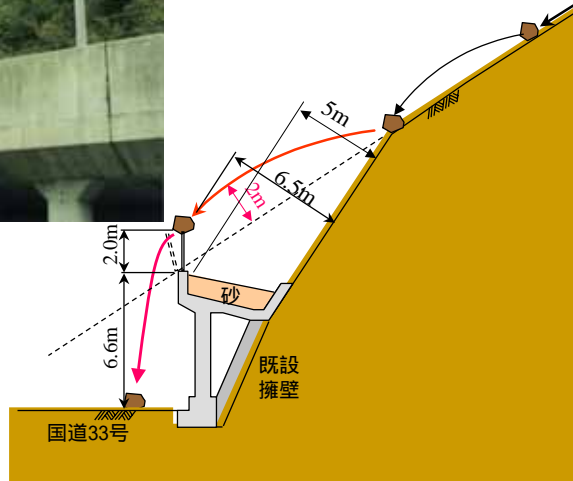
落石が新幹線のように速ければキャンピングカーの上を飛び越える。落石事故は起きなかったはず。

落石の最大跳躍量を2mと見なせるか？



菌原ダムの最大跳躍量5mで設計

一般国道33号
愛媛県上浮穴郡柳谷村
1981年



落石の運動エネルギーは意外と小さい



この防護ネットのエネルギー吸収性能は120kJ程度

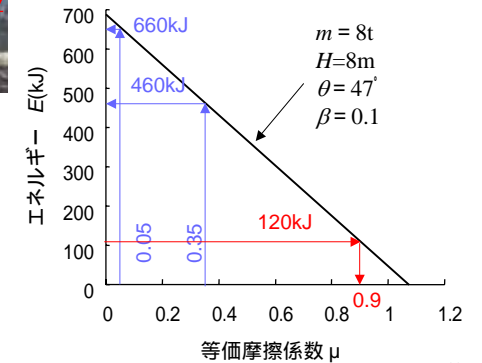
$E=460 \sim 660\text{kJ} ?$



$$E = mgH \left(1 - \frac{\mu}{\tan\theta}\right) (1 + \beta)$$

0.1

落石対策便覧 $\mu = 0.05 \sim 0.35$



落石の運動形態はバウンドが主体的



西土佐村落石実験(高知県、2000年)



土居町落石実験(四国技術事務所、2003年)

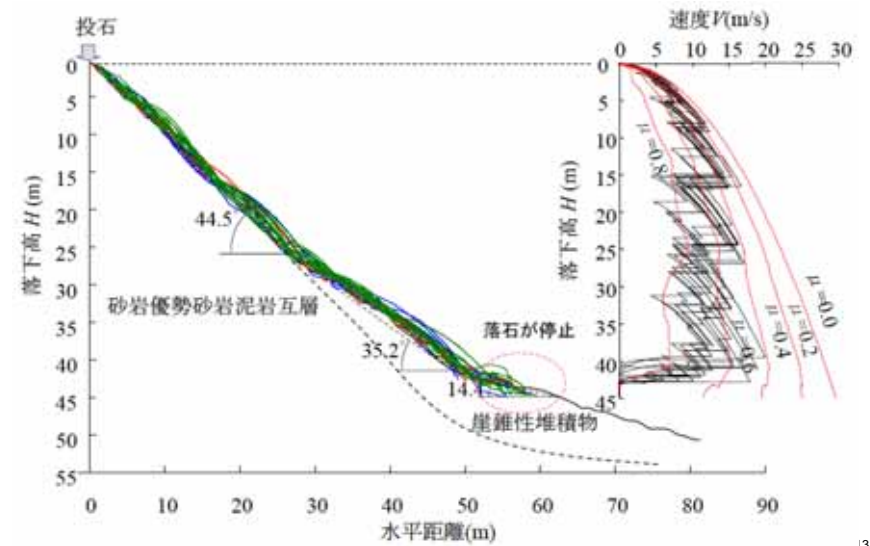


土居町落石実験(四国技術事務所、2003年)

12

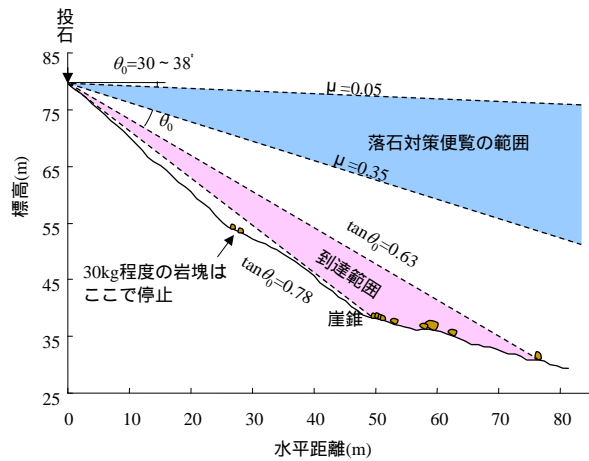
愛媛県土居町の落石実験

四国技術事務所、2003年



13

落石の停止位置



14

道路際に逆算した等価摩擦係数

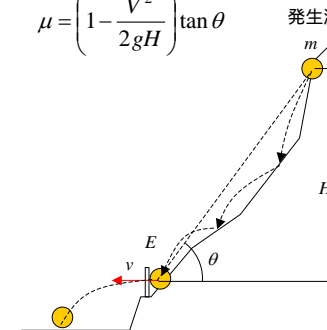
落石の運動をすべり運動と仮定して

エネルギーから逆算

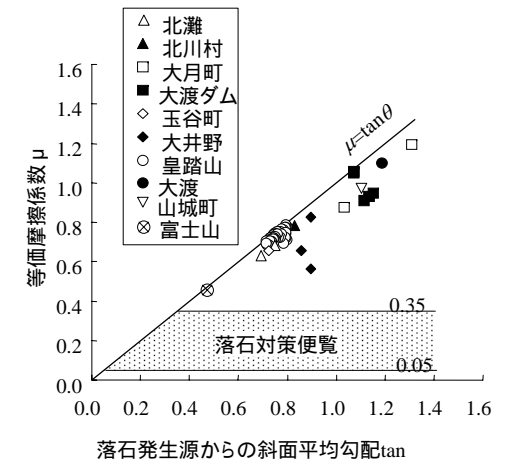
$$\mu = \left(1 - \frac{E}{mgH(1+\beta)} \right) \tan \theta$$

速度から逆算

$$\mu = \left(1 - \frac{V^2}{2gH} \right) \tan \theta$$

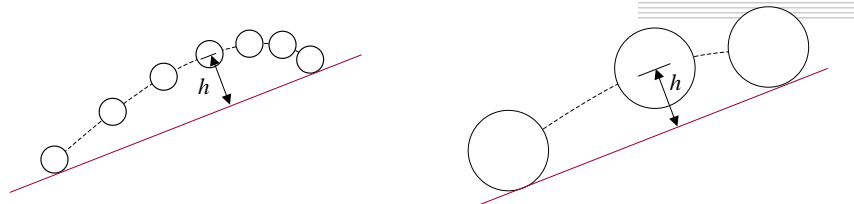


逆算された等価摩擦係数は0.5~1.2と大きい

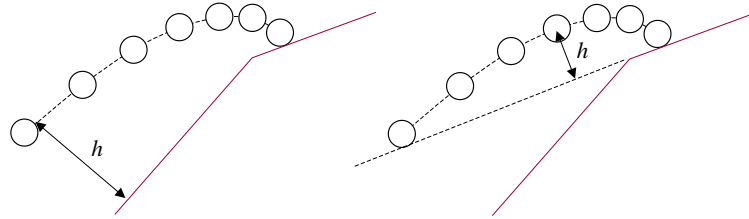


15

落石跳躍量の定義は？



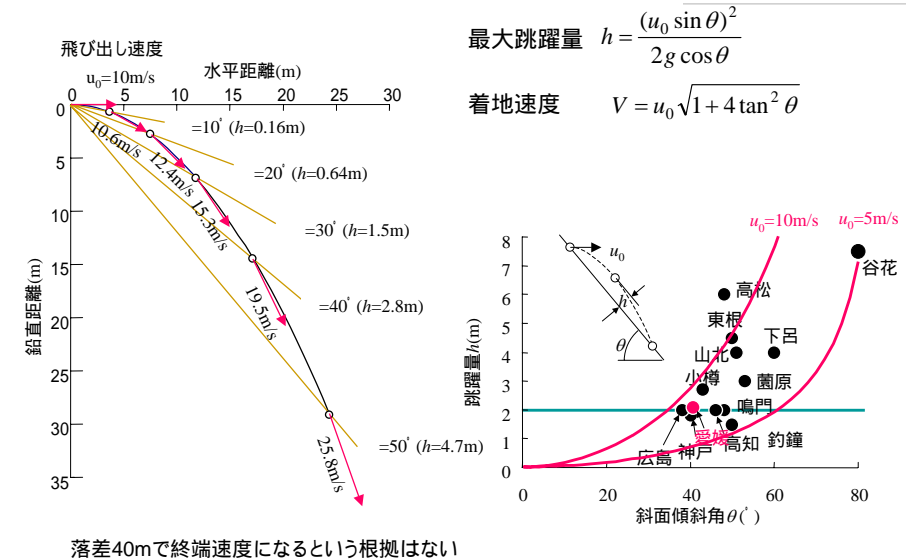
(a) 斜面の表面から落石の中心まで？ (b) 落石径が4mなら転がっていても跳躍は2m



(c) 斜面の勾配が変化している場合の跳躍量は？

16

跳躍量と速度は斜面傾斜角に依存する



17

現場のトラブルからの教訓

1. 落石の運動はバウンドが主体。
2. 落石の速度は自動車なみ。
3. 落石現場の道路脇で逆算された等価摩擦係数は 0.5 ~ 1.2。
4. 等価摩擦係数は斜面の特性値ではない。落下に伴って変化する。
5. 跳躍量の定義は明確でない。
6. 斜面勾配が急なほど着地速度と跳躍量が大きくなる。終端速度は存在しない。

18

3. 落石防護柵及び基礎



19

設計における5つの前提

1. 金網は25kJのエネルギーを吸収するまで変形できる。
2. 落石を2本のワイヤロープで均等に支持する。
3. ワイヤロープの歪みは全長にわたって一定。
4. 中間支柱は15度傾斜するまで降伏強度をたもつ。
5. ワイヤロープか中間支柱かのいずれかが降伏するまでに柵端金具や端末支柱、金網が破損することはない。

20

トラブル事例 その1 落石が金網を突破



国道11号(1990年, 死者3名)



富士山5合目(2009年)

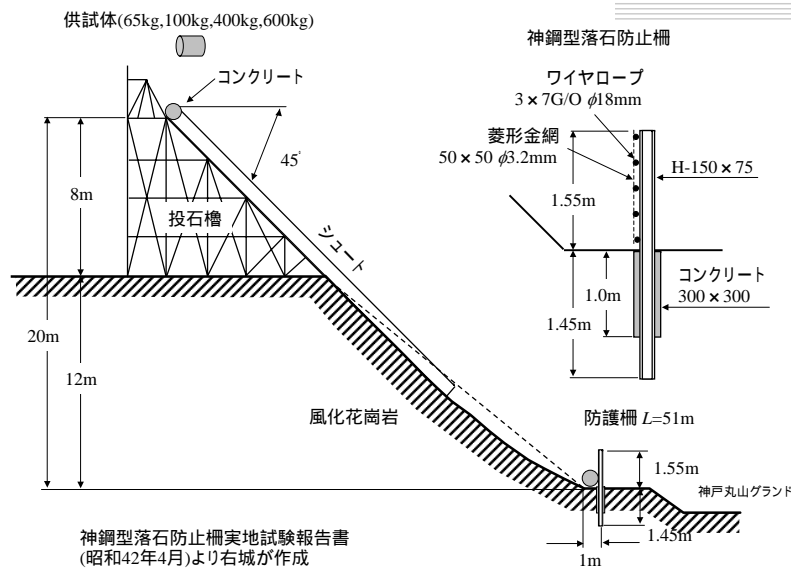


四国技術事務所の実験(2003年)

14kJで金網が破損し、23kJで突破

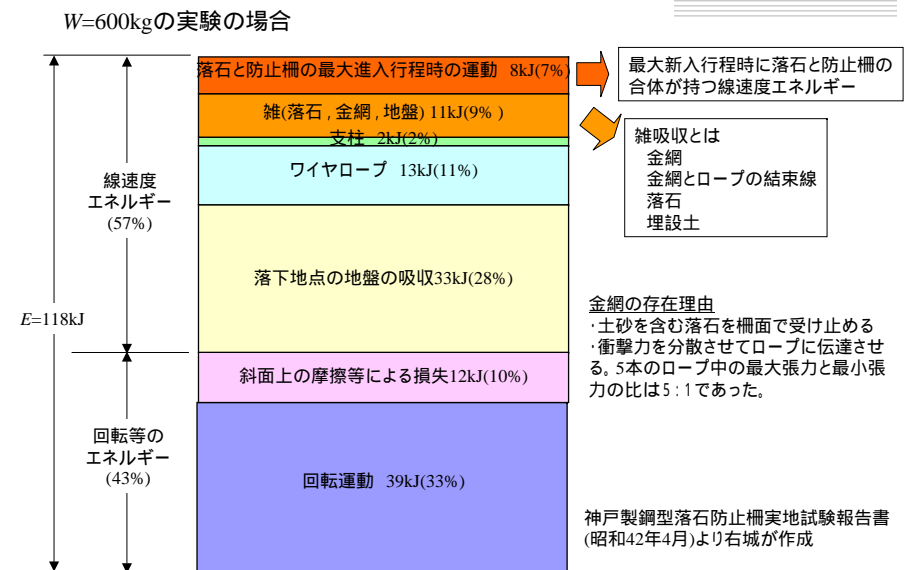
21

神戸大学と神戸製鋼所の実験 1966年(S41年)



22

現地実験による吸収エネルギーの内訳

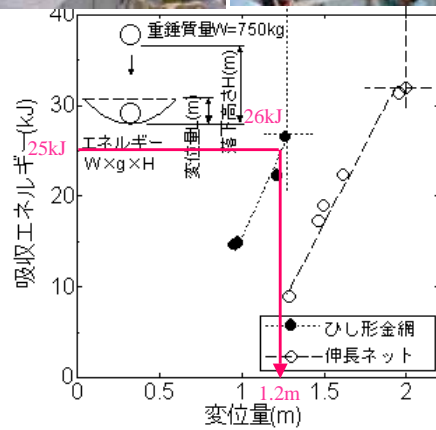


23

金網の吸収エネルギー



鉄道総研による実験

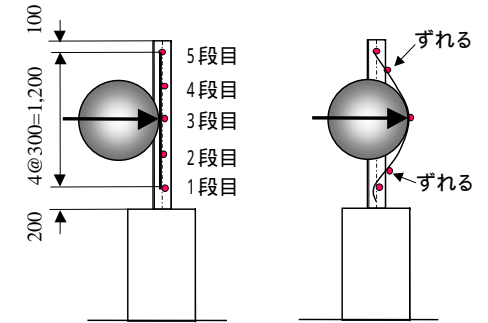
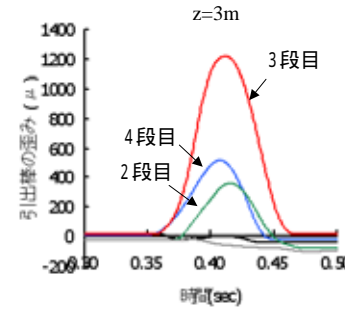


菱形金網(3.2×50mm)の最大吸収エネルギーは26kJ
 そのときの変位量は1.25m

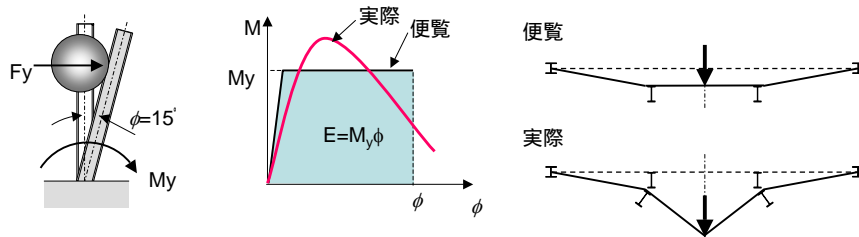
トラブル事例 その2 ワイヤロープが破断



2本のワイヤロープで落石を均等に支持する
 とはいえない。



トラブル事例 その3 中間支柱が座屈



トラブル事例 その4 柵端金具, 端末支柱が破損



端末支柱のウェブが局部破壊

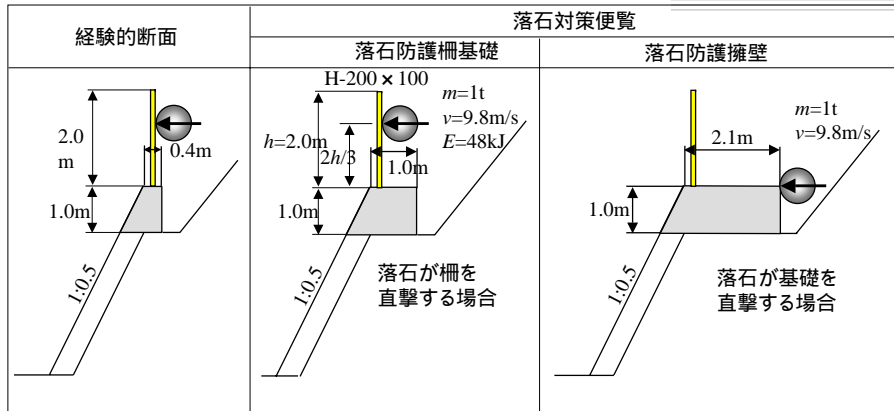
引付棒が破断

端末支柱と斜材の連結部の強度不足



ワイヤチャックは衝撃に弱い。楔が緩んでロープが引き抜ける
 性能が検証されないまま、価格を重視する傾向がある。

マニュアル重視のため基礎が過大設計

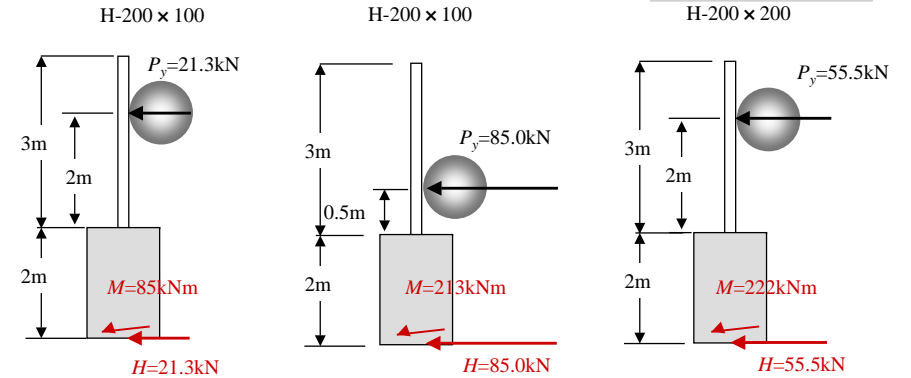


区別する必要はない。基礎は擁壁として設計すればよい

会計検査対策のマニュアル重視によって経験が否定され、過大設計になっている。

28

支柱を大きくしたら基礎が不安定になる



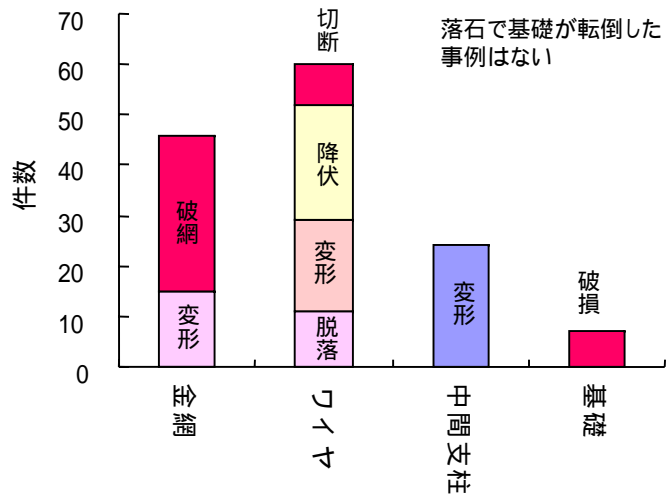
会計検査での指摘

落石の作用高を柵高の2/3としている根拠は？
柵の下方に作用した方が基礎に対しては危険なのでは？
支柱の断面を大きくしたため基礎の安全率が不足しているが良いのか？

29

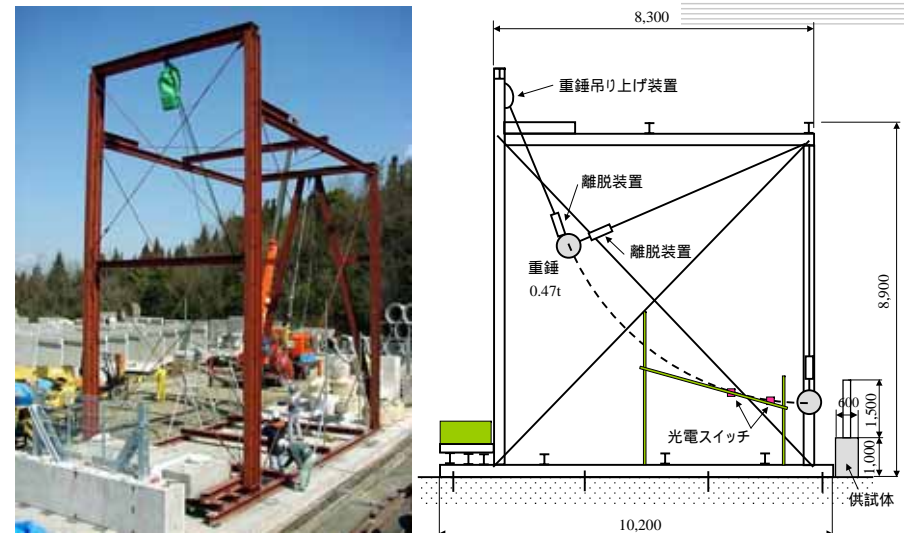
防護柵が破損しても基礎は転倒しない

平成9年度落石に関する実態調査報告書(土木研究所)



30

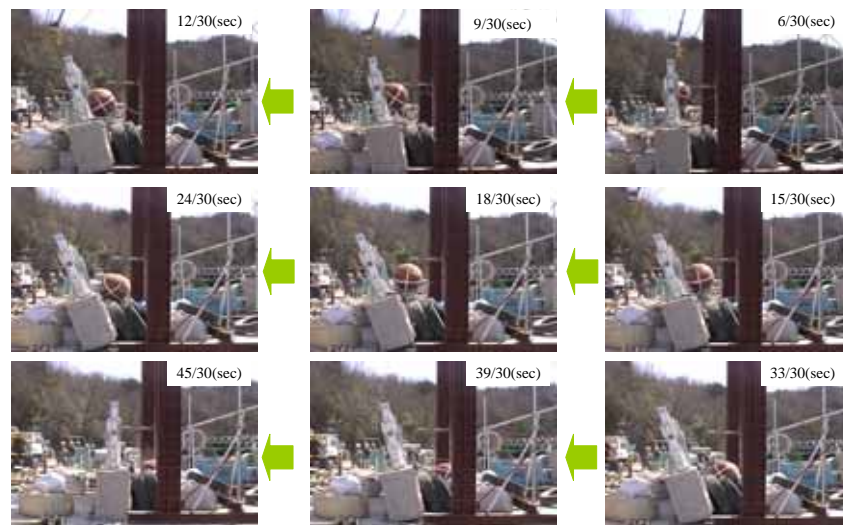
落石防護柵の重錘衝突実験(H15年)



四国地方整備局四国技術事務所

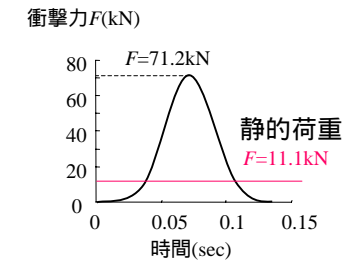
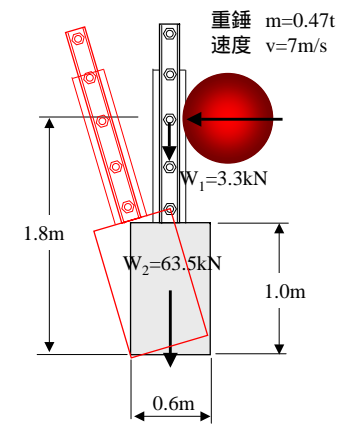
31

基礎の応答 (L=4.5m, 落下高2.5m)



32

安全率が0.16でも基礎は転倒しない



衝撃力による転倒の安全率

$$F_s = \frac{(3.3 + 63.5) \times 0.3}{71.2 \times 1.8} = 0.16$$

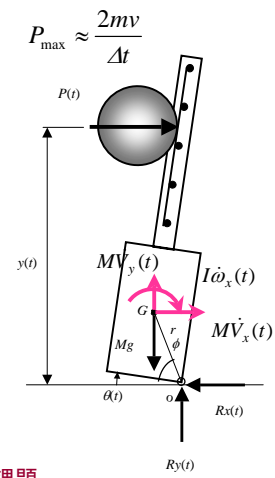
静的荷重が11.1kNなら転倒の安全率は1.0

$$F_s = \frac{(3.3 + 63.5) \times 0.3}{11.1 \times 1.8} = 1.0$$

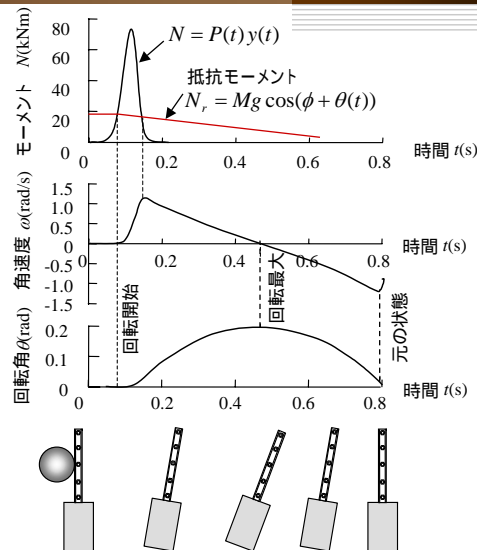
転倒の安全率が1以下になれば回転運動を開始

33

基礎の動的解析



課題
落石による衝撃力波形の決め方



34

現場のトラブルからの教訓

- 落石防護柵の設計上の前提は実際と異なる。
- 防護柵のエネルギー吸収性能を過大評価している。
- 基礎は転倒安全率が1未満になると回転運動を開始するが転倒するとは限らない。
- 落石荷重は衝撃力なので、基礎の設計は動的設計とするのが合理的。

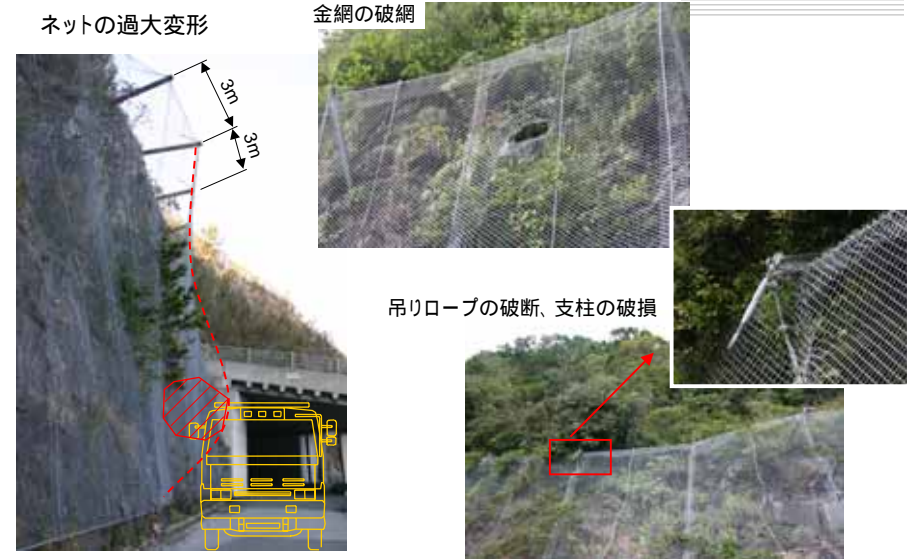
35

3. ポケット式落石防護ネット

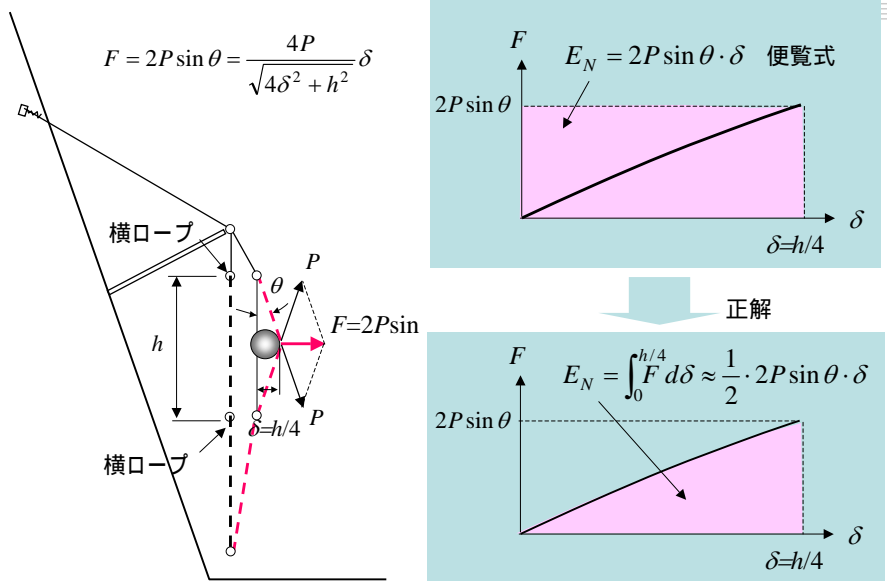
- トラブル事例
- 便覧式の問題点
- ロングスパンの現地公開実験



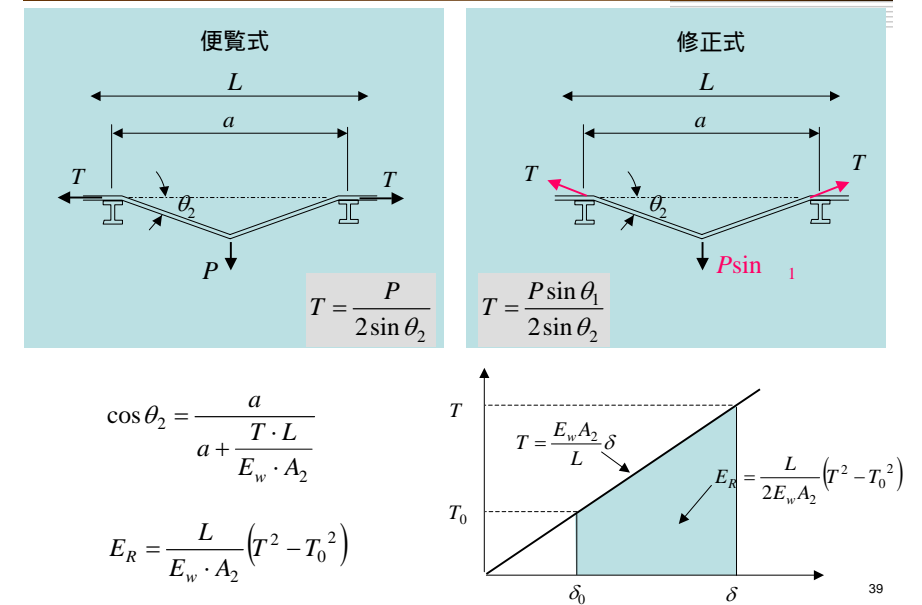
トラブル事例



便覧式の問題点1 金網の吸収エネルギー



便覧式の問題点2 横ロープの吸収エネルギー

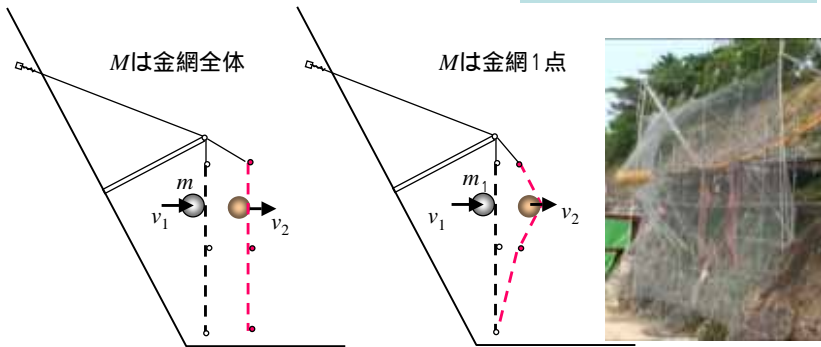
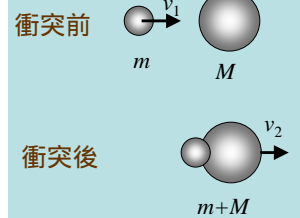


便覧式の問題点3 衝突時のエネルギーロス

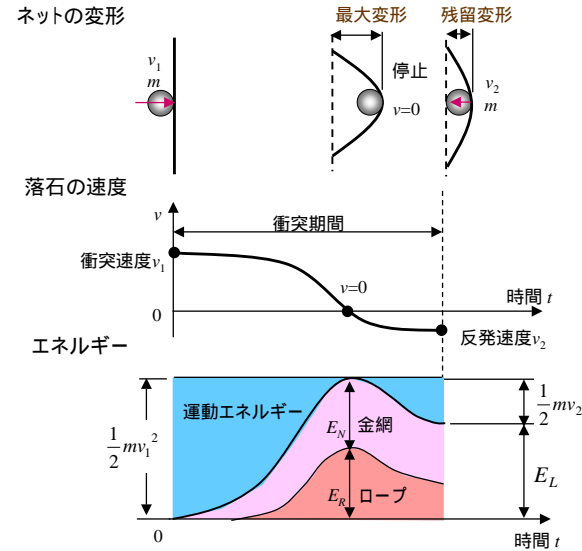
$$E_T = E_N + E_R + E_L$$

金網
ロブ
フ

$$E_L = \frac{1}{2}mv_1^2 \frac{M}{m+M}$$



便覧式の問題点4 衝突時の吸収エネルギー



便覧式

$$E_T = E_N + E_R + E_L$$

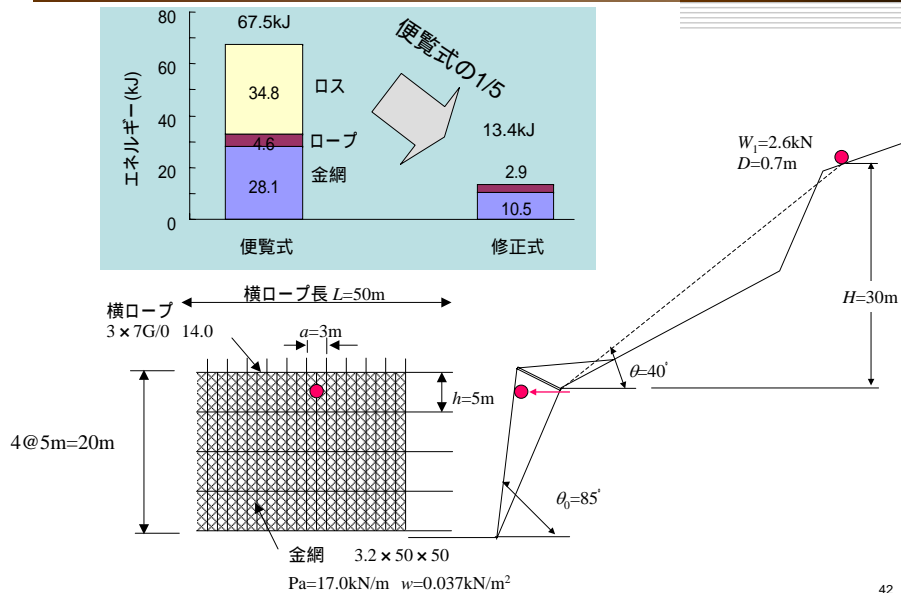
$$E_L = \frac{1}{2}mv_1^2 \frac{M}{m+M}$$

質点系の非弾性衝突

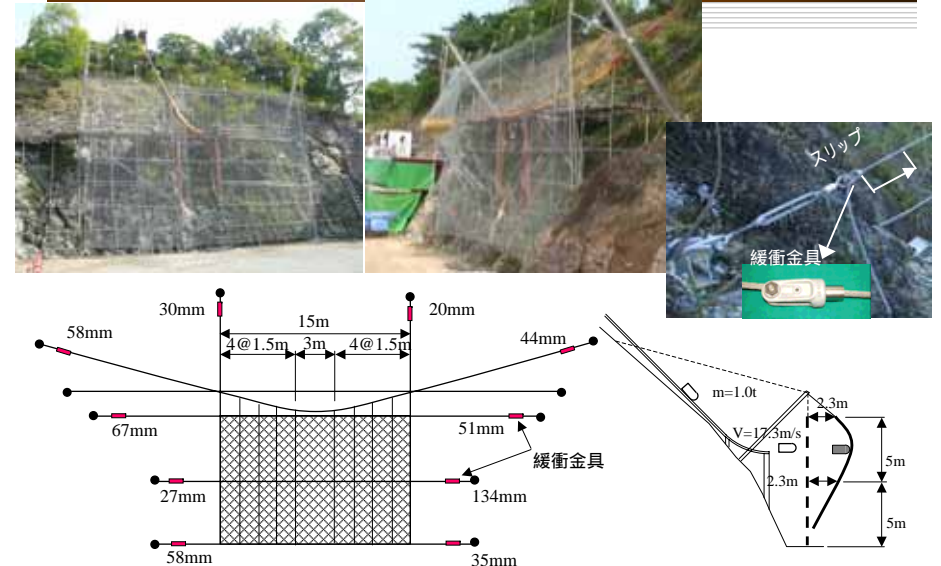
修正式

$$E_T = E_N + E_R$$

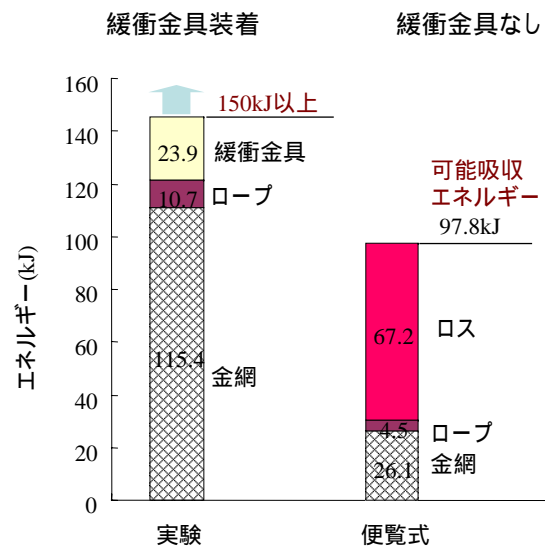
ポケット式落石防護ネットの吸収エネルギーの計算例



第1回目の現地公開実験 2008年5月27日



ポケット式落石防護ネットのエネルギー吸収性能



44

大失敗の第2回目公開実験 2008年10月10日

V=19.5m/s, 380kJで実験



2tのコンクリート塊

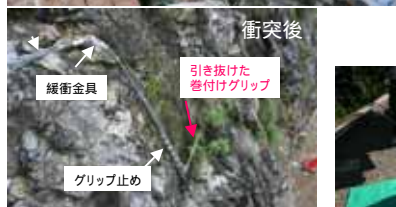


45

失敗の原因

巻き付けグリップの引き抜け

支柱基礎地盤の破壊



メーカーのカタログには、「ワイヤーロープの破断荷重と同等の保持力があり、グリップの取付けが簡単で、作業条件による影響が少ないため安定した強度が得られる」と書かれているが、ワイヤーロープの破断荷重157kNの約1/2の83kNで引き抜けた。

46

現場のトラブルからの教訓

- 落石の直撃を受けて吊りロープや支柱が破損
- 金網の破網, 過大変形で建築限界を侵す
- 便覧式は理論的に問題。修正式で計算すると吸収エネルギーは便覧式の1/5。
- ロングスパンに便覧式を適用すると安全側。
- 巻き付けグリップは衝撃力に弱い。
- 支柱基礎は岩盤でも風化していると破壊する。

47