

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. ポケット式落石防護ネット
4. 落石防護柵
5. 落石防護柵基礎と防護擁壁

(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) 古賀泰之(建設省土木研究所動土質研究所)



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) 松尾修(建設省土木研究所動土質研究所)

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 -

落石防護柵の重錘衝突実験(2002年)

四国技術事務所

愛媛で現場落石実験(2003年)

四国技術事務所

落石防護ネットの重錘衝突実験(2008年)
地盤工学会

落石対策便覧2回目改訂版(?)



2. 落石の運動

- 落石の発生形態
- 落石の運動形態
- 落石対策便覧の予測法
- そりモデル
- トラブル事例
- 等価摩擦係数
- 跳躍量
- 落下経路



1979年7月 一般国道33号 愛媛県上浮穴郡柳谷村

岩盤が割れて国道33号に落下 2010年8月16日



3.7 × 7 × 3m(推定150t)

落石発生形態の多くは崖部の崩落

安定性の判定が非常に難しい

崖から転がり落ちて停止不安定そうに見えるが意外と安定

植林があると崖の存在が分からない

崖部の崩落跡

崖錐性堆積物

抜け落ち

移動

切土法面

剥離

落石防護柵

道路

芸予地震(2001年)

4

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)

落石対策便覧による予測法

落石の速度

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

$$H \leq 40m$$

(40mで終端速度になる)

落石エネルギー

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

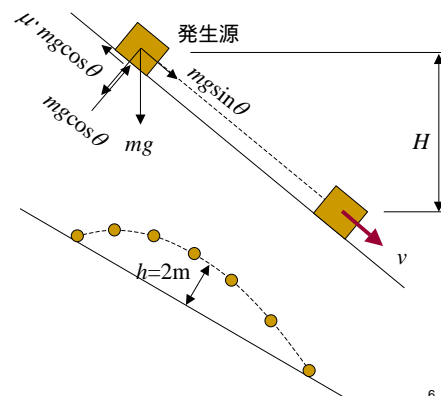
$$\beta = \frac{E_R}{E_V} \approx 0.1$$

回転エネルギー係数

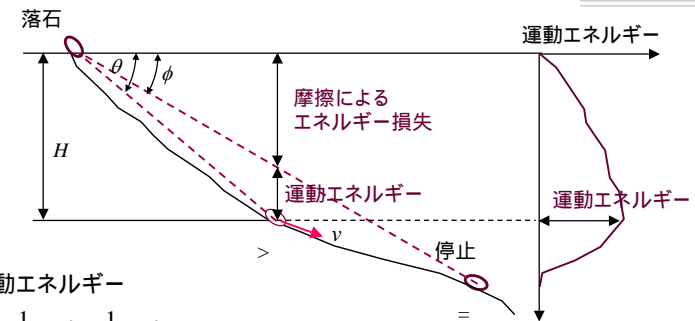
跳躍量 $h=2m$

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



そりモデル (ハイム、1932年)



運動エネルギー

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

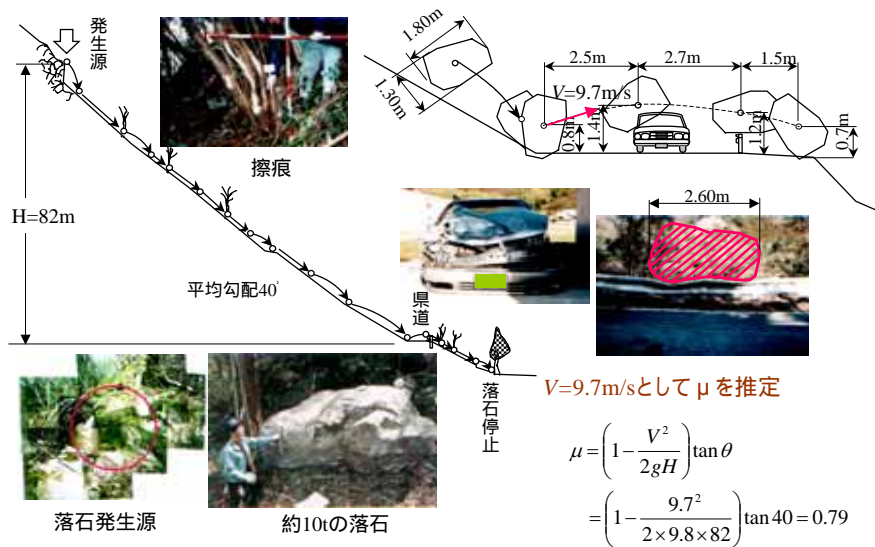
そりモデル

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

回転エネルギー

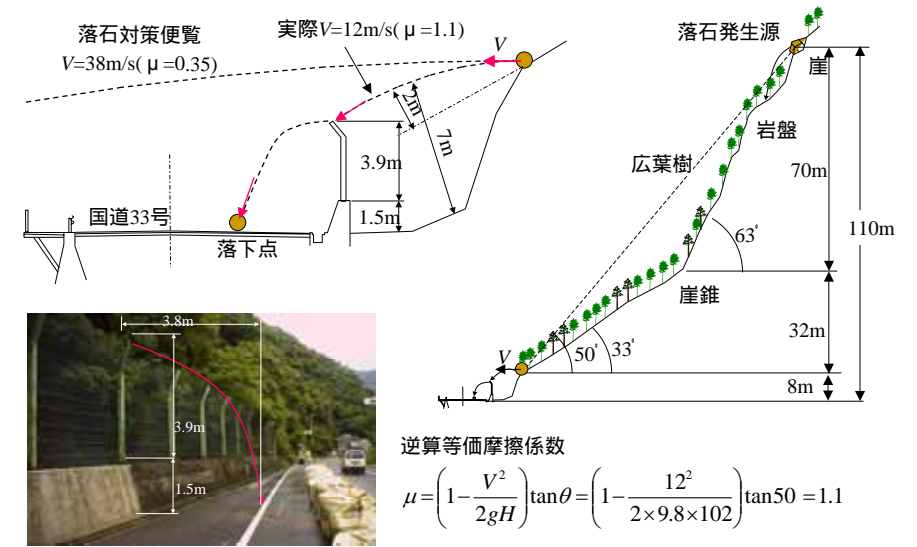
$$v = \sqrt{2gH \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right)}$$

高知県道東洋安田線・北川村島1996年



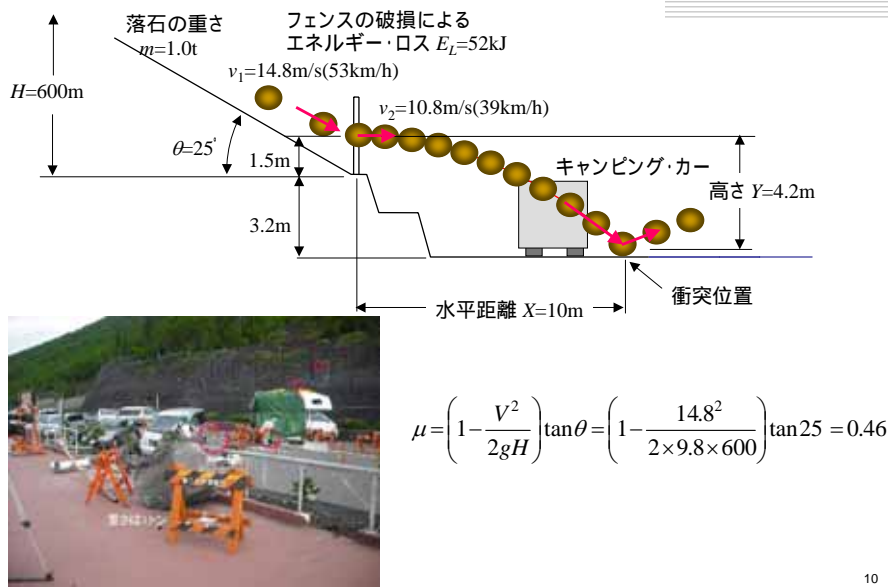
8

国道33号吾北村大渡 2003年5月



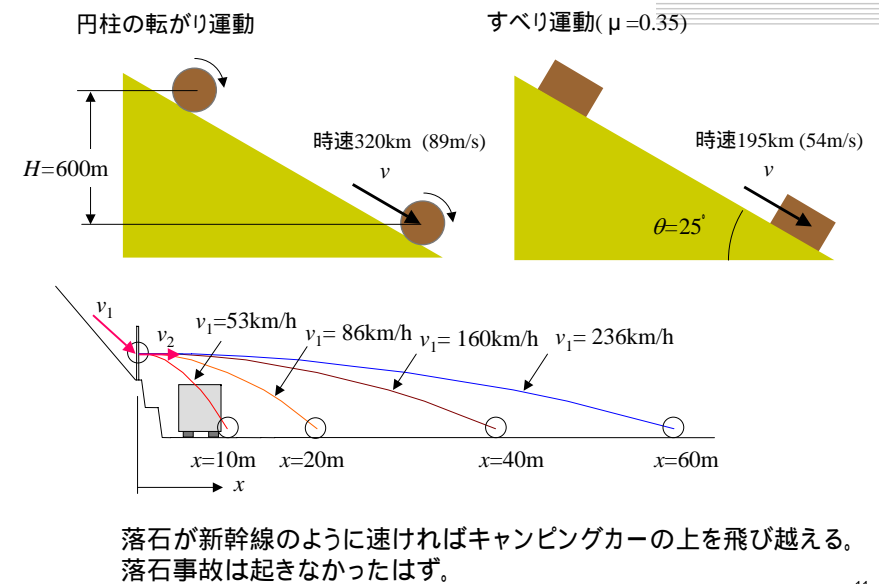
9

富士山五合目駐車場落石事故 2009年7月



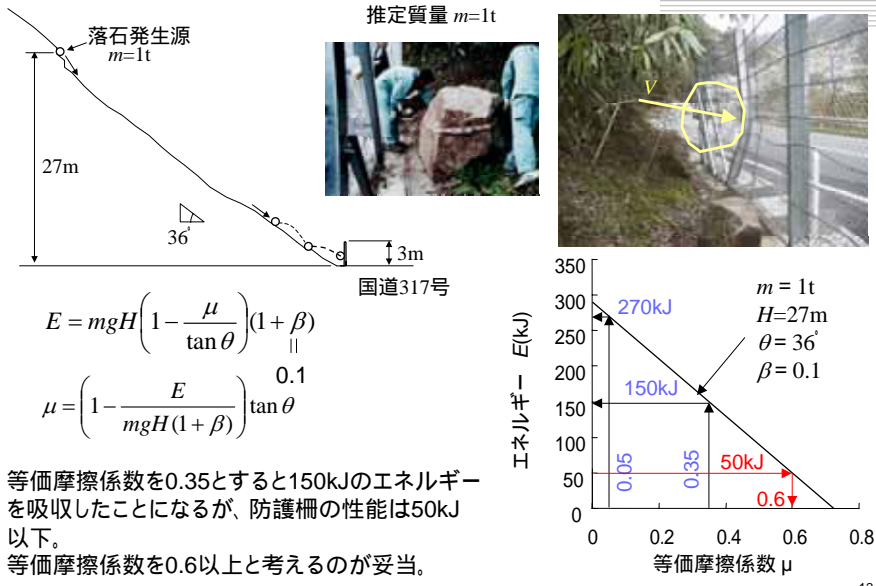
10

運動力学から導かれた落石の速度とエネルギー

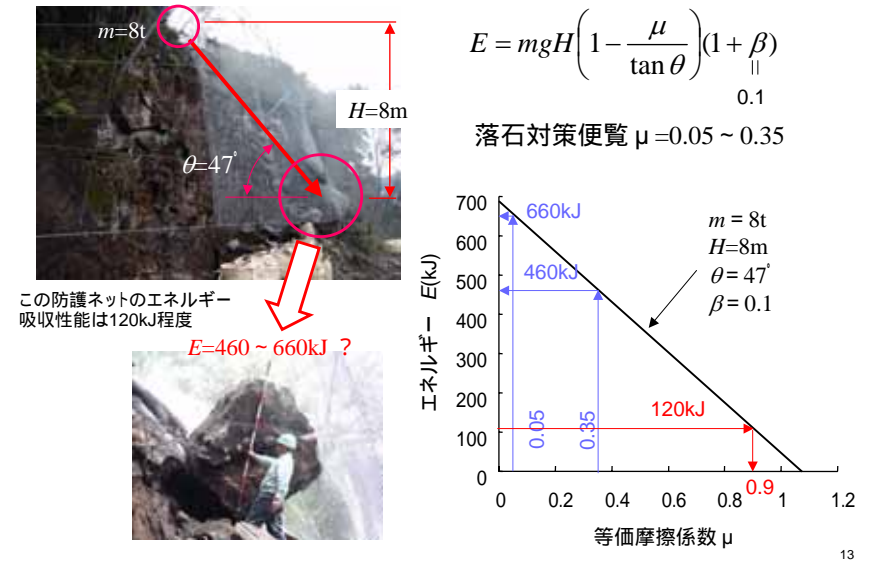


11

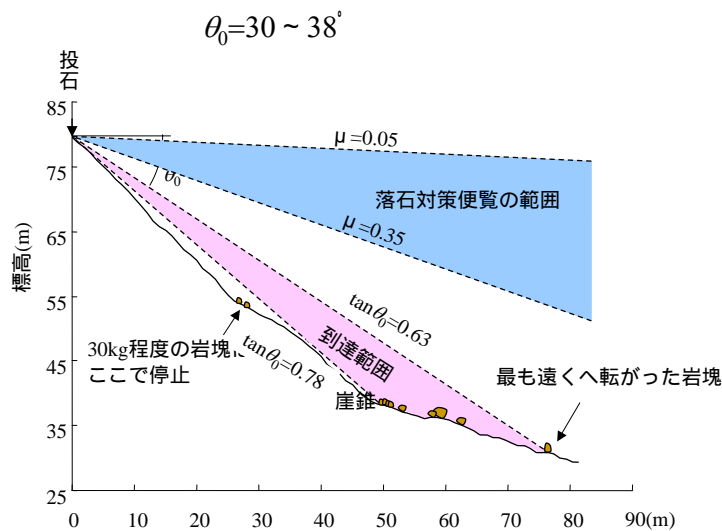
芸予地震による国道317号の落石 2001年



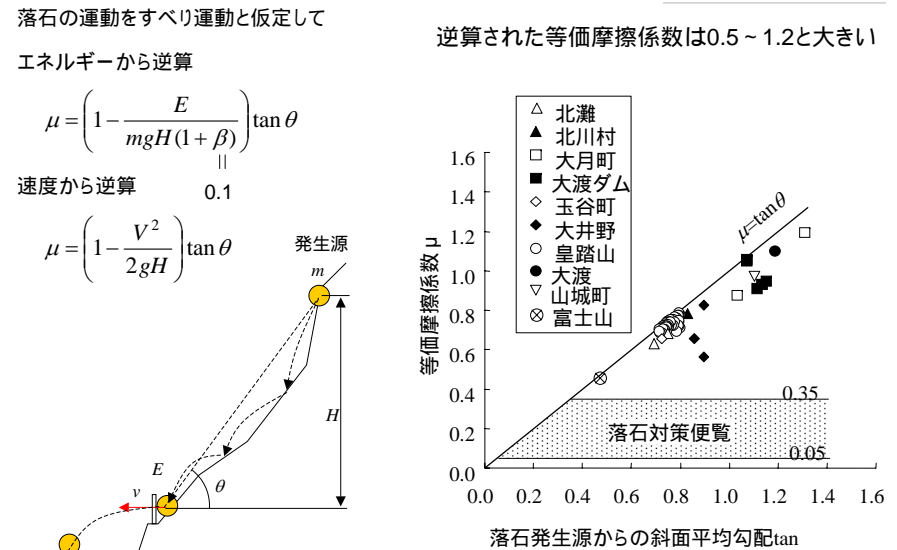
落石の運動エネルギーは意外と小さい



落石の停止位置

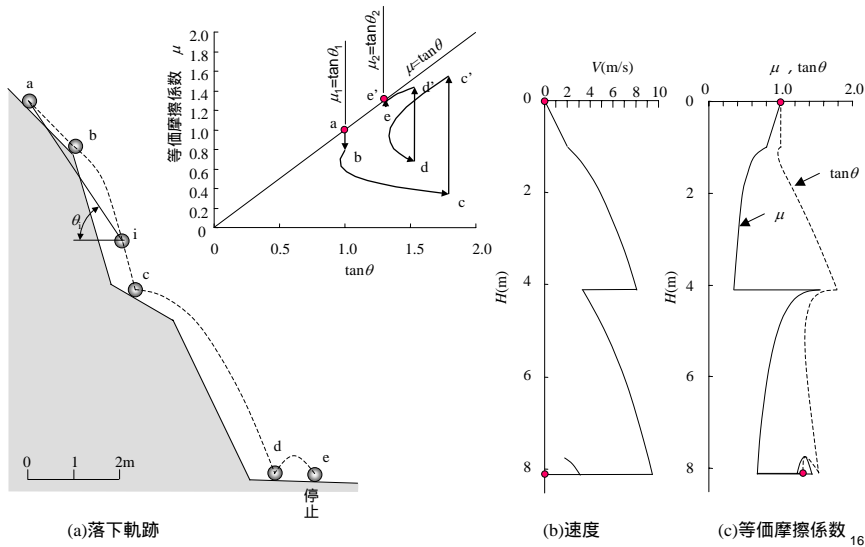


道路際に逆算した等価摩擦係数

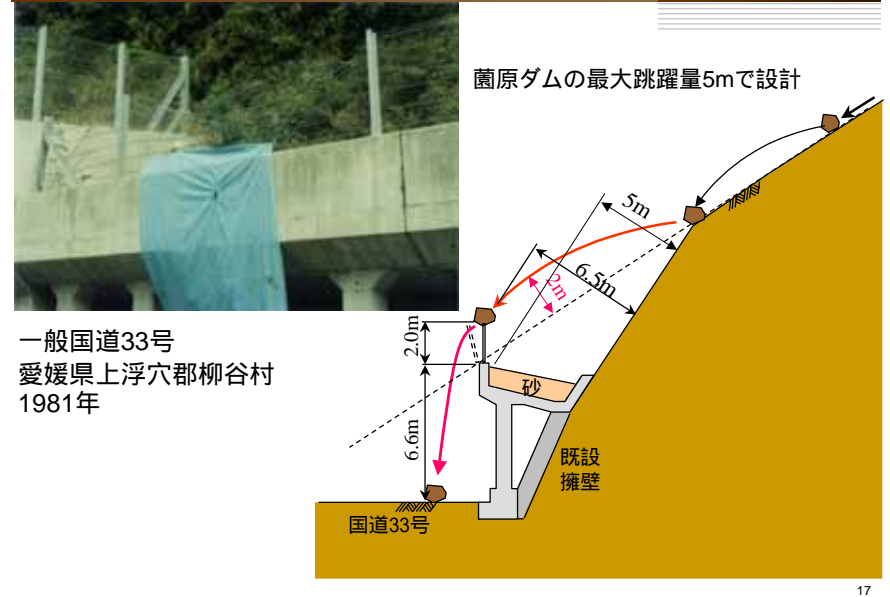


等価摩擦係数は落下に伴って変化する

等価摩擦係数は、 $\mu_1 = \tan \theta_1$ (落下前) から $\mu_2 = \tan \theta_2$ (落下後に停止) へ変化



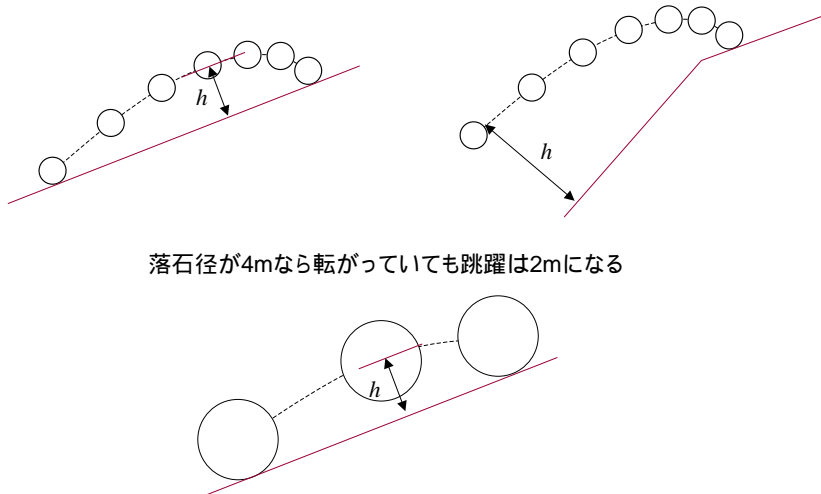
落石の最大跳躍量を2mと見なせるか？



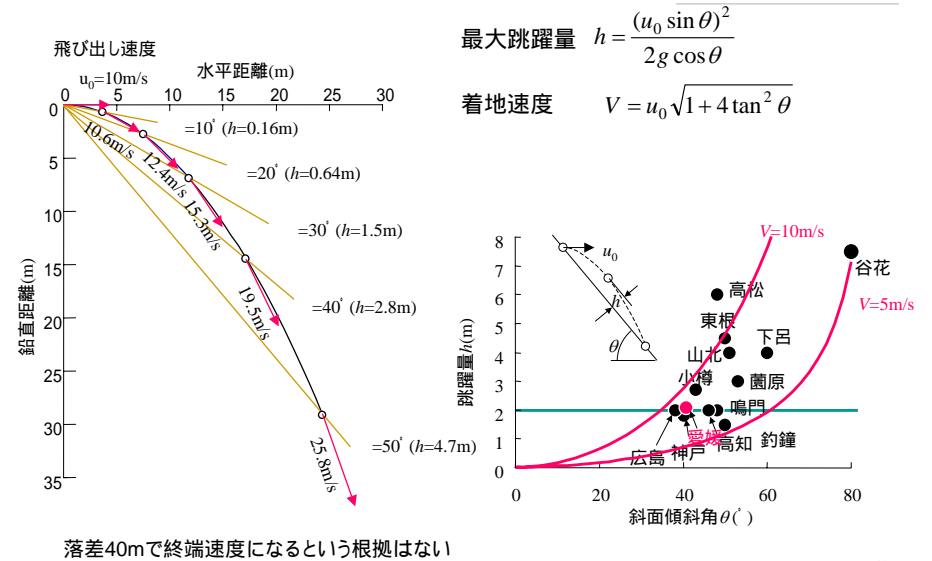
落石跳躍量の定義は？

斜面の表面から落石の中心まで？

斜面の勾配が変化している場合は？

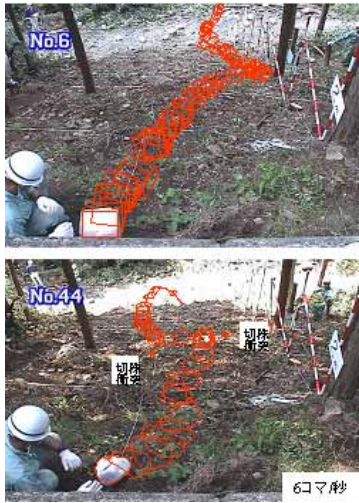


跳躍量と速度は斜面傾斜角に依存する

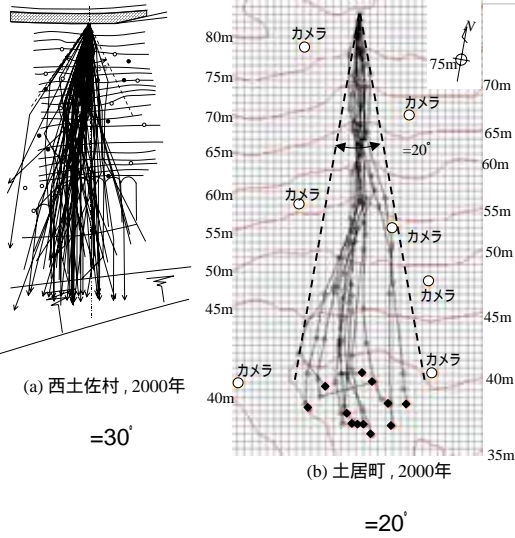


落差40mで終端速度になるという根拠はない

落石の落下経路



(高知県西土佐村2000年)



20

現場のトラブルからの教訓

1. 落石の発生源は斜面上方の崖部である。
2. 落石の運動はバウンドが主体。
3. 落石の速度は自動車なみ。
4. 落石現場の道路脇で逆算された等価摩擦係数は0.6~1.2。
5. 等価摩擦係数 μ は $\tan \theta_1$ から $\tan \theta_2$ へ変化する。
6. 跳躍量の定義は明確でない。
7. 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。
8. 落石の拡がり角は20~30度

21

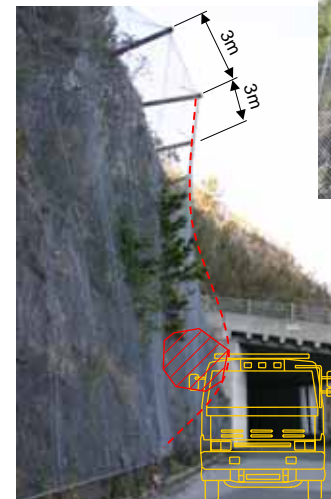
3. ポケット式落石防護ネット

- 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

ネットの過大変形



金網の破網

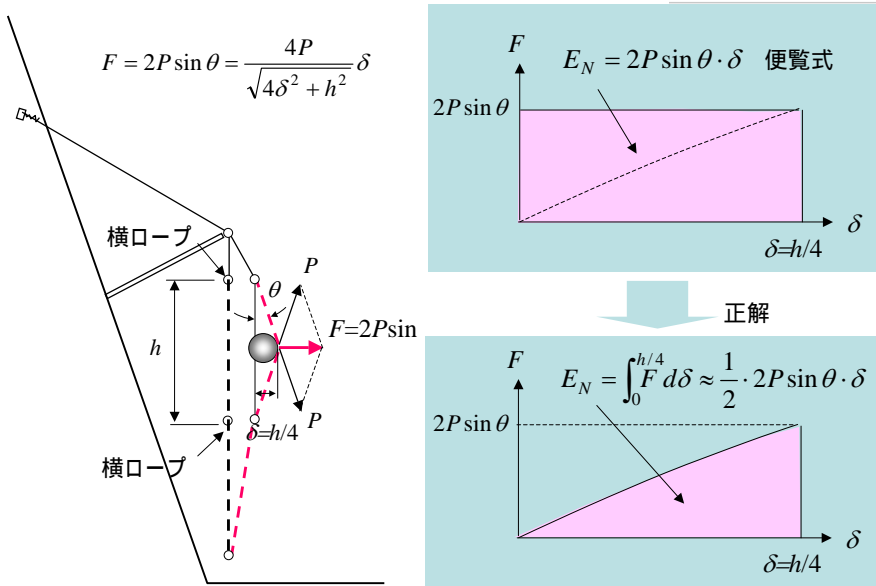


吊りロープの破断、支柱の破損

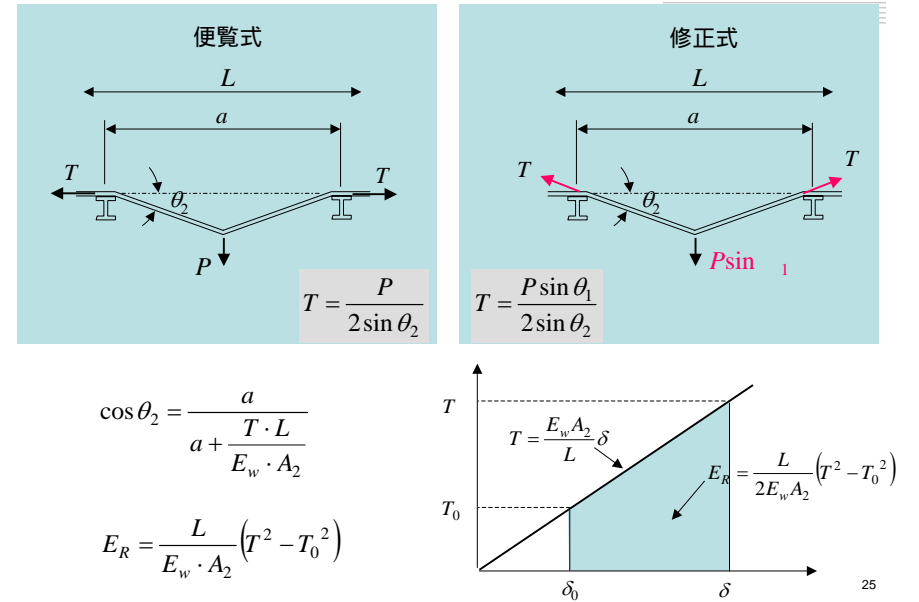


23

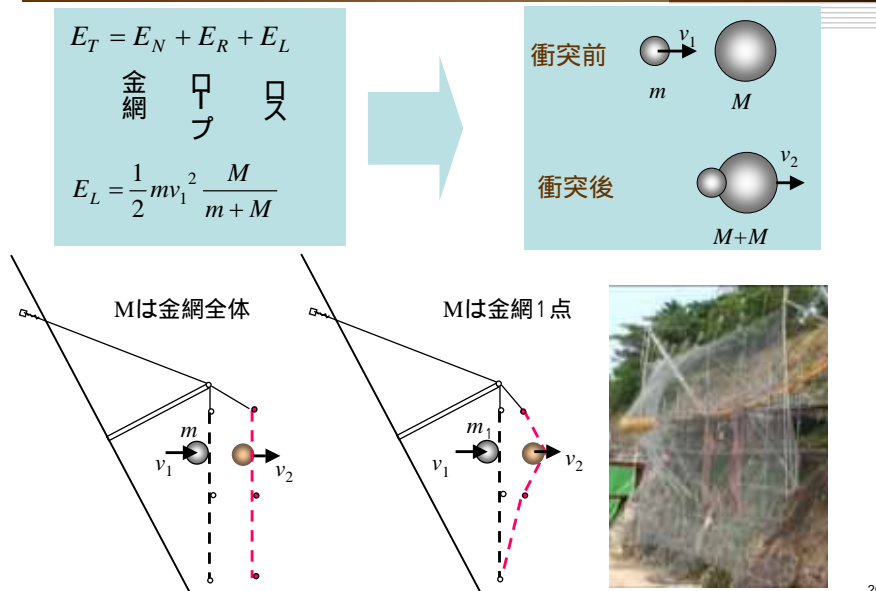
便覧式の問題点1 金網の吸収エネルギー



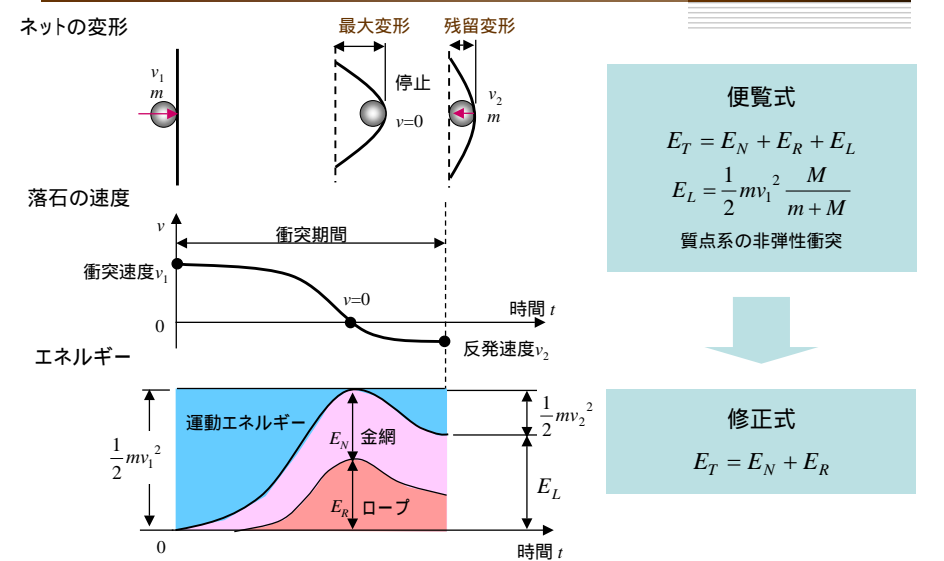
便覧式の問題点2 横ロープの吸収エネルギー



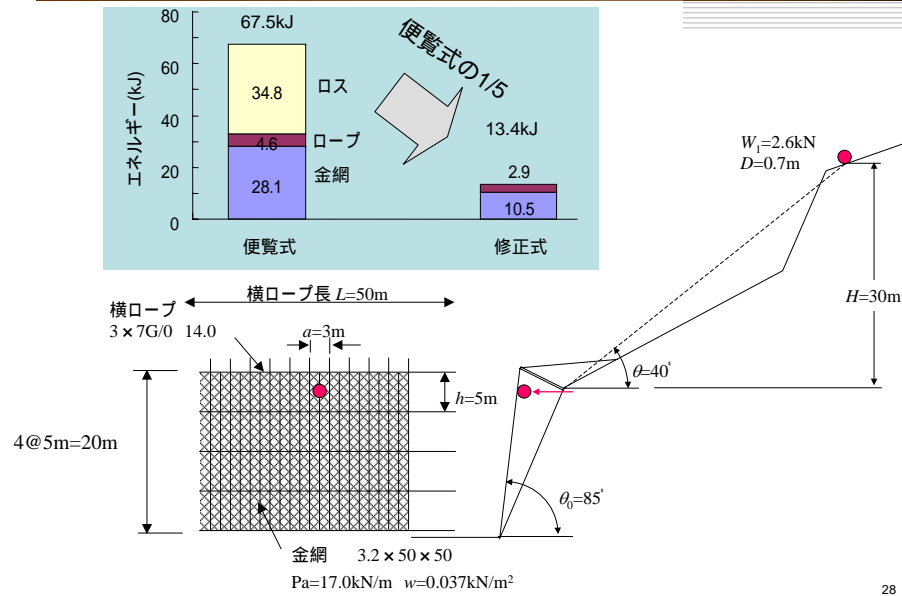
便覧式の問題点3 衝突時のエネルギーロス



便覧式の問題点4 衝突時の吸収エネルギー

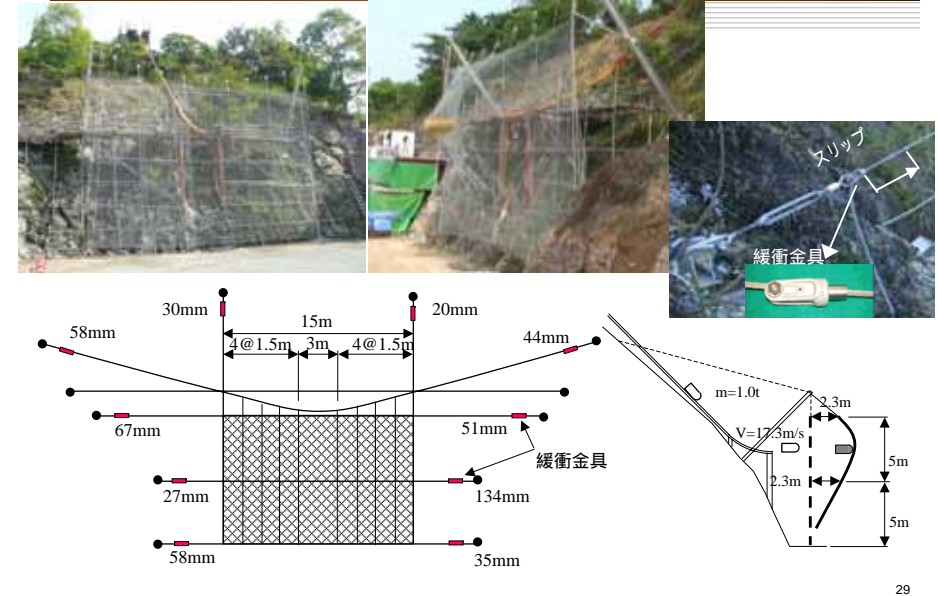


ポケット式落石防護ネットの吸収エネルギーの計算例



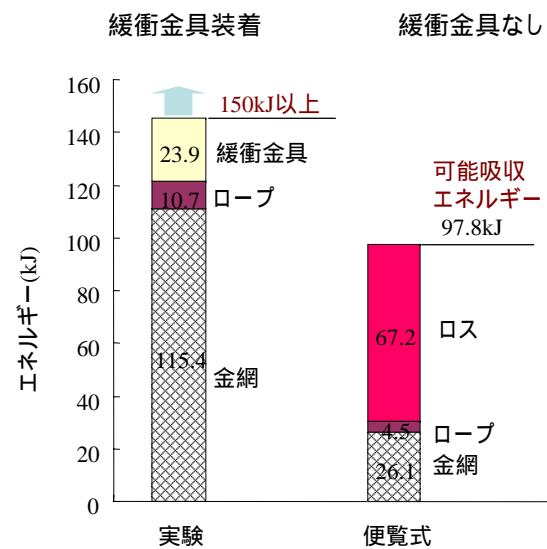
28

第1回目の現地公開実験 2008年5月27日



29

ポケット式落石防護ネットのエネルギー吸収性能



30

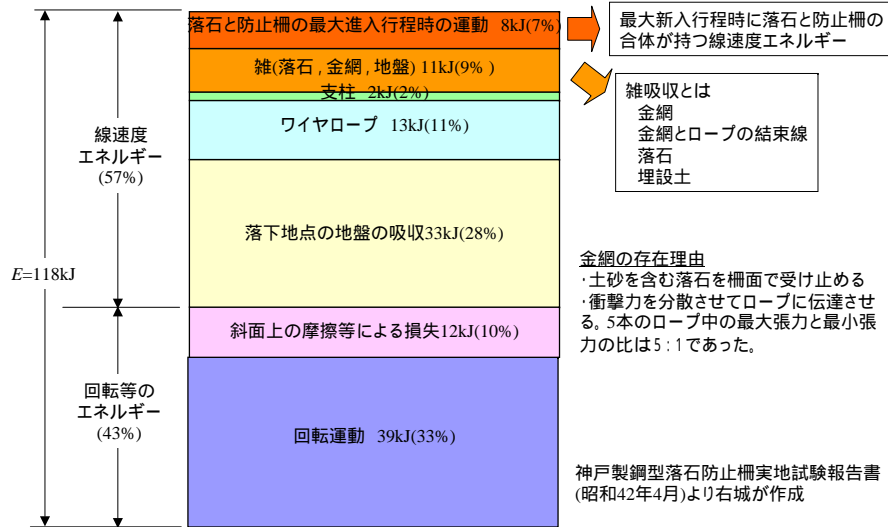
現場のトラブルからの教訓

- 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。

31

現地実験による吸収エネルギーの内訳

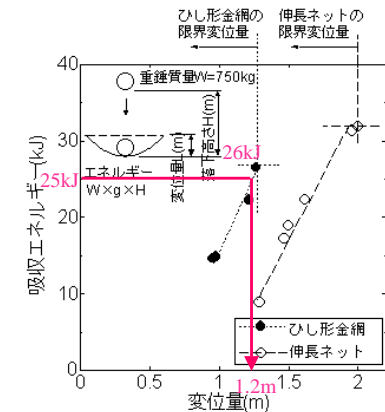
W=600kgの実験の場合



金網の吸収エネルギー



鉄道総研による実験

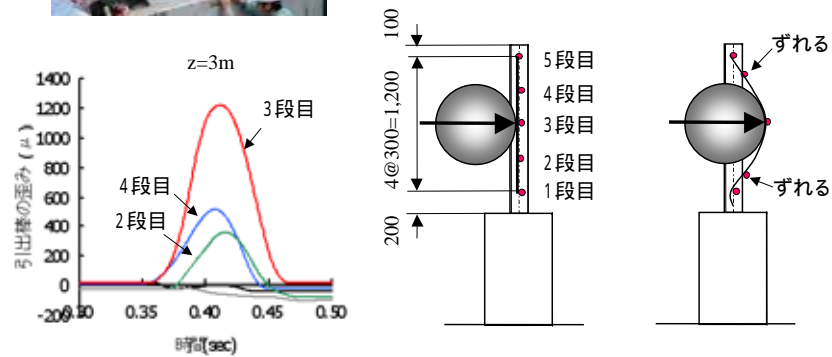


菱形金網(3.2 × 50mm)の最大吸収エネルギーは26kJ
そのときの変位量は1.25m

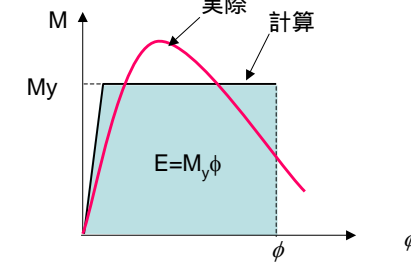
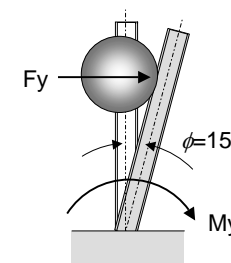
トラブル事例 その2 ワイヤロープが破断



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

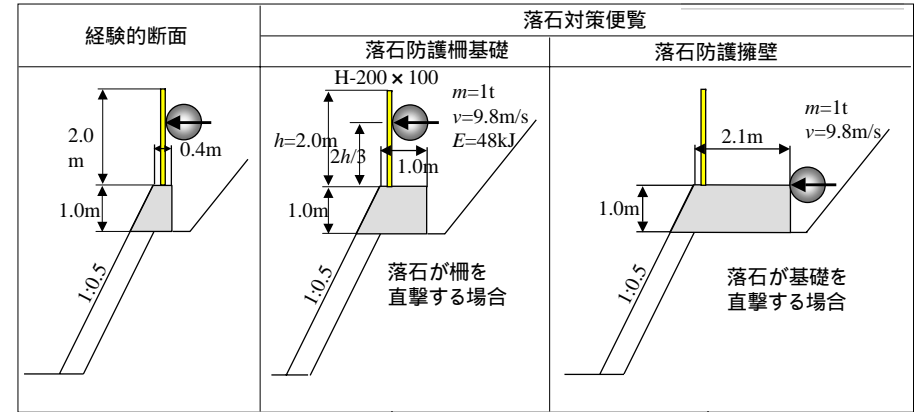


端末支柱のウェブが局部破壊 引付棒が破断 端末支柱と斜材の連結部の強度不足



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。

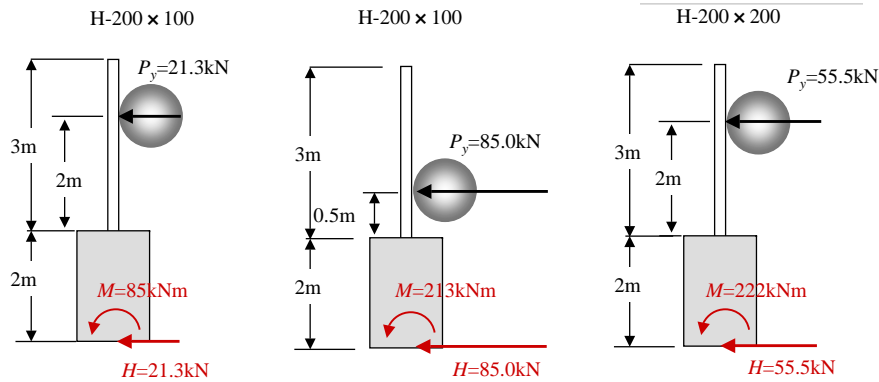
落石防護柵基礎はマニュアル重視の結果過大設計に



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。

支柱を大きくしたら基礎が不安定になる

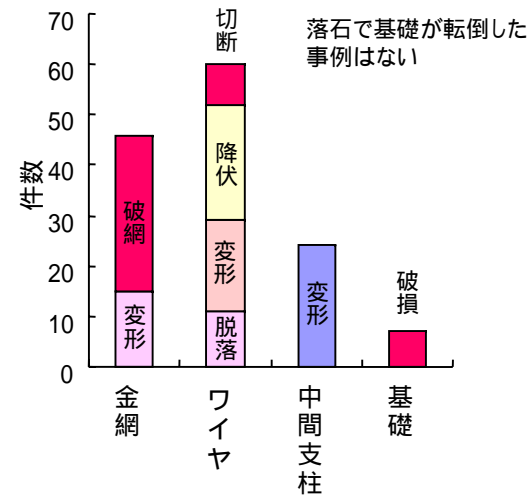


会計検査での指摘

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？

防護柵が損傷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)



落石で基礎が転倒した事例はない



2001年芸予地震

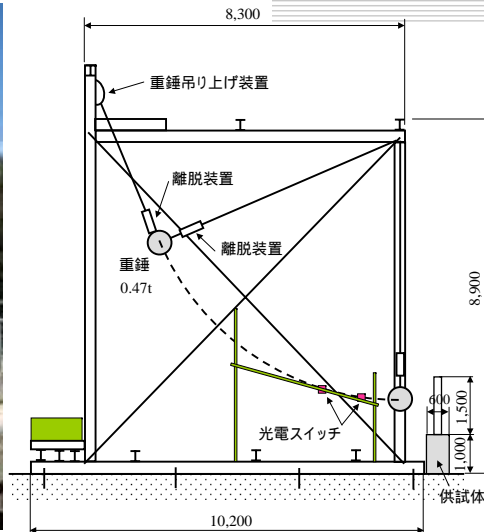


1997年鹿児島県北西部地震

落石防護柵の重錘衝突実験(H15年)

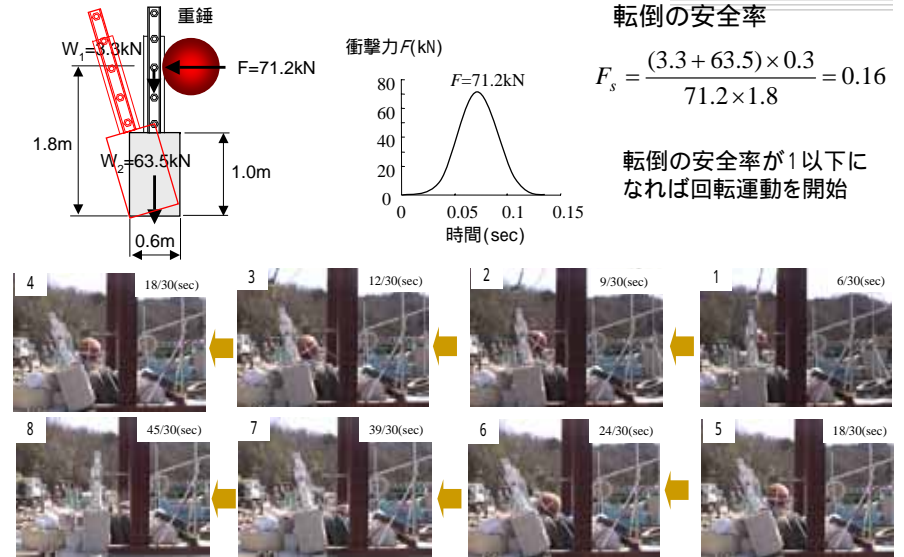


四国地方整備局四国技術事務所



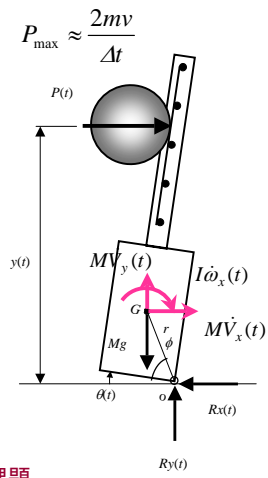
44

安全率が0.16でも基礎は転倒しない

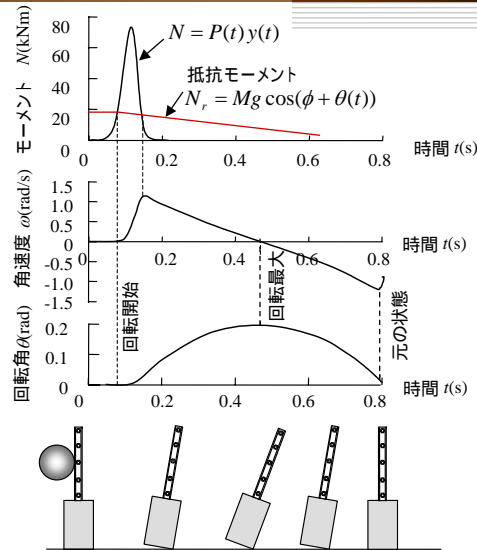


45

剛体的安定解析法A



課題
落石による衝撃力波形の決め方



46

現場のトラブルからの教訓

- 落石防護柵の設計上の前提条件は実態と異なる。
- 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かけるが転倒するとは限らない。
- 落石荷重は衝撃力なので、基礎は動的解析するのが合理的。
- 便覧式で落石防護擁壁を設計する際には、反発係数、有効抵抗長、許容回転角に留意。

47