

平成22年度 設計技術研修会

道路土工 - 切土工・斜面安定工指針

落石・岩盤崩壊対策

主催 (社)高知県測量設計業協会

(株)第一コンサルタンツ

右城 猛

指針の構成

のり面工・斜面安定工指針

- 1.5.2 落石の発生形態
- 2.3.6 落石の調査
- 3.7 落石対策
 - 3.7.1 落石対策の基本的な考え方
 - 3.7.2 落石対策工の選定
 - 3.7.3 落石予防工
 - 3.7.4 落石防護工

切土工・斜面安定工指針

- 第10章 落石・岩盤崩壊対策
 - 10.1 落石・岩盤崩壊対策の基本的な考え方
 - 10.2 落石・岩盤崩壊の調査
 - 10.3 落石の規模等の推定
 - 10.4 落石対策工の種類と選定
 - 10.5 落石対策工の設計・施工
 - 10.6 落石対策工の維持管理
 - 10.7 岩盤崩壊対策

落石対策便覧(平成12年)

一部格上げ

平成27年度に改訂

落石対策便覧に関する参考資料(平成14年)

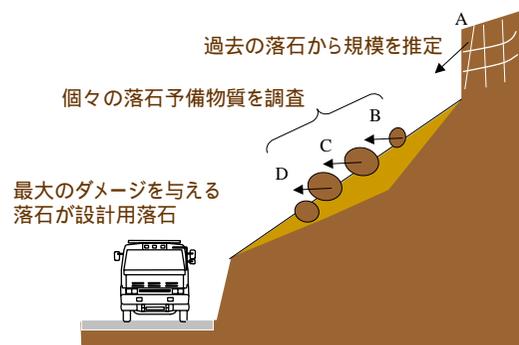
- 落石シミュレーション手法の調査研究資料 -



1

落石規模の推定

1. 斜面上の個々の落石予備物質に対する調査から、道路に及ぼす影響が大きいと考えられるものを設計用落石とする。
2. 斜面下方の谷川等に存在している過去の落石と思われる岩塊、近傍の斜面における過去の発生履歴等を判断材料の一つとしても良い。



2

落下経路・落下速度

1. 落下経路は斜面の地形及び転石の分布状況等から推定する。 **地形のコンターラインに直角に落下**
2. 落石の速度は既往の落石実験等の実績に基づいた経験則により求めることが可能。
3. 落下軌跡及び速度を定量的・合理的に予測する手法として、質点系落石シミュレーションや非質点系落石シミュレーション等の手法が開発・提案。
4. 経験則及び落石シミュレーションともにそれぞれ適用限界があるので、適用に当たっては総合的判断が必要。

経験則による方法	質点系シミュレーション	非質点系シミュレーション
等価摩擦係数法 (すべり運動と仮定) ↓ 指針からは削除	吉田らの手法 古賀らの手法 右城らの手法 榎谷・小林らの手法 コロラド州の手法(CRSP) トロント大学の手法(RocFall)	個別要素法(DEM) 不連続変形法(DDA)

3

落石対策便覧による速度と運動エネルギーの算定

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

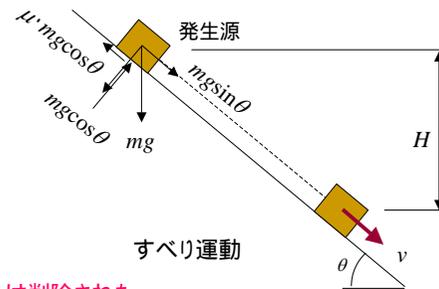
$$E = mgH \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right) (1 + \beta) \leq mgH$$

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

等価摩擦係数を用いた方法は、指針からは削除された

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

発生源
擦痕
平均勾配40
県道
落石停止
約10tの落石

$V=9.7m/s$ として μ を推定

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

$$= \left(1 - \frac{9.7^2}{2 \times 9.8 \times 82}\right) \tan 40 = 0.79 > 0.35$$

等価摩擦係数は0.35よりも大きい

国道11号鳴門市北灘 1990年10月

発生源
5m
観光バス乗客乗員49名, 3名死亡, 14名負傷
土砂
斜面勾配 36' ~ 40'
ロープ留め金具破断
金網破断
索端金具破断
3.00
1.60
国道11号

$$E = mgH \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right) (1 + \beta) = 1.4 \times 9.8 \times 63 \times \left(1 - \frac{0.35}{\tan 36}\right) \times 1.1 = 493kJ$$

$\mu=0.35$ とすると運動エネルギーを過大に評価しすぎる

柵のエネルギー吸収を50kJと仮定
 $E=97kJ$
 $v_0=8.2m/s$
落石 $m=1.4t$
7.7m
3.0
2.1

この事故から間隔保持材が使用された。

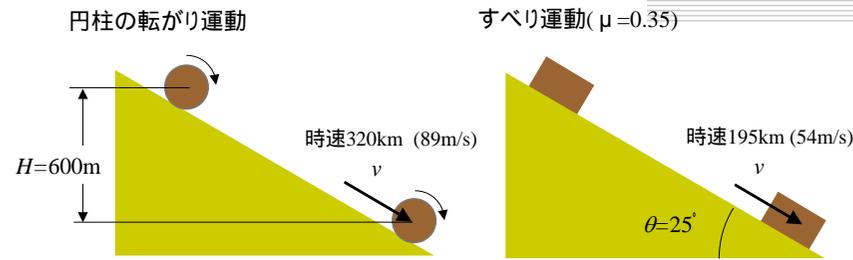
富士山五合目駐車場落石事故 2009年7月

落石の重さ $m=1.0t$
フェンスの破損によるエネルギー・ロス $E_L=52kJ$
 $v_1=14.8m/s(53km/h)$
 $v_2=10.8m/s(39km/h)$
 $\theta=25'$
高さ $Y=4.2m$
水平距離 $X=10m$
衝突位置

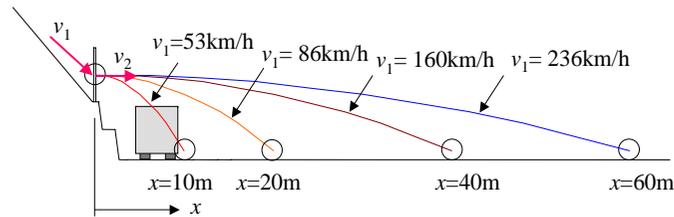
$$\mu = \left(1 - \frac{V^2}{2gH}\right) \tan \theta = \left(1 - \frac{14.8^2}{2 \times 9.8 \times 600}\right) \tan 25 = 0.46$$

等価摩擦係数は0.35よりも大きい

運動力学から導かれた落石の速度とエネルギー



転がりやすべり運動と仮定すると速度を過大に評価しすぎる。



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たはず。

8

落石の運動はバウンド



西土佐村落石実験(高知県、2000年)

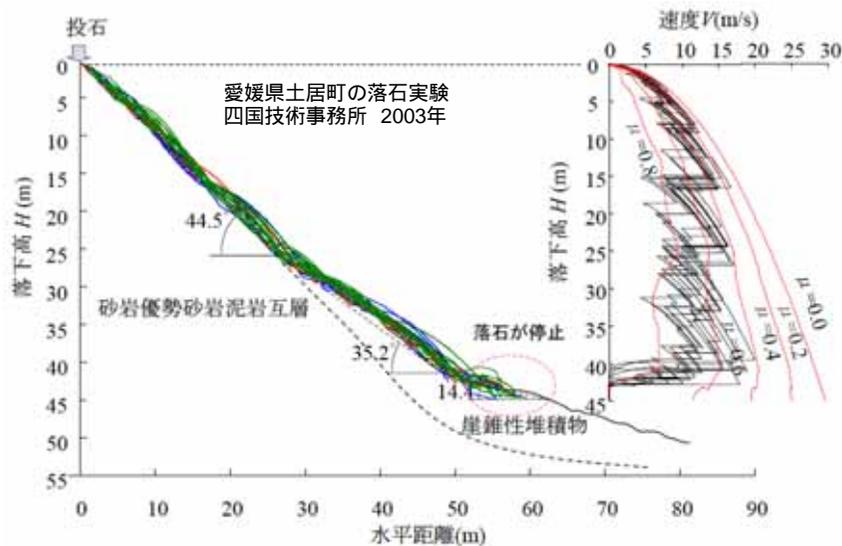


土居町落石実験(四国技術事務所、2003年)

土居町落石実験(四国技術事務所、2003年)

9

愛媛県土居町の落石実験 2003年

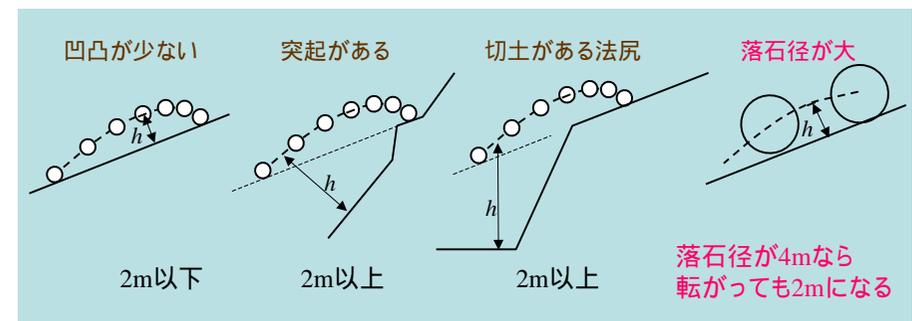


等価摩擦係数は一定ではなく、落下に伴って変化する(この例では0~0.8の間で変化)

10

落石の跳躍量

1. 凹凸の比較的小さい斜面での最大跳躍量は2m以下
2. 斜面上に局部的な突起や凹凸の多い斜面では、跳躍量が2m以上になることがある。
3. 自然斜面下に切土がある場合の法尻での跳躍量は2m以上になることがある。



跳躍量は定義されていない

11

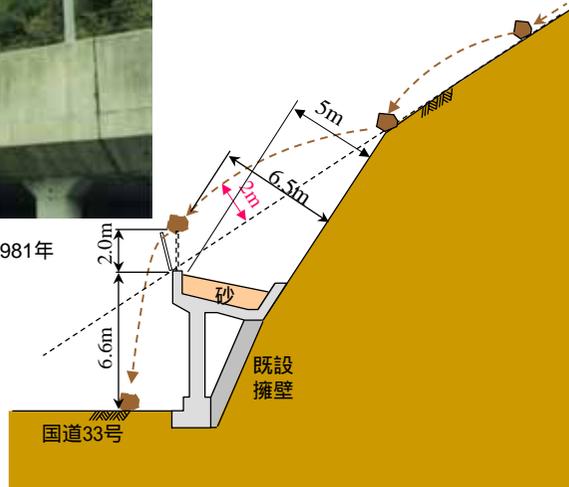
施工直後に落石が防護柵の頂部を直撃



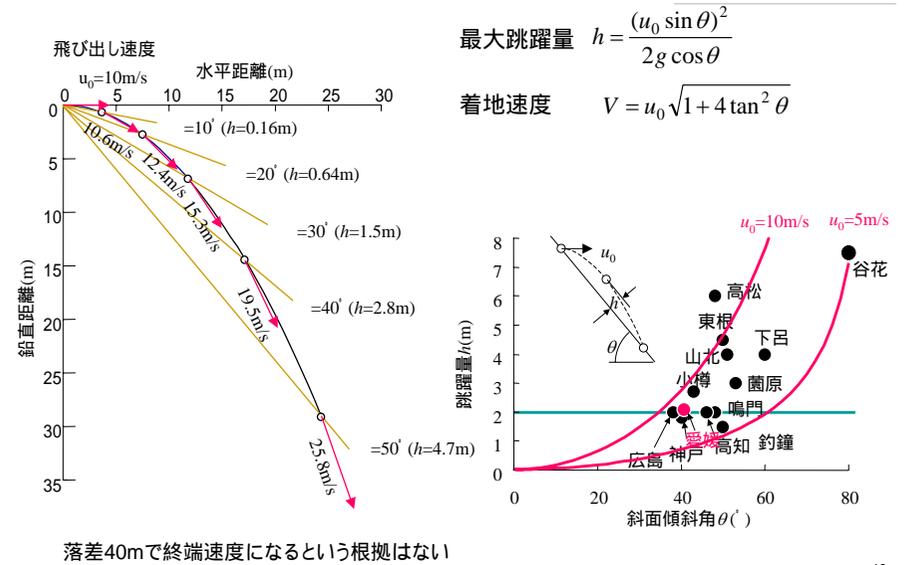
園原ダムの落石実験結果を参考に
最大跳躍量5mで設計

一般国道33号 愛媛県柳谷村 1981年

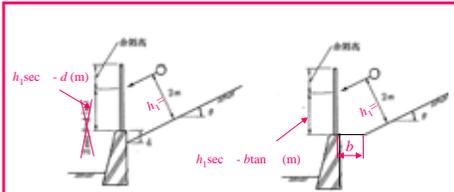
跳躍量は6.5m?、2m?



跳躍量と速度は斜面傾斜角に依存する



落石防護柵の設計



(ii) 荷重
落石防護柵の設計に用いる荷重としては、落石荷重のみを考える。落石の衝突位置は、図3-96に示すように支柱間の中央で、防護柵の高さの2/3の位置とし、残りの1/3は余裕高とする。また、落石の衝突方向は、防護柵に直角とする。

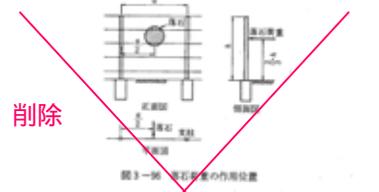
設計に用いる落石エネルギー (E) は、次式により計算する。

$$E = (1 + \beta) \left(1 - \frac{\beta}{\tan \theta} \right) W \cdot H \quad (3-19)$$

ここに E_1 : 落石エネルギー (kN・m) ($d \cdot m$)
 β : 回転エネルギーに関する係数 (無次元)
 μ : 斜面の摩擦係数 (表3-19) (無次元)
 θ : 斜面傾斜角 (度)
 W : 落石の重量 (kN) (gd)
 H : 落下高さ (m)

削除

また落石荷重が図3-96のように作用した場合、支柱2本が塑性変形をしてエネルギーを吸収するものとする。



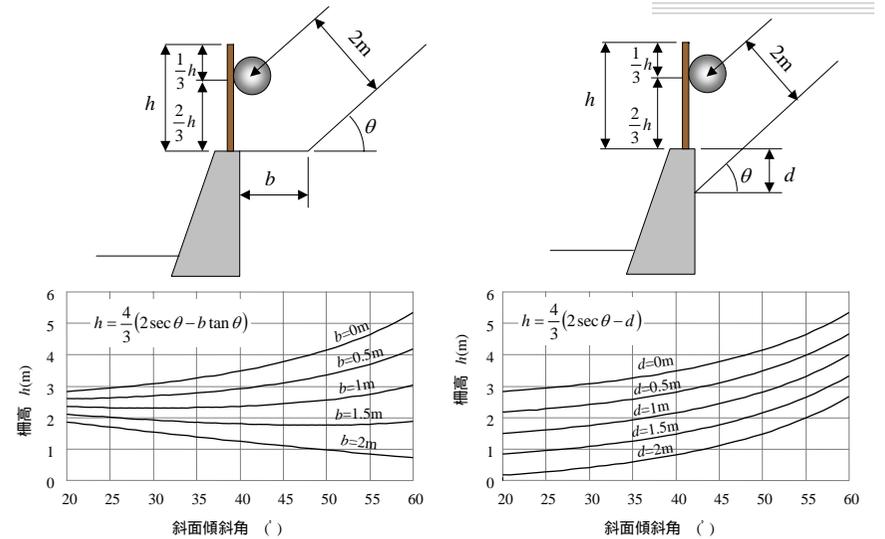
削除

表3-19 斜面傾斜角と摩擦係数 μ の値

区分	落石および防護柵の特性	設計に用いる μ	実験から得られる μ の範囲
A	硬質、丸状; 四角形、尖角なし	0.25	0~0.1
B	軟質、角状~丸状; 四角形、尖角なし	0.15	0.11~0.2
C	土砂、角状; 丸状~角状; 四角形、尖角なし	0.25	0.21~0.3
D	角状、粗面; 粗面; 四角形、尖角なし	0.35	0.31

(iii) 許容最大変位量および可能吸収エネルギー
 支柱の許容最大変位量は、図3-97に示すように15度とする。
 落石防護柵の可能吸収エネルギー (E₀) は、次式により計算する。
 $E_0 = E_1 + E_2 + E_3$ (3-20)
 ここに E_1 : ワイヤロープの吸収エネルギー
 E_2 : 支柱の吸収エネルギー
 E_3 : 金網の吸収エネルギー

柵の必要高



落石防護柵の設計における5つの前提条件

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。

ほとんどの製品は前提条件を満足していない。
製品価格が高いと採用してくれないため。
性能を確認せずに価格のみで判断する傾向がある。

16

落石が金網を突破した事例



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でワイヤロープを
切断して突破

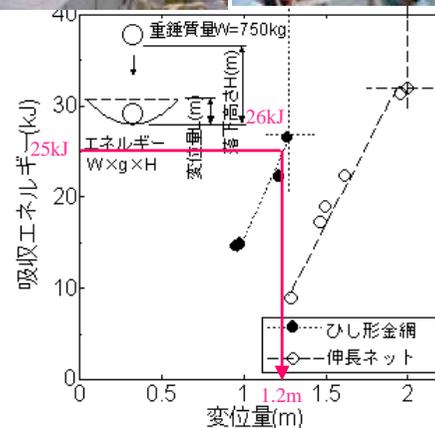
金網のエネルギー吸収量はわずか

17

金網の吸収エネルギー



鉄道総研による実験



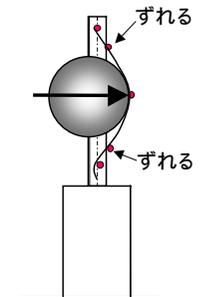
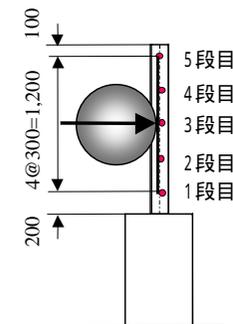
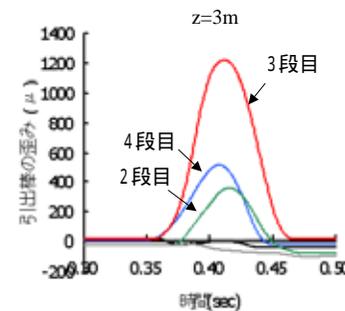
菱形金網(3.2×50mm)が25kJのエネルギーを吸収するためには1.2mのたわみが必要

18

ワイヤロープの破断事例

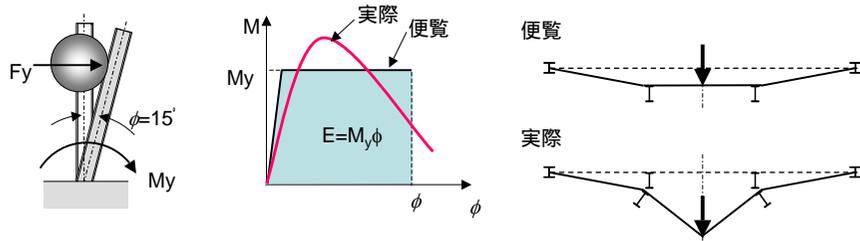


間隔保持材があっても落石でロープが上下に広がるため2本のロープで落石を均等に支持することはできない。



19

中間支柱の座屈事例



落石対策便による仮定と実際は随分と異なる

柵端金具, 端末支柱の破損事例



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
鳴門の落石事故(1990年)の教訓が生かされていない。
性能が検証されないまま、価格で判断する傾向がある。

ポケット式落石防護網の設計

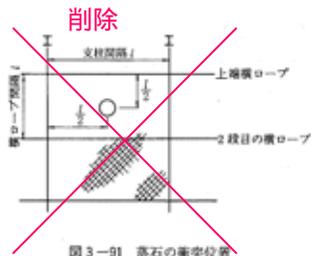


図 3-91 落石の衝突位置

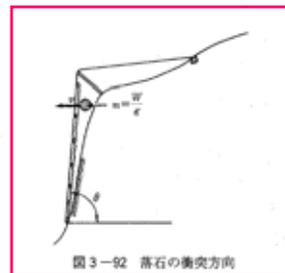


図 3-92 落石の衝突方向

$$E_w = \frac{1}{2} \cdot \frac{W}{g} (V \cdot \sin \theta)^2 \quad (3-17)$$

ここに E_w : 落石エネルギー (kN・m (tf・m))
 W : 落石の重量 (kN (tf))
 V : 落石速度 (m/sec)
 θ : 金網の傾斜角 (度)
 g : 重力の加速度 (m/sec²)

$$E_r = E_N + E_R + E_P + E_{HR} \quad (3-18)$$

ここに E_N : 金網の吸収エネルギー
 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_{HR} : 吊ロープの吸収エネルギー
 E_L : 衝突の前後におけるエネルギー差

落石防護網の可能吸収エネルギーは、金網、ワイヤロープ、支柱及び吊りロープの可能吸収エネルギーを合算して求める。

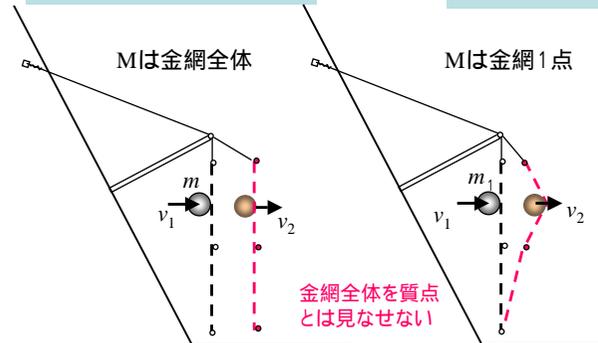
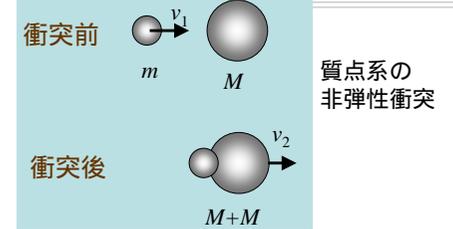
$$E_r = E_N + E_R + E_P + E_{HR}$$

衝突時のエネルギーロスの考え方

$$E_T = E_N + E_R + E_L$$

金網
 〇
 プ
 〇
 〇

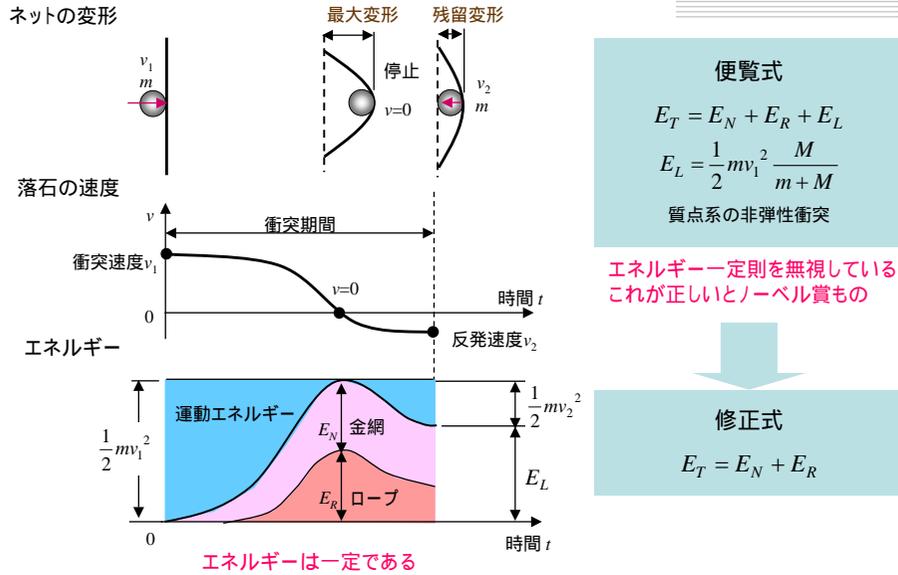
$$E_L = \frac{1}{2} m v_1^2 \frac{M}{m + M}$$



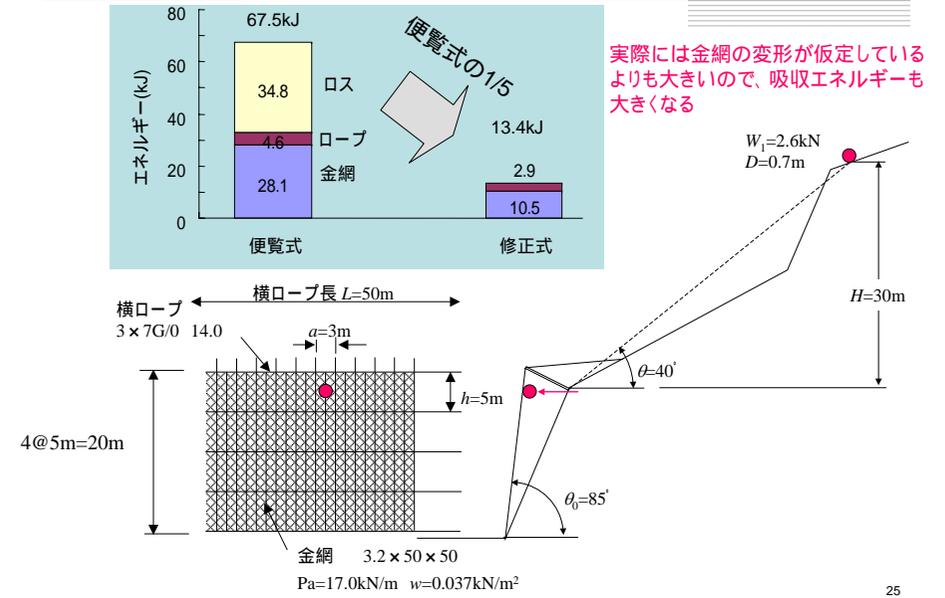
金網全体を質点とは見なせない



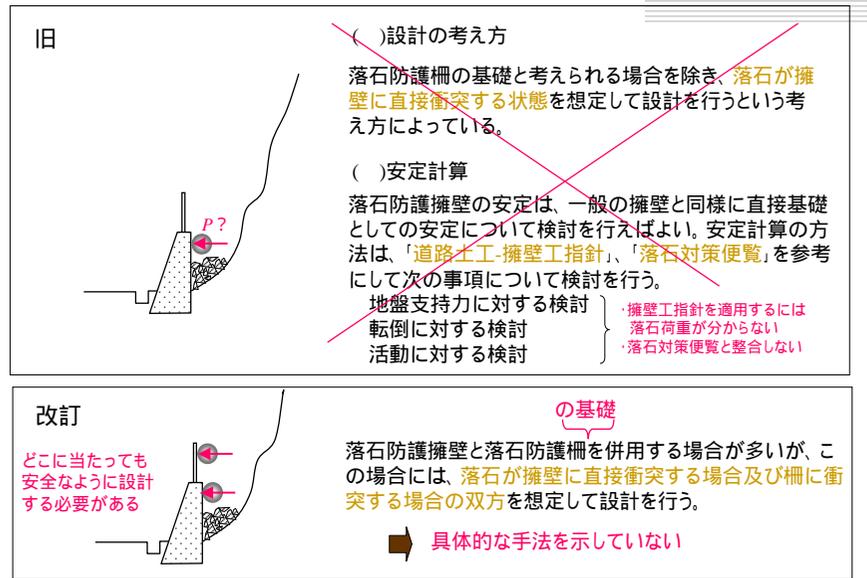
落石防護網の可能吸収エネルギー



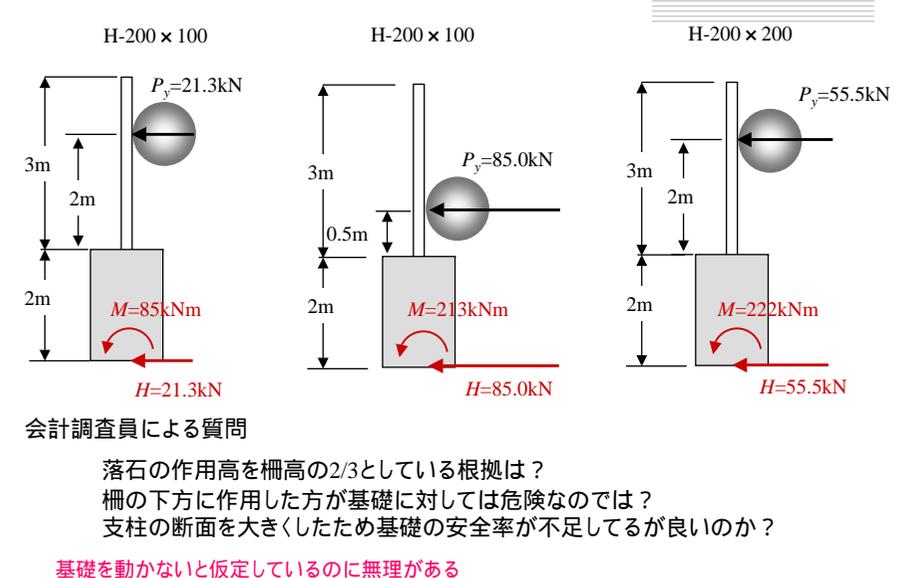
ポケット式落石防護網の吸収エネルギーの計算例



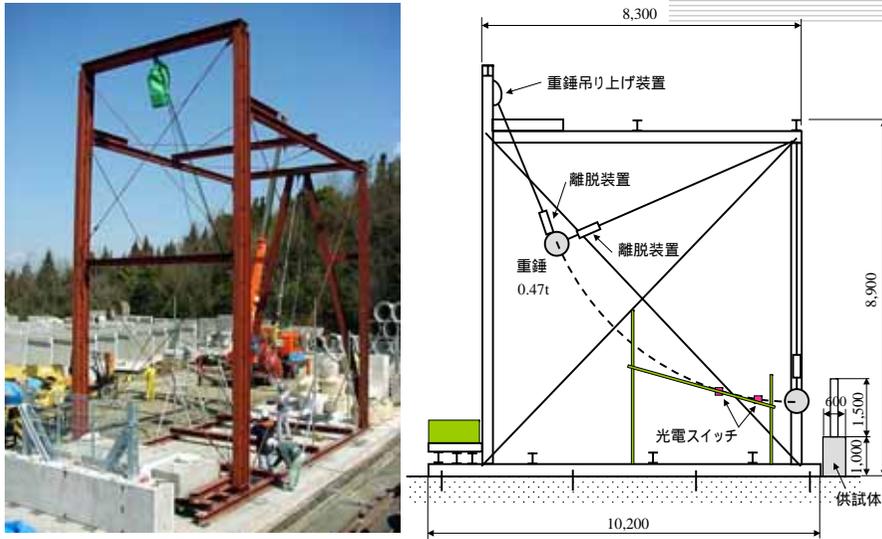
落石防護擁壁



支柱を大きくしたら基礎が不安定になる



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

右城の提案を検証するための実物実験装置

28

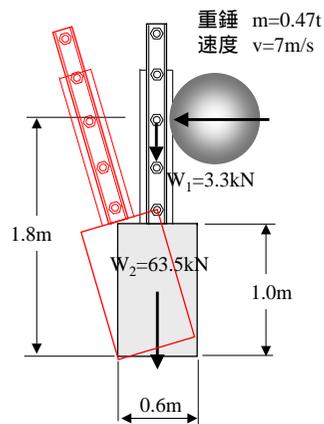
基礎の応答 (L=4.5m, 落下高2.5m)



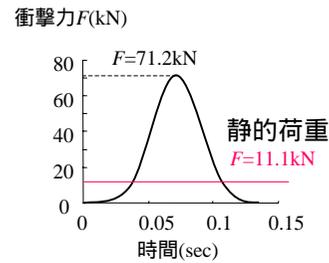
傾いても重心がつま先より前に出ないと転倒しない。起きあがる。

29

安全率が0.16でも基礎は転倒しない



転倒の安全率が1以下になれば回転運動を開始



衝撃力による転倒の安全率

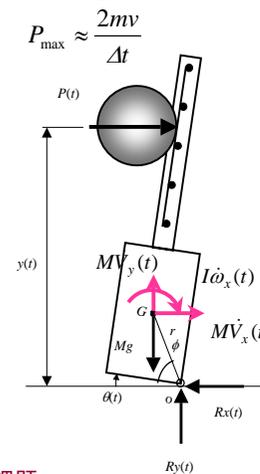
$$F_s = \frac{(3.3 + 63.5) \times 0.3}{71.2 \times 1.8} = 0.16$$

静的荷重が11.1kNなら転倒の安全率は1.0

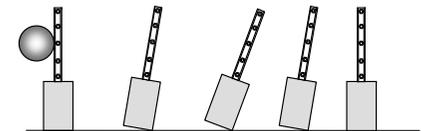
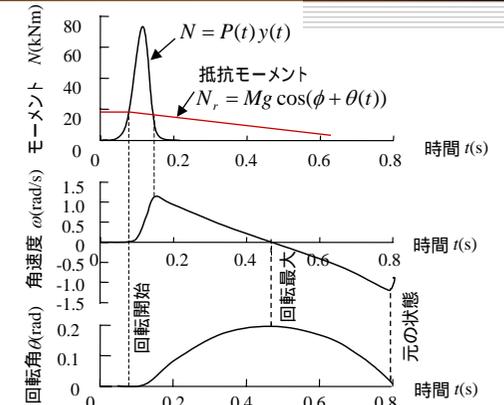
$$F_s = \frac{(3.3 + 63.5) \times 0.3}{11.1 \times 1.8} = 1.0$$

30

基礎の動的解析



課題
落石による衝撃力波形の決め方



31