

崩土荷重を受けるたわみ性防護柵の構造計算法の試み

A STRUCTURAL ANALYSIS OF FLEXIBLE FENCE AGAINST IMPACT LOAD BY DEBRIS SLIDE

古賀 泰之*, 呉 耀華**

Yasuyuki KOGA, Yoka KURE

*工博 小野田ケミコ (株) 技術・工事本部 副本部長 (〒116-0014 東京都荒川区東日暮里3丁目)

**工修 小野田ケミコ (株) 営業本部技術設計部 課長 (〒116-0014 東京都荒川区東日暮里3丁目)

キーワード：崩土、衝撃力、たわみ性防護柵、構造計算
 (debris slide, impact load, flexible fence, structural analysis)

1. まえがき

近年、耐力が大きく且つたわみ性の大きなネットパネル及びワイヤロープ類を主部材とし、部材の一部に衝撃緩衝装置を装着した吸収エネルギーの大きい落石防護柵の設置例が増加している。これらの内、リングネット工と言われる構造は、実構造に数多くの実験落石を衝突させ、全体構造ならびに部材の挙動を調べて設計落石に対応する部材・構造を構築してきた。このような防護柵に対して、崩土・積雪・雪崩のような面的荷重を受けることがあるが、この状態を実験的に数多く繰り返すことは困難であり、これを補うための構造計算を近似的に行う方法を考案した。

まず、たわみ性防護柵に静的な面的荷重が作用した場合の挙動を近似的に解析するモデルを構築した。解析により得られた荷重強度と柵の変形の関係は一般に3次元・非線形である。

次にこの関係を柵の変形が最大となる位置の値で代表させ、柵の剛性を1次元の非線形関係で表し、ここに1次元的に流入する崩土荷重を与えて柵の動的挙動を解析した。ここに、動的崩土荷重には、筆者らの提案する質点モデルを用いた¹⁾²⁾。

2. 崩土流入と動的作用荷重

連続的な崩土が剛な壁面に衝突する時の衝撃力に関しては、実務上は噴流モデルが採用されており³⁾、最大荷重は崩土の流入速度により決まる。

筆者らは、崩土がたわみ性の防護工に衝突した場合の衝撃力を簡易に評価するモデルとして、流入崩土の先頭部が経時的に防護工に捕捉され、以降は防護工と一体として運動するという質量が付加される質点モデルを提案した¹⁾²⁾。この結果、衝撃力は崩土の流入速度・長さ、防護工のたわみ性により変化し、最大値は防護工が剛な場合に、流体モデルに基づく噴流式による値と一致することが示された。質点モデルについては、用いるバネ係数に及ぼす崩土の圧縮性の影響が不明であり、崩土をバネで結ばれた集中質量モデルで表し考察を行った¹⁾。

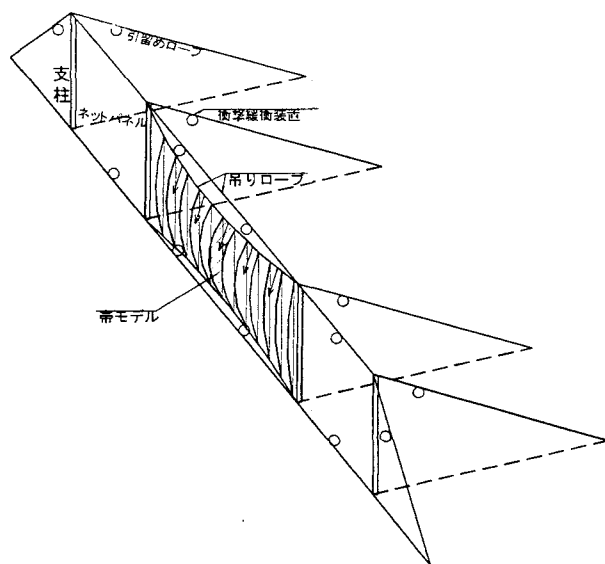


図-1 モデル概要

既発表の試算¹⁾²⁾では、柵のたわみ性は線形バネで表した。次項においては、たわみ性防護柵としてリングネット工を対象に、面的荷重が作用する時の柵の変位を算出する近似手法を考案する。

3. 静的崩土荷重を受ける柵の挙動解析⁴⁾

3.1 モデルの仮定と手順

モデルの全体概要を図-1に示す。防護柵の骨格はある間隔で地盤に建てられた複数の支柱、支柱の上下部に水平に張られたワイヤロープであり、このワイヤロープに荷重を直接受けるたわみ性の大きなネットパネルが吊られ、支柱を背面方向ならびに側方向に地盤に引留める数本のワイヤロープが設置される。上下の吊りロープならびに背面引留めロープには衝撃緩衝装置が装着されており、荷重の急増を低減するとともに、防護工に持ち込まれるエネルギーを吸収する役割をしている。全体として、構造は大変形・非線形であり、この特性を表す簡単な数学モデルを考察した。モデルには以下の仮定を置いた。

- ① ネットパネルへの荷重は静的・面的に作用し、簡易化のため吊りロープの長手方向に一様、荷重の作用方向が一様、深さ方向に台形分布とする。
- ② ①のネットパネルへの荷重を受けて支柱は長手方向に傾斜しないものとする。解析は2本の支柱間を対象とする。
- ③ ネットパネルの変形は、上下吊りロープのたわみとパネル自体の変形から成る。パネルを縦方向に独立・並列した細幅の帯（以下帯モデルと呼ぶ）から構成されるものとする。各帯モデルに面的作用荷重の帯幅分が作用する。帯モデルはそれぞれ幅のない1次元のケーブルとして扱う。
- ④ ③の各帯モデルの上下端で生ずる張力が上下吊りロープを引寄せ、ロープのたわみを生ずるものとする。
- ⑤ ④により吊りロープのたわみが生ずると、各帯モデルの両端支点が移動する。各帯モデルの変形計算の際には、両端支点は固定されたものとし計算を行い、その結果（両端張力）を用いて吊りロープの変形計算を行う。次に、計算された吊りロープのたわみの位置まで、各帯モデルの支点位置を移動させ、次段階の

各帯の変形計算を行う。このような繰返し計算を行い、吊りロープの変形の変化量が一定値以下になった段階で計算を終了する。

- ⑥ なお、面的荷重の載荷により、支柱を背面側に引留めるロープに装着された緩衝装置が引伸ばされ、支柱およびパネルの傾斜は載荷前のものから変化するが、この計算を最初に行い、それ以降、上述した帯モデルと吊りロープの繰返し変形計算を行う。

3.2 帯モデルと吊りロープの計算法

帯モデル及び吊りロープとも、太さのないケーブルとして扱う。ケーブルの解析は成書⁵⁾を参考とした。

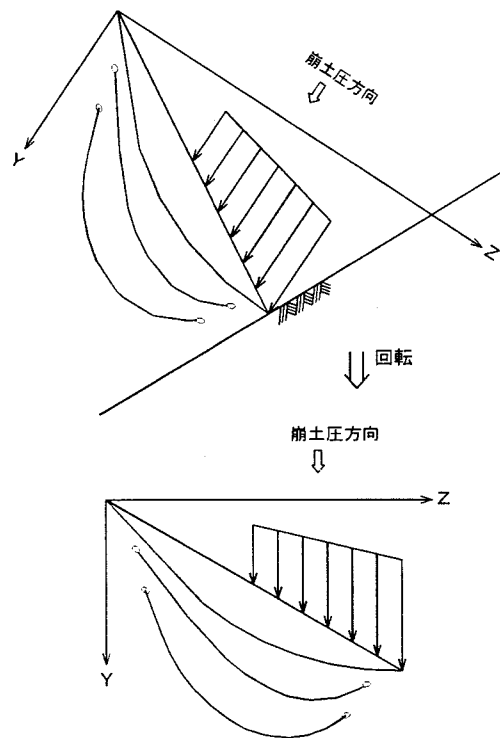


図-2 帯モデルの概要

帯モデル

- ① 図-2に帯モデルの概要を示す。各帯モデルは離散的な節点で仮想的に等分割し、作用する崩土分布荷重は各節点で等価な離散荷重に置きかえる。帯モデルに作用する離散荷重は一定方向であり、結果として生ずるたわみ変形は2次元的である。また、簡単化のため載荷重方向が鉛直下向きとなるように荷重ならびに帯モデルを回転させる（図-2中の

座標軸 $z-y$)。

- ② 離散荷重が作用するケーブル (帯モデル) のたわみや張力は、作用点での力の釣合い (2方向) 条件、ケーブルの両端支点位置条件、現在のたわみ曲線から逆算される初期長さが実際の初期値に等しいという条件を用いて算定することができる⁵⁾。

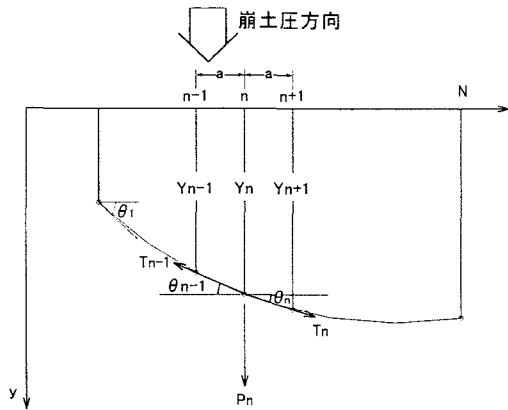


図-3 ケーブルに関する諸量

吊りロープ

- ① 吊りロープには、各帯モデルから引寄せ張力が離散的に作用するが、吊りロープのたわみによる各帯モデルの支点位置の違いに起因する膨らみの大きさの違いを反映して、端部張力の大きさ・方向は一樣でない (図-1 参照)。この場合について、成書⁵⁾にある1次元変形の解法を拡張した。
- ② なお、吊りロープにおいて衝撃緩衝装置はロープ上のある位置に装着され、ロープ張力によりその位置でロープは大きく伸びることになる。計算上は、解析対象区間内に存在する緩衝装置伸び特性が各分割区間全体に一樣に分布するものとして、それぞれがロープ張力により伸びるものとした。

3.3 計算例

部材の伸び特性

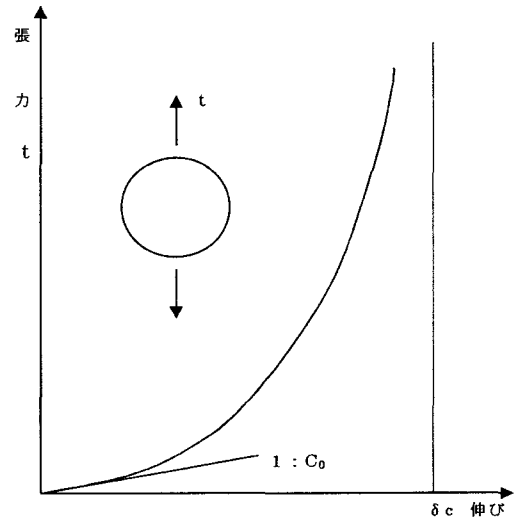
ネットパネルの縦方向伸び特性の基となる1個のネットリングの張力～伸び関係は次式で表した⁶⁾ (図-4 (a))。

$$\delta = \frac{c_0 t}{1 + \frac{c_0 t}{\delta_c}} \quad (1)$$

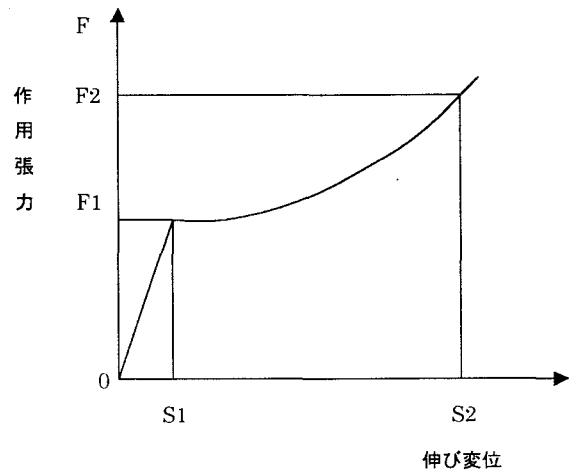
t : リング1個当りの張力

δ : リング1個当りの伸び量

δ_c : リング1個当りの伸び量の上限值



(a) ネットリングの伸び特性



(b) 緩衝装置

図-4 部材の伸び特性

この場合、張力が小さいときの張力～伸び量の関係は係数 c_0 で結び付けられ、張力が大きいときの伸び量の上限值が δ_c となる双曲線型を想定している。リング1個の1次元的伸び特性はリングの側方変位条件に依存するが、計算上は側方自由または側方変位拘束の2種から選ぶようにした。パネルの縦方向伸び特性は、リングの配置の影響を近似的に考慮して設定した。緩衝装置の伸び特性はメーカーにより与えられた以下の定式化を用いて図-4 (b) のように表した。

$$0 < S < S_1 \text{ において, } F = F_1 / S_1 \cdot S \quad (2a)$$

$$S_1 < S < S_2 \text{ において, } F = F_1 + C_2 \times (S - S_1)^{0.2} \quad (2b)$$

計算条件

図-6に荷重条件を示す。ここでは、 $P_y = P_z$ とした部材特性の詳細数値は省略する。

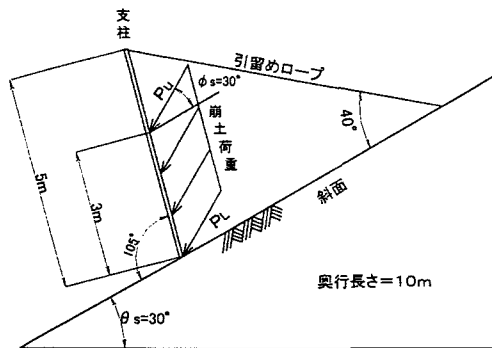


図-5 荷重条件

計算結果 (変形)

図-5に一定荷重時のネットパネル全体のたわみ変形を透視図的に、図-7に荷重を変えたときの支間中央部帯モデルのたわみを示す。現実の崩土や雪崩の衝撃力は不明な点が多いが、噴流式 $P = \rho v_0^2$ を用いれば、例えば、密度 $\rho = 1 (\text{t/m}^3)$ 、流速 $v = 10 (\text{m/sec})$ のときに $P = 10 (\text{tf/m}^2)$ である。なお、今回の計算ではネットたわみ時に斜面に接触することは考慮していない。また、ネットの相対的な変形は、斜面傾斜角には無関係で、荷重傾斜角 ϕ_s に支配される。

計算結果 (作用力)

以上のような変形と合わせて、吊りロープや引留めロープの張力、帯モデルの縦方向張力、支柱の頭部・基部での作用力等が算定される (図は省略)。

計算結果 (吸収エネルギー/柵の変形特性の1次元モデル化)

各部材の作用荷重と変形の関係を用いて、各部さらには構造全体での吸収エネルギーは次式により算定できる。

$$(\text{吸収エネルギーの総和}) = (\text{引留めロープ 吸収エネルギー}) + (\text{帯モデル 吸収エネルギー}) + (\text{上部吊りロープ 吸収エネルギー}) + (\text{下部吊りロープ 吸収エネルギー}) \quad (3)$$

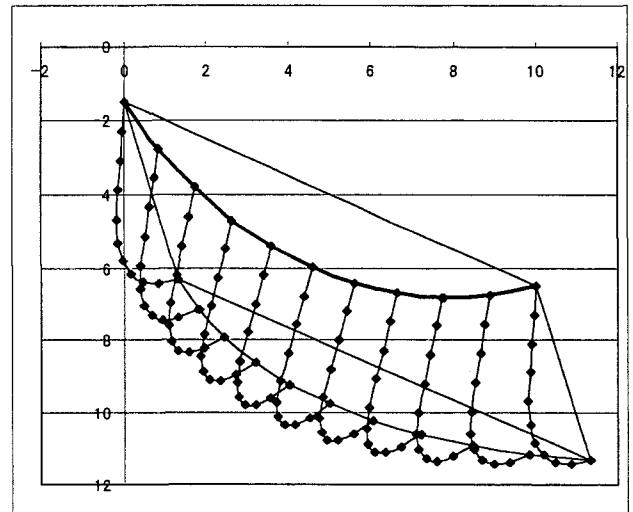
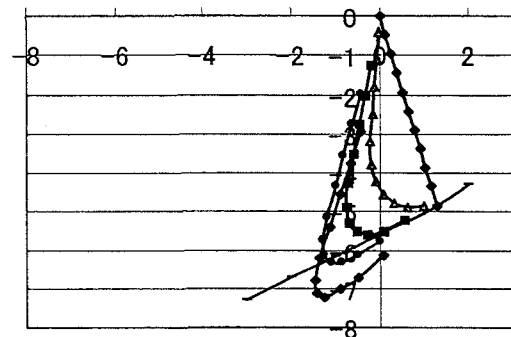


図-6 ネット変形図(一定荷重条件下)

荷重: 0.1, 0.5, 1, 10 tf/m^2

水平軸(m)



鉛直軸(m)

図-7 荷重の変化と支間中央部モデルたわみ

図-7に対応する作用荷重と吸収エネルギーの関係を図-8に示す。緩衝装置の伸び特性は、前述したようにメーカーにより与えられた定式を用いているが、荷重が大きい領域で伸び量には上限値があることは十分には表していないと考えられ、結果として大きい荷重レベルにおいて緩衝装置を含む部材 (引き留めロープ及び吊りロープ) の吸収エネルギーは過大に評価していると考えられる。

載荷重を変えたときの防護工の変形は図-6のように立体的であるが、ネットパネルについて荷重方向で初期位置からの最大膨らみを代表変位とすると、(荷重) ~ (代表変位) ~ (吸収エネルギーの総和) の概念的関係は図-9のようになる。これを書き換えて (代表変位) ~ (吸収エネルギー) の関係が得られる。ここでは、(吸収エネルギー) が解析対象の領域にわたる総和を考慮しているから、(荷重)も土圧に載荷面積を乗じた総荷重

と考える。図-9の変位 X とエネルギー $E(X)$ の関係に対応する単位面積当りの荷重強度 $F(X)$ は、載荷面積を $AREA$ として

$$F(X) = \frac{1}{AREA} \frac{dE(X)}{dX} \quad (4)$$

得られる。図-7に示した計算例について次式により定式化を行った例を図-10に示す。

$$E = a \exp(bX^c) \quad (5a)$$

$$F(X) = \frac{1}{AREA} \frac{dE}{dX} = \frac{1}{AREA} abcX^{(c-1)} \exp(bX^c) \quad (5b)$$

図(a)では、構造計算による変位と載荷面積当りの吸収エネルギー関係とそれを定式化した関係式とを示す。図(b)では、図(a)に示した吸収エネルギーの定式から式(5b)により荷重を算定した結果を示す。

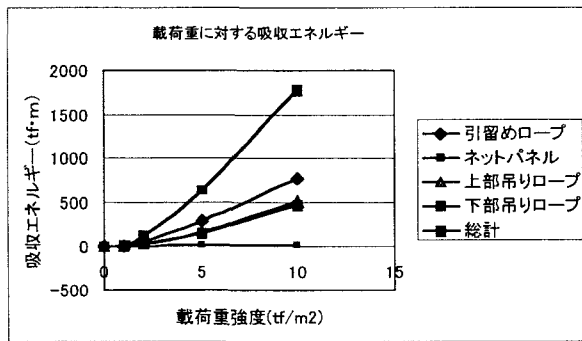


図-8 載荷重に対する吸収エネルギー

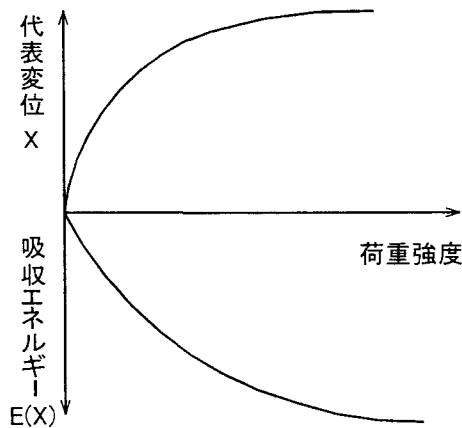


図-9 荷重強度～代表変位～吸収エネルギーの関係(概念図)

4. 崩土流入を受ける柵の数値計算例

以上ではネットパネルに静的な面的荷重が作用した時のパネルのたわみ等を近似的に算定する解析モデルを示した。

次に崩土荷重に2. に概略紹介した質点モデル

を用い、図-10(b)に示した変形特性の防護柵に崩土が流入したときの衝撃力の計算を行った。なお、除荷・再載荷時はバネ係数 k_r の線形弾性とした。計算式の詳細は既発表¹⁾²⁾であるが、基礎式は時刻 t 、 $t+dt$ 間の運動量保存則から、次式のようになる。

$$v_2 = v_1 + \left\{ \rho(v_0 - v_1)^2 \times f(u_1) \times dt + Mg(\sin\theta - \text{sign}(v_1) \times \mu \cos\theta) \times dt \right\} / \{M + \rho(v_0 - v_1)dt\} \quad (6)$$

ここに、 $f(u)$: 防護柵反力

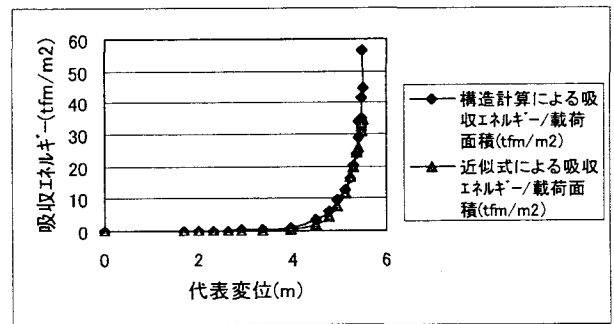
u : 防護柵変位

v_1, v_2 : 防護柵に捕捉された崩土の速度

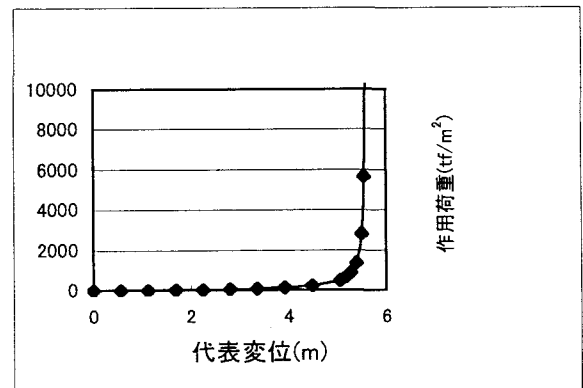
v_0 : 崩土の流入速度

ρ : 崩土の密度

M : 捕捉された崩土と防護工の重量



(a) 変位～吸収エネルギー



(b) 変位～作用荷重

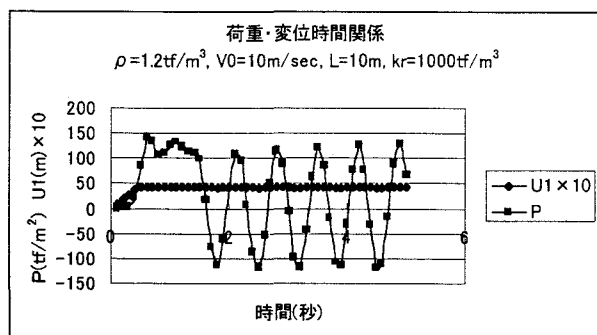
図-10 代表変位に対する吸収エネルギー・作用荷重

計算例として図-11(a)に荷重と変位の時間変化を、図-11(b)に荷重・変位関係を示す。他の計算例は省略するが、以下のような結果が得られた。

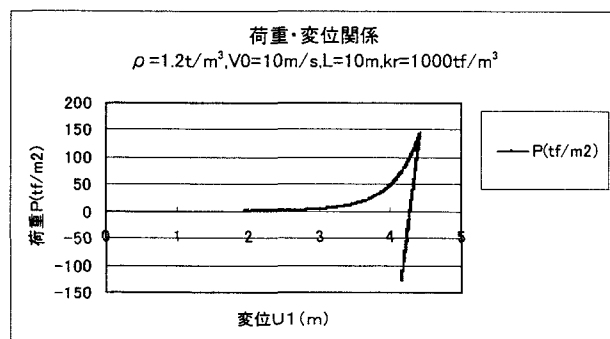
- ① 衝突の初期を除いて荷重・変位とも規則振動的な挙動を示す。これは、全質量が捕捉された後の一定質量ならびに除荷・再載荷時の線

形バネの振動挙動を示している。この振動挙動は、除荷・再載荷時の線形バネ係数の大きさに大きく依存する。また、変位には大きな残留値がある。

- ② 崩土長さを変えた場合、捕捉質量の大きさの影響から、振動周期は大きく異なるが、荷重及び変位の最大値はほぼ同一であった。



(a)



(b)

図-11 荷重・変位・時間の関係

- ③ 図-11の条件の場合、最大荷重は噴流式による結果 $120(\text{tf}/\text{m}^2)$ とほぼ等しい。このことは、既往の線形防護工解析の結果¹⁾と同一である。細かく言えば、振動挙動に先立って生ずる過渡期間において生ずる荷重がやや大きく、振動期間中の最大値はそれよりもやや小さく、後者が噴流式による値にほぼ一致する。
- ④ 防護柵のバネ係数式(4b)において、係数 a を

大きくした計算を行ったが、荷重の最大値はあまり変わらず、概ね噴流式で評価された。これは、既往の線形防護工解析の結果¹⁾と同様である。

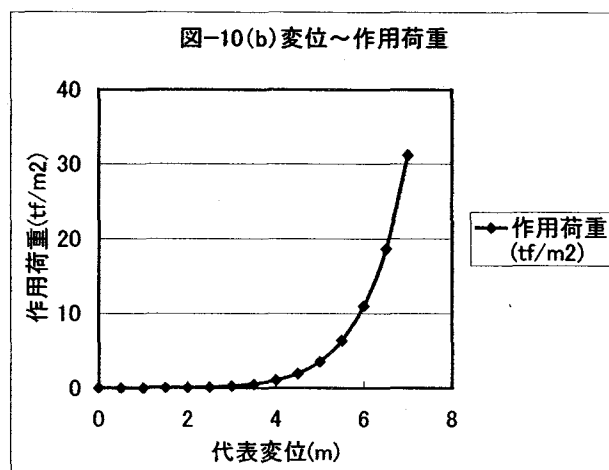
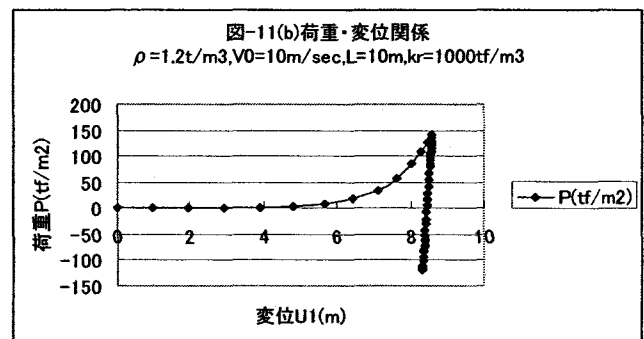
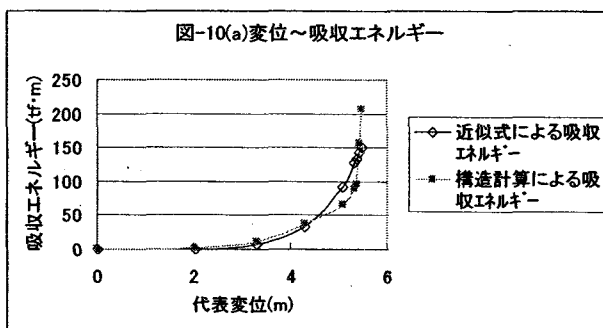
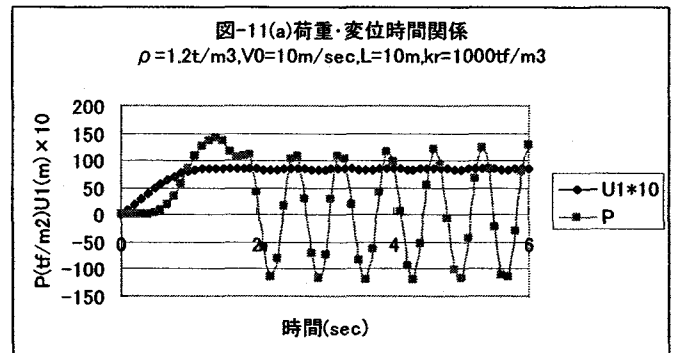
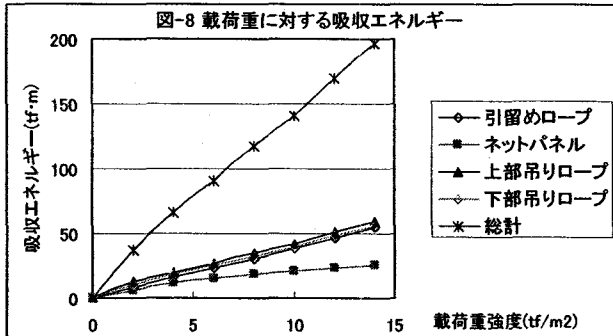
5. あとがき

- ① 静的な面的荷重に対する防護柵の近似計算結果は土砂等が堆積したリングネット工の形状に定性的に近いものとなった。
- ② 3次元で非線形となる防護柵の変形特性を、柵の最大変位量に注目し、構造全体の吸収エネルギーを介して、1次元の非線形変形特性を算定し、崩土作用力に関する質点モデルを用いて崩土衝撃力の計算を試みた。
- ③ 崩土衝撃力の定性的な特性は線形バネの場合と同様であった。また最大衝撃力は噴流式による値とほぼ一致した。今後の課題として、静的及び動的な面的荷重下の事例との比較が必要とされる。

参考文献

- 1) 2) 古賀泰之・呉耀華ほか：崩土の衝撃力に関する1次元モデル(その1、2)、第38回地盤工学研究発表会、2003。
- 3) 日本道路協会：道路土工のり面工・斜面安定工指針、1999。
- 4) 古賀泰之・呉耀華：崩土を受けるたわみ性防護柵の構造計算法、第59回土木学会年次講演会、2004。
- 5) 土木学会：構造力学公式集、1986。
- 6) 古賀泰之ほか：高エネルギー吸収たわみ性落石防護柵の設計手法について、地すべり、Vol.39、No.1、2000。

【崩土荷重を受けるたわみ性防護柵の構造計算法の試み】 差替図面



吸収エネルギー及び作用荷重の近似式

$$E(X) = a \exp(bX^c)$$

$$a = e^{-8} \quad b = 5.474 \quad c = 0.51$$

$$F(X) = \frac{1}{AREA} \frac{dE}{dX} \quad AREA = 30$$