

たわみ性防護柵に対する崩土による衝撃力に関する考察

IMPACT LOAD ON FLEXIBLE FENCE BY DEBRIS SLIDE

呉 耀華*, 古賀 泰之**

Yoka KURE, Yasuyuki KOGA

*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)

**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)

キーワード：崩土、衝撃力、たわみ性防護柵、設計法
(debris slide, impact load, flexible fence, design method)

1. まえがき

斜面において突発的に生じる崩土災害を防止する上で、土砂の運動(流下速度・到達距離等)と構造物に衝突する際の衝撃力が課題となる。運動・衝撃力とも現場観測・模型実験・解析により知見が得られるが、ここでは、構造物に作用する崩土衝撃力に関して解析的検討を行う。

崩土の運動は、土塊の変形を考慮しない質点または剛体モデル、流体モデル、離散化モデル(DEM, DDA)により検討される。一定時間にわたって流下する土砂による衝撃力に関しては、単体の岩石を対象とした落石、または土石流中の巨礫に関する多くの研究と異なり、一部の実験的研究^{1) 2) 3)}を除いて研究は少ない。最近では、離散化モデルにより運動と構造物への衝撃力とを同時に求める試みもある⁴⁾。いくつかの研究において、剛な壁への衝撃力は、噴流の衝突式(以下では噴流式と呼ぶ)として ρv_0^2 (ρ :崩土の密度, v_0 :流下速度)により与えられるものとされており¹⁾、いくつかの技術基準にも採用されている^{5) 6)}。

本論では、まず、いくつかの単純な仮定の下に、構造物のたわみ性の影響を考慮できる質点モデルを提案する。次に、このモデルと実務上多用される噴流モデルとが準拠する仮定の相互の関係を明らかにする。さらに、質点モデルに用いられた仮定を拡張するための集中質量モデルの意義について考察する。最後に、従来の噴流モデルとも連続

性のある質点モデルに基づいたたわみ性防護工の設計フロー(案)の骨子を述べる

2. 質点モデル^{7) 8)}

(1) モデルの概要

崩土の場合、土石流とは異なり、流下時間及び土量はある程度限定されたものと考えられる。この報告では崩土の流動過程全体を扱うものではなく、流下してきた崩土がある構造物や防護工に衝突した時の衝撃力を対象とする。したがって、こ

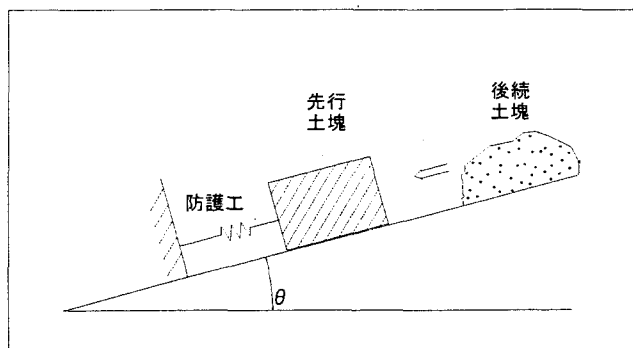


図-1 モデル概念図

こでは一定総量の崩土が既知の一定層厚・一定速度で1次元的に流下し、構造物に衝突する場合を考える。モデルは、衝突に伴い構造物からの反力を受けて減速する崩土の先行部(影響領域と呼ぶ)は剛体として、後続の流下崩土が連続的に質量・運動量を補給すると考えるものであり、高橋・吉田⁹⁾が斜面の勾配変化点(下流が緩勾配)を越えて流下する土石流について、上流から連続的に運

動量が補給されつ下流部の土塊の運動が次第に減速する過程を扱ったモデルに類似するものである。構造物としては、たわみ性のある構造物を対象とした。以上のモデルの概念を図-1に示す。

以上を数式表現すると以下ようになる。時刻 t における先行土塊（影響領域及び構造物）の質量を M 、速度を v_1 、微小時間 dt 間の流入土塊の質量を m 、速度を v_0 とする。この流入を完全非弾性衝突とし、時刻 $t + dt$ における新しい影響領域の質量は $M + m$ 、速度を v_2 とする。作用力積を考慮した運動量保存則から次式が得られる。ここでは自重の斜面方向成分ならびに底面摩擦の影響は省略している。

$$(M + m)v_2 - (Mv_1 + mv_0) = -f(u_1) \times dt \quad (1)$$

ここに、 $f(u)$ は構造物の初期位置からの変位 u と関係付けられる構造物からの反力である。落石の場合は、流入質量 m はある時刻のみ一定で、その後ゼロとなる。崩土の場合、流入質量 m を先行土塊と後続崩土の相対速度に比例するものとして

$$m = \rho(v_0 - v_1)dt \quad (2)$$

とすると、式(1)から

$$v_2 = v_1 + \frac{\rho(v_0 - v_1)^2 \times dt - f(u_1) \times dt}{M + \rho(v_0 - v_1)dt} \quad (3)$$

となる。さらに、自重の斜面方向成分ならびに底面摩擦の影響を付加すると(4)を得る。ここに、 θ : 崩土捕捉区間での斜面傾斜角、 μ : 同区間での底面摩擦係数。

$$v_2 = v_1 + \{ \rho(v_0 - v_1)^2 \times dt - f(u_1) \times dt +$$

$$Mg(\sin \theta - \text{sign}(v_1) \times \mu \cos \theta) \times dt \} /$$

$$\{ M + \rho(v_0 - v_1)dt \} \quad (4)$$

影響領域を剛体・非圧縮性とする微小時間 dt 内の変位の増分 du は影響領域の重心の速度 v から $v dt$ と算定される。なお、崩土の流下速度は実斜面条件を反映した速度 v_0 として所与のものとして与えている。

(2) 数値計算例

ここでの計算例においては荷重と柵の変形は線形弾性関係にあり $f(u) = k \times u$ と表されるものとする。表-1の条件を標準的なものとして行った数値計算例を示す。バネ係数 k は、たわみ性防護柵への落石衝突時の逆算バネ係数の1例¹⁰⁾を参考と

した。

1) 衝撃力に対する崩土長さの影響

まず崩土を受ける構造物の応答ならびに崩土長さの影響に関して、 $v_0 = 10(\text{m/sec})$, $\theta = 0$, $\mu = 0$ の場

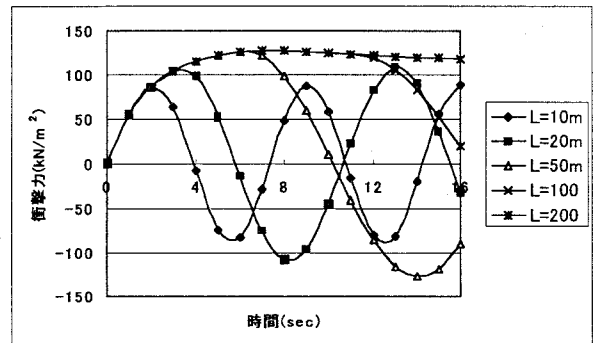


図-2 崩土長さとの衝撃力

合に、崩土長さ L を変えたときに崩土衝撃力がどのように時間変化するかを図-2に示す。 v_0 =一定ゆえ、崩土長さ L の影響は継続時間 t_d の影響と見てもよい。

表-1 標準的計算条件

崩土の密度 ρ	1,200 (kg/m ³)
崩土の流下速度 v_0	10 m/sec
流下継続時間 t_d	3(sec)
単位断面積当りの総流下質量 $M_T (= \rho v_0 t_d)$	36,000 (kg/m ²) =36(t/m ²)
崩土長さ $L (= v_0 t_d)$	30(m)
斜面傾斜角 θ	0° (0,15,30,45,60°)
底面摩擦係数 μ	0(0~0.6)
単位面積あたりバネ係数 k	=10(kN/m ³)
防護工質量 M_0	0

崩土長さが有限の場合には、捕捉された崩土と構造物バネを一体とした振動的応答を示す。また、崩土長さが増加し質量が増加すると、振動周期は長くなり、最大荷重は増加する。しかし、崩土長さの増大に伴う衝撃力の増加は少なく、崩土長さがある限界値以上では最大衝撃力は変わらない。これは崩土が順次衝突する過程でエネルギー損失を仮定しているためである。

図-2はバネ係数 k が一定の場合の結果であるが、バネ係数 k を変えると当然振動波形の周期が変化し、結果として崩土長さの影響も定量的には異なってくる。そのため、バネ係数を変化させた計算を行い、崩土長さの影響を調べた計算結果を図-3に示す。ただし、同図では崩土長さに代わって継続時間 t_d を変数に用いている。この図のように、いくつかのパラメータが変化しても、無次元化された継続時間 td/Ts と実務に多用される流体圧 ρv_0^2 で無次元化した衝撃力 $P/\rho v_0^2$ とには一義的

な関係がある。ここに

$$T_s = \sqrt{\rho L/k} = \sqrt{\rho v_0 t_d / k} \quad (5)$$

T_s は崩土の全質量 ρL に対する単振動系の周期 T_d に対して $T_s = T_d / 2\pi$ の関係がある。なお、内田らは、図-3 と同様の意味を有する結果として剛な擁壁模型に崩土の量を変えた実験を行い、一定量以上では衝撃力は一定値に収束する結果を得ている¹¹⁾。

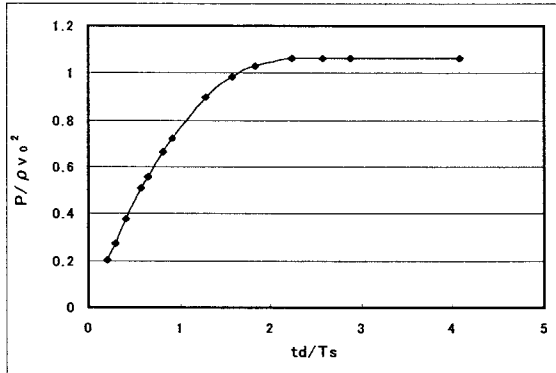


図-3 無次元化継続時間と衝撃力

2) 質点モデルと噴流式との比較

上述したように、崩土長(継続時間)が短い場合には、最大荷重は小さくなる。崩土長(継続時間)が十分長いとして(以下の計算では、 $t_d = 20 \text{ sec}$ とした)、その条件での上限最大荷重と速度との関係を調べた結果を図-4に示す。実用上両者はほとんど一致する。理論的にも基礎式(3)または(4)に戻って、流入が継続する期間内に最大荷重が生ずるとすれば、 $v_1 = v_2 = 0$ であるから、

$$\therefore P_{\max} = ku_{\max} = \rho v_0^2 + Mg \sin \theta \quad (6)$$

斜面傾斜角 $\theta = 0$ とすると、式(6)の右辺第2項 $= 0$ であり、衝撃力の最大値がいわゆる噴流式に等しいことと整合する。継続時間が短ければ、継続時間内に最大荷重が生ずるとは限らないので、一般にはこの値よりも小さい。

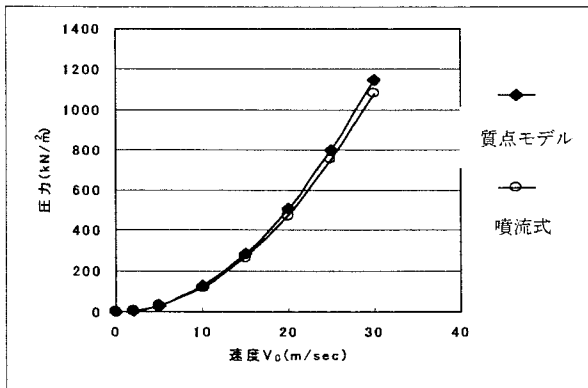


図-4 質点モデルと噴流式の比較

3) 斜面勾配の影響、衝撃力と堆積による静的荷重の寄与

斜面に勾配がある場合には、崩土の衝突・流入以外に、土塊自重の斜面方向成分と摩擦抵抗との不平衡により、運動の変化が生じる。その不平衡力は、時間と共に流入崩土量(堆積土量)が増加するにつれ、静的に漸増する。この静的荷重と衝撃力は共に構造物の設計に重要である。

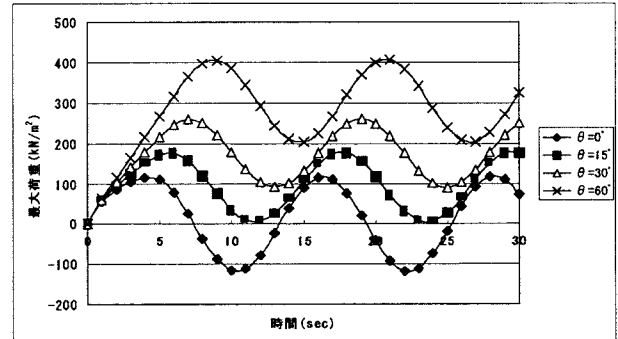


図-5 傾斜角による最大荷重への影響

図-5は、 $v_0 = 10 \text{ (m/sec)}$ 、 $L = 30 \text{ (m)}$ 、 $\mu = 0$ の場合に、斜面傾斜角 θ に対して、衝撃力がどのように変化するかを示す。ここでは流入崩土量の全量が防護工に堆積するものとしている。

- $\theta = 0^\circ$ (水平)の場合、 $\mu = 0$ としているため、衝撃力は正負両側に振動的に変化する。
- θ が増加するにつれて衝撃力が最大値に達する時間は増加し、最大値も増加する。これは、 θ が増大するにつれて、初期の不平衡力が増大し作用力が平衡に達する時間が増大することおよび平衡時の変位が増大するためである。衝撃力の最大値は、斜面傾斜による自重の斜面方向成分の影響を受けて変化する。

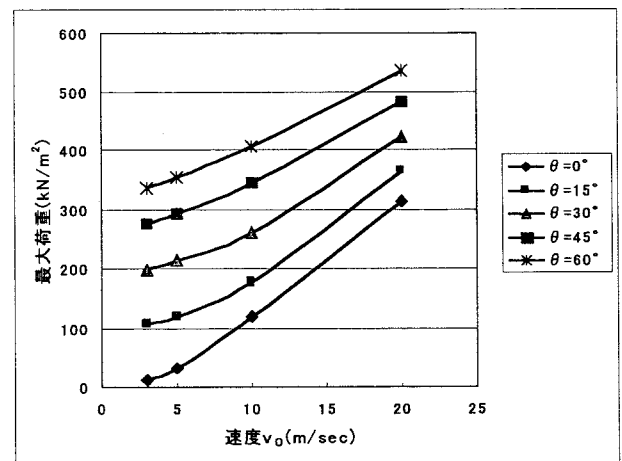


図-6 傾斜角による最大荷重の比較

4) 斜面傾斜がある場合の最大荷重

次に、崩土の総流入質量 $M = \rho L$ を一定として、

いくつかの θ に対して、 v_0 、 t_d をパラメータとして、速度に対する最大荷重の関係として図-6に示す。 $\theta = 0^\circ$ の場合には、速度に対する関係は噴流式で表される。

- ・ 斜面傾斜角が増大するにつれて、最大荷重は大略平行移動的に増加する。増加は式(6)の第2項に相当するものである。

(3) 噴流モデルとの対比

噴流モデルは、平板に流体が衝突した後に、平板に沿って流れ、衝突後に平板法線方向の速度成分を持たないという仮定に基づいている¹²⁾。したがって、衝突後に平板法線方向に反射する速度成分があれば、衝撃力は通常の噴流公式よりも大きくなる。

噴流モデルの仮定に対して質点モデルは次のような仮定を置いている。

- ① 後続崩土が先行崩土に衝突する時の反発係数 $e=0$ とし、捕捉崩土および防護工は一体として運動する。
- ② 後続崩土が捕捉された際に、防護工と捕捉崩土の相対運動は考慮しない。
- ③ 捕捉された崩土と後続の流入崩土との間に相互作用はない。

これらの仮定は噴流モデルのものと同様であり、最大衝撃力が一致する理由と考えられる。

(4) 質点モデルのまとめ

質点モデルと噴流モデルは、後者が剛な壁に衝突する場合に限定されていることを除いてほぼ同等の仮定を置いている。たわみ性の構造物に衝突する崩土が構造物に与える衝撃力は、噴流式を基礎として構造物のたわみ性・崩土の流下継続時間の影響を受け、構造物がたわみやすいほど、継続時間が短いほど(崩土質量が小さいほど)小さくなる。さらに、崩土が斜面を流下する場合、最大荷重は崩土の堆積による影響も受ける。ここで言う構造物のたわみ性には、崩土の圧縮性も含まれるべきであるが、このモデルではその評価はなされない。次項においてこのことに対する検討を行う。

3. 質点モデルの再考(集中質量モデル)¹³⁾

質点モデルでは捕捉された崩土が防護工と一体運動をするという仮定を置いており、防護工の変位の増分 $du = v dt$ (v :捕捉崩土の重心速度)として計算を行った。このことは捕捉崩土が場所的に

一様な運動をする、捕捉崩土が非圧縮性であるということと同等であると考えられる。次に新しいモデルを構築して崩土圧縮性の影響の検討を行った。ここでは、計算例等は文献に譲る¹³⁾。

(1) モデルの概要

質点モデルの仮定と異なり、防護工に捕捉された崩土が一様運動でなく、内部的相対運動により、防護工を含んだ運動自体が変化をし、防護工作用

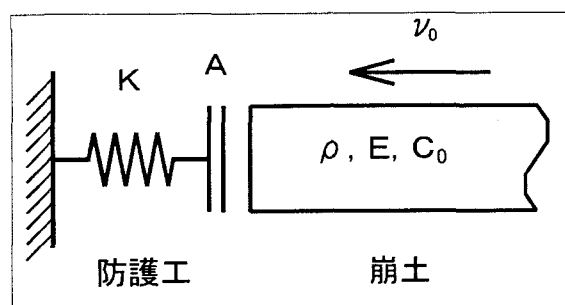


図-7(a) 波動質量モデル

外力が変化することが考えられる。このような観点から検討する上で簡単なモデルとして、崩土を半無限長さの線形弾性棒として線形防護工に一定速度 v_0 で衝突する1次元波動モデルが考えられる(図-7(a))。この場合の衝撃力 σ は次式

$$\sigma = \frac{\rho C_0 v_0}{1 + \rho C_0 A / K t} \quad (7)$$

で与えられる。ここに、 C_0 :弾性棒の波動速度、 A :バネ係数 K に対する防護工載荷面積

この式によれば、衝突後の経過時間と共に衝撃力は $\sigma_{max} = \rho C_0 v_0$ の上限値に収束する。これは、大同の述べる土石流が圧縮性の場合の衝撃力と同等のものである¹⁴⁾。この式によれば、最大衝撃力は崩土の衝撃速度のみならず、崩土の波動速度、したがって、崩土の圧縮性に依存することになる。

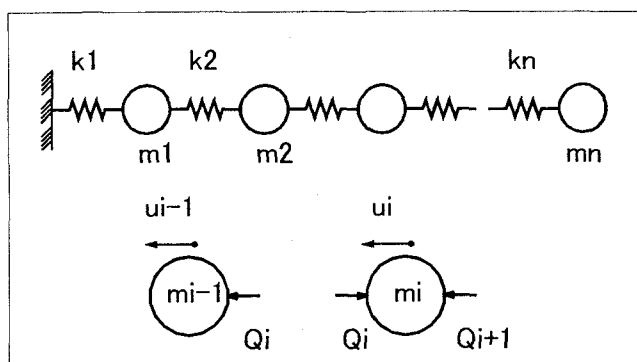


図-7(b) 集中質量モデル

さらに、崩土が有限長で防護工や崩土自体の圧縮性が非線形の場合の検討を行いやすくするために、流入崩土を1次元的な微小ブロックに分割し

て、相互にバネで結ばれる集中質量モデル(トロッコモデル)を考えた(図-7(b))。このバネはひずみ硬化型の非線形とした。この非線形式は、側方変位拘束条件下の土の圧密特性式により、また除荷・再載荷時は線形バネを与えた(図-8)。

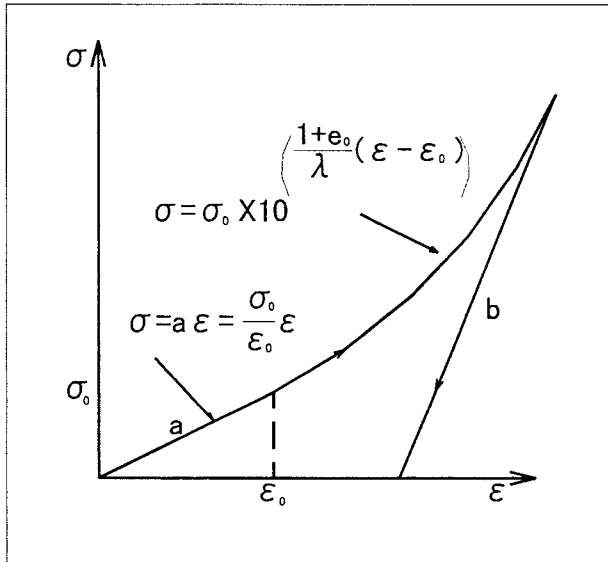


図-8 ブロック間の荷重～変位関係

(2) 数値計算からの考察

まず、図は省略するが、バネ係数を線形とした有限長の集中質量モデルと半無限長の波動モデルによる衝撃力の挙動は、かなり近い結果が得られた。以下に、集中質量モデルによる数値計算からの知見を述べる。

- ① 一定流入速度下で崩土長さに対して、衝撃力は増加するが、一定以上の崩土長さに対して、衝撃力は一定値に収斂する。一方、崩土長さが短くなると衝撃力は減少する。これは質点モデルと同様の特徴である。
- ② 崩土の圧縮性が増加(バネ係数が低下)するにつれ衝撃力が低下することが示される。このことは波動モデルによる式(7)からも定性的に了解できる。

表-2 モデルの特徴一覧

モデル・項目	噴流モデル	質点モデル	波動モデル	集中質量モデル
崩土の物性	流体	不明	線形弾性体	非線形履歴性固体
最大衝撃力	ρv_0^2	ρv_0^2	$\rho C_0 v_0$	
防護工のたわみ性の影響	含まれない	表される	表される	表される
崩土長さの影響	含まれない	表される	半無限長	表される
崩土剛性の影響	含まれない	含まれない	表される	表される

③ 流入速度と衝撃力の関係は、定性的には噴流

式の速度依存性に類似しているが、②に述べたように衝撃力の絶対値は噴流式とは一般に合致しない。

- ④ 以上に述べた4つのモデルの特徴を表-2にまとめる。表-2のように、崩土衝撃力に及ぼす崩土圧縮性の意義や質点モデルの前提とする物性は引き続き検討を要する。

4. 崩土荷重を受ける防護工の設計フロー

以上に述べたいくつかの衝撃力モデルの内、従来の設計荷重式である噴流モデルと連続性のある質点モデルに準拠した場合の、崩土荷重を受けるたわみ性防護工の設計フローの骨子を図-9に示す。

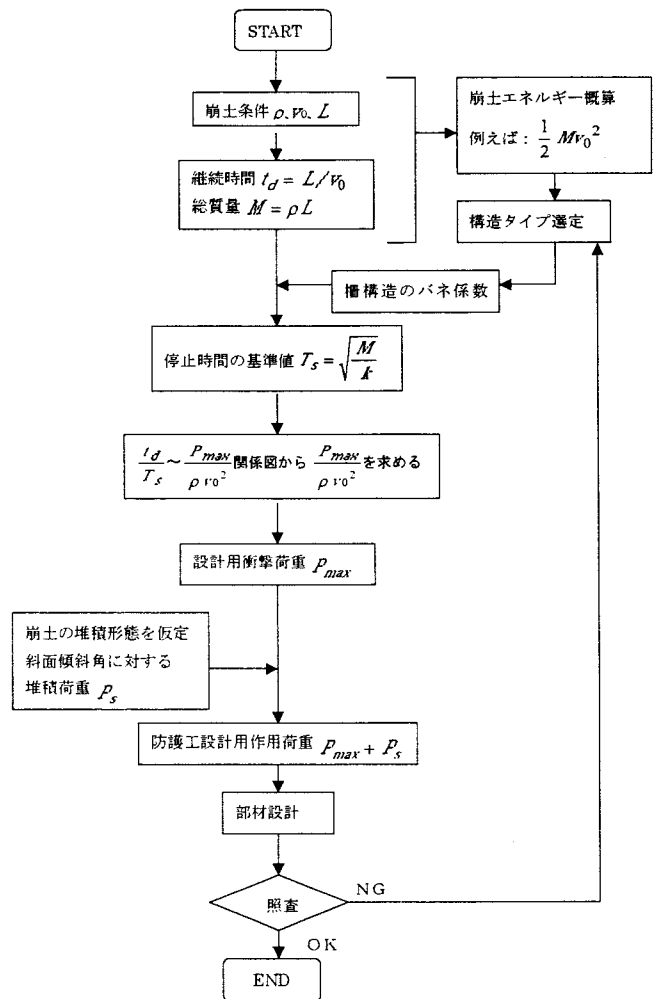


図-9 崩土荷重を受けるたわみ性防護工の設計フロー

5. まとめ

- ① 崩土の衝撃力を算定するために、崩土の先端が順次防護工に流入し、その後一体となって

運動するという質点モデルを提案した。これは従来の噴流モデルを防護工がたわみ性、崩土が有限長の場合に拡張したものと同等と考えられる。

- ② 土の圧縮性を考慮できる1次元の集中質量モデルによれば、衝撃力に及ぼす崩土長さや防護工のたわみ性の影響は質点モデルと同様である。流入速度依存性は噴流式に類似するといった結果が得られたが、基本的に衝撃力は崩土の圧縮性に依存し、質点モデルが前提とする物性等については依然検討の余地が残されている。
- ③ 質点モデルで防護工挙動を近似した時の防護工の設計フローを提案した。

参考文献

- 1) 仲野公章・右近則男：砂質崩土の衝撃力に関する実験、新砂防、Vol.39,No.1,1986.
- 2) 寺本和子・右近則男・工藤賢二：崩壊土砂が擁壁に及ぼす衝撃力に関する実験、昭和62年度砂防学会研究発表会、1987.
- 3) 三好岩生・鈴木雅一：土石流の衝撃力に関する実験的研究、新砂防、Vol.43,No.2,1990.
- 4) 森山崇・善功企・陳光斉・笠間清伸：不連続変形法を用いた斜面崩壊時の崩土の到達距離および衝突力の検討、第39回地盤工学研究発表会、2004.
- 5) 日本道路協会：道路土工のり面工・斜面安定工指針、1999.
- 6) 国土交通省：告示332号、1991.
- 7) 8) 古賀・呉ほか：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.
- 9) 高橋 保・吉田 等：土石流の発生と流動に関する研究(1)一勾配の急変による堆積、京大防災研究所年報第22号B-2、1979.
- 10) 古賀ほか：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.1,2,2001.
- 11) 内田太郎ほか：崩土の衝撃荷重の時間変化に関する実験的研究、平成16年度砂防学会研究発表会、2004.
- 12) 日野幹雄：流体力学、朝倉書店.
- 13) 古賀・呉：崩土の衝撃力に関する1次元モデル(その3)、第39回地盤工学研究発表会、2004.
- 14) 大同淳之：土石流が構造物等に作用する衝撃力、第1回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム、1992.