

崩壊土砂が衝突時に待受け式擁壁に作用する荷重の時間変化推定手法の検討

国土交通省国土技術政策総合研究所 小山内信智, 内田太郎, 曾我部匡敏
八千代エンジニアリング(株)下田義文, ○吉川修一

1 はじめに

急傾斜地崩壊防止工事のうち待受け式擁壁工は斜面改変が少ないため、自然環境を保護しつつ、崩壊対策ができる利点がある。近年、待受け式擁壁の設計において、崩壊土砂が擁壁に衝突する際に擁壁に作用する力(以下、「崩土荷重」という)が考慮されるようになってきた。これまで、崩土荷重の推定方法としては、模型実験または数値解析による検討が行われている。崩土の流下、停止に関しては、様々な数値解析手法が提案されており、土砂を離散化した粒子の集合体として扱った離散体モデル、土砂を流体のような連続したものとして扱った連続体モデル、土塊全体を質点として扱った質点モデルに大別される。

離散体モデルは、土石流・崩壊土砂の分野に数多く適用され、土砂の到達範囲、格子型堰堤の閉塞などを再現できることが示されてきた。また、崩壊土砂の流下・堆積は、差分法、有限要素法を用いた連続体モデルによっても良好に再現できることが明らかにされてきた(吉松ら, 2004 など)。一方、大同・宮本(1983)は運動量保存則に基づき、土石流段波が堰堤に作用する荷重を再現する方法を提案した。近年、古賀ら(2004)は、崩土が構造物に作用する荷重を推定できる質点モデルを提案した。しかしながら、これまでのところ、崩壊土砂が衝突時に構造物に作用する荷重についての数値解析手法についてはほとんど検討されていない。

そこで、本研究では、崩土が衝突時に構造物に作用する荷重の時間変化に着目し、これまで荷重算出を目的として扱われている数値解析手法の中から、個別要素法(離散体モデル)、大同・宮本モデル(連続体モデル)、古賀らのモデル(質点バネモデル)を選出し、室内実験結果との比較を通して適用性を検討した。

2 室内実験結果への適用

2.1 実験概要

実験は川砂と礫を混合した試料(最大粒径 19.0 mm, 50%粒径 5.1mm)を斜面勾配 45° で流下させる方法で行った。土砂量は 0.1 m³, 試料の含水率は約 3%とした。斜面途中に設置した受荷台に試料を衝突させ、受荷台背面に設置した圧縮型ロードセルで荷重の時間変化を測定した。なお、実験の詳細は内田ら(2005)を参照されたい。

2.2 解析モデル

(1) 離散体モデル(個別要素法)

個別要素法では、水路および受荷台を図-1に示す平面要素、崩土の集まりを球要素で表し、各要素間に働く力をバネ、ダッシュポット、スライダで表したものである。球要素と平面要素が接触するバネ、ダッシュポットに作用している力の和で構造物への作用荷重を求める。入力変数は表

1に示すとおりであり、要素径は、球粒子が受荷台高 25cm に接触するときの個数を 10 個程度となるように 2.5cm とした。要素数、要素質量は粒子径と崩土量、崩土密度から、粘着力、内部摩擦角は試験値、バネ定数、減衰定数、計算時間間隔は香月ら(2003)の文献を参考に設定した。なお、本研究では、香月ら²⁾

によるプログラム(3次元個別要素法)を基に作成した。

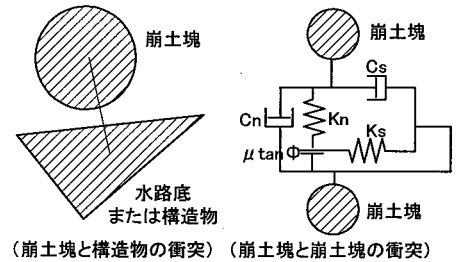


図-1 個別要素法モデル

表-1 個別要素法入力変数

項目	記号	設定値	単位
要素数		6,400	個
要素径	r	2.5	cm
要素質量	m	0.266	N
粘着力, 内部摩擦角	c, Φ	0.78, 35	N/cm ²
法線, 接線バネ定数	Kn, Ks	10, 4	N/cm
法線, 接線減衰定数	Cn, Cs	0.46, 0.09	-
減衰定数	h	0.2	-
計算時間間隔	Δt	10 ⁻⁵	sec

(2) 連続体モデル(大同・宮本モデル)

大同・宮本モデル³⁾は、図-2に示すような土石流段波が構造物に衝突したときの構造物への作用荷重を、段波高 η' と堤高 H_0 の大小関係、土石流の圧縮・非圧縮性を考慮して、流れのもつ運動量変化と静圧力の和として求めるものである。入力変数は表-2に示すとおりであり、流速、流動深、段波前面の角度、流下土砂濃度は実験結果の画像解析等から測

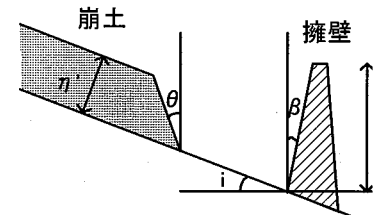


図-2 大同・宮本モデル

表-2 大同・宮本モデル入力変数

項目	記号	設定値	単位
堤高	H_0	0.184	m
堤体上流法勾配	β	45	度
流路勾配	i	45	度
流速	u_0	6.997	m/s
流動深	η'	0.075	m
段波前面の角度	θ	42.9	度
堆積土砂濃度	C_0	0.629	-
流下土砂濃度	C_0	0.064~0.418	-
水の密度	ρ_0	0	t/m ³
砂礫の密度	σ	2.697	t/m ³
堆積土砂密度	ρ_t	1.696	t/m ³
流下幅	B_0	0.8	m

定・算出した。流下土砂濃度は、到達量と貯留量の時間変化の比から設定した。なお、本研究では、荷重は崩土の流動深は堤高より低く、崩土は非圧縮として求めた。

(3) 多質点モデル

多質点バネモデルでは、図-3に示すように、崩土を複数の質点が線形バネ、ダッシュポットで結合されていると近似した。各質点に初速度を与え、崩土が構造物に衝突したときを $t=0$ とし、バネ $K1$ 、ダッシュポット $C1$ に作用している荷重を崩土荷重として求めた。入力変数は表-3に示すとおりであり、崩土断面積、崩土長さ、流下速度、流下時密度は実験結果の画像解析等から測定・算出した。底面摩擦は実験堆積時の崩土重量と収束荷重の力のつりあいから $S=0$ とした。バネ定数は、式-1に示すように変形係数 E を用いて表し、受荷台に作用する荷重の実験値の再現性が得られるよう試行錯誤的に決定した。また、ダッシュポット定数 C は、式-2に示す

ように質点 i の粘性減衰係数 α_i と質量 m_i を用いて表し、本研究では $\alpha_i=0$ とした。

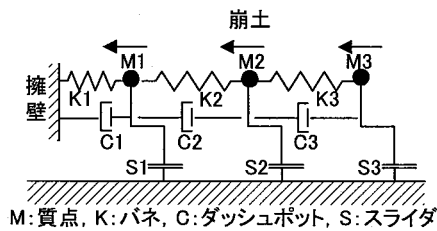


図-3 多質点バネモデル

表-3 多質点バネモデル入力変数

項目	記号	設定値			単位
		質点1	質点2	質点3	
流下時密度	ρ	1.1	1.1	1.1	t/m ³
崩土断面積(平均流動深×水路幅)	A	266	800	1333	cm ²
崩土要素長	L	0.6	0.6	0.6	m
流下速度	V	7.0	7.0	7.0	m/s
変形係数	E	0.1	0.1	0.1	kg/cm ²
底面摩擦係数	μ	0	0	0	-
粘性減衰定数	α	0	0	0	1/s

式-1 $k = \frac{EA}{L}$ 式-2 $C = \alpha_i m_i$

3 適用性結果と考察

受荷台に作用した荷重の時間変化について、実験値と各モデルの解析値を比較した(図-4)。本研究では、多質点バネモデルは質点が離反するまで、大同・宮本モデルは実験において流動深が堆積の影響を受けずに精度良く計測されている時刻までを対象とした。この結果、大同・宮本モデルは実験値よりもやや小さい荷重であるものの、 $t=0.25$ sec 付近の荷重増加の傾向が見られる等、比較的良好な再現性が得られているといえる。この結果は、これまでの実験から崩土が衝突時に構造物に作用する荷重は崩土の流体圧として求めることができるとした結果(例えば、内田ら, 2004)と矛盾しない。すなわち、崩壊土砂の流下過程(密度、速度、流動深等の時間変化)が明らかとなるとき、大同・宮本モデルを用いて、荷重の時間変化を評価できることが分かった。

個別要素法による計算値は、実験値より小さく、バラツキが大きい結果となった。一方、これまでの土石流、がけ崩れ

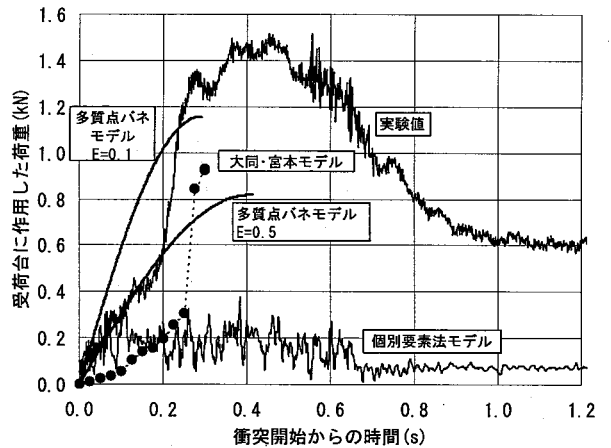


図-4 実験における荷重測定値と解析値との比較

における個別要素法の研究同様(例えば、深和ら, 2003, 若井ら, 2004等)、このときの崩壊土砂の堆積形状は実験結果を比較的よく再現している(図-5)。

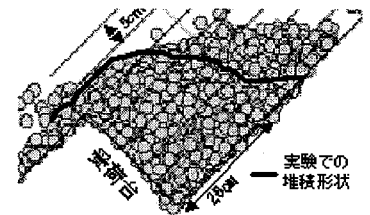


図-5 実験における堆積形状と個別要素法解析結果との比較

多質点バネモデルは、ピーク荷重はある程度再現できるものの荷重の時間変化までは再現性が得られていない。多質点バネモデルを用いるにあたっては、変形係数を試行錯誤的に決定したが、ピーク荷重とその発生時刻を同時に精度良く再現することはできなかった。すなわち、ピーク荷重を実測値に近づけるとピーク荷重の発生時刻は実際より早くなり、ピーク荷重の発生時刻を実測値に近づけるとピーク荷重が実測値より小さくなった(図-4)。

4 結論

本研究の結果、次のことが明らかとなった。①大同・宮本モデルは、崩壊土砂の流下過程(密度、速度、流動深等)を与条件として適切に設定することで、荷重の時間変化を評価できることが分かった。②離散体モデルは、荷重にバラツキが多く見られるものの、堆積形状の再現性は評価できることが分かった。③多質点バネモデルは、ピーク荷重はある程度推定できるものの荷重の時間変化までは評価は難しいことが分かった。

最後に、本研究にあたり多くのご指導を頂いた防衛大学香月教授、筑波大学宮本教授にたいし記して謝意を表す。

参考文献 1) 内田ら：衝突時に崩壊土砂が構造物に作用する荷重に関する実験：構造物の変位が荷重に及ぼす影響、砂防学会誌、投稿中、2) 深和ら：3次元個別要素法によるオープン型鋼製砂防堰堤の土石流捕捉効果解析、土木学会論文集 No738, 2003. 7、3) 宮本, 大同：堤体に作用する土石流段波の衝撃力に関する研究(I)、立命館大学理工学研究紀要, 第42号, 1983