

(75) 斜面および防波堤・護岸等の地震時すべり安定性の検討に用いる地震動の有効値の一評価手法について

(財) 電力中央研究所 栃木 均
(財) 電力中央研究所 平田 和太

1. はじめに

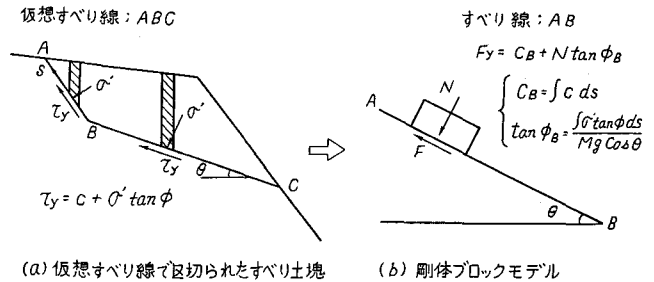
電力・土木・港湾施設の建設においては、切土・盛土斜面や防波堤・護岸等の斜面構造物の耐震安定性評価が必要な場面に数多く遭遇する。これら斜面構造物の耐震安定性の検討は、通常、実設計の立場から静的震度法解析が行われる他、動的解析が補助的に使われている。静的震度法解析では、対象構造物に作用する地震力を震度に置換する必要があるが、その際、地震動の最大加速度を重力加速度で除した値を震度とする従来の方法では、静的地震力を過大に評価する傾向にあることが指摘されており、静的地震力を合理的に評価する方法の確立が望まれている。

近年、動的解析によって土塊の滑動量を計算し、それによって地盤の安定性を評価する方法が各種提案されている。これは地震の被害事例調査やそれらの逆解析を通して、土塊の滑動が即地盤の崩壊には結び付かないこと^{1),2)}が明らかにされたためであり、振動台による模型実験、詳細なFEM解析等によっても検証されている^{3),4)}。本研究は、このような観点から、上記の斜面構造物の地震時すべり安定性の検討に用いる静的地震力の一評価法として、すべり土塊の滑動量を指標とした地震動の“強さ”の評価を行い、地震動の有効値を震度とする方法についての検討を行ったものである。

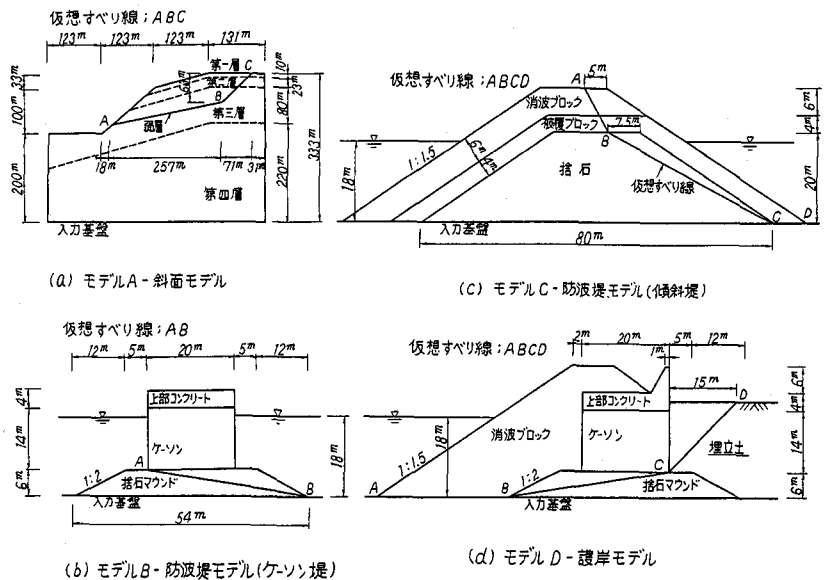
2. すべり土塊のモデル化

斜面および防波堤・護岸の地震による破壊形態として、土塊のすべり破壊を想定し、仮想すべり線上の土塊を傾斜平面上の剛なブロックにモデル化した(剛体ブロックモデル、図-1)。このモデルは、剛なブロックの底面に生じるせん断力が土塊のせん断強度を越えた場合に滑動が起きるとするものである。ブロックの滑動抵抗力 F_y は合粘着力 C_B と内部摩擦角 ϕ_B とにより次のように表わされる。

$$F_y = C_B + N \tan \phi_B \quad (1)$$



(a) 仮想すべり線で区切られたすべり土塊 (b) 剛体ブロックモデル
図-1 すべり土塊をモデル化した剛体ブロックモデル



(a) モデルA-斜面モデル (b) モデルB-防波堤モデル(ケソン堤) (c) モデルC-防波堤モデル(傾斜堤) (d) モデルD-護岸モデル
図-2 検討に用いた斜面および防波堤・護岸モデル

$$C_B = f c ds$$

$$\tan \phi_B = f (\sigma - u) \tan \phi ds / (M g \cos \theta) \quad (2)$$

ここで、 N はブロックへの垂直抗力であり、 c 、 ϕ はすべり線上の材料の強度定数を、 σ 、 u はすべり線における初期応力と間隙水圧を示している。 M 、 θ はブロックの質量とすべり線の傾斜角であるが、解析では、ブロックの質量 M はすべり土塊の全質量に等しくし、すべり線の傾斜角 θ は代表的なすべり線の傾斜角とした。

図-2には検討に用いた斜面および防波堤・護岸モデルとそれらの物性値を、表-1には斜面および防波堤・護岸モデルを上記の方法により剛体ブロックにモデル化した結果を示す。また、図-3には、上記モデル化手法の妥当性を裏付ける一例を示す。同図は、剛体ブロックモデルとFEMにより土塊の地震時すべり安全率を求め、両者の比較

を行ったものであるが、結果は良好であると言える。

3. すべり土塊の滑動解析

(1) 直接数値積分による解析

上で述べた剛体ブロックモデルにより地震動の加速度の大きさを増大させた滑動解析を行い、土塊のすべり抵抗力を越えるような大きな地震力が作用した場合にどの程度の滑動が起きるか検討を行った。検討に用いた地震波は、模擬地震波No.2

(最大加速度 340 gal, 直下型, M 6.5を想定)、No.7 (同 407 gal, 遠地型, M 8.5を想定) および実地震波 Taft (同 147 gal, M 7.7) であり、最大加速度を、100 gal から 900 gal 付近まで 100 ~ 200

gal 刻みで段階的に増大させ、加速度の大きさによる土塊の滑動量の変化を調べた。

図-4には滑動解析により得られた加速度と土塊の滑動量の関係を示す。同図における加速度は、剛体ブロックモデルへの入力地震動の最大加速度 A_m を示しているが、最大加速度 A_m がブロックを滑らせる最小の加速度(降伏加速度 A_y)を越えると滑動が起きている。そして、どの地震動及びどのすべり線に関しても、降伏加速度を越えた直後では滑動量は小さく、その後徐々に滑動量が増大することがわかる。これらの結果は、土塊に滑動が起きたとしても、それが直接的に斜面構造物の崩壊には結び付かないことを示していると言える。

表-1 剛体ブロックモデルの諸定数

解析対象	ブロックの質量 M (ton)	付加質量 Ma (ton)	傾斜角 θ (deg.)	合粘着力 C _a (tonf)	内部摩擦角 ϕ_a (deg.)
モデルA	35200	-	12.2	1420	19.9
モデルB	902	168	9.2	0	33.6
モデルC	639	-	28.1	0	37.8
モデルD	2320	-	9.2	0	32.3

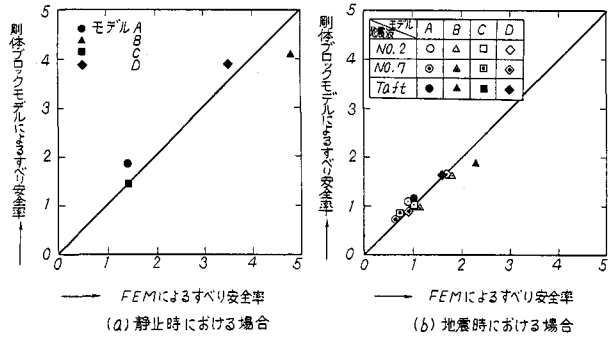


図-3 剛体ブロックモデルによる地震時すべり安全率

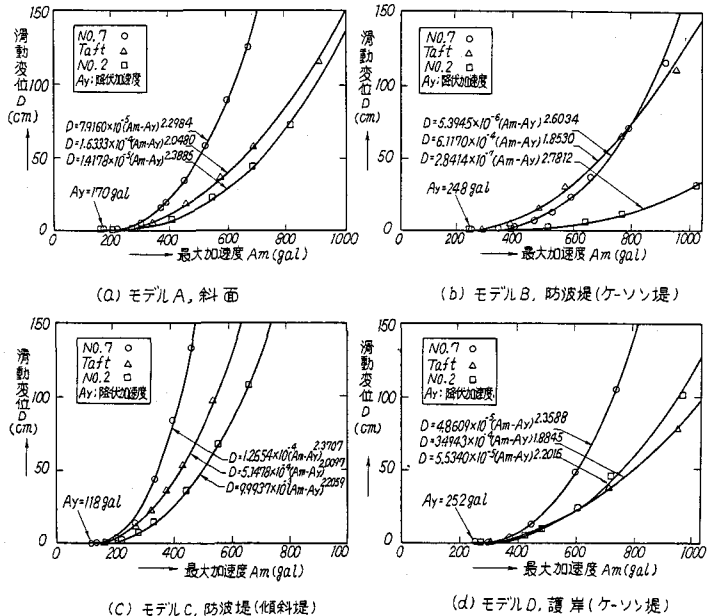


図-4 滑動解析の結果

(2) パルスを用いた解析

土塊の滑動量を簡略的に求める目的で、地震動の加速度波形を n 個の連続したパルスにモデル化した解析を行った。パルスの形状は、矩形、三角形および半正弦波形状の3種について検討した(図-5)。パルス数 n は、降伏加速度を越える波の数であるが、それらの内、加速度の超過分が最大加速度の超過分の20%に満たない波は除くことにし

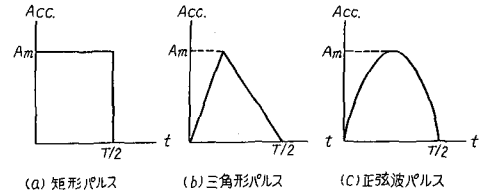
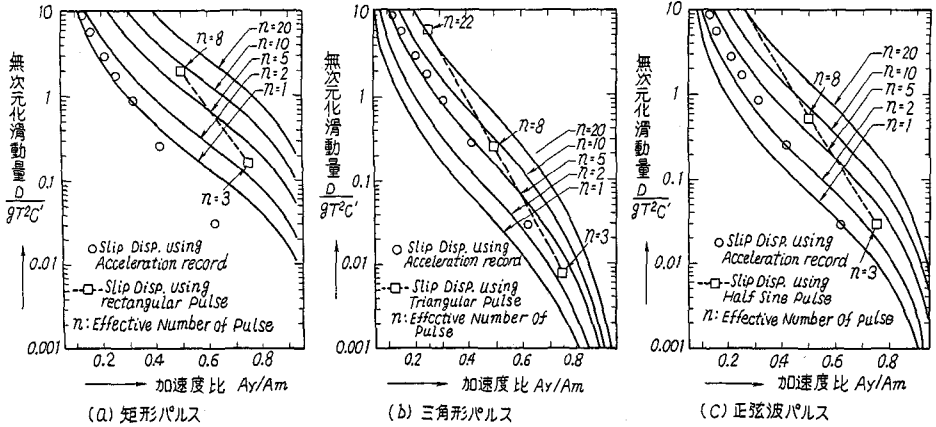


図-5 地震波の1つの波をモデル化したパルス

図-6には、加速度波形を n 個の連続したパルスにモデル化して求めた滑動量を示す。図中には、比較のために(2)で述べた地震波形から直接求めた滑動量も示してある。



同図では、図-6 パルスによる滑動量と地震波形から直接求めた滑動量との比較(斜面モデル, No. 2)地震波をパルスにモデル化したことによって滑動量の無次元化が可能になり、地震動の卓越周期と土塊の強度定数により無次元化された滑動量が、最大加速度と降伏加速度の比に対して示してある。これらの結果によれば、三角形パルスを用いることにより、地震波形から直接求めた滑動量を近似し得ると言える。これにより、任意の地震動に対しても、その諸特性と土塊の強度定数から、土塊の滑動量を簡略的に求めることができるものと考えられる。

4. 滑動量を指標とした地震動の有効値の評価

上記の滑動解析の結果に基づき地震動の有効値の評価を行い、地震時すべり安定性の検討に用いる震度の評価法についての検討を行った。

図-7は、滑動解析の結果に基づく破壊の概念図であるが、地震力を動的に作用させた場合と静的に作用させた場合との対比を示している。同図において、地震力を動的に作用させた場合には、加速度が降伏加速度を越えると滑動量が徐々に増大するが、わずかの滑動量を許容し得るものとする、ある加速度レベルまでは安定であると考えられる。一方、地震力を静的に作用させた場合には、加速度が降伏加速度に達した時点で斜面構造物は破壊に至ることになる。すなわち、地震力を静的な力として扱う場合には、構造物を破壊させる荷重の大きさに違いが生じると言える。

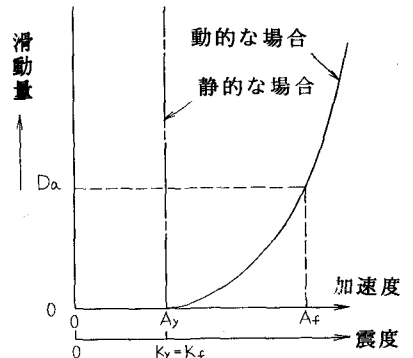


図-7 動的な場合と静的な場合の破壊の概念図

以上の考察から、動的地震力を等価な静的地震力に置換する1つの方法としては、動的な場合と静的な場合とで、構造物を破壊させる荷重の大きさを等価とすることが考えられると言えよう。ここでは、地震時すべり安定性の検討に用いる震度 k を、地震動の最大加速度 A_m に低減率 α を乗じた形で次式のように表わし、構造物を破壊させる加速度 A_t と静的解析において安定限界と考えられる降伏震度 k_y とが対応するよう震度

を定めることを試みた。

$$k = \alpha A_m / g \quad (3)$$

ここで、 g は重力加速度を示している。上式において、最大加速度 A_m に破壊加速度 A_f を、震度 k に降伏震度 $k_y (= A_y / g)$ を代入することにより、低減率 α が次のように表わされる。

$$\alpha = A_y / A_f \quad (4)$$

上式により低減率 α を求めるには、破壊加速度 A_f が必要となる。破壊加速度 A_f は、構造物の重要度、機能、周辺構造物への影響等に応じた許容滑動量を設定し、その許容滑動量を生じさせる加速度レベルとすることにする。

図-8には、仮りに、許容滑動量 D_a を1cm, 5cm, 20cmに設定して破壊加速度 A_f の評価を行い、(3)式を用いて低減率 α の評価を行った例を示す。ここで、破壊加速度 A_f の評価法は、図-8に示した三角形パルスによる滑動量曲線を用いて、許容滑動量 D_a に対応する加速度比 (A_y / A_f)を読み取るものである。地震動の有効値 A_e は、このようにして定めた低減率 α を地震動の最大加速度 A_m に乘ずることにより得られる。図-9には、許容滑動量として種々の値を設定し、模擬地震動No.2, No.7および実地震波Taftについて上で述べた方法により地震動の有効値の評価を行った例を示す。同図によれば、ごくわずかの滑動量(2, 3cm)を許容することによって、地震動の有効値は急激な減少を示し、以降ならかに減少する傾向にある。以上の検討の結果、本手法を用いることにより、斜面構造物の地震時すべり安定性の検討に用いる地震力を合理的に評価できることが示されたと言える。今後、模型実験等による滑動量評価手法の高精度化を図り、実設計への適用を図る考えである。

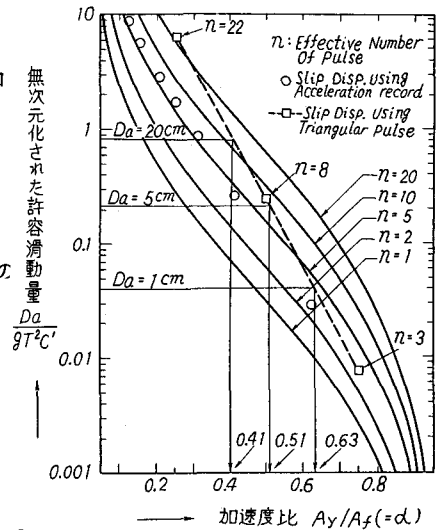


図-8 破壊加速度 A_f の評価例

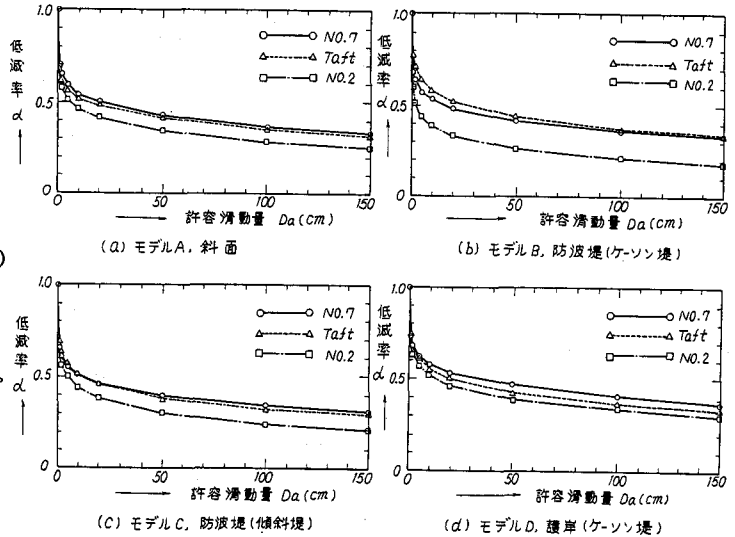


図-9 地震動の有効値の評価例

参考文献

- 1) 伯野元彦 他：地震加速度と構造物破壊の関係についての一つのシミュレーション，土木学会論文集，第34号，1984年4月。
- 2) Veletsos, A. S. and Newmark, N. M. : Effects of Elastic Behavior on the Response of Simple S systems to Earthquake Motions, Proc. 2nd WCEE, 1960.
- 3) Goodman, R. E. and Seed, H. B. : Earthquake-Induced Displacements in Sand Embankments, Proc. A SCE, SM2, Mar., 1966.
- 4) 渡辺啓行, 馬場恭平, 平田和太：フィルダムの動的解析に基づくすべり安定評価手法の一考察，電力中央研究所報告，No. 381020，昭和56年12月。
- 5) Seed, H. B. and Goodman, R. E. : Earthquake Stability of Slopes of Cohesionless Soils, Proc. A SCE, SM6, Nov., 1964.