

# ダム湖における地すべり段波の平面2次元解析

Two-Dimensional Analysis of Landslide-Surge on Dam Lake

水工事業本部 水工第1部  
共通事業本部 地質部

濱木 道大<sup>1)</sup>  
荒井 信行<sup>2)</sup>  
長瀬 眞央<sup>3)</sup>



1)



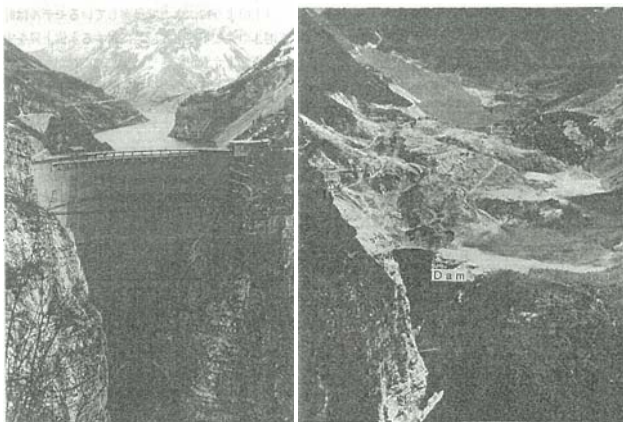
2)



3)

## 1. はじめに

ダム湖斜面で地すべりが発生し、貯水池内に大量の土砂や岩塊が突入した場合、貯水池には非常に大きな衝撃波(以下、段波とする)が発生する。発生した段波は貯水池内を同心円状に広がり、地すべり地点周辺のみならず、ダム湖の対岸や沢などにも入り込み広範囲にわたり影響をあたえる。1963年のバイオントダム(イタリア)の事例<sup>12)</sup>では、左岸の斜面が約1kmにわたり地すべりを起こし貯水池に突入した(写真-1)。これによって巨大な段波が発生し、ダム堤体を乗り越えて下流の集落などに多くの犠牲者がでる大惨事となった。この事例よりも、もっと小規模な地すべりであったとしても、沢などの狭窄部や橋脚などの構造物の周囲では、段波が集中することによって波高が増幅し、周辺に大きな被害をあたえる可能性がある。



左写真)災害前

右写真)災害後

写真-1 バイオントダムにおける段波被害例<sup>3)</sup>

このため、ダム湖周辺に親水公園などがあり、人々がかかわりが高いダム湖である場合、小規模な地すべりであったとしても十分に警戒する必要がある。また、あらかじめ地すべりが予想されている地点では、地すべりによる段波の発生状況と周辺への影響を予測し、十分な安全対策を講じる必要があると考える。

本稿では、実際に地すべりが予想されている地区について、地すべりにより貯水池内に段波が発生した場合の段波の発生状況と周辺への影響を数値解析により予測した。解析にあたっては、波の回折や波高の平面分布などを表現可能な平面2次元解析を用いた。これにより、地すべりに起因する段波に対して、事前に安全対策を検討することが可能となる。

## 2. 地すべり条件の設定

段波の平面2次元解析は、Aダムで実際に地すべりが予想されているB地区の地すべり(以下、B地区地すべりとする)について行った。B地区地すべりの状況を写真-2に示す。B地区地すべりは、平成14年12月下旬の貯水位の急低下時に発生した「崩壊性地すべり(岩盤すべり)」である。この地すべりは完全に崩れきっておらず、現在も不安定な状態のまま中段～上段のブロックが残存している。このため、今後水位の変動とともに地すべり移動体の不安定化が進行し、段波を伴うような崩壊につながる可能性が高い地区である。このB地区地すべりについて、移動体の規模と崩落後の地形(地盤線)を推定し、その突入速度について検討した。

(1) 地すべり移動体の体積(土量)

B 地区地すべりは、幅約 50m、奥行き約 120mの規模を有し、岩屑化した下部のAブロックと、移動体として残存する上部のB～Dブロックに区分される(Bブロックの一部も岩屑化)。B 地区地すべりの平面図を図-1 に示す。平成 14～15 年度にかけての動態観測では、融雪や貯水位変化に伴って変動速度が増加する傾向が観測されている。これらのことから、B 地区地すべりは崩落後も不安定な状態にあり、融雪や貯水位変化の影響で大規模な崩落につながる可能性があるかと推定できる。

また、段波の誘因となる「地すべり移動体(崩落土塊)」は、斜面の上部に残存するB～Dブロックであると推定できる。B 地区地すべりの状況から新たにすべり面を設定し、すべり面上の地すべり移動体が全て崩落すると仮定して、地すべり発生後の地盤線を推定した。

地すべり移動体の体積(崩落土量)は、設定したすべ

り面に沿ってB～Dブロック(図-1 の赤着色部)が崩落するものとして推定した。推定土量の算出結果を表-1 に示す。これによれば、地すべり移動体の体積(崩落土量)は、常時満水位時(以下、N.W.L 時とする)に約 31,000m<sup>3</sup>、サーチャージ水位時(以下、S.W.L 時とする)に約 23,000 m<sup>3</sup>である。



写真-2 B 地区地すべりの状況

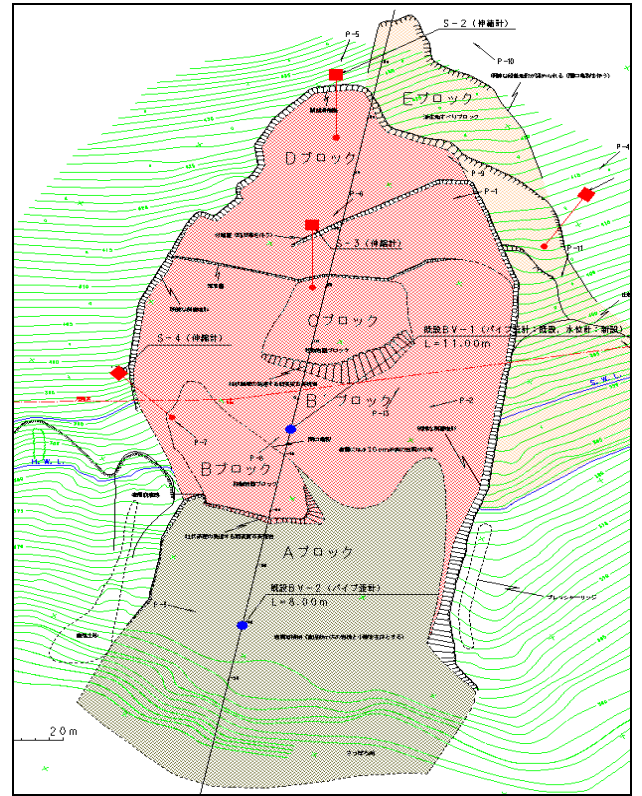


図-1 B 地区地すべりの平面図

表-1 崩落土量一覧

ブロック名	表面積 (m <sup>2</sup> )	平均層厚 (m)	概算土量(m <sup>3</sup> )			備考
			全体	NWL以上	SWL以上	
Aブロック	2,200	6	13,200	0	0	—
Bブロック(岩塊部)	290	11.5	3,340	1,670	0	滑動中(本検討の対象とする)。SWL時では水没するが、NWL時では約50%が水面上に露出する。
B'ブロック(岩屑部)	1,500	8.5	12,750	12,750	6,375	滑動中(本検討の対象とする)。SWL時では約50%が水没する。
Cブロック	300	18	5,400	5,400	5,400	滑動中(本検討の対象とする)
Dブロック	950	12	11,400	11,400	11,400	滑動中(本検討の対象とする)
Eブロック	960	5	4,800	4,800	4,600	B～Dブロックの崩落後に活動が活発化すると想定される
<b>想定崩落土量</b>	—	—	—	<b>31,220</b>	<b>23,175</b>	
総計	6,200	—	50,890	—	—	—

※表面積はプランメーターによる。Aブロックの水没部分の表面積は旧地形から推定した。Eブロックは脚部位置が不明なことからサーチャージ水位より上方斜面の土量についてのみ推定した。

## (2) 地すべり移動体の突入速度推定

地すべりを起因とした津波(段波)の発生事例の中で、発生時の移動速度(突入速度)が記録されているものは、1963年のバイオントダムにおける事例(25~30m/s程度)しかない。一般に津波を発生させるような斜面移動現象は、急激に発生し、短時間の間に崩落土塊が水中に突入してしまうことから、移動速度を観測することは困難である。また、すべり面上の摩擦抵抗や、ブロック同士の衝突なども加味して、正確な移動速度を予測することも困難である。

ここで、B地区地すべりは、比較的急勾配の斜面上に位置する「岩盤すべり」であることから、地すべりは急激な「崩壊」に至るものとし、貯水池への突入速度を予測する。最大突入速度は、空気抵抗を受けずに地すべり移動体が自由落下したと仮定すると、N.W.L時で最大約31m/s、S.W.L時で最大約28m/sとなる。崩落状況によっては、崩落途中にブロック同士の衝突等が起こり、先端速度がさらに加速される可能性もある。しかし、実際には地盤との摩擦によって減速することや、バイオントダムの事例と比較して地すべり規模が小さく、落下距離も比較的短いことを考慮すれば、これらの自由落下速度は危険側での最大値と判断できる。

以上から、本稿ではより危険な状況での段波を予測する目的で、地すべり移動体が自由落下に近い状態で瞬時に水面下に突入(突入速度は最大30m/s程度)し、それにより瞬間的に崩落土量と同体積の水塊が排除されたものと仮定して、数値解析を行った。

## 3. 基礎式及び数値解析法

本稿では、ダム貯水池における地すべりによる段波現象を取扱うため、2次元ST.VENANT浅水流方程式を基礎方程式とし、有限差分法であるMacCormack法<sup>4)</sup>を数値解析法として選定した。

### (1) ST.VENANT浅水流方程式

2次元ST.VENANT浅水流方程式は、3次元Navier-Stokes方程式から導かれ、以下のように保存系で表される。

質量保存則:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

x方向の運動量保存則:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = E_x \quad (2)$$

y方向の運動量保存則:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial y} = E_y \quad (3)$$

ここに、 $x, y$ は平面座標、 $t$ は時間、上式中の変数は、以下のように表される。

$$H = h(x, y, t) \quad (4)$$

$$U = u(x, y, t)h(x, y, t) \quad (5)$$

$$V = v(x, y, t)h(x, y, t) \quad (6)$$

$$F = u^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \quad (7)$$

$$G = uvh \quad (8)$$

$$S = v^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \quad (9)$$

また、 $E_x, E_y$ は以下のように表される。

$$E_x(x, y, t) = gH(S_{0x} - S_{fx}) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (10)$$

$$E_y(x, y, t) = gH(S_{0y} - S_{fy}) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (11)$$

ただし、上式中で、 $h$ は水深、 $u, v$ は $x, y$ 方向の水深平均流速、 $g$ は重力加速度、 $\varepsilon$ は渦動粘性係数、 $S_{0x}, S_{0y}$ は河床勾配であり、以下のように表される。

$$S_{0x} = -\frac{\partial Z_f}{\partial x} \quad (12)$$

$$S_{0y} = -\frac{\partial Z_f}{\partial y} \quad (13)$$

ここで、 $Z_f$ は河床高、 $S_{fx}, S_{fy}$ は河床の摩擦勾配であり、これをManning則により表すと、以下のように表される。

$$S_{fx} = \frac{n^2 U (U^2 + V^2)^{1/2}}{H^{10/3}} \quad (14)$$

$$S_{fy} = \frac{n^2 V (U^2 + V^2)^{1/2}}{H^{10/3}} \quad (15)$$

ただし、 $n$ はManning粗度係数である。

### (2) MacCormack差分スキーム

MacCormack差分スキームは、格子点上の値のみを使って差分式を記述し、簡単な前進・後進の差分法に基づいて解析を行うため解の鈍化が少ないという特徴をもっている。<sup>5)</sup>そのため、常流・射流が混在する急流河川の解析や、衝撃波を伴う段波解析等に有効な解析手法である。



### (3) 境界条件

境界条件は以下のように設定した。

#### 1) 水際の処理

湖面と斜面との水際では、段波は自由端反射するものとした。段波が斜面上に乗り上げ、遡上していく過程は考慮しないものとした。

#### 2) ダム湖上下流からの流入流出

河川水のダム湖上流側(沢など)からの流入、ダム湖下流側への放流などは考慮しないものとした。湖面が境界条件となる場合には、段波は反射せずに通すものとした。

## 4. 段波の平面2次元解析

ここでは、「2.地すべり条件の設定」の条件をもとに、地すべりにより発生する段波の波の伝わり方と高さ及び影響範囲を、数値解析により推定した。想定する地すべり発生時の水位は、N.W.L時とし、B地区の周囲約2km四方の範囲について解析を行った。

### (1) 地盤データの設定

地すべり移動体が崩落した直後に段波が発生すると想定し、解析に用いる地盤データは以下のように設定した。まず、B地区の周囲約2km四方の範囲について、10m×10mのメッシュデータを計測した。そこに「2.地すべり条件の設定」で設定したすべり面をもとに、地すべり後の地盤線を反映し、解析に用いる初期地盤データとして設定した。地すべり後の地盤コンター図を図-2に示す。

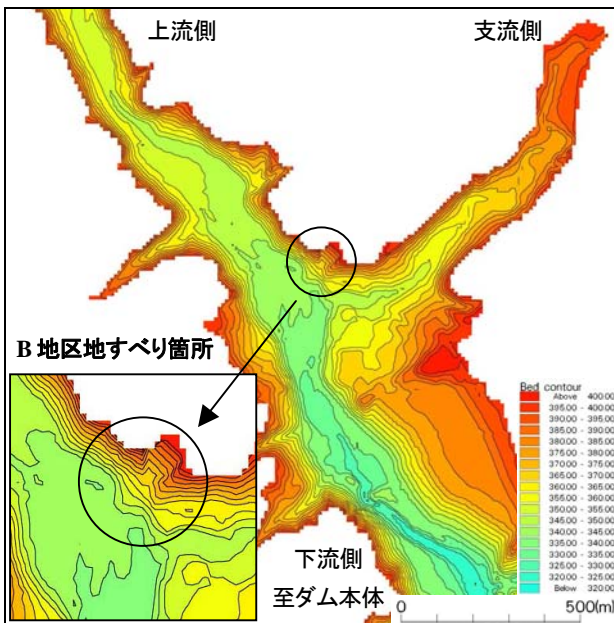


図-2 地盤高コンター図(地すべり後想定地盤)

### (2) 初期段波の設定

地すべりによる初期段波の波高については、より危険な状況での段波を予測する目的で、地すべり移動体Xが自由落下に近い状態で瞬時に水面下に突入(突入速度は最大30m/s程度)し、それにより瞬間的にXと同体積の水柱Yを初期段波として設定した。初期段波の設定方法を図-3に示す。初期段波の波高については、地すべり地点の形状や移動体の高さなどを考慮して設定した。初期水位はN.W.L時で設定した。計算条件一覧表を表-2に示す。

### (3) 計算結果

計算ケース1によるAダムB地区地すべりの段波解析結果を以下に示す。波高変化コンター図を図-5に示す。

これらによると、N.W.L時に発生した段波は地すべり地点を中心としてリング状に伝播し、約15秒で対岸に到達(対岸での最大波高は約3.0m)する。約30秒を過ぎたあたりからリング状の波形が崩れ、岸辺の水深の浅いところを回折するように伝播する。下流左岸の親水区域には、約40秒後から60秒後にかけて、0.5~1.0mの波が到達する。左岸の沢へは、地すべり地点より800m上流まで、約70秒かけて約0.5mの波が到達する。

解析結果から、発生する段波は津波のように波長の長い波(半波長で100m程度)となっていることがわかる。解析では段波の遡上現象は考慮していないが、津波同様に波高の2倍程度の高さまで斜面を遡上する<sup>9)</sup>と仮定し、解析中の各地点の最大波高から段波の影響範囲図を図-6に示すように作成した。これらの資料から、地すべりによる段波に対する危険区域を判定し、事前に安全対策を検討する上での基礎資料とした。

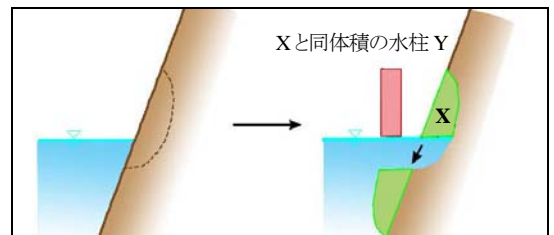


図-3 初期段波の設定方法

表-2 計算条件一覧表

計算条件	計算ケース1
地すべり発生時の水位	H.W.L時(常時満水位)
地すべり移動体の体積	31,220m <sup>3</sup>
初期段波設定方法	移動体と同体積の水柱を仮定
初期段波の波高	34.69m
初期段波のメッシュ数	9メッシュ(900m <sup>2</sup> )
地盤形状(図2参照)	地すべり後(約2km四方)

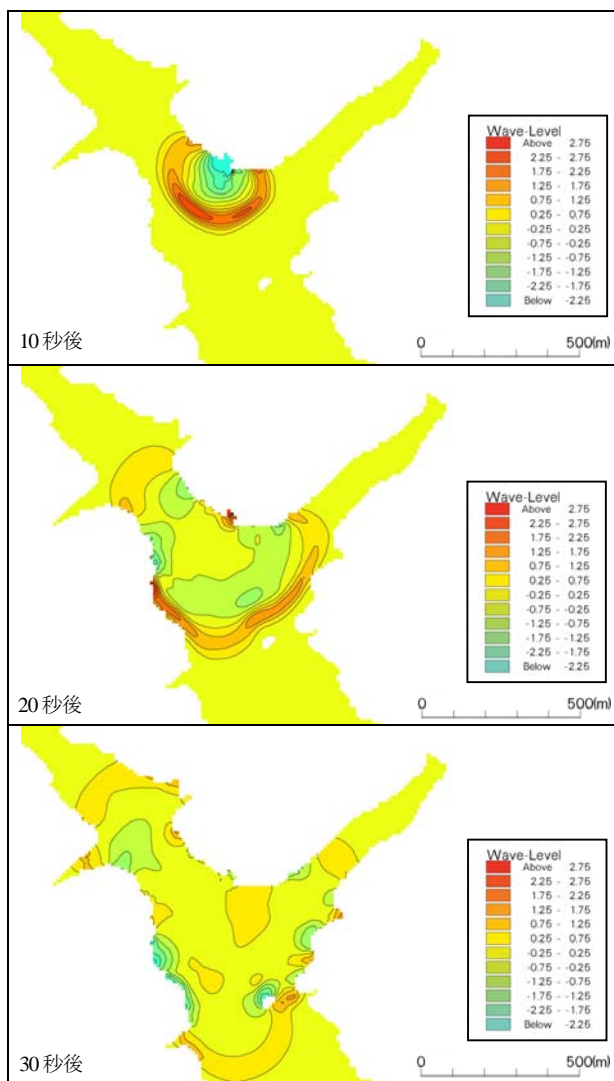


図-4 波高変化コンター図(段波の半波長は 100m 程度)

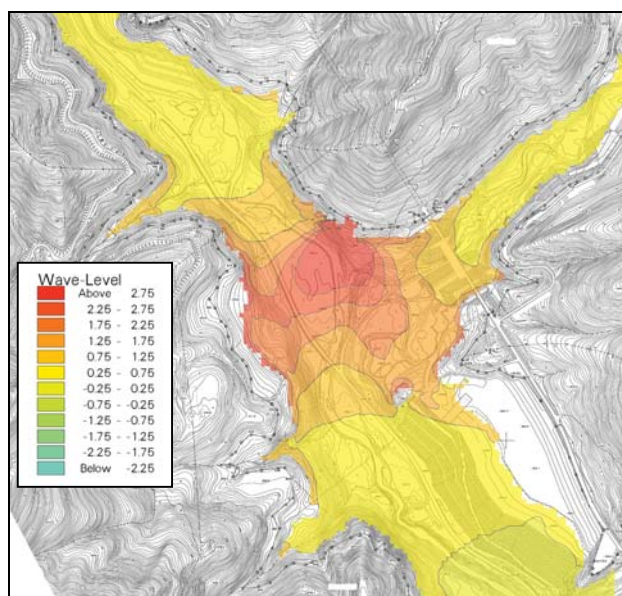


図-5 段波の影響範囲図(この図を元に危険区域を判断する)

## 5. まとめ

本稿では、実際に地すべりが予想されている地区について、地すべりにより貯水池内に段波が発生した場合、その段波の発生状況と周辺への影響を数値解析により予測した。解析にあたっては、平面 2 次元解析を用いることによって、波の回折や波高の平面分布などを表現し、影響範囲を平面的に予測した。これにより、地すべりによる段波に対して、事前に安全対策を詳細に検討することが可能となった。

今後の課題としては、地すべり移動体が貯水池内へ突入する際の突入速度と波の発生の関係を明らかにし、初期段波設定の精度を向上させる必要がある。さらに、水際の境界条件を移動境界に対応させ、段波の遡上現象を高精度に予測することが必要である。また、本解析手法はダム湖のみならず、一般の湖沼や湾などへの適用も可能な手法であるので、今後応用範囲を広げていきたいと考えている。

最後に、検討にあたってご助言をいただいた関係各位に深く謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 相田勇:山崩れによる津波, 海洋科学, vol9, pp.103-110, 1982
- 2) 道上正規ほか:貯水池内での土砂流入に伴う水面波に関する実験的研究, 鳥取大学工学部研究報告, 第27巻, pp.105-112, 1996
- 3) 道上正規:貯水池内での大崩壊に伴う水位変動について, ダム技術, No.105, pp.4-11, 1995
- 4) R.Garcia,RA.Kahawita : Numerical solution of the MacCormack finite-difference scheme, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.6, pp.259-274, 1986
- 5) (社)砂防学会編:山地河川における河床変動の数値計算法, pp55, 2000.9
- 6) 石垣島地方防災連絡会:津波防災マニュアル別冊, 沖縄県石垣市HPより