

岩盤構造物の性能評価における課題

— 静的震度法による不連続性岩盤斜面の動的安定性評価について —

亀村勝美

深田地質研究所

Some Issues on the Performance Evaluation of Rock Structures

— Dynamic Stability Evaluation of Discontinuous Rock Slopes by the Seismic Intensity Method —

KAMEMURA Katsumi

Fukada Geological Institute

要旨：不連続性岩盤斜面の動的安定性評価手法は、連続体として評価できる土質斜面と異なり未だ確立されていない。そこで評価手法確立における課題を明確にすべく、金属棒ブロックでモデル化した不連続性岩盤斜面の動的試験を行うとともに、その結果に対し様々な解析手法により評価を行い、それらの適用性について議論してきた。評価手法の内、静的震度を用いた極限平衡法は不安定となる可能性のあるブロックが設定されれば解析は容易であるものの、得られた限界震度と実際の動的加速度との乖離が大きく、そのままでは動的安定性の評価に用いることはできない。

これに対し、港湾施設の重力式護岸や盛土などにおいては被災事例に基づいた研究がなされ、静的震度と動的加速度との関係を考慮した耐震解析手法が示されている。ここではそうした研究の結果を、不連続性岩盤斜面を対象とした試験結果や静的震度法による評価結果と比較し、静的解析における震度の評価法について考察する。

キーワード：不連続性岩盤、動的安定性、静的震度法、模型斜面、加振実験

Abstract: Unlike soil slopes, methods for evaluating the dynamic stability of discontinuous rock slopes have not yet been established. In order to clarify the issues in establishing the evaluation method, dynamic tests on a discontinuous rock slope modeled with metal bar blocks were conducted. The results were evaluated using various analytical methods, and the applicability of those methods has been discussed. Among the evaluation methods, the limit equilibrium method using static seismic intensity can easily analyze once a block that may be unstable can be assumed. However, the deviation between the obtained limit seismic intensity and the actual dynamic acceleration is too large for it to be used for dynamic stability evaluation as it is.

On the other hand, studies have been conducted on gravity-type seawalls in ports and embankment facilities based on damage cases, and seismic analysis methods considering the relationship between static seismic intensity and dynamic acceleration have been presented. In this paper, the results of such studies are compared with the results of tests on discontinuous rock slopes and the results of evaluation using the static seismic intensity method, and the evaluation method of seismic intensity in static analysis is discussed.

Keywords: discontinuous rock slope, dynamic stability, static seismic intensity method, model slope, vibration test

1. はじめに

地震国である我が国においては、社会インフラを構成する様々な構造物の耐震性をいかに確保するかは重要な課題であり、これまで多くの関係機関において被災事例に基づいた研究がなされ、その成果に基づいて耐震性評価法が示されてきた。しかしその内容を見てみると構造物の種類によって考え方、検討手法に違いがあり、耐震性評価は未だその確立に向けた検討段階にあると考えられる。

様々な構造物の中でもその力学特性が明確な鋼構造物などとは異なり、山岳トンネルや岩盤斜面などの岩盤構造物は、岩盤特有の不連続性、不均質性に起因する非線形性が著しく、岩盤構造物の地震時挙動に及ぼす影響の評価を難しくしている。結果として岩盤構造物の耐震性評価法は未だ確立されたとは言いがたい状況にある。

不連続性岩盤斜面の動的安定性評価については深田地質研究所年報において静的震度法の基本的な考え方を示すとともに、土木学会岩盤力学委員会「岩盤動力学に関する研究小委員会」斜面耐震WG（以下、斜面耐震WG）が実施した金属六角棒を用いた模型斜面の加振実験結果に対する静的震度法による評価における問題点を明らかにした（亀村，2021）。

斜面耐震WGではさらに議論を深めるために1G場での試験に引き続き遠心力载荷試験機を用いた25Gと50G場での実験を行っている（納谷ら，2022）。亀村（2023）ではその概要を紹介するとともに

試験結果に対する各種数値解析法による評価結果を示し、その適用性について検討した。そして明らかにされた多くの解決すべき課題を踏まえたうえで、不連続性岩盤斜面の動的安定性を評価するための基本的なフローを示した。

このフローにおいては岩盤斜面の地質情報に基づく最初の安定性評価手法として静的震度法を用いることを考えているが、その適用に当たっては得られた限界震度の評価が大きな課題となっている。そこで構造物の動的安定性評価における静的震度法の適用性に関する様々な機関における研究事例を調査し、岩盤斜面の動的安定性評価手法における静的震度法の適用性について検討を行った。

2. 不連続性岩盤斜面模型の加振実験と静的震度法による評価

斜面耐震WGでは、不連続性岩盤の動的安定性の評価に関する様々な課題を明らかにするとともに、この分野の研究の方向性を示すことを目的に模型実験を行い、その結果に対する様々な解析手法の適用性について議論してきた。

この内模型実験については、1G場での加振実験を亀村（2021）で、遠心力载荷試験機を

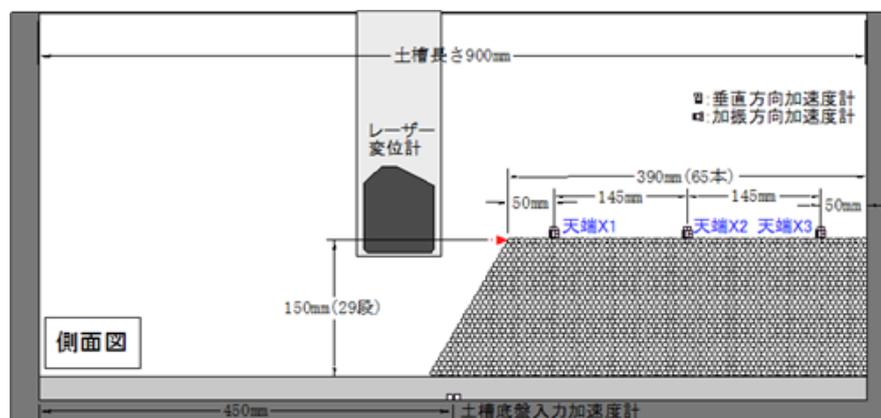


図1 斜面模型：高さ150mm（亀村，2022）。

用いた 25G と 50G 場での実験を亀村 (2022) で紹介した。以下に遠心力載荷加振実験についてその概要を示す。

実験は、金属六角棒 (対辺長 6mm) を 150mm の高さに積み上げた図 1 に示す斜面模型を遠心力載荷試験装置に載せ、25G 条件で 50Hz、50G 条件で 100Hz の加振を行った。それぞれの試験は 1m/sec^2 程度の微小加速度からスタートし、Step ごとに徐々に加速度を上昇させ完全に崩壊が生じるまで行った。

25G の試験の場合、Step12 で斜面前方への加速度が最大で 294.1m/sec^2 になった時点で

表 1 25G Step12 入力水平加速度値 (斜面前方方向)。

波数	時刻 (sec)	加速度 (m/sec^2)	
1	0.0332	10.6	前波
2	0.0534	38.4	
3	0.0736	99.6	
4	0.0927	228.2	本波
5	0.1122	270.3	
6	0.1330	268.3	
7	0.1526	282.1	
8	0.1731	282.0	
9	0.1929	256.3	
10	0.2131	274.5	
11	0.2332	294.1	
12	0.2531	285.9	
13	0.2734	293.1	
14	0.2934	237.3	後波
15	0.3119	143.9	
16	0.3308	39.1	

肩部の崩壊が生じ、次の Step13, 14 では崩壊領域が拡大していく状況が確認できた。25G, Step12 の入力水平加速度を図 2 に、各波数における斜面前方方向への加速度値を表 1 に、そして斜面表層の状況を写真 1 に示す。

崩壊に至るブロックの挙動は、次のようになっている。

3 波目 (99.6m/sec^2) : 法肩部で応答が大きくなりブロック間に隙間が生じ始める。

4 波目 (228.2m/sec^2) : 斜面表層の 7 段目くらいまでが転倒モードで前方へ変位する (写真 1 (a)) が、次の後方への架台の動きで多少遅れながらも元へ戻る。

5 波目 (270.3m/sec^2) : 5 波目になると斜面表層から 3 層までの 7 段目くらいまでのブロックが転倒モードで変位するが戻る (写真 1 (b))。

6 波目 (268.3m/sec^2) : 5 波目と同じ動き。

7 波目 (282.1m/sec^2) : 表層から 3 層までは同じ動きを示す。これに加え表層から 6 層、9 層の深部においても 60° のすべり面に沿った分離面が明確になる。

8 波目 (282.0m/sec^2) : 頂部の 1 ブロックが転落する (写真 1 (c))。

9 波目 (256.3m/sec^2) : 2 段目のブロックが転落。

11 波目 (294.1m/sec^2) : 3 段目のブロックが転落 (写真 1 (d))。

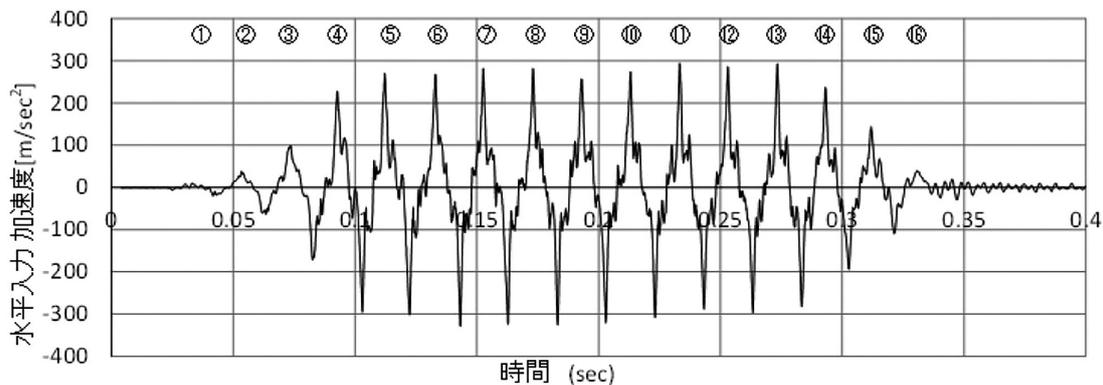
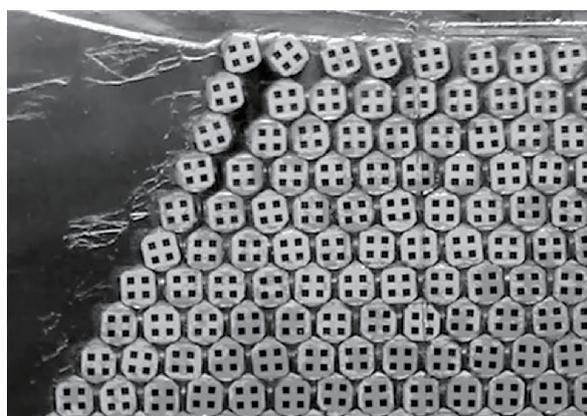
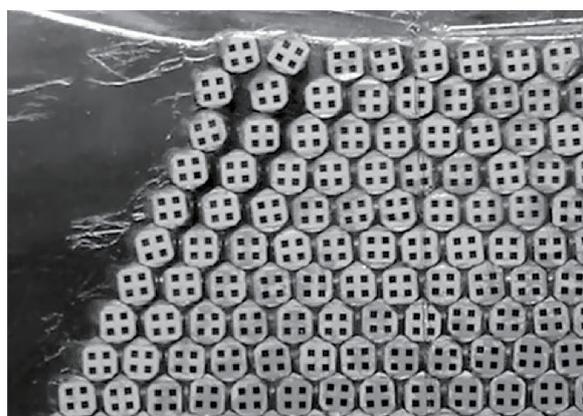


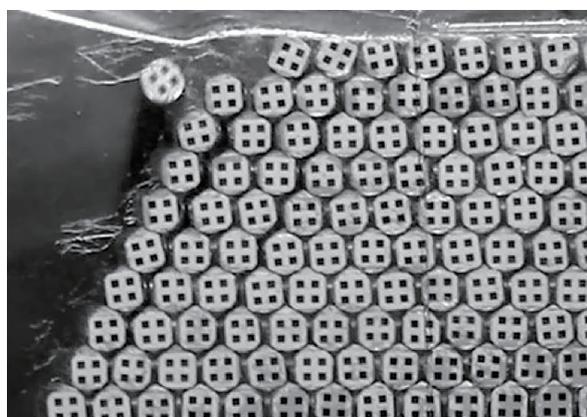
図 2 25G Step12 崩壊開始時の入力水平加速度波形 (亀村, 2022)。



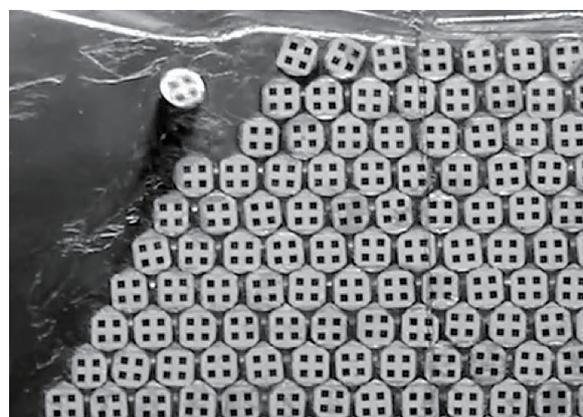
(a) 4 波目 $\alpha_{max} = 228.2 \text{ m/sec}^2$ の作用後



(b) 5 波目 $\alpha_{max} = 270.3 \text{ m/sec}^2$ の作用後



(c) 8 波目 $\alpha_{max} = 282.0 \text{ m/sec}^2$ の作用後



(d) 11 波目 $\alpha_{max} = 294.1 \text{ m/sec}^2$ の作用後

写真 1 25G 場 Step12 における崩壊状況 (亀村, 2022).

このようにして層の上から3段目までのブロックが崩落して加振は終了する。そして次の Step13 では、前波に続く4波目で斜面後方方向への入力加速度が 353.8 m/sec^2 に達した段階でブロックの崩壊が生じ始め、その範囲は斜面下方と後方へと順次拡大して行く。

このように25G場での崩壊は、すべり面に沿うすべりではなく、すべり面で分離したブロック柱の転倒モードからの個々のブロックの崩落と考えることができる。

以上の25G場での実験結果とともに、これまでに実施された模型実験の内、斜面高さが15cmのケースの結果を併せて表2に示す。ここで斜面高さが30cmの結果を除外したのは、亀村(2021)

表2 模型実験(斜面高さ15cm)による斜面崩壊時水平震度。

重力場(G)		1	25	50
加振周波数(Hz)		10	50	100
崩壊時	波数	6	8	9
	加速度(m/sec^2)	12.5	282.0	328.5
	水平震度	1.28	1.15	0.67
応答の相関変化時	波数	3	4	6
	加速度(m/sec^2)	8.83	228.2	256.3
	水平震度	0.90	0.93	0.52
静的震度法による極限震度			0.58	

で示したように破壊時の変形モードが異なるためである。

表2における「応答の相関変化時」とは、亀村(2021)で検討したように具体的な斜面崩壊が生じる以前に入力加速度と崩壊に至るブロックの加

速度の相関が明らかに変化する時点、すなわち斜面構造の動的特性が変化した時点を示している。

このように 50G のケース以外では、崩壊現象に至る加速度は静的震度法で求められる限界震度 0.58 を大きく上回っており、このままでは耐震性評価に用いることはできない。一方で静的震度法の簡便さは捨てがたいものがあり、静的震度法で求められる限界震度の評価法を明らかにできればその適用性は広い。

3. 静的震度法による限界震度と加速度の関係

これまで様々な構造物の耐震性評価手法として用いられてきた静的震度法の適用性については、被災事例や数値解析手法により検討されてきている。

亀村 (2021) では港湾構造物の重力式岸壁の被害事例に基づく静的震度と地盤加速度の関係の検討事例を紹介した。そこでは実際に被災した重

力式岸壁に作用した地盤加速度を推定し、それと静的震度法による設計法から求められる被災時の作用震度を比較し、図 3 のような関係が示されている。

そして静的震度と地盤加速度との関係について野田ら (1975) は、次のような式を結論として示している。

$$k_h = \frac{1}{3} \left(\frac{\alpha}{g} \right)^{\frac{1}{3}}$$

ここに k_h : 静的震度

α : 地盤加速度 (cm/sec²)

g : 重力加速度 (cm/sec²)

である。

この結果は検討対象とした被災データのすべてを対象としたもので、多くの仮定に基づくものも含まれているため、同時に震度 = (0.35 ~ 0.85) α/g という関係 (図中点線) も示している。

ここで野田らが評価対象としている被災データについて見直しを行う。野田らの検討において対

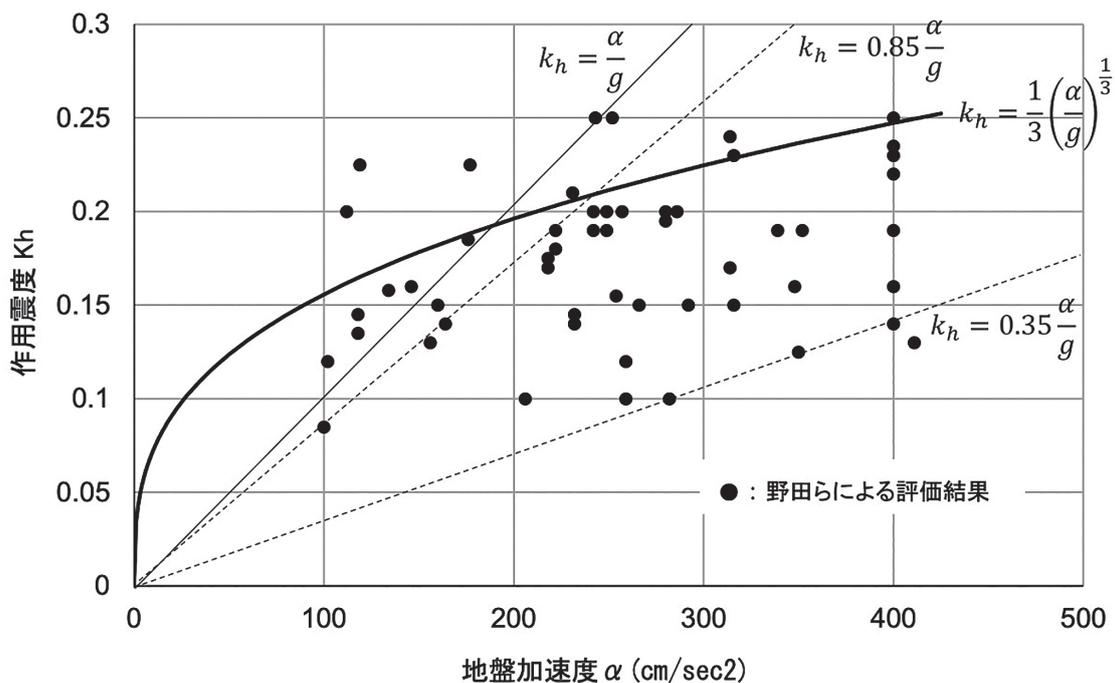


図 3 作用震度と地盤加速度の関係 (野田ら, 1975 による)。

表3 被害程度の分類.

被害程度	はらみ出し(cm)	沈下(cm)
大被害	200<	100<
中被害	100-200	50-100
小被害	<100	<50

表4 被害程度と地盤加速度の関係.

被害程度	震度				計
	5弱	5強	6弱	6強	
	地盤加速度(cm/sec ²)				
	~91	91-165	165-294	294-526	
大	0	1	3	8	12
中	0	2	4	0	6
小	0	8	19	8	35
計	0	11	26	16	53

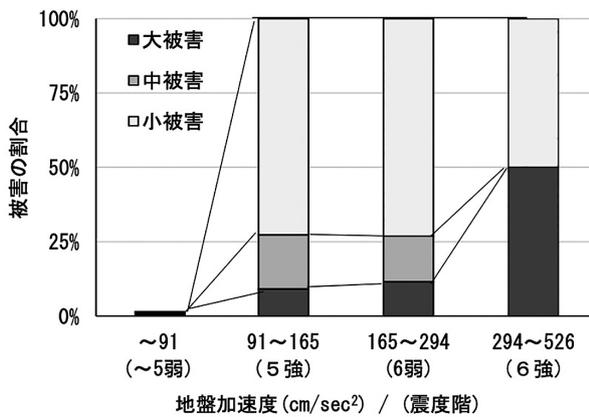


図4 地盤加速度と被害程度の関係.

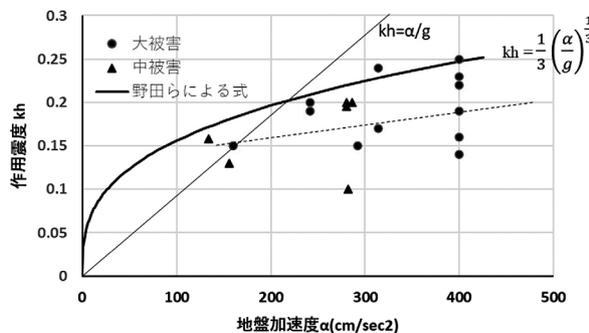


図5 大, 中被害に対する作用震度と地盤加速度の関係.

象としている重力式岸壁の地震被害程度は、表3に示す基準で分類されており、図3には大被害から小被害までのすべてが含まれている。野田らが示す小被害の内容を詳細に見ていくと、エプロンのクラックや沈下など、岸壁本体にとってほとんど無被害とみなされるものも含まれている。

こうした事例では実際の作用震度に対し被害ありで逆算した震度が過大に評価されている可能性がある。そこで被害程度と加速度の関係を見るために、気象庁震度階級に対応する地盤加速度で野田らが検討対象とした53の被災事例の検討結果を分類してみると表4のようになる。

この表から加速度に対する地震被害程度の割合を示すと図4が得られる。このように加速度の増加とともに大被害の割合が増加しており、データ数は少ないものの被害程度と加速度との関係は明瞭である。このような関係は、地震リスク評価で用いられる損傷度曲線（ fragility curve ）に対応するもので、岸壁構造の耐震性を表している。

そこで図3から小被害のデータを省略し、作用震度と地盤加速度の関係を大被害、中被害を対象として書き直してみると図5のようになる。図3と比べるとばらつきは残るものの作用震度と地盤加速度の関係はより明瞭に示されている。

このように剛体的な挙動をすると考えられる構造物の動的安定性を静的震度法によって評価した場合、求められた限界震度に対応する最大加速度で実際に破壊が生じることは少なく、それよりかなり大きな地震動まで耐えることができることが判る。ただし図に見るように被災データに基づく評価結果は広く分布しており、静的震度と動的加速度の関係を明確に示すことは難しい。

そこで静的震度と加速度の関係性に関する同様の研究について調査した。

4. 連続体を対象とした検討事例

渡辺ら (1981) は、多くの事例研究や模型実験をもとにフィルダムの地震時安定解析を行い、動的解析手法による地震時すべり安定評価手法を提案している。そして結論として次式で定義される等価瞬間震度 k_{HorV} を導入し、「この等価瞬間震度の時刻歴がすべり線の安全率の時刻歴と良い相関があり、等価瞬間震度が最大となる時刻で安全率が最小となることを見出した」と述べている。

ここに

k_{HorV} = (潜在すべり円弧上の土塊に作用する
応答加速度から求められる各瞬間の合計
慣性力が等しくなる平均加速度) / 重力加
速度

であり、すべり土塊の面積を C 、座標 (x, y) での密度を ρ 、ある時間における加速度を α 、重力加速度を g とすると、

$$k_{HorV} = \frac{\iint_C \rho(x, y) \alpha(x, y) dx dy}{g \iint_C \rho(x, y) dx dy}$$

と表すことができる。

鳥居ら (2001) は、この等価瞬間震度を用いて盛土構造物の動的有限要素法解析を行い、地震時の地表面最大加速度と設計に用いる静的水平震度の関係について検討している。検討対象とした盛土は高さ 10, 20, 40 m の 3 種類で、解析に用いる地盤定数は、砂～砂質粘土相当の一般的な値を用いている。応力ひずみ関係に双曲線型の非線形履歴ループを、破壊基準にはモール・クーロンの破壊基準を用いている。

解析は土質定数を変化させた 13 ケースについて海洋型地震動と直下型地震動の 2 種類の地震波を作用させ行っている。その結果得られた静的震度法により求められた限界水平震度と限界入力最大加速度 (動的解析ですべり安全率が 1.0 となる

ときの入力加速度) の関係の内、直下型地震によるものを図 6 に示す。図には鳥居らが解析結果とともに紹介している兵庫県南部地震における道路盛土と鉄道擁壁の被災例の評価結果、次に紹介する松尾ら (1984) による評価結果も併せて示した。鳥居らは、これらの結果を得て、

- 海洋型地震動と直下型地震動ともに地表面最大加速度が 500 gal 以下の場合には野田らの式が適用できる
- 500 gal 以上の直下型地震においては、限界水平震度は野田らの式よりも大きく、水平震度は地表面加速度の震度換算値の 1/2 ～ 2/3 程度となる

と考察している。

一方、松尾ら (1984) は自然斜面や堤防など連続体として評価できる土構造物の破壊事例と非破壊事例を収集し解析するとともに、その地点における地震動記録の収集と解析を行い静的震度と地震動との関係の評価している。破壊事例、非破壊事例については、静的震度法である円弧すべり面法を用いて各被災事例に対応する震度を逆算している。また地震動については、被害を生じた地震と過去にその近辺で発生した同程度の地震の加速度記録を分析し、距離減衰式を導いたうえで、解析対象地点の最大加速度を推定している。

求められた 27 地点の推定最大加速度と逆算震度の関係を図 6 に示す。松尾ら (1984) はこの結果を得て次のような考察を行っている。

「本論文の河川堤防や斜面については円弧すべり面法を用いて逆算震度を算出しているのに対し、野田らの重力式岸壁の場合には滑動、支持力、転倒に関してそれぞれ規定されている設計法、すなわち、地震時に作用する外力として Coulomb の地震時主働土圧を用いて、岸壁底面でのすべりと転倒に関する安定計算を、また、支持力に関し

では、同様の土圧を考慮した円弧すべり面法で安定計算を行っている。しかし、それにもかかわらず、図をみると、堤防、斜面の逆算震度と重力式岸壁に関するそれらの値に有意な傾向の差が認められない。野田らが示した上限の関係式が堤防、斜面の逆算震度もほぼ包絡していることは興味深い。」

この考察は、松尾らの検討結果と野田らの示す近似式を比較して行ったものであり、図6に示すように地盤加速度が400 cm/sec²までの事例を対象としている。したがって今回の金属棒模型斜面の実験結果や鳥居らの数値解析による400 cm/sec²を上回るような加速度に対応する結果も併せてみると、鳥居らが指摘するように野田らの示す

加速度の増加に対する震度が急激に小さくなるような「べき関数」ではなく、幅はあるものの直線での近似の方が全体的な傾向に合っていると思われる。実際、図6に示したデータについて直線近似を行うと、

$$k_h = 0.62 \frac{\alpha}{g}$$

が得られ、鳥居らの指摘(1/2 ~ 2/3)と矛盾しない関係式が得られる。

このように、不連続性岩盤を模擬した金属棒模型斜面の実験結果、非線形性を考慮した連続体解析で評価された結果、剛体ですべりや転倒などのモードを考慮した解析で評価された結果は、対象とする構造物、その構成材料、安定性を評価す

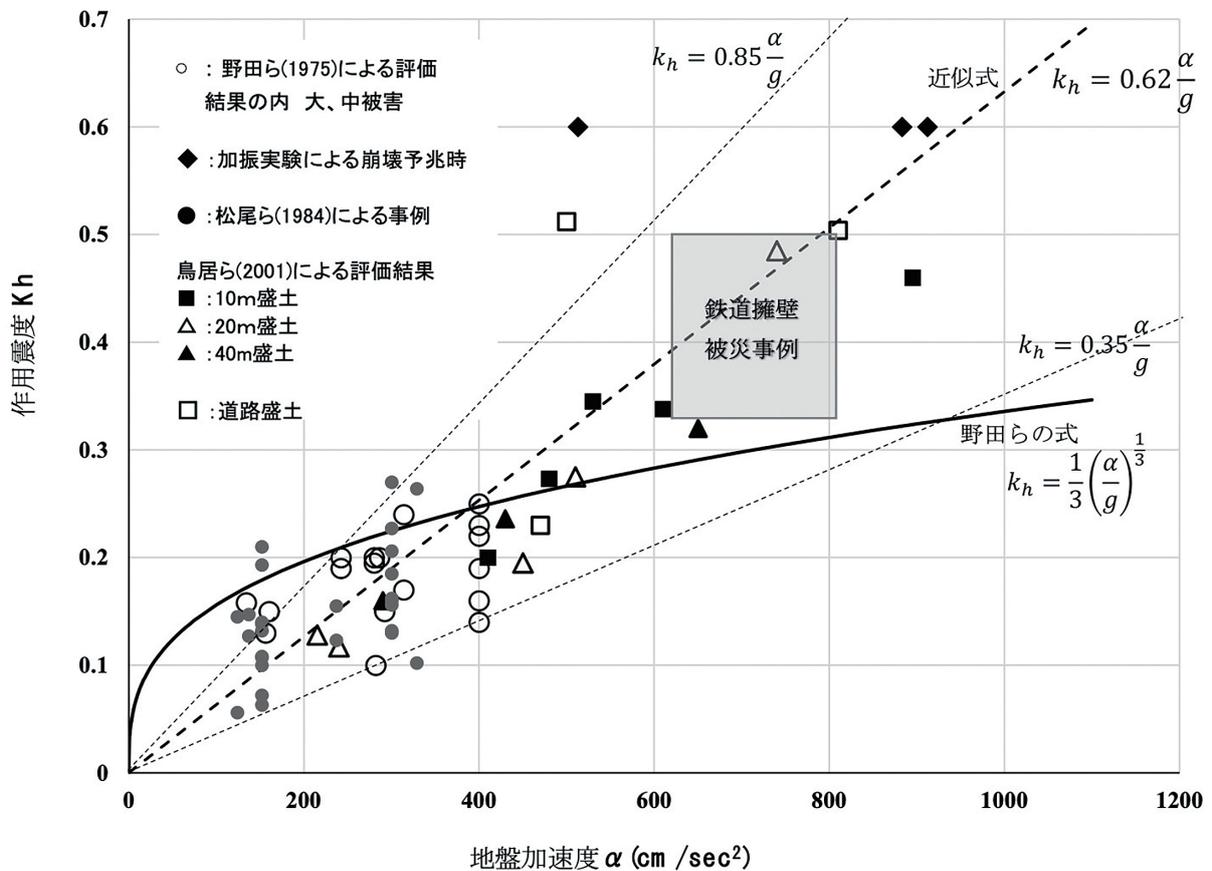


図6 静的震度法により評価された限界震度と動的加速度の関係。

る静的震度法や数値解析法などがバラバラであるにもかかわらず、結果として得られた静的震度と最大加速度との関係は同じ傾向を示しており、静的震度法による限界水平震度と動的加速度には有意な関係があることが推定される。

次の課題は、以上示してきたような静的震度法による限界震度と加速度との関係を設計法としていかに具体的な形とするかである。このためには、さらに詳細な検討を重ねる必要がある。

5. おわりに

港湾構造物に関する基準（日本港湾協会，2007）は、港湾施設の耐震性照査に用いる解析法と地震動について詳細に述べている。その中に地震動に起因する様々な構造物の変形の周波数特性、地震動の継続時間と許容される変形量を考慮した新しい震度法がある。例として重力式係船岸における震度算出法の流れを図7に示す。この検討フローの中で注目すべき点は以下のとおりである。

①周波数特性を考慮したフィルターの設定：

このフィルターは、様々な地質、構造条件の岸壁モデルに対して複数の正弦波による応答解析を行い、地震動の周波数成分の岸壁変形への影響度を評価したものである。これにより残留変形にあまり寄与しない1 Hz以上の成分を減衰させることができる。

このフィルターの設定において岸壁周辺地盤の固有周期が用いられているが、岸壁の場合、地盤を構成する地層の層厚とそのせん断波速度によって求めることができる。

②時刻歴による低減率の算定：

地震動の構造物への影響は、加速度の大きさ、周波数と継続時間によって決まる。この基準では上述した多くの岸壁モデルの

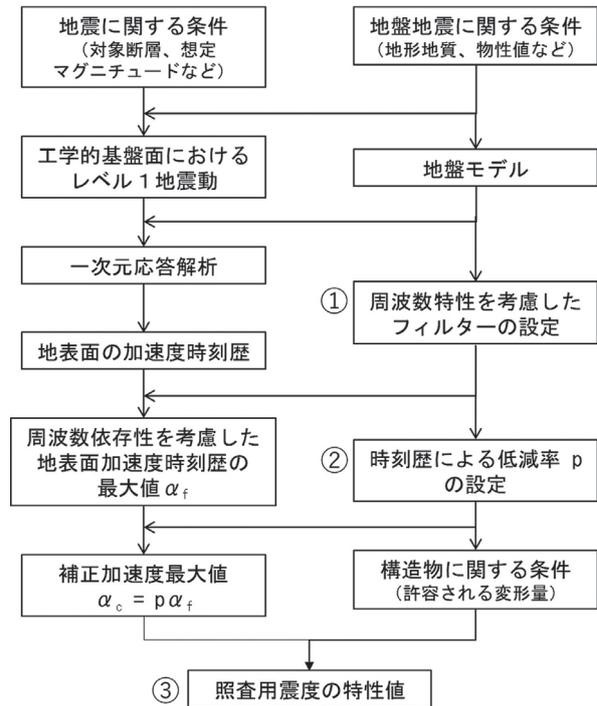


図7 港湾構造物における照査用震度の設定フロー。
 日本港湾協会（2007）に基づいて作成。

数値解析結果を統計的に評価して、フィルター処理された後の加速度に対する低減率の式を導いている。

③照査用震度の特性値：

最終的な性能照査用の震度は、補正加速度最大値 α_c と岸壁の許容変形量から求められる。ここにおいても多くの数値解析結果を基に統計的に導かれた関係式が用いられている。

この基準には、様々な港湾構造物に対する同様の照査用震度の設定法が示されている。

こうした静的震度の設定法は、港湾構造物に関する多くの被災事例があることと、非線形性を考慮した数値解析手法を用いて様々な構造条件、地盤条件、動的外力条件の組合せの下で検討ができることで初めて可能となると考えられる。したがって同様の考えを亀裂性岩盤斜面に対する静的震度の算定に適用することは簡単ではない。それ

は以下のような理由による。

まず上述①に関しては、不連続性岩盤構造物の周波数特性や固有値を計測あるいは算定する手法が確立されていないことが挙げられる。

②に関しては、不連続体で構成される構造物の動的解析手法としてDEM (Distinct Element Method: 個別要素法) や DDA (Discontinuous Deformation Analysis: 不連続変形法) などがあり、こうした解析手法によって不連続体の動的挙動のシミュレーション、すなわち不連続体としての挙動が既知である場合にその挙動のメカニズムを試行錯誤で探ることはできている。

しかし設計において挙動の予測などに用いるためにはまだモデル化手法、力学特性の評価法などに多くの解決すべき課題が残されており、手法として確立されているとは言えず、連続体のように多くの数値解析結果の統計的評価によって定性的あるいは定量的な傾向を評価することは現時点では不可能と思われる。

③に関しても、②と同様にまず数値解析手法とその結果に対する評価法が確立される必要がある。

このように連続体としてモデル化ができ、数値解析によりその動的挙動を評価できる構造物については被災事例に基づいて様々な解析を行うことで震度と加速度の関係を評価する経験式を求めることができる。

しかし不連続体で構成される構造物については、そもそもその動的挙動を解析する手法が確立されておらず、数値解析によるパラメトリックスタディで何らかの経験則を見出すことはできない。今後は、不連続体解析手法による固有値の算定法、不連続体解析結果に対する解析条件の設定法などに関する検討を継続し、静的震度法による剛体の動的安定性評価手法を明らかにしていきたい。

文献

- 亀村勝美 (2021): 岩盤構造物の性能評価における課題 —不連続性岩盤の動的安定性評価について—. 深田地質研究所年報, **22**, 53–66.
- 亀村勝美 (2022): 不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層斜面模型の遠心力载荷加振実験 (4) —極限平衡法による安定性評価—. 第 48 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 91–96.
- 亀村勝美 (2023): 岩盤構造物の性能評価における課題 —不連続性岩盤斜面の動的安定性評価の現状と課題—. 深田地質研究所年報, **24**, 139–151.
- 松尾 稔・板橋一雄 (1984): 斜面および土構造物の耐震性評価に関する研究. 土木学会論文集, **352** (III-2), 139–147.
- 納谷朋広・岡田哲実・関口 陽 (2022): 不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層斜面模型の遠心力载荷加振実験 (3) —遠心力载荷加振実験—. 第 48 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 85–90.
- 日本港湾協会 (2007): 港湾の施設の技術上の基準・同解説. 日本港湾協会.
- 野田節男・上部達生・千葉忠樹 (1975): 重力式岸壁の震度と地盤加速度. 港湾技術研究所報告, **14** (4), 67–111.
- 鳥居 剛・黒田修一・松井 保 (2001): 震度法における盛土の限界水平震度と地盤加速度の関係について. 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, 1041–1044.
- 渡辺啓行・馬場恭平・平田和太 (1981): 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, 381020.