

日高帯の地震応答特性に関する一検討

One examination concerning earthquake response characteristic of Hidakatai

(株) 構研エンジニアリング ○ 正 員 保木 和弘 (Kazuhiro Hoki)
(独) 北海道開発土木研究所 正 員 石川 博之 (Hiroyuki Ishikawa)
(独) 北海道開発土木研究所 正 員 岡田 慎哉 (Shin-ya Okada)
室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

日高帯は北海道のほぼ中央を縦断して広く分布している地質帯である。日高帯では、地震発生後に斜面の崩落した事例が幾つかあり、海岸沿いには国道を含んでいることから、日高帯の地震時応答特性を把握することは重要であるものと考えられる。

本研究では、日高帯に属する実斜面に対して地震が与える影響を定性的に把握することを目的とし、三次元時刻歴応答解析を実施した。本解析では、実際の斜面と観測地震波形をモデル化して、以下に示す検討を行った。

- (1) 地震波入力の変化を変化させて、地震波の方向が地震応答特性に与える影響の検討
- (2) 斜面に亀裂面を設定し、亀裂面が地震応答特性に与える影響の検討
- (3) 出尾根地形と出尾根のない平滑な地形のモデルを作成し、地形の違いが地震時応答特性に与える影響の検討

本論文では、解析モデル形状の設定に至るまでの過程から上記に示す検討結果について述べることとする。

2. 解析モデル形状の設定

2.1 設定の流れ

先に述べた検討を実施するため、地震応答解析に用いる解析モデル形状を設定しなければならない。このことより、以下のような流れで解析モデルを設定した。

- (1) 奥行方向に層状となる平面等高線図から作成したモデルおよび鉛直方向に層状となる正面等高線図から作成したモデルの2種類の解析モデルについて固有振動解析を行い、メッシュ構成の違いが解析結果に及ぼす影響を検討する。
- (2) 次に解析領域の違いが解析結果に与える影響の比較を行うため、奥行方向への領域が異なるモデルで比較を行う。
- (3) メッシュ構成および解析領域を設定した後、地震応答解析用モデルを作成する。

上記の流れで、地震応答解析用のモデルを作成した。

2.2 解析モデル

図-1～図-5に、本解析で使用した三次元有限要素モデルを示す。解析は、全5ケースを実施しており、地震応

表-1 固有振動解析ケース一覧

	解析モデルの概要
Case01	奥行方向に層状のモデル
Case02	鉛直方向に層状のモデル
Case03	奥行方向に広げないモデル
Case04	奥行方向に 0.5Dy* 広げたモデル
Case05	奥行方向に 1.0Dy* 広げたモデル

*Dyは斜面幅のこと

表-2 固有振動解析用物性値

	弾性係数 E(GPa)	ポアソン比 ν	密度 $\rho(\text{t/m}^3)$
Case01～Case05	5.0	0.3	2.70

表-3 各解析ケースにおける固有振動数の一覧

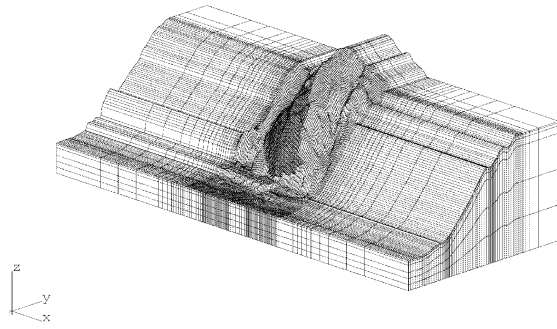
	固有振動数 (Hz)	
モード	Case01	Case02
1次	1.44	1.45
2次	1.81	1.83
3次	2.31	2.34
4次	2.60	2.58
5次	2.71	2.74

答解析は、Case01～Case05の結果を踏まえたモデルを用いる。また、固有振動解析の内容については表-1に示す。なお、解析モデルは斜面を正面にしたとき、横方向をNS(x)、奥行方向をEW(y)、上下方向をUD(z)と設定している。なお、解析モデルは、詳細データの存在する実斜面をモデル化した。

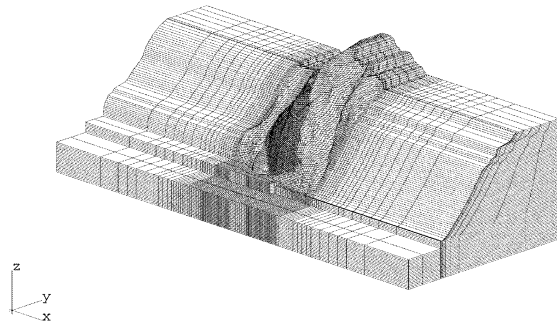
境界条件は、底面を完全固定とし、側面および背面、前面は水平せん断振動に注目し、鉛直方向を拘束している。総節点数および総要素数は、地震応答解析に用いたモデルでは約60,000～70,000となっている。表-2に、本解析で使用した物性値を示す。物性値については、すべて岩石試験から得られた値を使用した。また、解析モデルは一樣な地質と仮定した。

2.3 固有振動解析結果

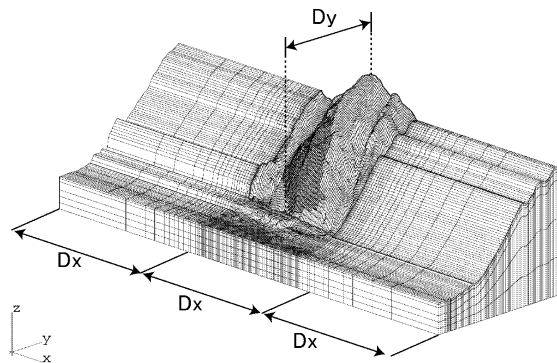
解析モデルの作成方法としては、モデルを平面等高線図から作成する方法(Case01)と、正面等高線図から作成する方法(Case02)が考えられる。Case01の方法では、Case02に比較して地形がより詳細に再現することができる。しかしながら、Case02の方法は要素が鉛直方向に層状となるこ



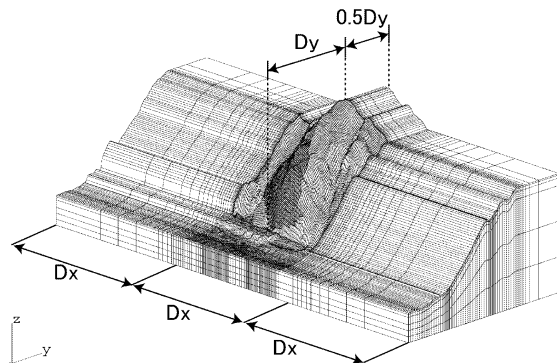
図－1 奥行方向に層状の解析モデル (Case01)



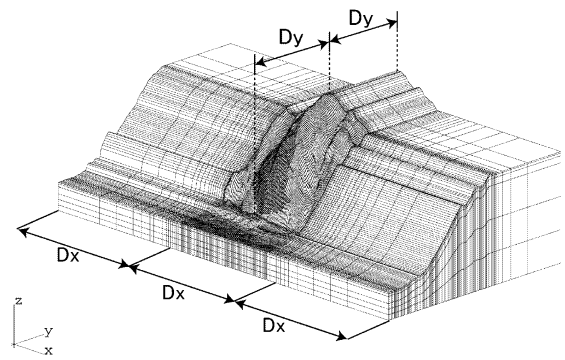
図－2 鉛直方向に層状の解析モデル (Case02)



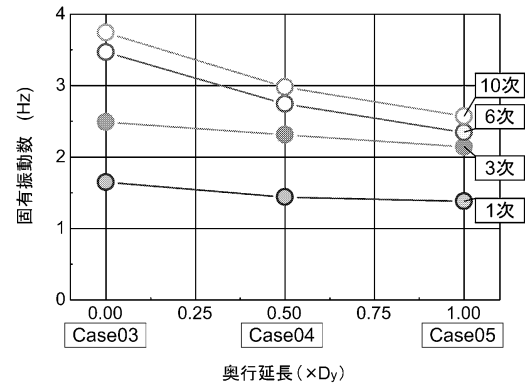
図－3 奥行方向に広げない解析モデル (Case03)



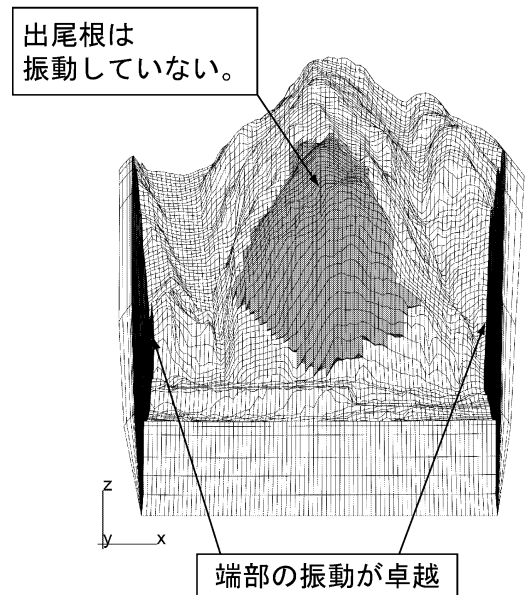
図－4 奥行方向に $0.5Dy$ 広げた解析モデル (Case04)



図－5 奥行方向に $1.0Dy$ 広げた解析モデル (Case05)



図－6 奥行方向延長幅と固有振動数の変化



図－7 変形図

とから、地震応答解析に適したモデルと考えられた。

そこで、奥行層状モデル (Case01) と鉛直層状モデル (Case02) について固有振動解析を実施し、比較した。表－3 に、Case01 および Case02 における固有振動数を一覧にして示す。また、表には5次までの固有振動数を示している。

表－3 より、両者ともに同程度の値を示しており、振動モードも同様であった。このことから、以後の解析につい

ては地形をより詳細に表現できていると思われる奥行層状モデルを使用することとした。

次に、地震応答解析時の解析領域を設定するため、奥行方向への延長を3通りに変化させ、解析領域の違いが固有振動数に与える影響の比較を実施した。図－6 に、Case03 ～ Case05 に関する固有振動数の推移を示す。その結果、奥行延長をもつ Case04 および Case05 に比較して、奥行延長をもたない Case03 は大きな固有振動数を示している。一

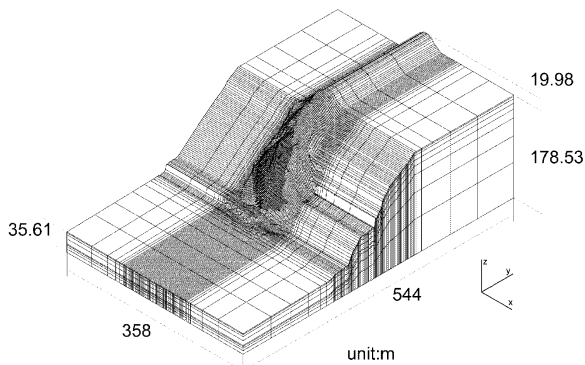


図-8 解析モデル（出尾根地形 Case06～Case10）

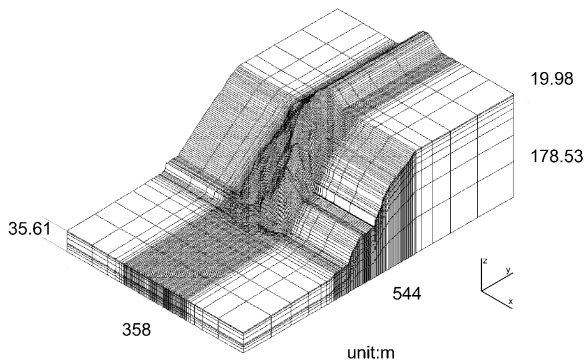


図-9 解析モデル（平滑な地形 Case11）

方、Case04 および Case05 はほぼ同程度の固有振動数であることがわかる。

このことより、以後の地震応答解析時では、奥行延長は斜面部分の奥行長さと同程度の長さを確保することとした。

また、図-7 に Case05 における変形モード図の一例を示す。図より、着目点である出尾根部以外の部分に卓越振動が発生していることが分かる。このように、着目点以外の部分において卓越振動が発生する例が多く、有用な結果を効率よく得るためには、モデル上で不要な部分を削除しておく必要があると考えられる。

よって、モデルの谷になっている部分を削除して、出尾根部分以外の振動が卓越しないモデルを作成することとした。

解析領域の幅を決定する際に、以上の固有振動解析結果から得られたモデルに対して、NS 方向に領域を変化させた解析を実施し、詳細な検討を行った。その結果、図-5 に示している領域以上をモデル化しても、解析結果に大きな影響を与えないことが明らかとなった。

以上より、解析コストの縮減のため、モデル幅を小さくした図-8 に示すモデルを地震応答解析用モデルとして採用することとした。

3. 解析仮定

3.1 解析モデル

図-8 および図-9 に示す解析モデルは、斜面を正面に見たとき、横方向を NS(x)、奥行方向を EW(y)、上下方向を UD(z) と設定している。なお、図-9 は、Case11 で実施する地形の違いが地震応答特性に与える影響の検討で使用するモデルである。

解析モデルは、前述の通り詳細データの存在する実斜面

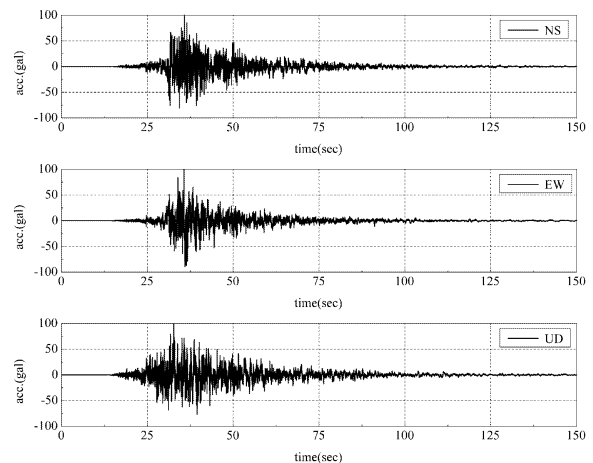


図-10 入力加速度波形

をモデル化しており、解析対象範囲は出尾根地形を含む斜面に対して、前後左右に NS(x)、EW(y) 方向へ斜面幅 (Dx、Dy) 程度広げている。

境界条件は、底面を完全固定とし、地震波入力によりモデル端部で生じる応力の反射を回避するため、モデル底面および側面、前面、背面に無反射境界条件を設定している。総節点数および総要素数は、解析ケースによって異なり、約 70,000 および 60,000 となっている。Case10 は亀裂を有するモデルであり、亀裂は斜面を正面に見たとき出尾根部の左上および左下に亀裂を設定した。

表-4 に、本解析で使用した物性値を示す。物性値については、動解析であることを考慮し、超音波伝播速度試験から得られた動弾性係数および動ポアソン比を用いている。密度は岩石試験から得られた値をそのまま使用した。また、解析モデルは一様な地質と仮定している。

3.2 入力加速度波形

本解析における入力地震波として用いる波形は、(1) 対象斜面近傍にある観測所の波形であること、および (2) 基盤観測波形であることを条件とした。これより、基盤強震観測網 (KIK-NET) の大樹観測所における加速度波形を採用している。なお、使用した地震波形は 2003 年十勝沖地震時に観測されたものである。図-10 に、本解析で使用した入力加速度波形を示す。本解析で使用した加速度波形は、以下に示す流れで基線補正処理を施している。(1) 観測加速度波形の 0 点ずれを補正後、積分して速度波形を算出。(2) 速度波形に対して等速運動に近いトレンド成分を除去する基線補正処理を施す。(3) その後、再度微分し加速度に戻した波形を使用している。

3.3 解析ケース

表-5 に、本解析で実施した解析ケースを一覧にして示す。なお、加速度波形は各加速度成分の最大値を 100gal で規格化したものを用いている。(1) 地震動の入力方向が斜面の応答特性に与える影響の検討については Case06～Case08 で実施しており、それぞれ NS(x)、EW(y)、UD(z) 方向へ加速度入力している。また、(2) 亀裂面が地震応答特性に与える影響の検討については、Case09 および Case10 において解析を実施しており、加速度の入力方向については、実際の地震応答特性を把握したいことから NS、EW、UD の 3 方向すべてを同時に入力している。(3) 地形の違いが地

表－4 地震応答解析用物性値

解析用定数	弾性係数 $E(\text{GPa})$	ポアソン比 ν	密度 $\rho(\text{t/m}^3)$
Case06～Case11	30.0	0.3	2.70

表－5 解析ケース一覧

解析ケース	地形	加速度の 入力方向
入力方向が 斜面に与える 影響検討	Case06	NS (x)
	Case07	EW (y)
	Case08	UD (z)
亀裂面が斜面に 与える影響検討	Case09	亀裂無し
	Case10	亀裂有り
地形の違いが斜面に 与える影響検討	Case09	出尾根地形
	Case11	平滑な地形
		3 方向 合成

表－6 最大応答値一覧 (Case06～Case08)

	最大応答値		
	加速度 gal	速度 kine	変位 mm
Case06 (NS)	331.3	8.02	3.06
Case07 (EW)	296.0	8.89	2.86
Case08 (UD)	217.2	6.01	1.78

表－7 最大応答値一覧 (Case09～Case11)

	出力位置	最大応答値		
		加速度 gal	速度 kine	変位 mm
Case09 出尾根亀裂無し 3 方向合成	岩体下部	122.2	2.71	0.87
	岩体上部	245.4	5.38	2.12
	地山上部	254.7	6.65	2.67
Case10 亀裂有り 3 方向合成	岩体下部	298.8	2.80	0.93
	岩体上部	408.3	5.74	2.20
	地山上部	249.9	6.63	2.67
Case11 平滑な地形 3 方向合成	岩体下部	117.2	2.46	0.76
	岩体上部	205.4	5.01	1.95
	地山上部	248.6	6.45	2.57

震応答特性に与える影響の検討では、Case09 の出尾根地形および Case11 の出尾根のない平滑な地形を用いて解析を実施した。

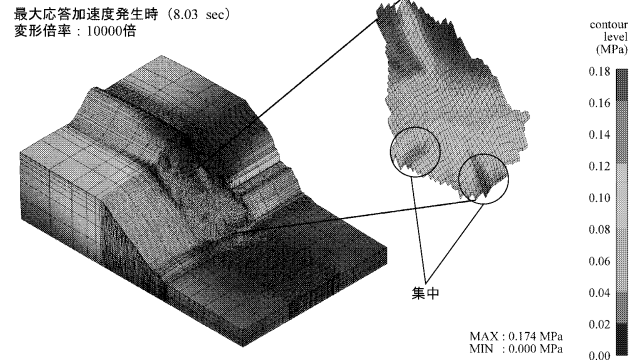
4. 解析結果

4.1 地震動の入力方向が地震応答特性に与える影響

表－6 に、Case06～Case08 において発生した加速度、速度、変位の最大応答値を一覧にして示す。なお、出力点については、解析モデルで最も高い位置にある斜面表面の節点におけるものである。表－6 より、NS 方向に加振したときの加速度および変位の応答値が最も卓越していることがわかる。

4.2 亀裂面が地震応答特性に与える影響

表－7 に、Case09 および Case10 において発生した最大応答値を一覧にして示す。出力点は、亀裂面近傍にある岩体下部、岩体上部および地山上部の節点に関して出力して



図－11 最大主応力分布図 (Case10)

いる。なお、出力は NS 方向の応答としている。表より、Case09 と Case10 で比較した場合、亀裂面から離れた位置にある地山上部の出力点については、ほぼ同程度の値を示している。しかしながら、亀裂面付近にある岩体下部および岩体上部の出力点については、1.5～2.5 倍程度の加速度応答値を示していることがわかる。また、速度および変位の最大応答値に着目すると、Case09 と Case10 とで、ほぼ同程度の値を示していることがわかる。

図－11 に、Case10 における最大主応力分布図を示す。なお、出力時間は、最大応答加速度の発生した時間におけるものである。図に着目すると、亀裂の縁に沿って、応力集中がみられる。

4.3 地形の違いが地震応答特性に与える影響

表－7 より、Case09 と Case11 に着目すると、最大加速度および速度、変位応答値については平滑な地形に比較して、出尾根地形のほうが大きな値を示している。なお、Case11 については岩体を取り除いた解析であることから、近傍の節点を出力点として代用している。

また、応答波形および最大加速度発生時における最大主応力分布についてはほぼ同様の性状であったことを確認している。

5. まとめ

本解析範囲内では、以下の結果が得られた。

(1) 地震動の入力方向が地震応答特性に与える影響の検討
1) NS 方向に加振した時の応答値が最も大きくなる傾向にある。

(2) 亀裂面が地震応答特性に与える影響の検討

1) 最も高い位置（亀裂面から離れた位置）での加速度応答に関しては、大きな影響を与えていない。

2) 亀裂面付近での加速度応答は、亀裂のないモデルに比較して 1.5～2.5 倍程度の応答値を示した。

3) 速度および変位応答に関しては、亀裂のないモデルとほぼ同程度の値を示した。

4) 亀裂面を有している場合、亀裂の縁に沿って応力集中が発生する。

(2) 亀裂面が地震応答特性に与える影響の検討

1) 最大応答値は平滑な地形より出尾根地形のほうが若干大きくなる傾向にある。

謝辞：本論文では、防災科学技術研究所における KIK-NET の加速度記録を使用している。ここに記して謝意を示す。