

地震時の斜面災害の特徴

—鳥取県西部地震の崩壊地と非崩壊地を調査して—

鳥取大学工学部土木工学科 榎 明潔

1. まえがき

筆者は、鳥取県西部地震後に斜面の被災状況を調べるために、震源付近のいくつかの山で現地調査を行った。この調査の特徴は、崩壊地だけを選んで調査するのではなく、登山道や尾根・沢などを歩く線的調査に留まっているが崩壊地を含むひと山全体を調査しようとする点である。この調査の結果、非崩壊地にも多くの変状があり、尾根部分や山腹の勾配の変化する凸部分で、幅数 cm から 1m 程度の多くのクラックのあることがわかった。また、変状のある斜面のうちでは、完全に崩壊している部分の割合が非常に少ないことも見出された。

さらに、現地調査で得られた斜面の幾何形状と強度定数、周辺で観測された地震の加速度記録を用いて、震度法で安定計算すると、変状の見られた斜面はすべて崩壊しているはずという結果を得ることも判明した。

そこで、地震時の斜面表層土の挙動・運動について、新しい仮説と変位の計算法を提案し、実測値と比較する。

2. 鳥取県西部地震における現地調査

2-1. 調査地域と調査方法

調査の主な対象とした地域は次の3地域である。震源との位置関係を図-1に示す。また、鉛直加速度が1Gを越えて浮き上がりを生じた賀祥ダム南側の上長田神社山門と鎌倉山頂上部のクラックを写真1,2に示す。

- ① 鳥取県西伯郡西伯町鎌倉山（山頂の標高730m）2斜面(A,B)で詳細調査
- ② 鳥取県日野郡日野町本郷裏山（山頂の標高495m）1斜面(資料採取は2個、C1,C2)で詳細調査
- ③ 鳥取県日野郡日南町役場裏山（山頂の標高470m）3斜面(D,E,F)で詳細調査

調査方法を以下に述べる。現地で、登山道や尾根・沢などを歩いて変状を観察し、変状の見られた斜面のうちから幾何形状・植生などの点から見て代表的と考えられる斜面を選んで、幾何形状(斜面の傾斜、延長、表層土の厚さなど)を調査した。また、すべり面に近い部分の土にシンウォール・チューブを圧入して試料採取を行い、実験室に持ち帰って一面せん断試験により不攪乱状態でのピーク強度定数(c, ϕ)と大変形後の強度定数(c_{res}, ϕ_{res})や単位体積重量を求めた。

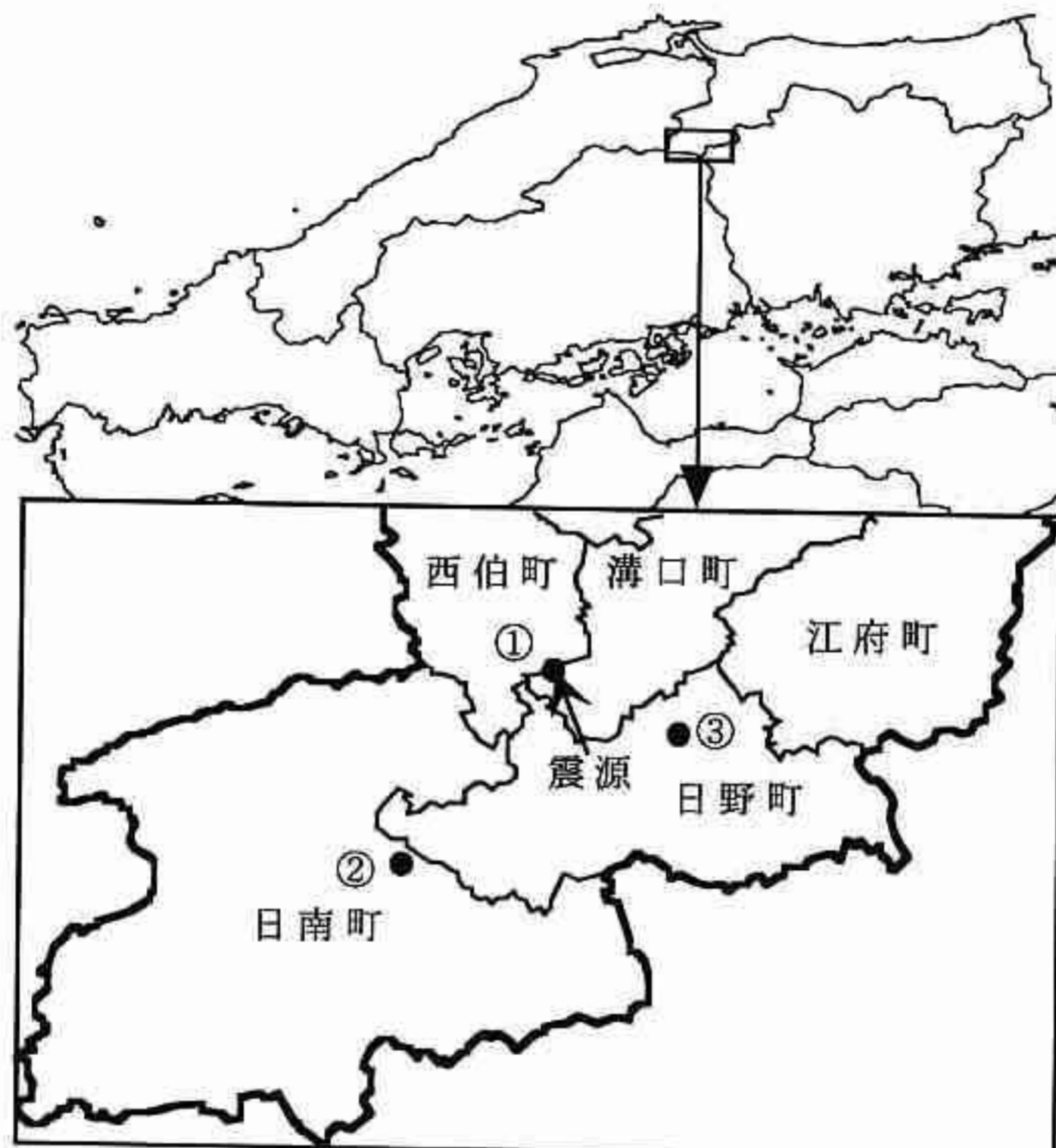


図-1 調査地域と震源の位置

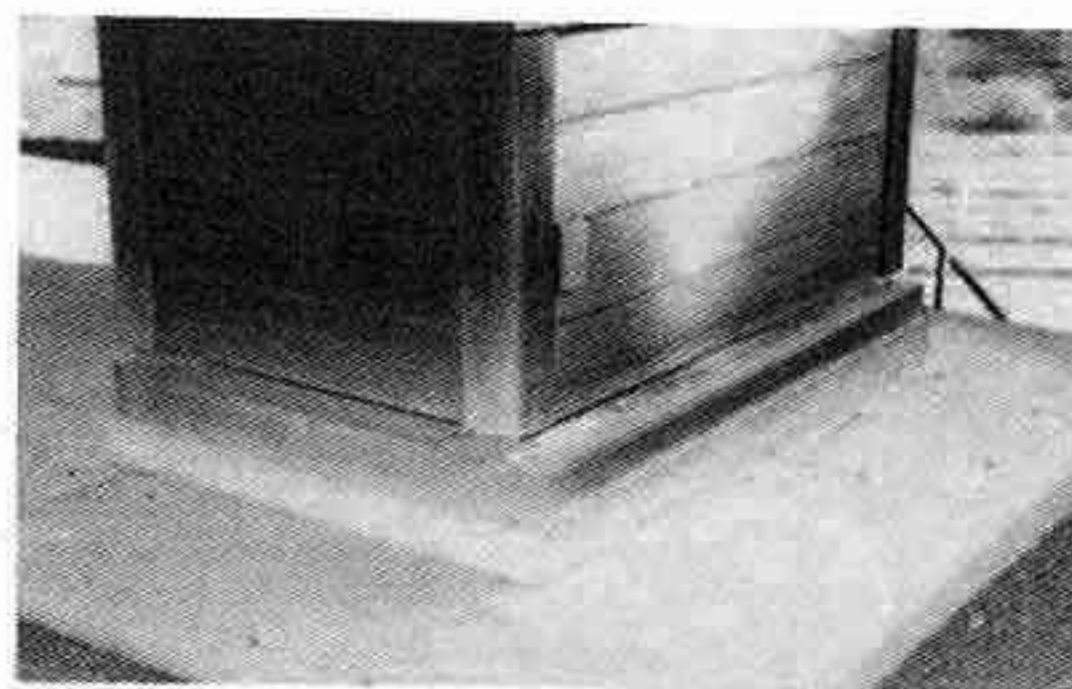


写真-1 上長田神社山門の浮き上がり
(鉛直のほぞが抜けていることに注意)



写真-2 鎌倉山山頂のクラック

2-2. 調査結果の概要

各地区の踏査経路とその経路周辺で見られた変状を、図-2~4に示す。これらの図には、詳細調査を行った代表的斜面の断面の幾何形状も示した。踏査経路沿いという限られた面積に、かなり多くの変状が見られる。また、斜面の勾配は 37° ~ 48° 、表層厚は1~3m(一部は推定)、斜面長は50m以上であり、表層厚と斜面長の比が0.1より小さく、無限斜面近似(斜面要素の左右の側面力は、大きさが等しく向きが反対であると近似すること)が成立する。

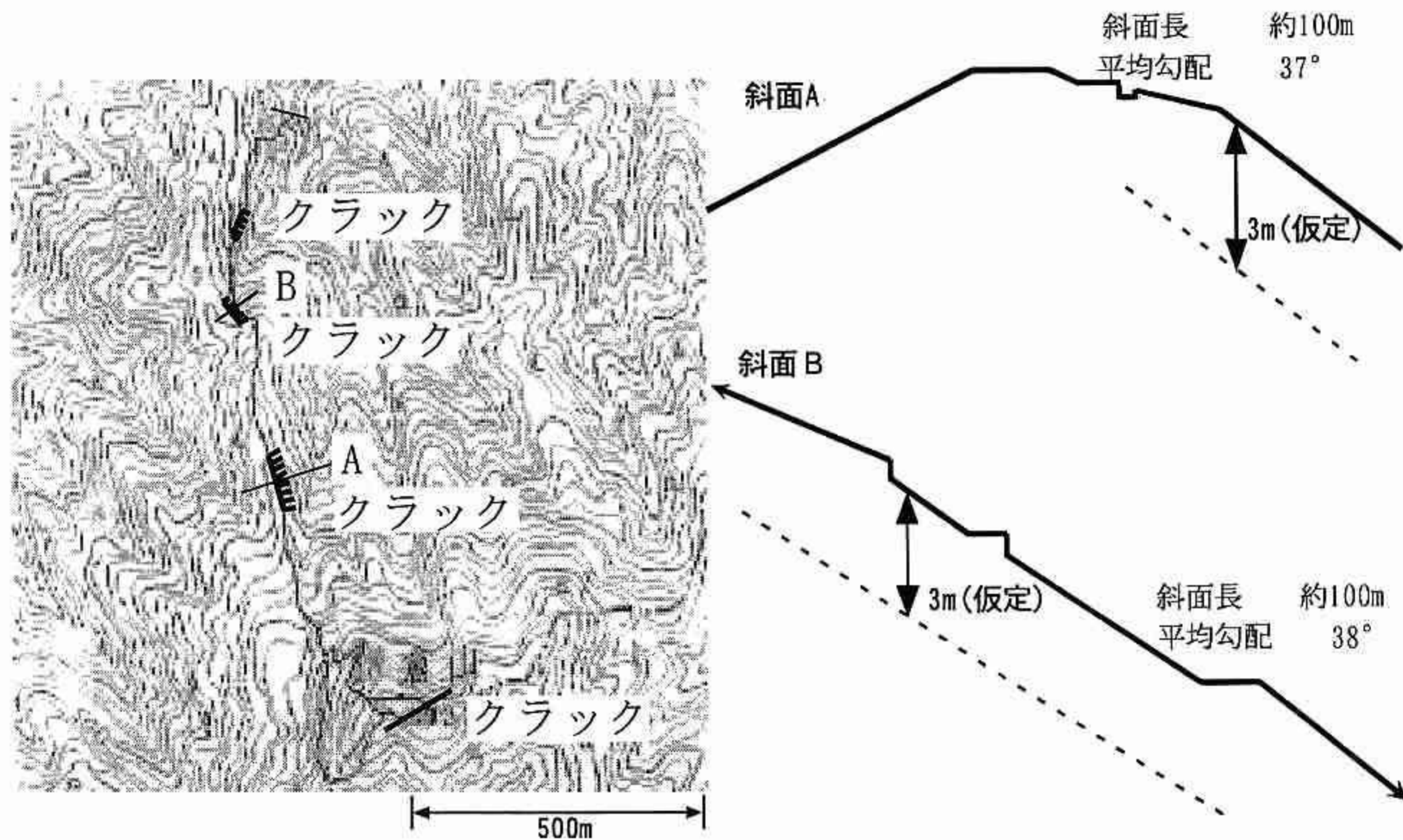


図-2 西伯町鎌倉山踏査ルートと断面図

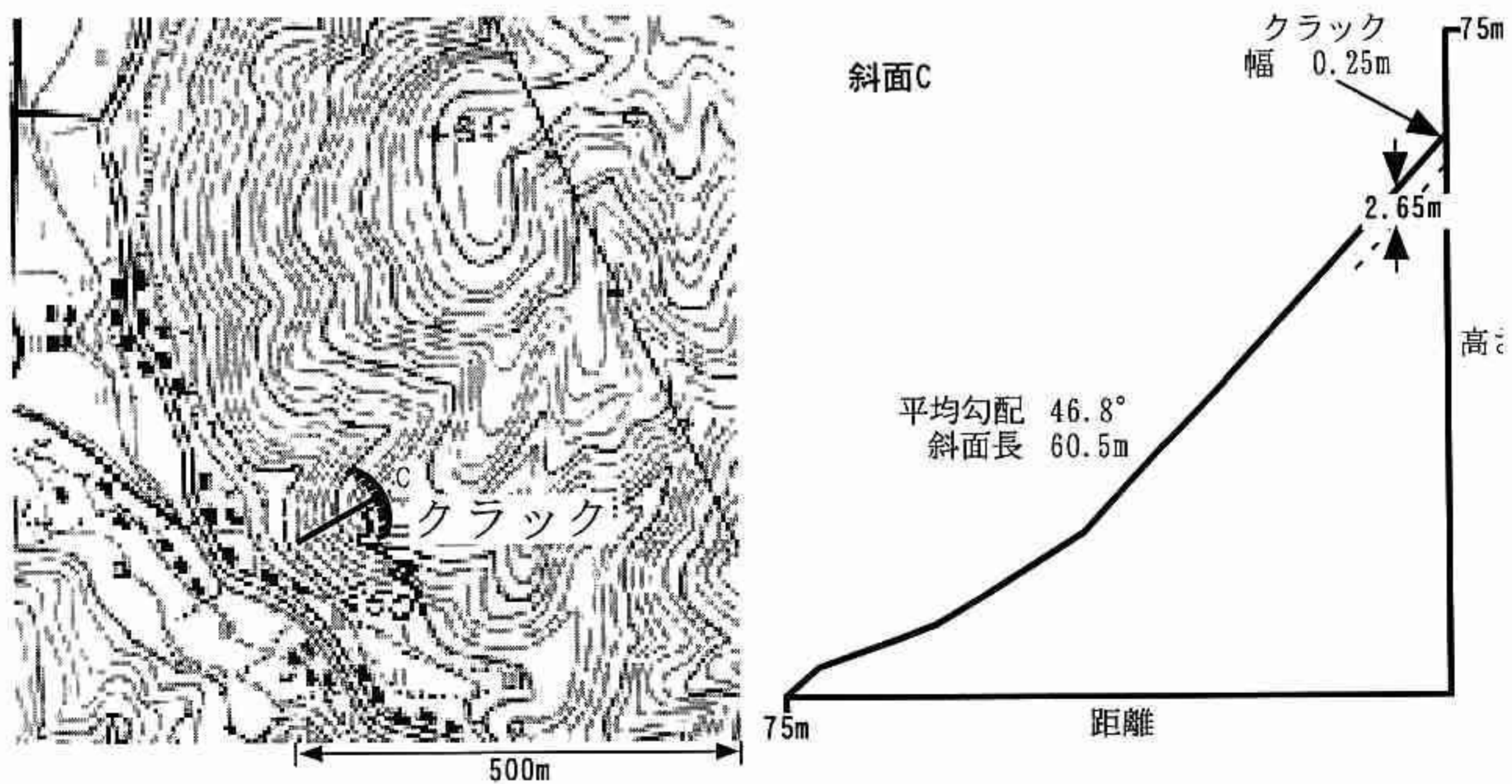


図-3 日野町本郷裏山踏査ルートと断面図

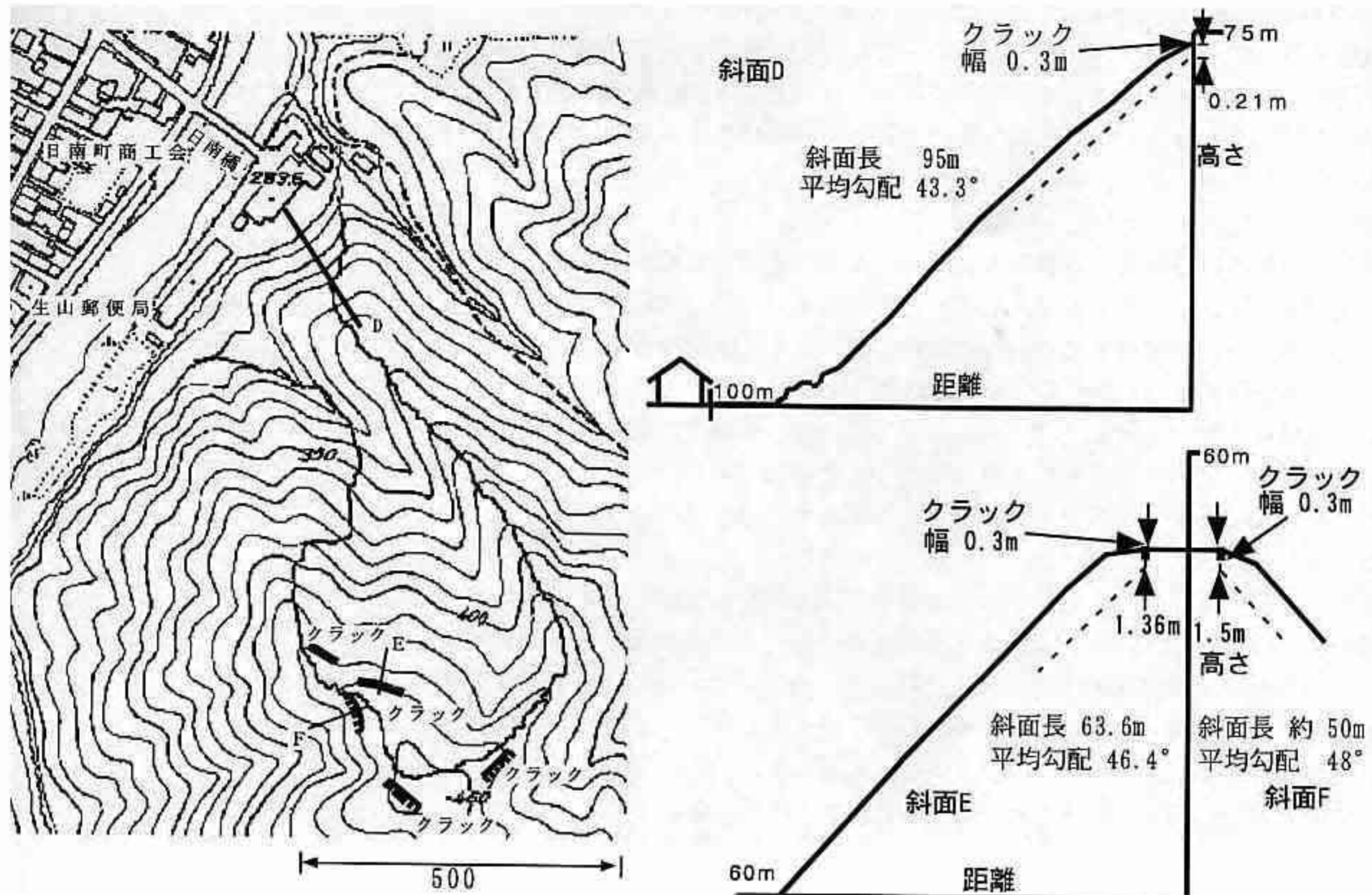


図-4 日南町役場裏山踏査ルートと断面図

また、各斜面で採取された土から得られた強度定数等を表-1に示す。サンプリングした土はいずれもシルト質砂で、サンプリングによる攪乱などの影響は不明であるが、強度定数としては、ピーク強度に対応した内部摩擦角 ϕ は $30^\circ \sim 53^\circ$ 、粘着力 c は $0.5 \sim 2.7 \text{ tf/m}^2$ が得られた。大変形後の残留強度に対応した内部摩擦角 ϕ_{res} は $40^\circ \sim 52^\circ$ 、粘着力 c_{res} は $0.0 \sim 1.2 \text{ tf/m}^2$ が得られた。単位体積重量は、 $1.60 \sim 1.83 \text{ tf/m}^3$ である。なお、調査した時期(10月下旬から11月上旬)が秋雨時期であったにもかかわらず、いずれの斜面でも表層土内に地下水面は存在しなかったため、地震時(10月6日)にも地下水面は存在しなかったと推定できる。

表-1には、調査した各斜面を無限斜面と近似して震度法を適用して得た地震時の斜面の安定を表す次の式を用いて、5種類の安全率 $F_{s1} \sim F_{s5}$ を求め、示した。

$$F_s = \frac{\gamma H \{ (k_v + 1) \cos \beta - k_h \sin \beta \} \tan \phi + c / \cos \beta}{\gamma H \{ (k_v + 1) \sin \beta + k_h \cos \beta \}} \quad (1)$$

これらの安全率の意味は次の通りである。

- Fs1: 地震前の静止状態での安全率 (強度定数 c, ϕ 、震度 $k_v=0, k_h=0$ を使用)
- Fs2: 地震中の安全率 (強度定数 c, ϕ 、震度 $k_{v\text{max}}, k_{h\text{max}}$ を使用)
- Fs3: 地震中の安全率 (強度定数 c, ϕ 、震度 $k_{v\text{max}}$ とその時の k_h を使用)
- Fs4: 地震中の安全率 (強度定数 c, ϕ 、震度 $k_{h\text{max}}$ とその時の k_v を使用)
- Fs5: 地震後(大変形後)の静止状態での安全率 (強度定数 $c_{\text{res}}, \phi_{\text{res}}$ 、震度 $k_v=0, k_h=0$ を使用)

なお、 $k_{v\text{max}}, k_{h\text{max}}$ としては、鳥取県西部地震(本震)について日野町地表面(花崗岩上に11m厚の砂礫層を有する)で観測された加速度波形(KiK-net)から得た値を用いた。

観測された1G近い水平方向の最大加速度を用いて求めたFs2やFs4に注目すると、全て1.0を大幅に下回っており、地震時には全ての斜面が崩壊することになっている。この震度法を用いた解析結果と、実際にはクラックしか生じていないという現地調査結果は完全に矛盾する。

3. 山腹斜面表層土の地震応答の剛塑性モデルとそれを用いた解析

前節で述べた矛盾について考えるため、これらの山腹表層土の地震時の運動を、剛塑性体近似で、震度法と同様の概念を用いて無限斜面近似の下に、明らかにすることを試みた。特に、震度法で地震加速度を静的に与えてこれらの斜面の安定を論じると崩壊することになるけれども、実際にはこの崩壊は地震波のほんの一部に対して断続的に生じるだけであることを考慮に入れることを試みた。

3-1. 山腹斜面表層土の地震応答を求める剛塑性モデルと相対運動のモード

丘陵・山岳は、プレートの褶曲によってできるというその成因から想像できるように、多くの場合、緩い表層土が薄く基岩を覆うという構造である。特に山腹の上半部では表層土の層厚が数十 cm から数 m 程度と薄いのが普通で、尾根部や山頂部では表層土が存在しないこともある。

基岩は硬く弾性波速度 v_s も数 km/s 以上であるが、表層土は緩く弾性波速度 v_s は 100m/s 程度である。この層厚と弾性波速度から、表層土の固有振動数は数十 Hz とかなり高い。このため、通常のスペクトルを持った地震波（卓越周波数が 0.1-10 Hz 程度）が基岩から表層土に与えられた場合には、表層土は基本的には剛体のように基岩と一体となって運動すると考えられる。

また、表層土中には、雨期を除いては、地下水面が存在しないのが普通である。したがって、地震時に液状化が生じる可能性は殆ど無く、表層土は地震時にも通常の $c-\phi$ 材として挙動すると考えてよい。

さらに、表層土の層厚は山腹の長さに対して十分に小さいから、地震による表層土の運動を扱うに当たっては、第一次近似として、側面力を無視できる無限斜面と扱うことができると考えられる。

以上から、山腹斜面を図-5のようにモデル化した。

ここで、基岩の鉛直上向きの加速度を α_v 、右向きの加速度を α_h とする。また、表層土の鉛直上向きの加速度を α'_v 、右向きの加速度を α'_h とする。基岩と表層土が一体となって運動している場合には $\alpha_v = \alpha'_v, \alpha_h = \alpha'_h$ であるが、ばらばらに運動している場合には、 $\alpha_v \neq \alpha'_v, \alpha_h \neq \alpha'_h$ である。

基礎方程式

斜面垂直方向の釣合い式(運動方程式)

$$N = \rho H \{ (\alpha'_v + g) \cos \beta - \alpha'_h \sin \beta \} \quad (2)$$

斜面平行方向の釣合い式(運動方程式)

$$T = \rho H \{ (\alpha'_v + g) \sin \beta + \alpha'_h \cos \beta \} \quad (3)$$

破壊条件式

$$S = N \tan \varphi + c / \cos \beta \quad (4)$$

A 表層土が基岩と一体で運動する条件

表層土が基岩から離れないためには、 $N \geq 0$ の条件が必要である。ゆえに式(2)より $(\alpha'_v + g) \cos \beta - \alpha'_h \sin \beta \geq 0$ と
ころが、 $0 \leq \beta < \pi/2$ の範囲を考えているから、

$$\therefore \alpha'_v \geq \alpha'_h \tan \beta - g \quad (5)$$

B すべり落ちない条件

式(5)の条件下で $T < S$ の場合には、接触面でのすべりも発生しない。したがって、式(3),(4)から次式を得る。

$$(\alpha'_v + g) (\tan \varphi - \tan \beta) > \alpha'_h (1 + \tan \beta \tan \varphi) - c / (\rho H \cos^2 \beta)$$

この場合には、 $\alpha'_h = \alpha_h, \alpha'_v = \alpha_v$ であるから、結局、表層土が基岩と一体になって運動するためには基岩の加速度には次の式が成立する必要がある。

$$\varphi \geq \beta \text{ のとき } \alpha_v > \alpha_h / \tan(\varphi - \beta) - g - c / \{ \rho H \cos^2 \beta (\tan \varphi - \tan \beta) \} \quad (6)$$

$$\varphi \leq \beta \text{ のとき } \alpha_v < \alpha_h / \tan(\varphi - \beta) - g - c / \{ \rho H \cos^2 \beta (\tan \varphi - \tan \beta) \} \quad (6')$$

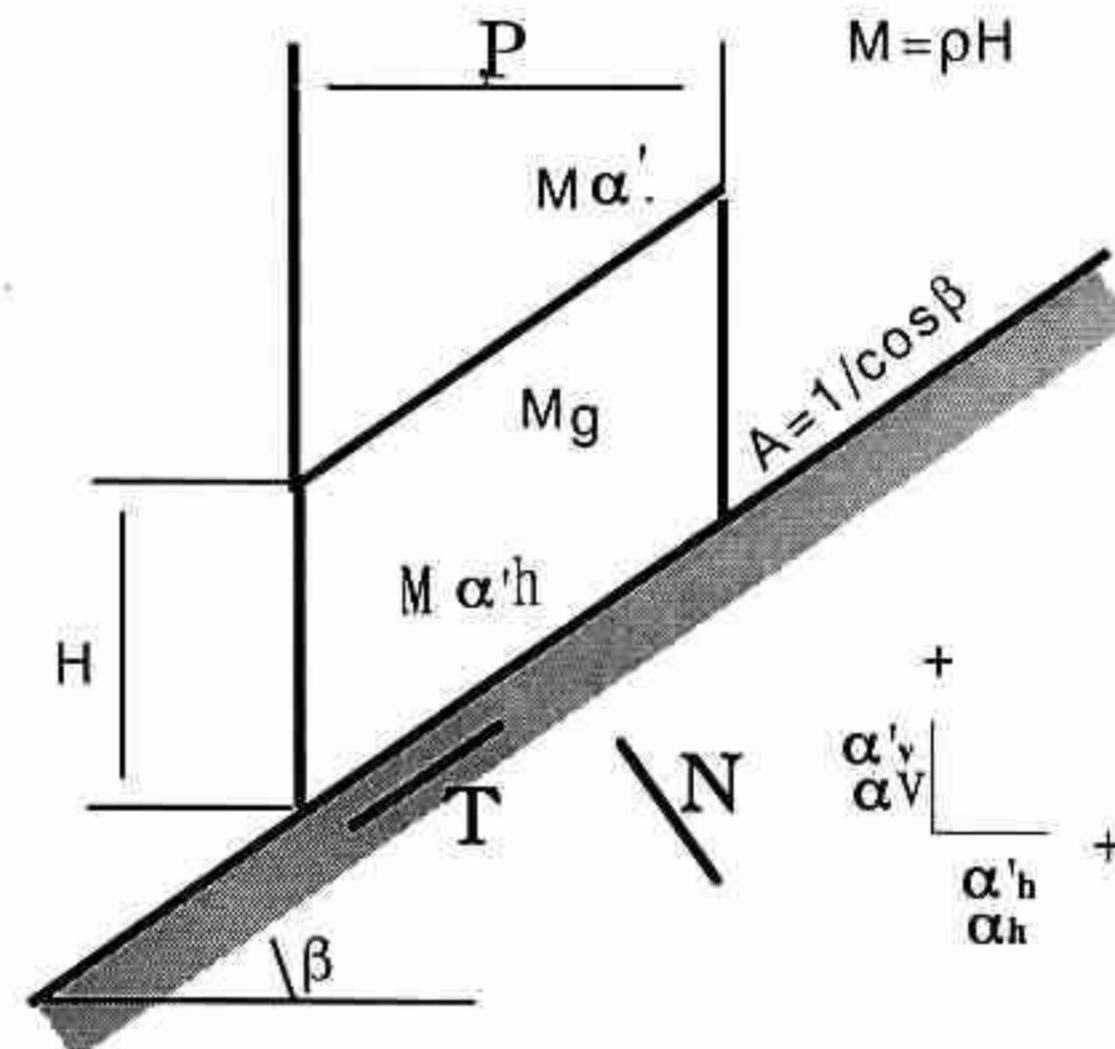


図-5 地震動を受ける無限斜面の一部

C すべり上がらない条件

Bは、表層土が基岩上をすべり落ちない場合の条件だが、斜面勾配が緩く地震動が強い場合には、表層土が基岩上を逆にすべり上がることも考えられる。このときには、上式でTの符号を逆にすればよい。したがって次式を得る。

$$\alpha_v \geq -\alpha_h / \tan(\varphi + \beta) - g - c / \left\{ \rho H \cos^2 \beta (\tan \varphi + \tan \beta) \right\} \quad (7)$$

式(5),(6),(6'),(7)の条件を、 $\beta=30$ 、 $\varphi=40$ 、 $c/(\rho H)=0.2g$ の場合について計算し、基岩の地震動を表す $\alpha_v - \alpha_h$ 空間で表示すると図-6となり地震時の表層土の運動には以下の4種類のモードがあることが分かる。

- ① 基岩と一体となって運動するモード
- ② 基岩から分離するモード
- ③ 基岩には接触しているが基岩に沿ってすべり落ちるモード
- ④ 基岩には接触しているが基岩に沿ってすべり上がるモード

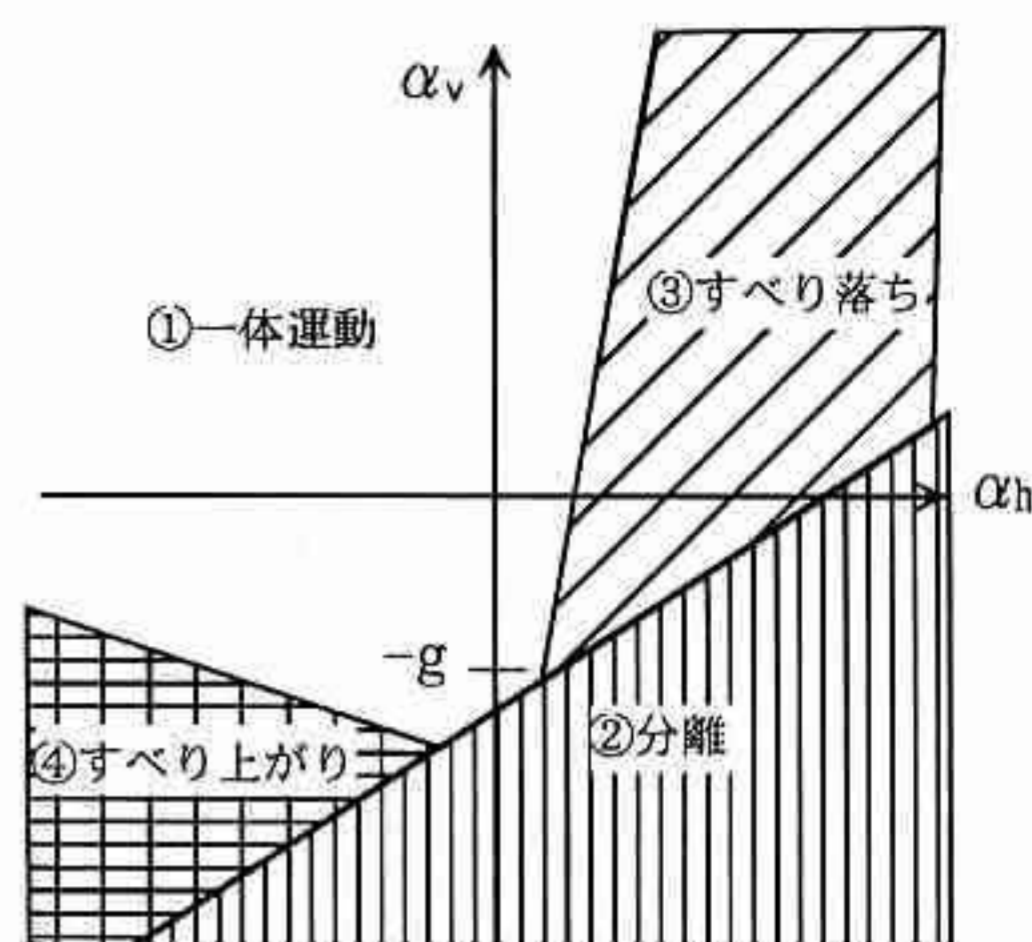


図-6 表層土と基岩の相対運動のモード

3-2. 相対変位を生じる場合の運動

表層土と基岩の相対運動には、①表層土が基岩から分離する、②表層土が基岩沿いにすべり落ちる、③表層土が基岩沿いにすべり上がる、の3種類が存在する。しかし、地震波形と斜面の幾何条件・強度条件によっては、全てのモードが存在するとは限らない。因みに、後述する鳥取県西部地震における調査斜面に対する実際の解析では、②のモードのみが生じた。そこで、ここでは②の場合の表層土の運動について簡単に述べる。

この場合、基岩から表層土には土のせん断強度までの力しか伝わらない。

$$T = S \quad (8)$$

また、接触面に垂直な方向の変位・速度・加速度は、基岩と表層土で等しいから、斜面垂直方向の加速度 α'_n について次式が成立する。

$$\alpha'_n = \alpha_n = \alpha'_v \cos \beta - \alpha'_h \sin \beta = \alpha_v \cos \beta - \alpha_h \sin \beta \quad (9)$$

また、表層土の基岩平行方向の加速度を α'_β とすると

$$\alpha'_\beta = \alpha'_v \sin \beta + \alpha'_h \cos \beta \quad (10)$$

式(8),(9),(10)を用いて、以下のように表層土の基岩平行方向の加速度を α'_β を求めることができる。

$$\alpha'_\beta = (\alpha_v + g) \cos \beta \tan \varphi - (\alpha_h \tan \varphi + g) \sin \beta + c / (\rho H \cos \beta) \quad (11)$$

一方、基岩のすべり面方向の加速度は次式で求められる。

$$\alpha_\beta = \alpha_v \sin \beta + \alpha_h \cos \beta \quad (12)$$

この基岩と表層土のすべり面方向の加速度の差 $\Delta\alpha_\beta = \alpha_\beta - \alpha'_\beta$ がゼロになると、表層土は再び基岩と一体になって運動する。そして、この $\Delta\alpha_\beta$ をすべっている時間だけ2回積分したものが、その間の表層土と基岩の相対変位量 δ である。

なお、③表層土が基岩沿いにすべり上がる場合にはTの向きを逆にすることで、②の場合から容易に運動を求めることができる。また、①表層土が基岩から分離する場合には、表層土は分離直前の基岩の位置と基岩の速度を初期条件として、再び基岩に衝突するまで、放物運動する。

3-3. 調査斜面の解析結果

相対運動モードを表す $\alpha_v - \alpha_h$ 関係

式(5),(6),(6'),(7)の条件を $\alpha_v - \alpha_h$ 空間で表し、その図にさらに実際の地震波形における $\alpha_v - \alpha_h$ 関係を重ねて表示すると、各調査斜面で表層土と基岩がどのモードの相対運動をしたかが判明する。ただし、実際の地震波形から α_h を求めるには、N-S方向の水平加速度とE-W方向の水平加速度から斜面の面している方向（上り方向を正とする）の水平加速度を計算する必要がある。

各調査斜面における $\alpha_v - \alpha_h$ 関係図の一部を図-7から図-10に示す。地震波形としては前述した日野町地表面で観測されたものを用いた。

いずれの斜面でも、表層土の運動モードは、基岩と一体となって運動するモード以外には、基岩沿いにすべり落ちる運動モードだけを生じる。しかし、日野町本郷地区裏山と日南町役場裏山では基岩と分離するモードが現出する寸前である。実際、写真-1で示したように鉛直加速度が1Gを越えていたことが確認されており、場所によっては分離モードの運動が生じていた可能性もある。

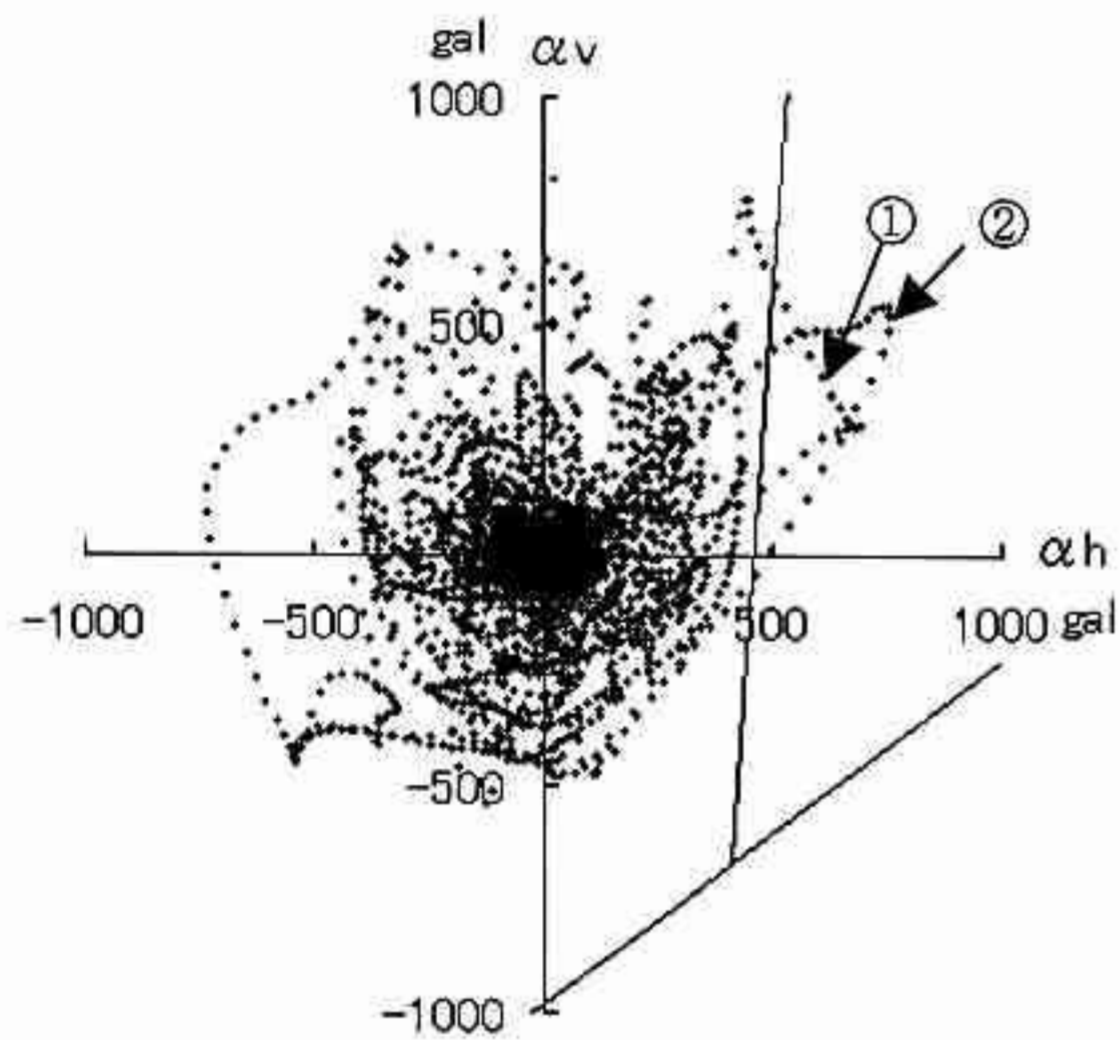


図-7 西伯町鎌倉山A斜面における $\alpha_v - \alpha_h$ 関係

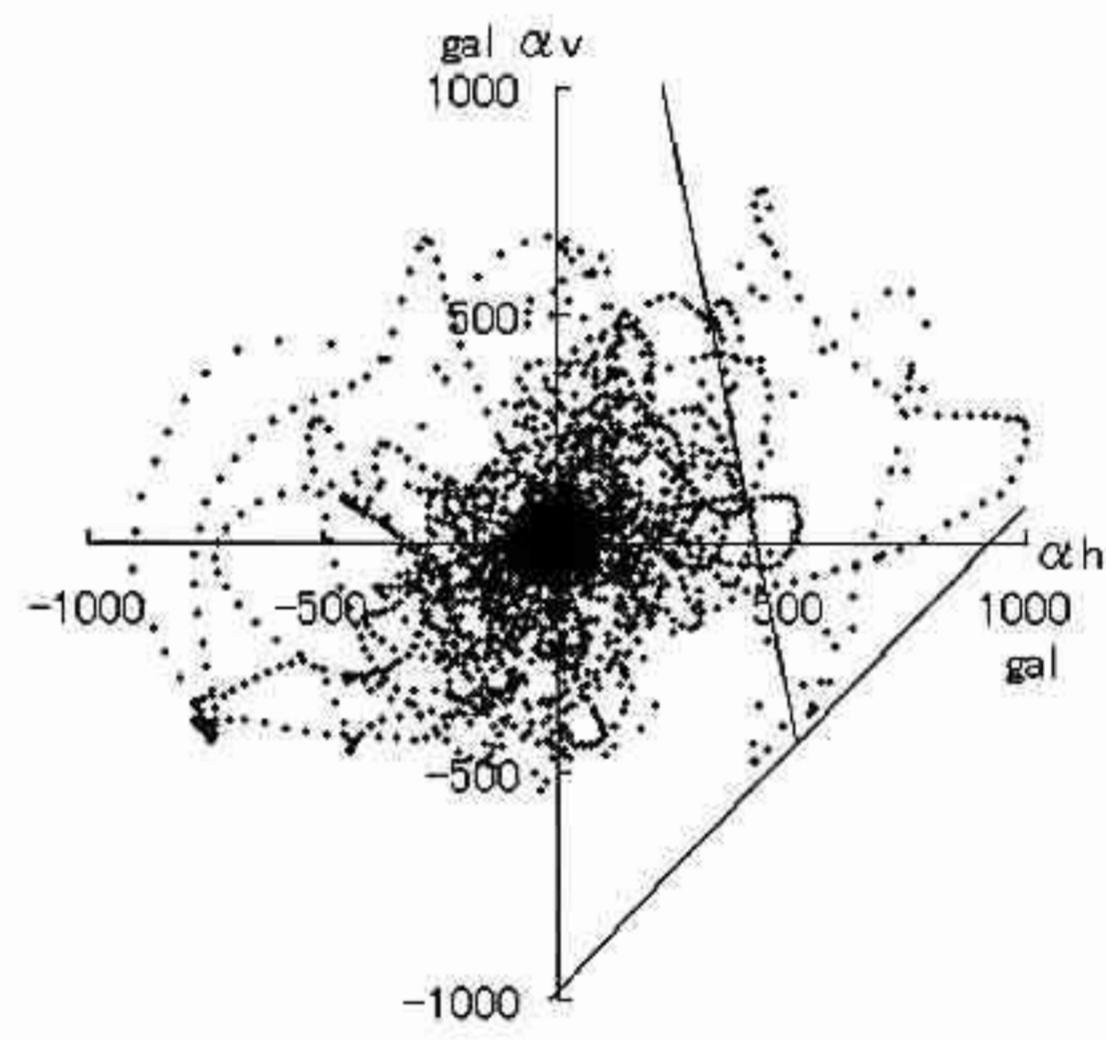


図-8 日野町本郷裏山C1斜面における $\alpha_v - \alpha_h$ 関係

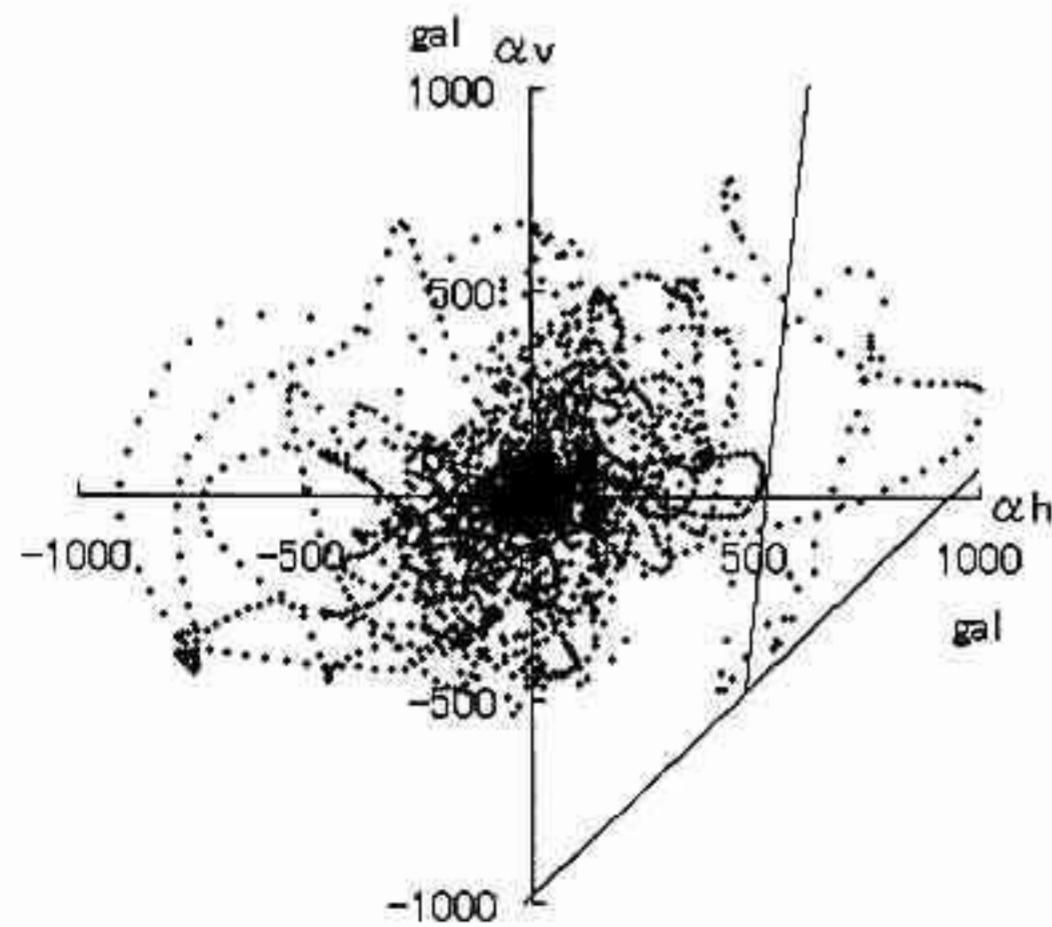


図-9 日南町役場裏山E斜面における $\alpha_v - \alpha_h$ 関係

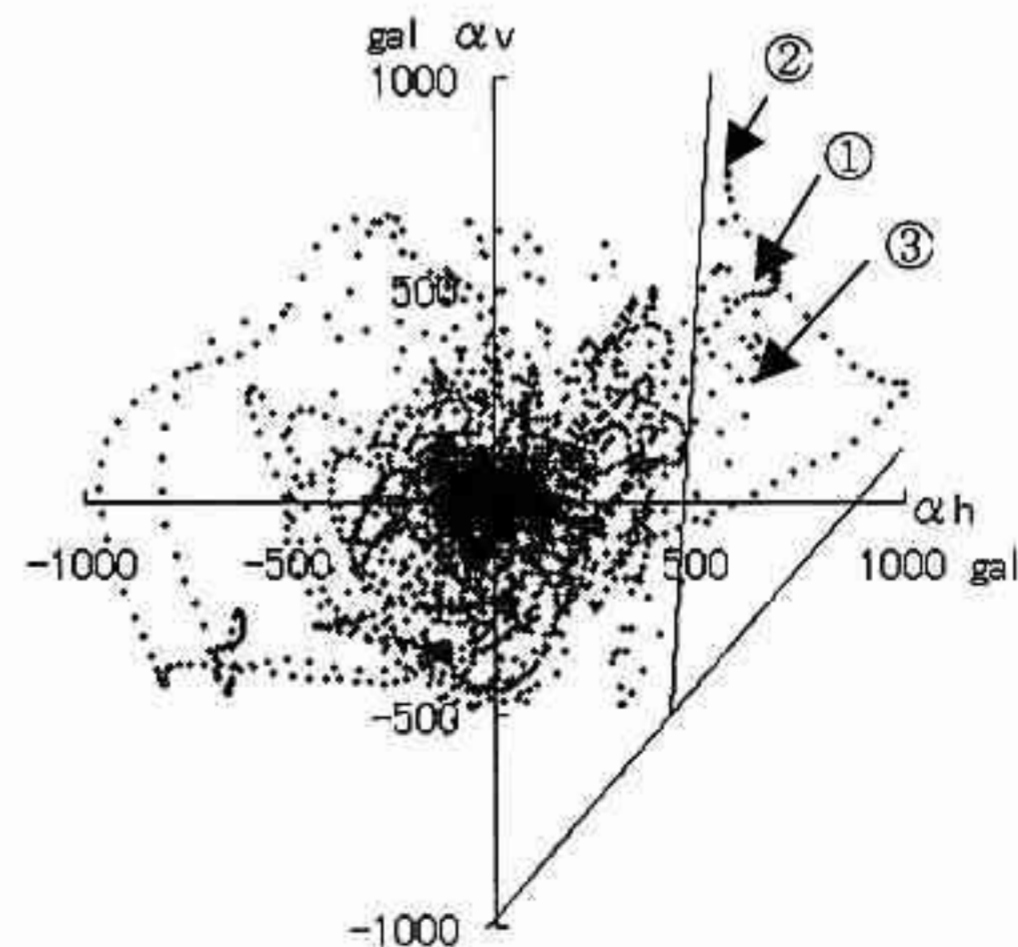


図-10 日南町役場裏山F斜面における $\alpha_v - \alpha_h$ 関係

地震時の基岩の加速度波形と相対変位量

各斜面において、表層土がすべり落ちるという運動モード（絶対座標で考えるなら、実際には基岩が表層土を残したまま斜面上方へ変位するという運動モード）をどの時刻に生じたのかを、式(6)または(6')を用いて調べ、かつ、すべり落ちている時間にどれだけ相対変位が発生したかを式(11)、(12)を用いて求めることができる。図-11,12にこうして求めた結果の例を示す。

相対すべりは、数十秒続く地震継続時間の中で数回生じている。一回一回はほんの僅かの時間、たとえば0.1秒程度であり、相対変位量も数cm以下程度である。

表-1の右側の数欄に、KiK-netで得られた各地の加速度波形をもとに計算した、調査各斜面における表層土と基岩の相対変位量を示した。この相対変位量と比較する目的で、現地調査で得られたクラックの形状（幅）も表-1に示した。すなわち、尾根に生じたクラックの幅は、一方の斜面の変位量と他方の斜面の変位量の和になるはずであるし、凸型に勾配の変わる山腹に生じたクラックの幅は、下方の急斜面の変位から上方の緩斜面の変位を差し引いた値となるはずである。

4. あとがき

鳥取県西部地震後における斜面の被災状況を現地調査した結果、非崩壊地にも多くの変状があり、尾根部分や山腹の勾配の変化する凸部分で、幅数cmから1m程度の多くのクラックのあること、変状のある斜面のうちでは、完全に崩壊している部分の割合が非常に少ないことが分かった。そして、現地調査で得られた斜面の幾何形状と強度定数、周辺で観測された地震の加速度記録を用いて、震度法で安定計算すると、変状の見られた斜面はすべて崩壊しているはずという結果を得た。そこで、地震時の斜面表層土の運動について、剛塑性体近似・無限斜面近似を行って運動方程式を導き、基岩と表層土の相対運動に4個のモードがあること、相対運動を生じる場合の変位の計算法を示した。

調査で得たクラック幅は全般に相対変位の計算結果より大きい、「地震時には全ての斜面が崩壊することになる」という震度法を用いた解析結果の矛盾に説明を与えることには成功している。

なお、西伯町鎌倉山山頂や日南町役場裏山の尾根で多くの「飛び石」が確認されていることから推測すると、平地に比べて山地、特に尾根や頂上部などでは地震波の加速度振幅が何らかの原因で大きくなっている可能性がある。したがって、もし各斜面で実際にその斜面基岩の加速度波形を用いることができたなら、実測値と計算値の差はより小さくなる可能性もある。

地震時に完全に崩壊した斜面は、おそらく、以下のいずれかの理由によると考えられる。

- ① 微小なすべりが蓄積されて大変位を生じ、すべり面の土のせん断強度が残留状態に近づいて低下したため、地震後の安全率（表-1のFs5）が1.0以下になった。
- ② 地震時に表層土がすべり落ちることで、幾何形状が危険側に変化したため、地震後に安定できなくなった。
- ③ 斜面の一部が破壊し、そこから進行性破壊が始まった。あるいは、地震後の降雨の浸透や余震による変位の増大で崩壊した。

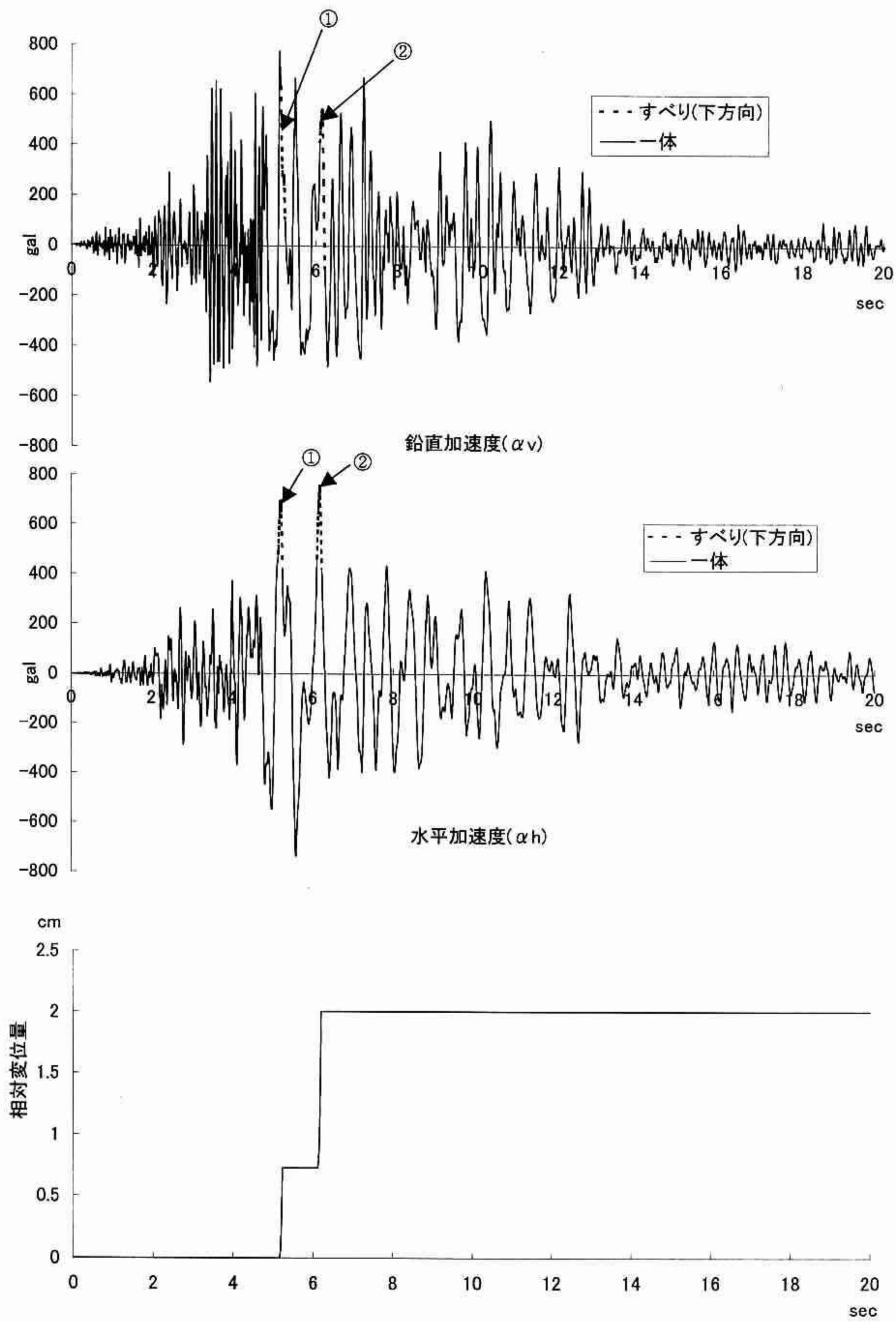


図-11 西伯町鎌倉山A斜面における表層土の運動と相対変位

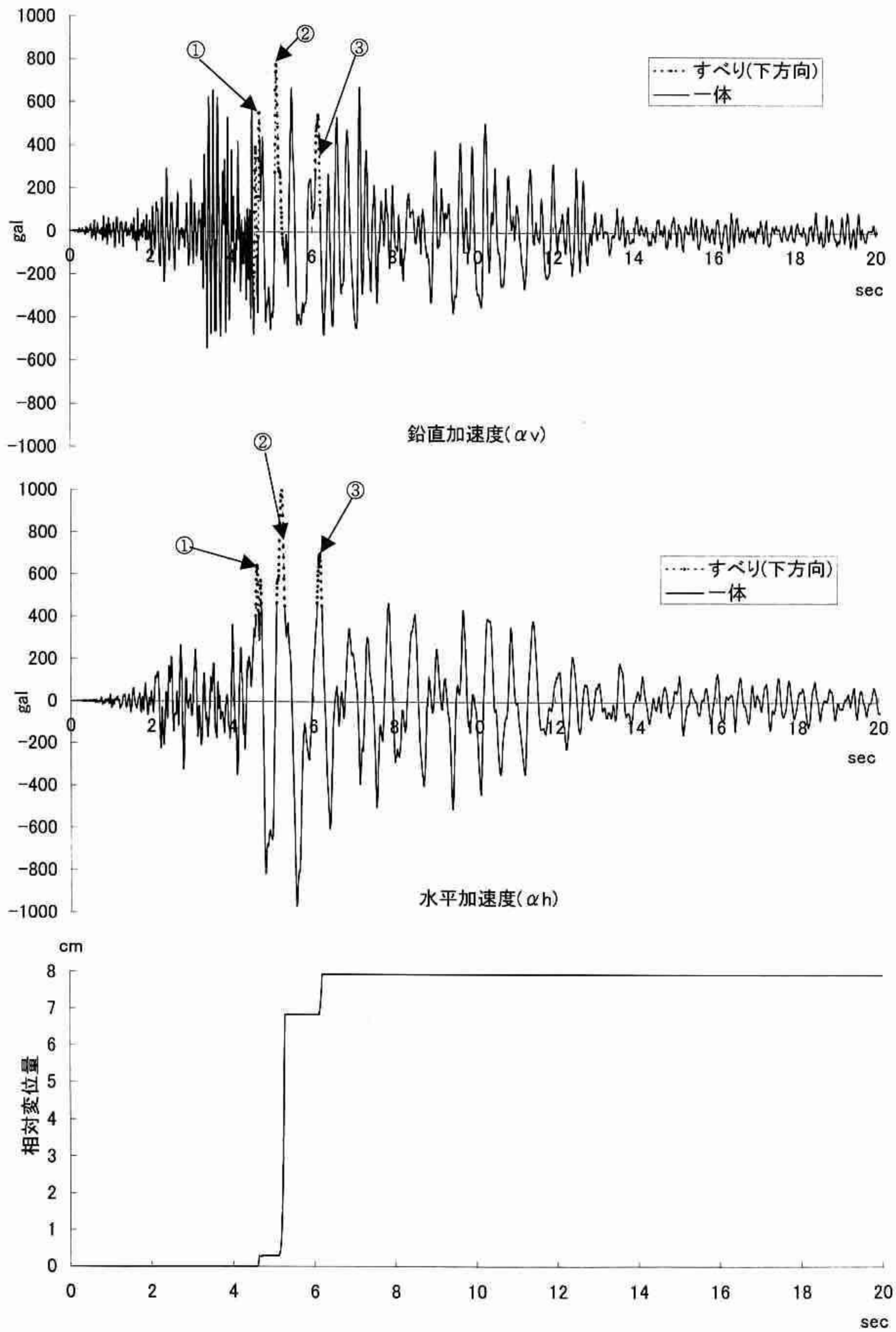


図-12 日南町役場裏山F斜面における表層土の運動と相対変位

表-1 各斜面の幾何条件・強度定数と無限斜面近似の下に震度法を用いて求めた安全率

調査項目 調査斜面		斜面の向き(°)	傾斜角(°)	斜面長m	層厚m	単位体積重量tf/m³	強度定数、安全率						クラックの形状			変位計算結果(cm)									
							不攪乱試料				大変形試料					日野		伯太	北房	智頭					
							φ(°)	C tf/m²	Fs				φ(°)	C tf/m²	Fs	長さm	深さm				幅cm	本震	余震	水平 鉛直	水平 鉛直
									Fs1 k _v =0 k _h =0	Fs2 k _v =max k _h =max	Fs3 k _v =max その時のk _h	Fs4 k _h =max その時のk _v						Fs5 k _v =0 k _h =0	水平	鉛直					
西伯町 鎌倉山 730m	A 560m	90	37	約100	3.0 (注1)	1.69	41.2	2.1	2.04	0.49	1.08	0.78	44.9	0.31	1.45	50	0.5	30	2.0	0	0.067	0	0		
	B 500m	90	38	約100	3.0 (注1)	1.76	52.9	0.5	1.9	-0.03	1.12	0.71	43.8	0.00	1.23	25	0.4	20	5.0	0	0.87	0.005	0		
日野町 本郷 裏山 495m	C1 330m	9	46.8	60.5	2.65	1.60	35.6	2.22	1.72	0.73	0.72	0.40	40.0	0.88	1.20	20	1.1	25	11.3	0	0.5	0	0		
	C2 330m						29.5	2.74	1.83	0.52	0.90	0.62	45.3	0.37	1.12				5.4	0	0.087	0	0		
日南町 役場裏 山 470m	D 340m	290	43.3	95.0	2.10	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	19	0.5	30	×	×	×	×	×		
	E 440m	10	46.4	63.6	1.36	1.83	×	×	2.19 (攪乱)	0.14 (攪乱)	1.15 (攪乱)	0.53 (攪乱)	51.9	1.2	2.19	11	1	30	6.2 (攪乱)	0	0.18 (攪乱)	0 (攪乱)	0 (攪乱)		
	F 440m	58	48.0	約50	1.50	1.83 (注2)	×	×	2.03 (攪乱)	0.12 (攪乱)	1.00 (攪乱)	0.51 (攪乱)	51.9 (注2)	1.2 (注2)	2.03	22	0.4	30	8.0 (攪乱)	0	0.4 (攪乱)	0 (攪乱)	0 (攪乱)		