

地震波の伝播による不均一層の応答解析について
Proc. of A.S.C.E. SM/久楽 勝行
 Oroville Dam における非線形有限要素法による応力
 と水平変位ならびに沈下の解析
State of California Department of Water
Resources Report No. TE-70-2/工藤 正
 砂防工事における暗渠について
Österreichische Wasserwirtschaft/池谷 浩

地震波の伝播による不均一層の応答
 解析について

“Response of Nonuniform Soil Deposits to Travelling Seismic Waves”
Destulian, H. and Seed H.B.
Proc. of A.S.C.E., SM. Vol. 97, No. 1, pp. 27~46
 January (1971)

(1) まえがき

本論文は図-1に示すような傾斜した岩盤上に堆積土がのっているような地盤の地震時の応答を計算し、検討を加えたものである。地震波が地盤を通過する際には反射、屈折、分散などを受けて地震波は時間的変動を起こすが、この論文では、波の時間的変動はなく、一定の速度で伝播する単純化した地震波を仮定した。そして解析の場を2次元平面ひずみの場として取り扱い、有限要素法によって解析した。この解析方法によって地震時の挙動が定量的に求まるばかりなく、Dibaj と Penzien によって提案された単一伝播波の方法を採用したことによって一定速度の地震波が伝播する場合の堆積土の動的挙動の時間的変動の影響についても検討することができた。

(2) 計算方法

運動方程式は Rosenbluth の方法を拡張した Dibaj

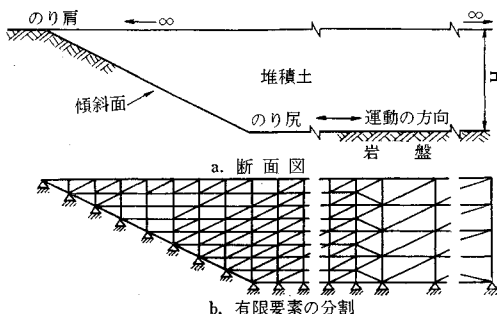


図-1 傾斜した岩盤上の堆積土

と Penzien の公式と本質的に同じものであり、図-1に示したような堆積土の有限要素に対して、運動方程式は最終的に次のようなマトリックスで表わされる。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -MR\ddot{u}_g(t) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 M, C, K はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックスであり、 R は正方マトリックスで岩盤の節点の変位によって求まる。また、 u_g は岩盤の節点の全変位ベクトルである。計算の際には、岩盤の運動がその性質を変えることなしに一定の速度 V_x で岩盤にそってすすむものと仮定する。

まず、地震波が岩盤の片端に到達し、最初の岩盤節点が運動し始めた時を0とする。最初の節点から d_x 離れた第2の岩盤節点は d_x/V_x に等しい時間後に運動し始める。そして最初の岩盤節点からの相対的な距離による時間的遅れをもって、他のすべての岩盤節点が同じように運動し始めるとして計算をすすめてゆく。

(3) 計算条件

岩盤の運動が一定速度で伝わる伝播波の方法と岩盤が一体となって運動する岩盤固定の方法とで応答計算がどのように違うかを検討するために、表-1に示すような条件の異なる8ケースについて解析した。堆積土として、中粒砂、固結粘土およびヘドロの3種類を、また岩盤の運動は EL Centro 地震 (1940.5.18) および Kern Country 地震 (1952.6.21) の際、記録されたデータを使用した。堆積土の厚さは 15 m, 24 m, 30 m にし、岩盤の傾斜勾配は 1:4 および 1:12 にした。表-1に示した8ケースについて、それぞれ波の伝播速度を 610 m/sec, 1524 m/sec, 3049 m/sec に変化させ、しかも岩盤の傾斜面に地震波が接近する場合と遠ざかる場合の2通りの解析を行なった。このため、岩盤固定の場合を加えて1ケースにつき7通りの違った応答計算を実施した。

表-1

番号	土	岩盤の運動	層の最大厚さ (m)	勾配
1	中粒砂	Taft 0.1g	30	1:4
2			30	1:12
3			30	1:12
4	中粒砂	EL Centro 0.1g	15	1:4
5			30	1:4
6	ヘドロ	EL Centro	24	1:4
7			24	1:12
8	固結粘土	EL Centro	24	1:12

(4) 計算結果

この応答解析は、地震時に堆積土の表面に生ずる最大水平加速度の分布を知ることにある。図-2は 1:4 の傾斜を持つ岩盤上に堆積した厚さ 30 m の砂層に Kern Country 地震で記録された 0.1g の加速度が底盤に作

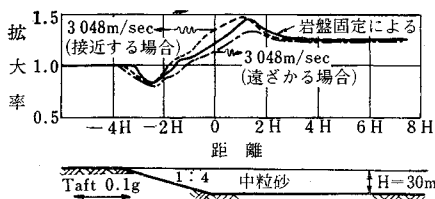


図-2 1:4 の傾斜を持つ岩盤上の砂の応答
($V_x=3048$ m/sec)

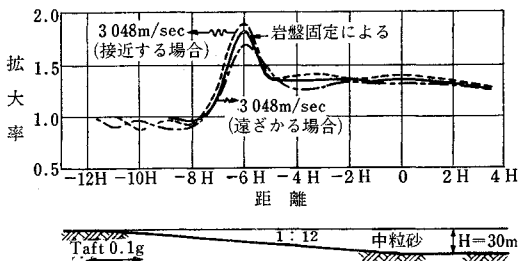


図-3 1:12 の傾斜を持つ岩盤上の砂の応答
($V_x=3048$ m/sec)

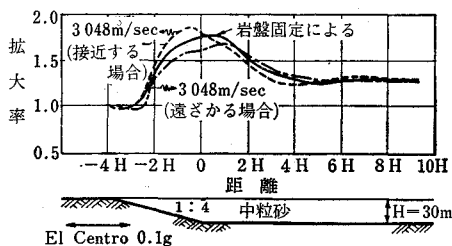


図-4 1:4 の傾斜をもつ岩盤上の砂の応答
($V_x=3048$ m/sec)

用したときの応答を示したものである。図中の拡大率は岩盤の最大加速度に対する堆積土の表面の最大加速度との比で表わしたものである。図から、岩盤固定の方法で求めた拡大率は伝播波の方法で、傾斜面から遠ざかる方向へ地震波が伝播する場合について求めたものに比べてわずかに大きくなっており、逆に傾斜面に近づく場合に比べてわずかに小さくなっている。また、図-3は岩盤の傾斜を1:4から1:12に変えた場合について示したものであり、図からその影響がほとんど現われていないことがわかる。図-4はEL Centro地震で記録された0.1gの加速度で計算した結果を示したものである。図-2と比較すると、かなり違った応答を示している。

(5) まとめ

この論文の解析結果から、堆積土の地震応答は岩盤内を伝わる地震波の速度に影響されることが示されており、また、解析するために単純化した仮定を実際の場合に適用することによって定量的な計算をすることも可能

であることが示されている。伝播波の方法による解の一般的特徴をのべると次のようになる。

1) 地震波が岩盤の傾斜面から遠ざかる場合の応答振幅は伝播速度が増大するにしたがって大きくなるが、応答の変化割合は小さくなる。しかし、応答振幅は岩盤固定の方法で求めたものの方が大きい。

2) 地震波が岩盤の傾斜面に近づく場合の応答振幅は岩盤固定の解よりも大きくなる場合もあれば、小さくなる場合もある。しかし、傾斜面から遠ざかる地震波の場合よりも常に大きくなる。

3) 両方向に伝播する地震波に対する応答の最高点の位置は岩盤固定の解とずれるが、伝播速度が増大するにしたがって、最高点の位置は一致してくる。

(委員 久楽 勝行・訳)

Oroville Dam における非線形有限要素法による応力と水平変位ならびに沈下の解析

“Nonlinear Finite Element Analysis of Stress and Movements in Oroville Dam”

Kulhawy, F.H. & Duncan, J.M.

Report No. TE-70-2, To. State of California Department of Water Resources., January (1970)

Oroville Dam はサンフランシスコの北約 95 km のサクラメント川の支川、フェザー川に、カリフォルニア州水資源局の手によって設計、建設された高さ 235 m (アースダムでは 1969 年現在世界最高)、堤体積約 6000 万 m^3 のアースフィルタイプのダムである (図-1)。

本論文は Kulhawy, Duncan, Seed らが行った、有限要素法によるこのダムの解析と実測値について比較検討を行なったものである。

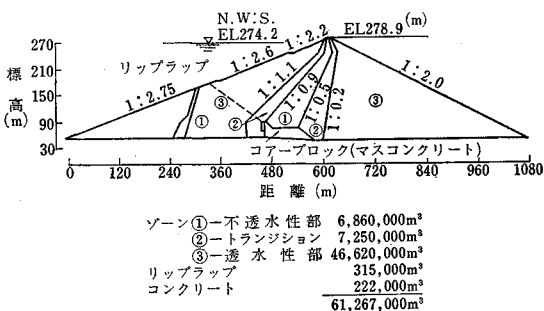


図-1 Oroville Dam の標準断面図

(1) 解析手順

ここでの解析は、非線形応力-ひずみ関係を用いて増分法により行なわれた。

1) 応力-ひずみ関係 築堤材料の非線形応力-ひずみ関係は築堤時と同じような含水比、密度の条件のもとに行なわれた三軸試験結果より得られた。この解析に

は次のような関係式とパラメーターが適用された。

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2C \cdot \cos \phi + 2\sigma_3 \cdot \sin \phi} \right]^2 K \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n$$

$$\nu_t = \frac{G - F \cdot \log \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)}{\left[1 - \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{K \cdot P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2C \cdot \cos \phi + 2\sigma_3 \cdot \sin \phi} \right]} \right]^2}$$

ただし、

K, n, R_f : $E_1 - \sigma_3$ 関係より得られる定数

G, F, d : $\nu_1 - \sigma_3$ 関係より得られる定数

C, ϕ : 粘着力および内部摩擦角

P_a : 大気圧

E_t, ν_t : 主応力 σ_1 によって決定される弾性係数とポアソン比

2) 要素分割 このダムでは a) コアブロック, b) 仮締切堤, c) 本体と三段階で築造されており, これを考慮してメッシュが組まれた。標準断面におけるメッシュを 図-2 に示す。

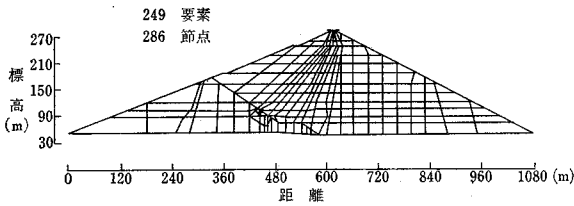


図-2 標準断面の要素分割

(2) 築堤材料の性質

築堤材料の三軸試験結果による $E_1 - \sigma_3$, $\nu_1 - \sigma_3$, C, ϕ の関係を 図-3~5 に, また, 解析に用いた定数値を表-1 に示す。

(3) ダムの水平変位ならびに沈下と応力

解析によるダムの水平変位ならびに沈下と応力を実測

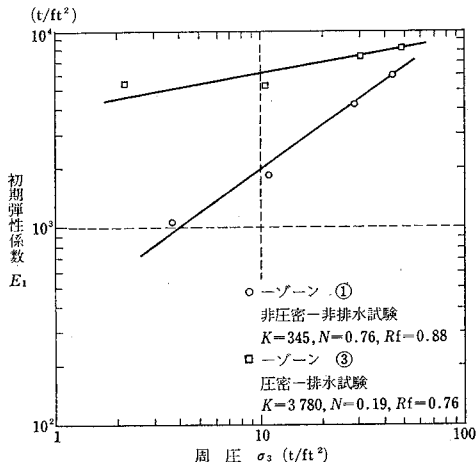


図-3 築堤材料の $E_1 - \sigma_3$ 関係図

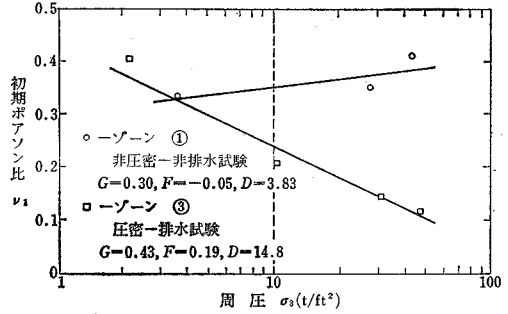


図-4 築堤材料の $\nu_1 - \sigma_3$ 関係図

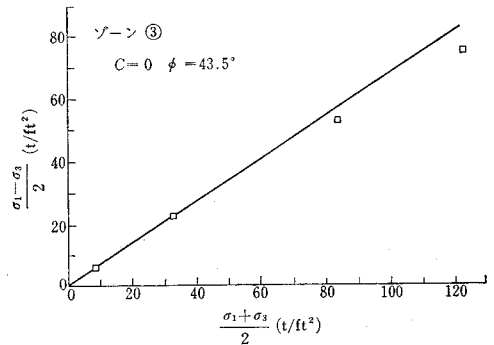
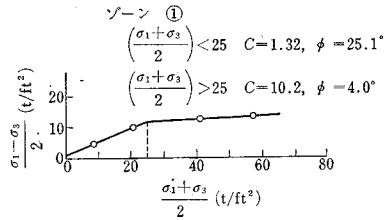


図-5 築堤材料の粘着力と内部摩擦角

表-1 応力-ひずみパラメーターの値

パラメーター	記号	解析に使用した値				
		透水性部 シヨン	トランジ 部	不透水性 部	粘土	コンクリ ート
単位体積重量 (lb/ft ³)	r	150	150	150	125	162
粘着力 (t/ft ²)	c	0	0	1.32	0.3	216
内部摩擦角 (°)	ϕ	43.5	43.5	25.1	13.0	0
係数	K	3780	3350	345	150	137
指数	n	0.19	0.19	0.76	1.0	0
破壊比	R_f	0.76	0.76	0.88	0.9	1.0
ポアソン比パラメーター	G	0.43	0.43	0.30	0.49	0.15
"	F	0.19	0.19	-0.05	0	0
"	d	14.8	14.8	3.83	0	0

値と比較し, その代表例を次に示す。

1) 沈下 (図-6)

2) 水平変位 (図-7)

3) 応力 (図-8)

4) 間げき水圧 (図-9)

(4) 結論

以上の解析の結果, 沈下と水平方向の変位については

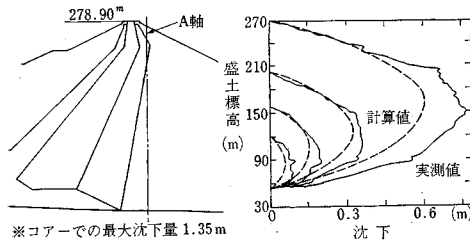


図-6 A軸における沈下曲線(施工時)

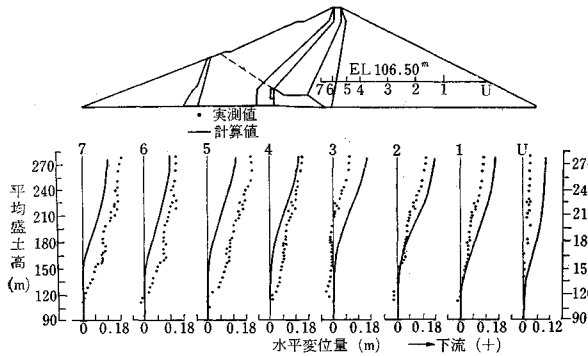


図-7 EL. 106.5 m における水平変位量

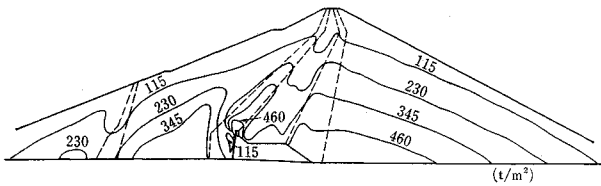


図-8 等最大主応力図(計算値)

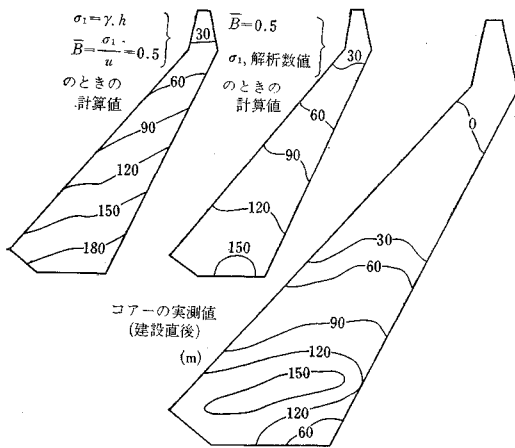


図-9 間げき水圧図(等ポテンシャル線)

計算値と実測値はよく合っているが、応力の計算値については必ずしも実測値とは合っていない。ここで応力の実測値は材料の強度に関係しないが、計算値については材料強度に関係することは注目すべきことである。

(委員 工藤 正・訳)

砂防工事における暗渠について

“Berechnungs Grundlagen für Klein- und Großdolen in der Wildbachverbauung.”

E. Leys.

Österreichische Wasserwirtschaft. Jahrgang 23, Heft 3/4, pp. 59~63 März. April (1971)

暗渠とは、砂防工事の横工における水抜き孔のことである。その形状、大きさ、数およびその配置は、おのおのの目的と地域的特性によって決まる。暗渠の分類は、その効果により次の三つに分類される。

(a) 工事施工中の排水のための暗渠：大きさは予想される水もしくは土石を導びき出すだけであり、それに応じて形状も決まる。

(b) 堆積土砂の浸透水を排水するための暗渠：この種の暗渠はたいてい小さい。形状としては、
 長方形 横 10 cm/縦 20 cm~40 cm/60 cm
 正方形 20/20 cm~60/60 cm
 スリット状 10/50 cm~20/200 cm
 円形 直径 20 cm~100 cm
 位をとる。

(c) 土石流対策用の暗渠：一般に大暗渠工法が用いられ、常時は水や土石を貯めないための暗渠である。この暗渠の大きさは流過断面によって決る。

長方形・扇形 100/150 cm~250/300 cm
 正方形 100/100 cm 以上
 スリット状 20/200 cm~40/400 cm
 円形 直径 100~200 cm
 をとる。

(1) 通常の工法における暗渠配列の幾何学的形状
 暗渠を階段状に使用する工法においては、一般に図-1のような幾何学的暗渠配列をとる。

(2) 土石流対策用暗渠の例

砂防工事に初めて暗渠が使用されたのは、1885年に東チロル Pustertal の Eri 渓谷において、200/250 cm という基礎大暗渠の形で工事された。この大暗渠工法は砂防工事の対象流域内で、洪水、土砂運搬、堆積、洗掘の各間に非常に好都合な相互作用を生じさせた。これ以後、大暗渠工法が砂防工学に取り入れられ、水抜き孔の発達をうながした。そして、砂防ダム上流側の堆砂区域をできるだけあけておくことにより、土石流を処理できる見通しがあった。

(3) 土石群の大径礫に関しての暗渠基礎幅の選択

砂防工事に用いられる大暗渠の基礎幅は、その溪流で

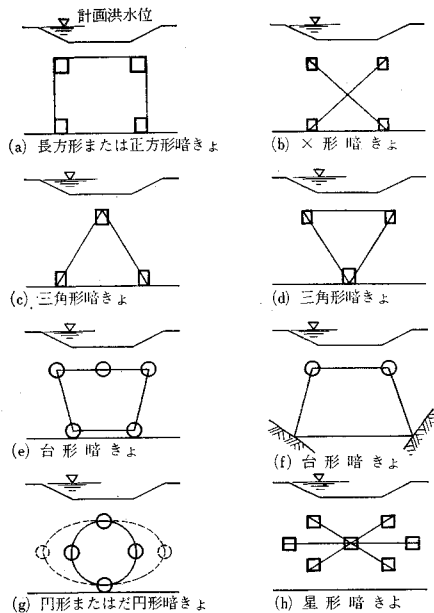


図-1 暗渠配列

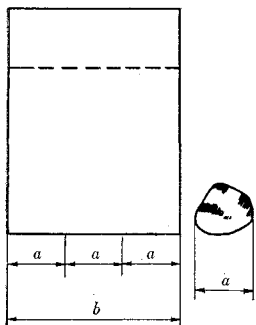


図-2 流下土砂に対する暗渠の大きさ

運搬されうる一つの岩塊の3倍の長さをとっている。そして、その基礎幅をもとに暗渠の大きさを決めている(図-2)。

暗渠の形が円形の場合は、断面積が辺長 $b=3a$ の正方形と同面積という条件から、直径 d は $d=3.4a$ をとる。

(4) 暗渠からの流出量に対する公式——暗渠の落差と流出速度の影響を無視した際の——

① 記号：以下にでてくる公式における記号は

h_2, h_4 : 暗渠上端までの水深 (m)

h_1, h_3 : 暗渠下端までの水深 (m)

w : 川底から暗渠下端までの水深 (m)

b : 暗渠幅 (m)

b_u : 暗渠下端幅 (m)

b_0 : 暗渠上端幅 (m)

d : 暗渠直径 (m)

S : 暗渠流過断面の重心点

e : 暗渠上端から重心点までの距離 (m)

φ° : 中心角

g : 重力加速度 (m/sec²)

μ : 流出係数

Q : 流出量 (m³/sec)

② 長方形暗渠からの流出量

$$Q = \frac{2}{3} \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} (h_1^{3/2} - h_2^{3/2})$$

③ 正方形暗渠からの流出量

$$Q = \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \sqrt{h_m} \quad h_m = \frac{h_1 + h_2}{2}$$

④ 台形暗渠からの流出量

$$Q = \mu \sqrt{2g} \frac{b_u + b_0}{2} (h_1 - h_2) \sqrt{h_2 + e}$$

$$\left(h_1 - h_2 \leq \frac{b_u + b_0}{2} \text{ の場合} \right)$$

$$Q = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} \frac{1}{h_1 - h_2} \left[(h_1^{3/2} - h_2^{3/2}) (b_0 h_1 - b_u h_2) + \frac{3}{5} (h_1 h_1^{3/2} - h_2 h_2^{3/2}) (b_u - b_0) \right]$$

$$\left(h_1 - h_2 > \frac{b_0 + b_u}{2} \text{ の場合} \right)$$

⑤ 円形暗渠からの流出量

$$Q = \mu \cdot \frac{d^2 \pi}{4} \sqrt{2g} \sqrt{h_2 + \frac{d}{2}}$$

⑥ 一部を切り取った円形暗渠からの流出量

$$Q = \mu \cdot \frac{d^2}{4} \left\{ \pi - \frac{1}{2} \left[\frac{\pi \varphi^\circ}{180} - \cos(\varphi^\circ - 90) \right] \right\} \times \sqrt{2g} \sqrt{h_2 + e}$$

⑦ 半円と長方形とを組合せた流出断面をもつ暗渠からの流出量

$$Q = \mu \left(\frac{d^2 \pi}{8} + ad \right) \sqrt{2g} \sqrt{h_2 + e}$$

⑧ アーチ門戸状暗渠からの流出量

$$Q = \mu \sqrt{2g} \left\{ \frac{d^2 \pi}{8} \sqrt{h^2 + \left(1 - \frac{4}{3\pi}\right) \frac{d}{2}} + \frac{2}{3} d \left(h_1 - h_2 - \frac{2}{d} \right) \left[h_1^{3/2} - \left(h_2 + \frac{d}{2} \right)^{3/2} \right] \right\}$$

⑨ 半円と半長円とを組合せた流出断面をもつ暗渠からの流出量

$$Q = \mu \frac{d^2 \pi}{4} \left(\frac{1}{2} + \frac{a}{d} \right) \sqrt{2g} \sqrt{h_2 + e}$$

結 言

砂防ダムによって永久的に押止される堆積土砂に対し、本論文では、暗渠をとって流出するであろう土砂である浮遊土砂について、土石流対策用暗渠の大きさを決める資料として、各種暗渠形式に対する流出量計算の公式を示した。

(委員 池谷 浩・訳)