



大規模特殊事業調査	
トンネルに関する調査	
耐震調査	資料No. 5
盛土に関する調査	
耐震調査	資料No. 2

土木研究所資料 第851号

沈埋トンネルおよび盛土の耐震性に関する調査報告

——沈埋トンネルおよび盛土の地震応答解析——

昭和48年12月

建設省土木研究所
振動研究室

まえがき

本報告書は昭和 47 年度に実施した沈埋トンネルと盛土の模型振動実験結果を検証し、さらに、地盤の構成や減衰特性に対する考慮を加えて実構造物の動的性質を推定するための資料を得ることを目的として実施した沈埋トンネルと盛土の地震応答解析結果をとりまとめたものである。

昭和 48 年 5 月

振動研究室

	栗	林	栄	一
(併)	岩	崎	敏	男
	川	島	一	彦
	若	月	高	春
	高	木	義	和

※ (本務) 建設省建築研究所国際地震工学部第二耐震工学室室長

目 次

まえがき

1. 解析モデルの設定	1
1-1 解析の対象	1
1-2 解析の種類	1
1-3 モデル化の検討	1
2. 解析結果	7
2-1 固有振動解析結果	7
(1) モデル1-1	7
(2) モデル1-2	10
(3) モデル2-1	13
(4) モデル2-2	16
(5) モデル2-3	19
(6) モデル2-4	22
(7) モデル2-5	25
(8) モデル2-6	27
(9) モデル2-7	29
(10) モデル2-8	31
2-2 正弦波による定常応答解析結果	42
2-3 地震動波形およびランダム波形による応答解析結果	45
2-4 静的解析結果	63
3. 解析結果の検討および実験結果との比較	64
3-1 固有振動解析結果	64
3-2 応答解析結果	64
(1) 正弦波による定常応答解析結果	64
(2) 地震動波形およびランダム波形による応答解析結果	65
4. 結 論	67
付 録 A 動的系の縮合	68
付 録 B 応答解析に用いた地震動波形およびランダム波形のパワースペクトル	72

1. 解析モデルの設定

1-1 解析の対象

解析の対象としたのは、沈埋トンネルと盛土の振動特性を調べる目的で昭和47年に実施した振動実験の模型である。この模型の概略図を図1-1（沈埋トンネル中心模型）、図1-2（盛土中心模型）に、弾性係数を表1-1に示す。模型は、長さが $1/550$ 、時間が $1/5$ 、密度が $1/1.40 \sim 1/1.90$ に縮小されており、後述する解析結果はこの模型相似則に従い実物の振動性状を推定することができる。

1-2 解析の種類

解析モデルは、トンネルおよび盛土の軸直角方向断面を平面ひずみ状態と考えた二次元モデルと、盛土とその周辺地盤の立体的な振動性状を検討するための三次元モデルの2通りとした。

二次元モデルでは盛土中央部、盛土斜路部、地盤部および盛土部分だけの各断面を考慮した。

解析モデルの種類と実験模型との関係を示すと表1-2のようになる。

これらの各モデルに対して固有振動解析を行ない、固有振動数、固有ベクトル、刺激係数を求めた。また、盛土中央断面（モデル2-1）に対しては、正弦波による定常応答解析と実験で模型に入力したEl Centro NS成分およびランダム波形による応答解析を行なうとともに、自重による静的解析を行なった。減衰定数は正弦波による定常応答解析では限界減衰に対して1%、2%、5%とし、El Centro NSおよびランダム波形による応答解析では2%とした。

1-3 モデル化の検討

(i) 二次元平面モデル

地盤構成、盛土の形状、弾性係数などは実験模型の通りとし、節点数を減少させるためモデルの幅を $2m$ （高さとの比は約1:7）とした。

境界条件は底面では水平方向、上下方向とも固定、側面では水平方向自由、上下方向固定とし、その他の点はすべて自由とした。

(ii) 三次元モデル

三次元モデルでは地盤の構成を忠実にモデル化することは、節点数が非常に多くなり困難であるため、実験模型との完全な対応あるいは二次元モデルとの比較は解析の中心目的からはずし、地盤と盛土の相互作用を一般的に求めるにとどめた。そのため、盛土の形状も長さを短かくし、左右対象とするなど多少変更し、地盤もI層、ロ層、ニ～ホ層から成る上層と、へ層、ト層から成る下層の2つに大きくモデル化した。弾性係数は各層の厚さを考慮した平均値を参考にして決定した。

境界条件は底面では水平2成分と上下方向とも固定とし、その他は全て自由である。

以上のようにして決定した解析モデルを図1-3～1-7に示す。また、弾性定数は表1-3の値を使用した。

固有値解析にあたっては動的自由度を減少させるため静的縮合法により130元の動的系に置き変えている。図1-3～1-7において黒丸で示されている節点が縮合後の節点である。静的縮合法に関しては付録Aに示した。

表 1-1 実験モデルの弾性係数(実測値)

		弾 性 係 数 (g/cm^3)	
		モ デ ル 1	モ デ ル 2
イ	層	1 2 8	8 9
ロ	層	1 7 3	1 0 8
ニ ~ ホ	層	7 3 5	5 7 0
ヘ	層	1 1 7 7	1 1 7 7
ト	層	1 3 6 4	1 3 6 4
盛 土	上部	1 8 0	1 4 5
	下部	1 2 9	1 4 5

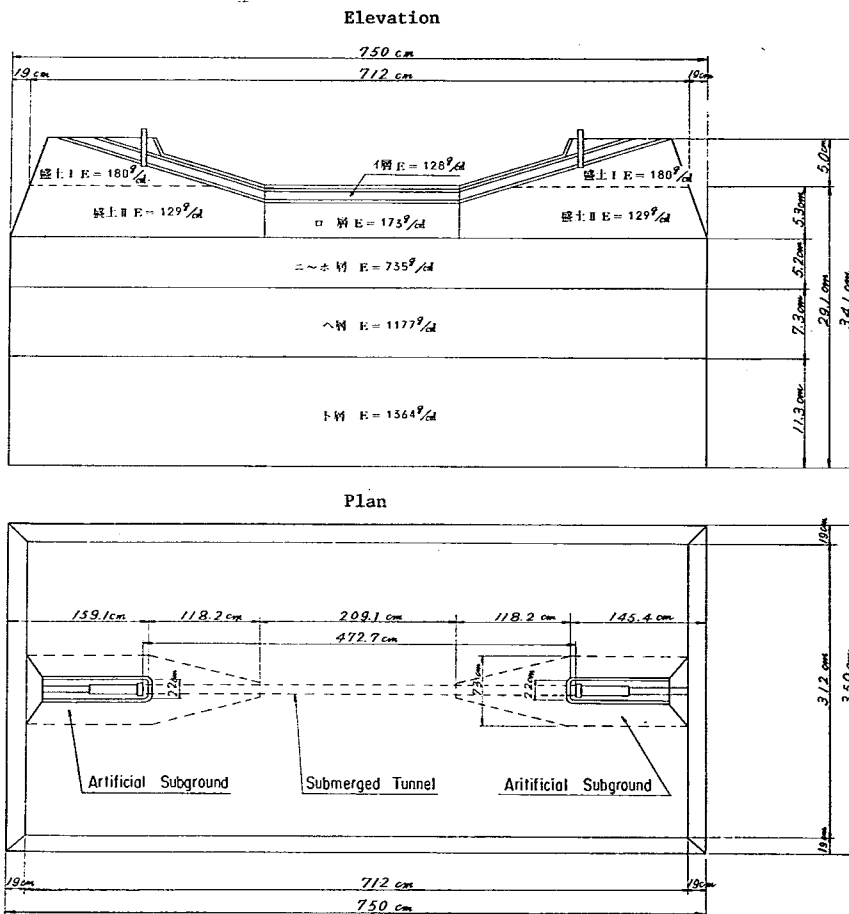


図 1-1 沈埋トンネル中心モデル(モデル1)

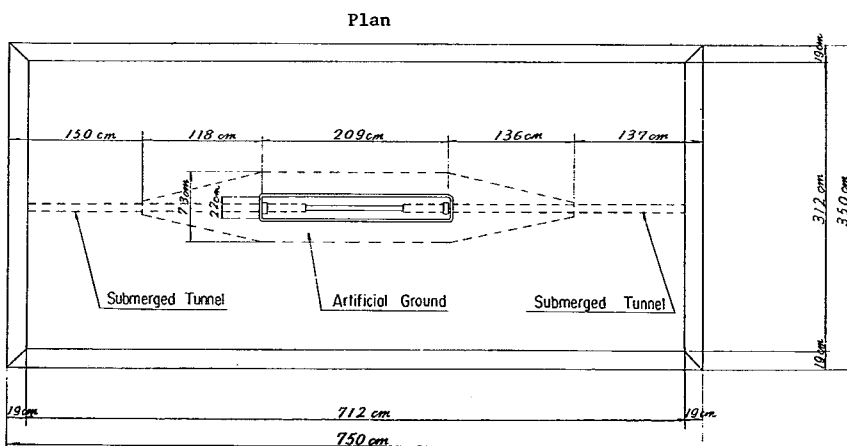
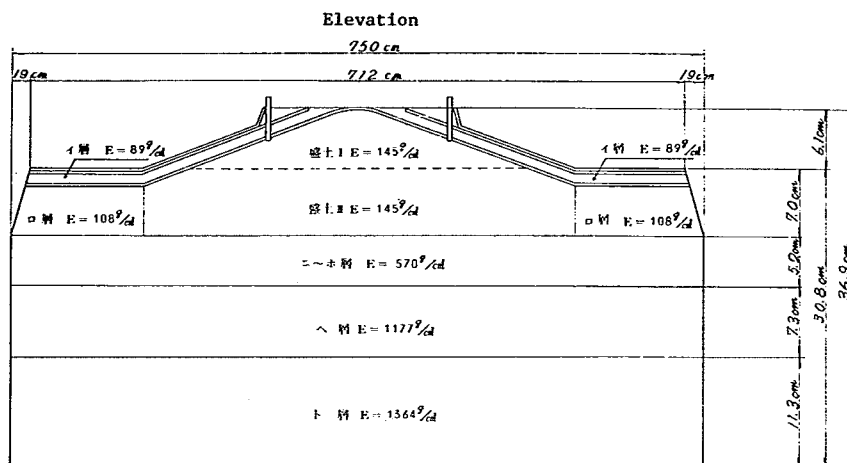


図 1 - 2 盛土中心モデル (モデル 2)

表 1-2 解析モデルの種類

実験モデル	解析対象断面	モデル 名 称	摘 要
モデル 1	盛土部断面	モデル 1-1	
	地盤部断面	モデル 1-2	トンネルは含まない。
モデル 2	盛土部断面	モデル 2-1	
		モデル 2-2	盛土下の地盤改良を施さない場合。
	斜路部断面	モデル 2-3	斜路部中央の断面で盛土の高さが半分。
	地盤部断面	モデル 2-4	トンネルは含まない。
	盛土断面	モデル 2-5	モデル 2-1 の盛土断面のみ考慮。
		モデル 2-6	モデル 2-5 からトンネルを取去った場合。
		モデル 2-7	モデル 2-5 の法面に小段をつけた場合。
	全 体	モデル 2-8	三次元モデル、地盤は上層と下層にモデル化。

表 1-3 解析モデルの弾性係数

(a) 二次元平面ひずみモデル

	弾 性 係 数 (g/cm^2)		単 位 体 積 重 量 (g/cm^3)	ポアソン比
	モデル 1-1, 1-2	モデル 2-1 ~ 2-2		
イ 層	1 2 8	8 9	1.0	0.4 5
ロ 層	1 7 3	1 0 8	"	"
ニ～ホ層	7 3 5	7 3 5	"	"
ヘ 層	1 1 7 7	1 1 7 7	"	"
ト 層	1 3 6 4	1 3 6 4	"	"
盛、土	1 8 0	1 4 5	"	"

(b) 三次元モデル

	弾 性 係 数 (g/cm^2)	単 位 体 積 重 量 (g/cm^3)	ポアソン 比
上 層 (イ層・ロ層・ニ～ホ層)	1 0 0	1.0	0.4 5
下 層 (ヘ層・ト層)	1 0 0 0	"	"
盛 土	1 4 5	"	"

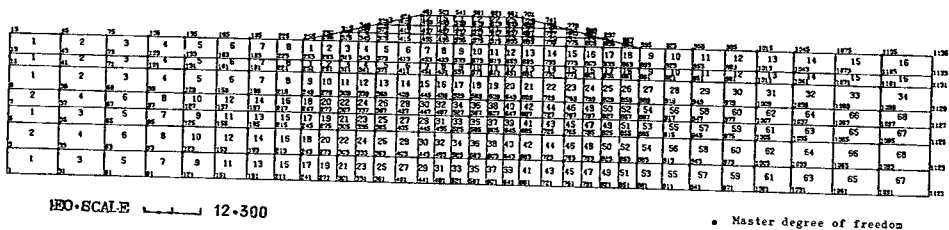


図 1-3 モデル 1-1・2-1・2-2

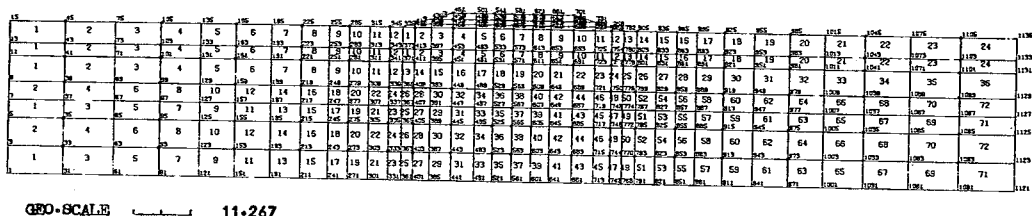


図 1-4 モデル 2-3

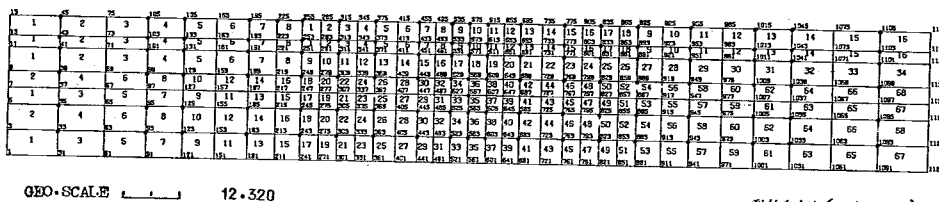


図 1-5 モデル 1-2・モデル 2-4

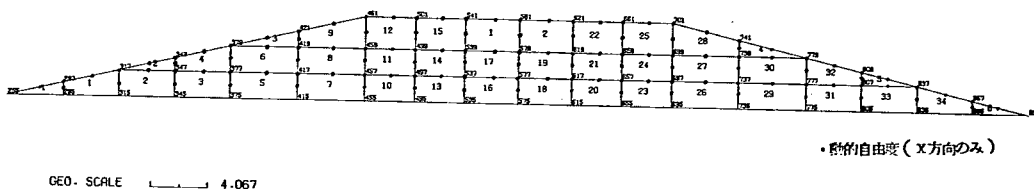
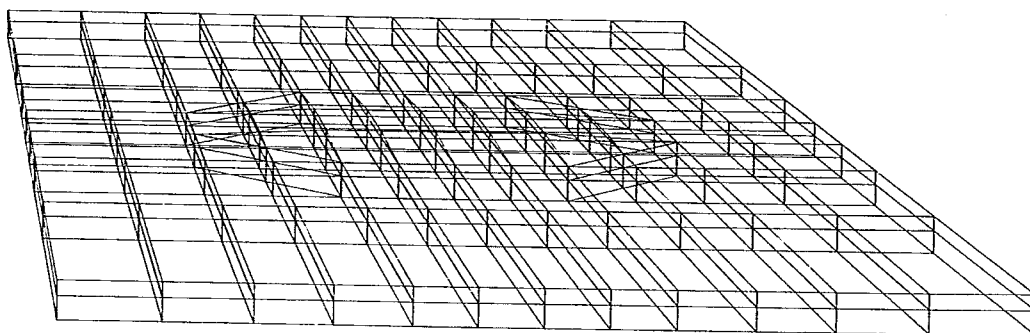
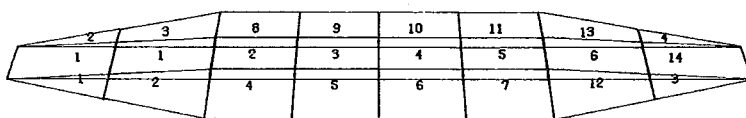


図 1-6 モデル 2-5・モデル 2-6・モデル 2-7



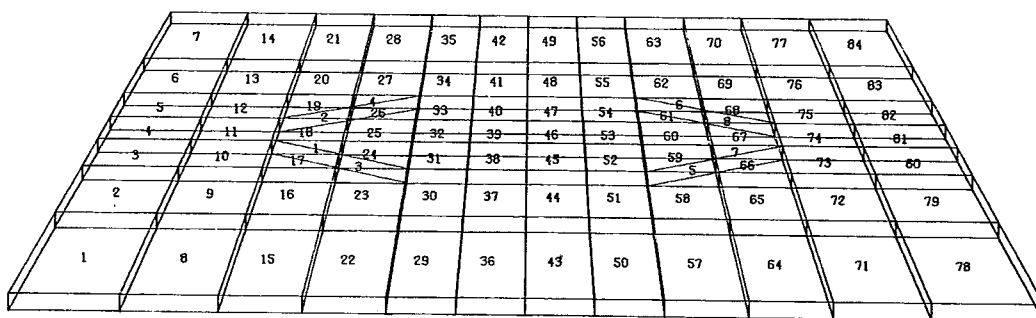
GEO. SCALE 1:42.122

(a) 全体図



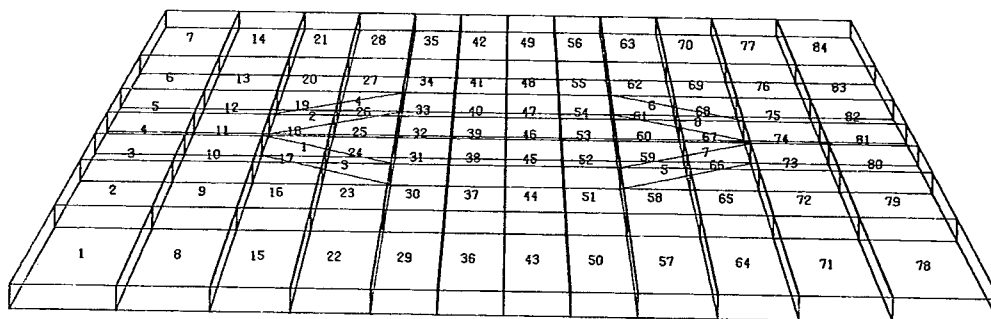
GEO. SCALE 1:41.786

(b) 盛土部



GEO. SCALE 1:60.994

(c) 第1層



GEO. SCALE 1:63.832

(d) 第2層

図1-7 モデル2-8

2. 解析結果

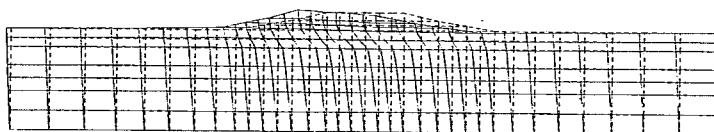
2-1 2次元モデル固有振動解析

(1) モデル1-1

表2-1 固有振動数・刺激係数(1~50次)

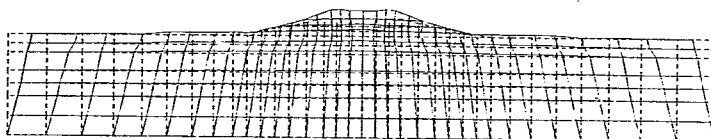
次	振動数 Hz	周期 Sec	刺激係数
1	4.632	0.2159	1.533
2	5.916	0.1690	0.000
3	6.225	0.1606	1.548
4	7.734	0.1293	-0.000
5	8.442	0.1184	-0.578
6	9.961	0.1004	-0.841
7	9.973	0.1003	0.000
8	10.842	0.0922	0.107
9	12.016	0.0832	0.000
10	12.226	0.0818	0.000
11	12.638	0.0791	-0.786
12	12.839	0.0779	0.877
13	13.509	0.0740	-0.000
14	13.894	0.0720	-0.846
15	14.264	0.0701	-0.000
16	14.378	0.0696	-0.098
17	14.569	0.0686	0.000
18	15.261	0.0655	0.327
19	16.762	0.0597	0.000
20	17.046	0.0587	0.526
21	17.358	0.0576	0.097
22	17.401	0.0575	-0.000
23	18.846	0.0531	0.627
24	19.398	0.0516	0.000
25	20.740	0.0482	-0.000

次	振動数 Hz	周期 Sec	刺激係数
26	20.986	0.0476	0.720
27	21.729	0.0460	0.261
28	21.894	0.0457	-0.000
29	22.195	0.0451	-0.380
30	23.121	0.0433	0.837
31	23.149	0.0432	-0.000
32	23.527	0.0425	0.000
33	23.665	0.0423	1.011
34	24.065	0.0416	0.021
35	24.276	0.0412	0.000
36	25.027	0.0400	0.000
37	25.200	0.0397	0.208
38	25.541	0.0392	0.000
39	25.756	0.0388	-0.543
40	26.008	0.0384	0.616
41	26.863	0.0372	-0.000
42	27.767	0.0360	0.000
43	28.744	0.0348	0.043
44	29.038	0.0344	0.000
45	30.159	0.0332	-0.350
46	30.822	0.0324	-0.000
47	31.169	0.0321	-0.296
48	32.433	0.0308	0.097
49	33.600	0.0298	0.000
50	33.928	0.0295	-0.065



DEO. SCALE 11.367
DIS. SCALE 1.000

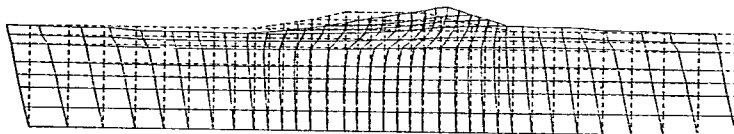
(1) 1次モード(モデル1-1)



DEO. SCALE 11.367
DIS. SCALE 1.000

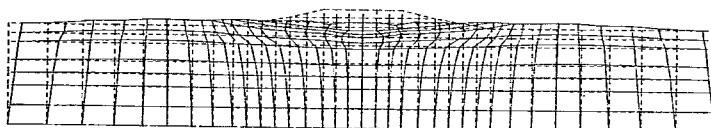
(2) 2次モード(モデル1-1)

図2-1 (1)~(2)



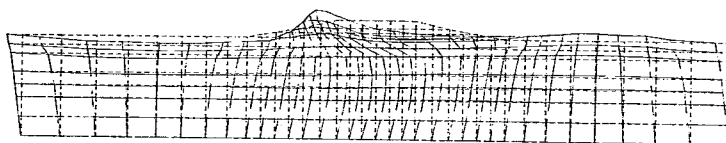
GEO. SCALE  11.367
 DIS. SCALE  1.000

(3) 3次モード (モデル1-1)



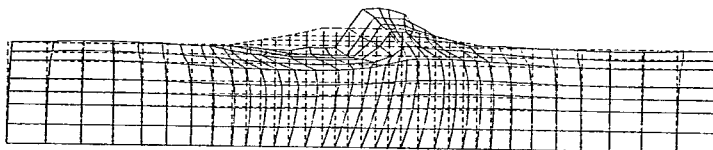
GEO. SCALE  11.367
 DIS. SCALE  1.000

(4) 4次モード (モデル1-1)



GEO. SCALE  11.367
 DIS. SCALE  1.000

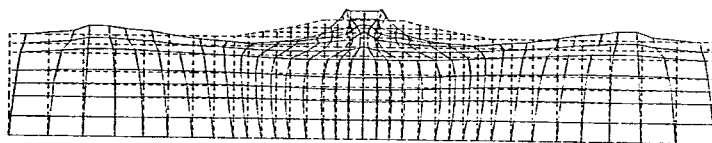
(5) 5次モード (モデル1-1)



GEO. SCALE  11.367
 DIS. SCALE  1.000

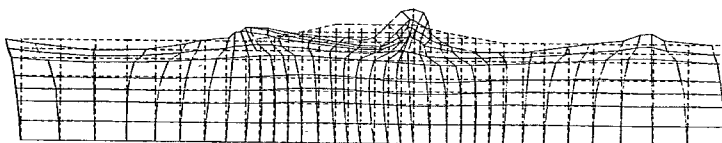
(6) 6次モード (モデル1-1)

図2-1 (3)~(6)



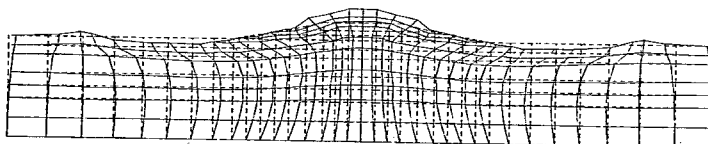
DEG. SCALE 11.367
DIS. SCALE 1.000

(7) 7次モード (モデル1-1)



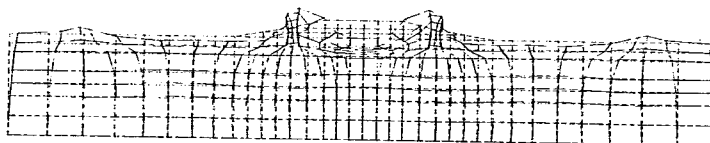
DEG. SCALE 11.367
DIS. SCALE 1.000

(8) 8次モード (モデル1-1)



DEG. SCALE 11.357
DIS. SCALE 1.000

(9) 9次モード (モデル1-1)



DEG. SCALE 11.357
DIS. SCALE 1.000

(10) 10次モード (モデル1-1)

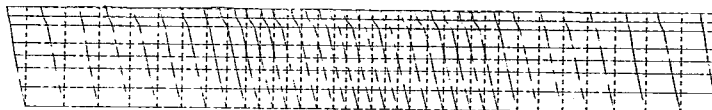
図2-1 (7)~(10)

(2) モデル 1 - 2

表 2 - 2 固有振動数，刺激係数（1 ～ 50 次）

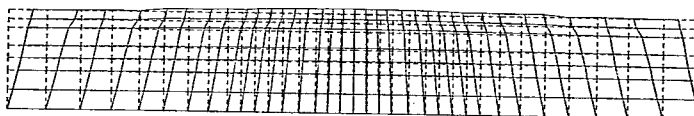
次	振 動 数 H_z	周 期 Sec	刺 激 係 数
1	5.448	0.1835	2.223
2	5.961	0.1678	-0.000
3	6.994	0.1430	0.235
4	8.375	0.1193	0.000
5	9.731	0.1027	-0.036
6	10.917	0.0916	-0.000
7	11.730	0.0853	0.197
8	11.968	0.0836	-1.229
9	12.655	0.0790	0.000
10	12.987	0.0770	-0.000
11	13.126	0.0762	1.118
12	13.666	0.0732	0.000
13	14.068	0.0711	-0.493
14	14.187	0.0705	0.472
15	14.710	0.0680	-0.000
16	15.623	0.0640	-0.000
17	15.707	0.0637	-0.133
18	17.388	0.0575	-0.125
19	17.937	0.0578	-0.000
20	19.347	0.0517	-0.000
21	20.365	0.0491	0.011
22	21.323	0.0469	-0.728
23	21.524	0.0465	-0.494
24	21.907	0.0456	0.000
25	22.603	0.0424	-0.983

次	振 動 数 H_z	周 期 Sec	刺 激 係 数
26	22.679	0.0441	0.000
27	23.102	0.0433	0.771
28	23.172	0.0432	-0.000
29	23.322	0.0429	0.799
30	24.015	0.0416	-0.000
31	24.453	0.0409	0.000
32	25.402	0.0394	0.664
33	25.616	0.0390	-0.000
34	25.596	0.0385	0.000
35	26.183	0.0382	0.404
36	26.718	0.0374	0.080
37	27.258	0.0367	0.066
38	28.122	0.0356	0.000
39	28.463	0.0351	0.000
40	29.856	0.0335	0.000
41	30.980	0.0323	-0.164
42	31.505	0.0317	-0.115
43	33.360	0.0300	-0.000
44	33.742	0.0296	0.183
45	34.100	0.0293	0.000
46	34.169	0.0293	-0.466
47	34.677	0.0288	-0.010
48	36.536	0.0274	-0.000
49	36.740	0.0272	0.734
50	37.020	0.0270	0.000



DEB. SCALE 11.640
DIS. SCALE 1.000

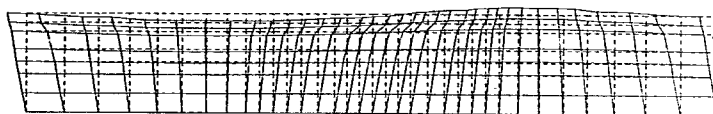
(1) 1 次モード (モデル 1 - 2)



DEB. SCALE 11.640
DIS. SCALE 1.000

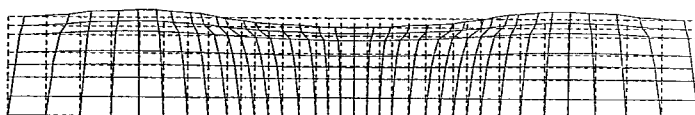
(2) 2 次モード (モデル 1 - 2)

図 2 - 2 (1)～(2)



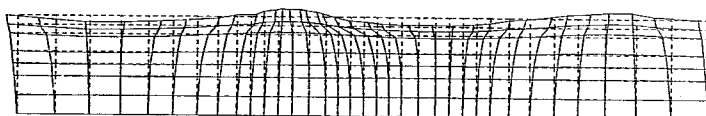
GEO. SCALE  11.640
 DIS. SCALE  1.000

(3) 3次モード (モデル1-2)



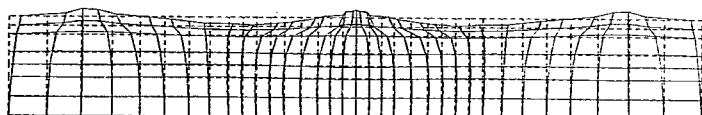
GEO. SCALE  11.640
 DIS. SCALE  1.000

(4) 4次モード (モデル1-2)



GEO. SCALE  11.640
 DIS. SCALE  1.000

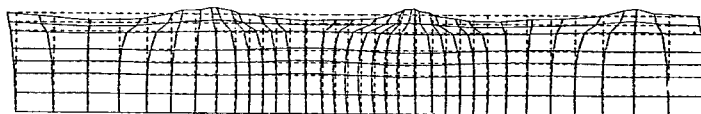
(5) 5次モード (モデル1-2)



GEO. SCALE  11.640
 DIS. SCALE  1.000

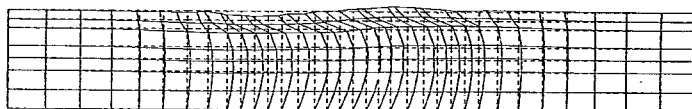
(6) 6次モード (モデル1-2)

図2-2 (3)~(6)



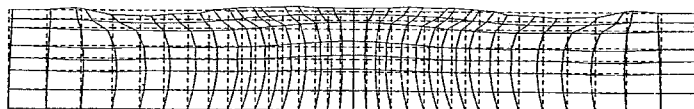
DEO. SCALE 11.640
DIS. SCALE 1.000

(7) 7次モード (モデル1-2)



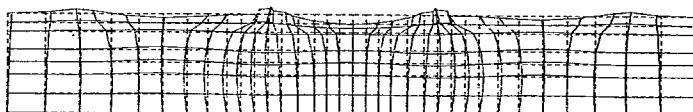
DEO. SCALE 11.640
DIS. SCALE 1.000

(8) 8次モード (モデル1-2)



DEO. SCALE 11.640
DIS. SCALE 1.000

(9) 9次モード (モデル1-2)



DEO. SCALE 11.640
DIS. SCALE 1.000

(10) 10次モード (モデル1-2)

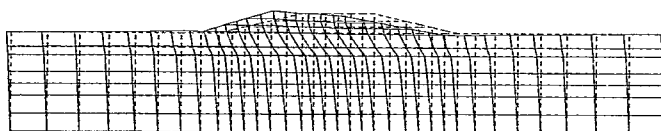
図2-2 (7)~(10)

(3) モデル2-1

表2-3 固有振動数・刺激係数(1~50次)

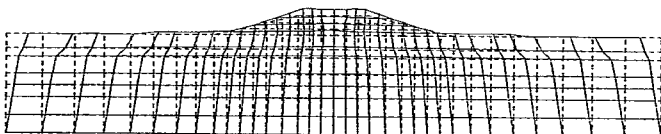
次	振動数 Hz	周期 Sec	刺激係数
1	3.9936	0.2504	1.310
2	5.1231	0.1952	0.000
3	5.3638	0.1864	1.290
4	6.4967	0.1539	-0.000
5	7.2841	0.1373	0.462
6	8.1785	0.1227	0.000
7	8.5971	0.1163	1.221
8	8.7946	0.1137	-0.277
9	9.7132	0.1030	0.000
10	10.214	0.0979	-1.364
11	10.304	0.0971	0.000
12	10.778	0.0928	-0.438
13	10.870	0.0920	-0.000
14	11.452	0.0873	-0.046
15	12.089	0.0827	-0.000
16	12.521	0.0799	0.001
17	12.881	0.0776	0.000
18	13.560	0.0737	0.209
19	14.865	0.0673	0.000
20	15.112	0.0662	0.408
21	15.603	0.0641	0.000
22	15.780	0.0634	-0.211
23	16.251	0.0615	0.493
24	17.494	0.0572	0.000
25	17.983	0.0556	-0.000

次	振動数 Hz	周期 Sec	刺激係数
26	18.162	0.0551	-0.061
27	18.274	0.0547	-0.000
28	18.676	0.0535	0.272
29	19.193	0.0521	0.371
30	19.547	0.0512	0.983
31	19.551	0.0511	0.000
32	20.302	0.0493	-0.000
33	20.501	0.0488	-0.782
34	20.869	0.0479	-0.000
35	20.893	0.0479	-0.695
36	21.166	0.0472	-0.427
37	21.351	0.0468	0.000
38	22.021	0.0454	-0.482
39	22.185	0.0451	-0.000
40	22.667	0.0441	-0.358
41	23.331	0.0429	0.000
42	23.584	0.0424	-0.000
43	23.603	0.0424	-0.509
44	25.124	0.0398	0.000
45	25.715	0.0389	0.547
46	25.873	0.0387	-0.061
47	26.106	0.0383	0.000
48	26.333	0.0380	-0.000
49	26.392	0.0379	0.934
50	27.306	0.0366	-0.265



GEO. SCALE 12.300
DIS. SCALE 1.000

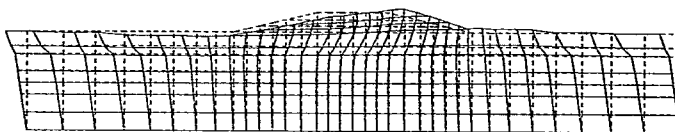
(2) 2次モード



GEO. SCALE 12.300
DIS. SCALE 1.000

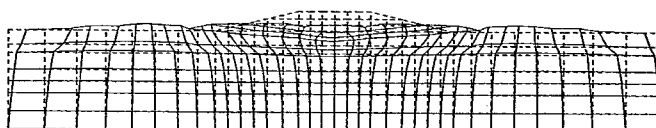
(1) 1次モード

図2-3 (1)~(2)



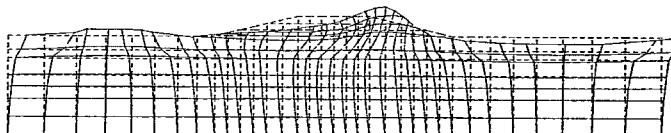
GEO. SCALE 12,300
DIS. SCALE 1,000

(3) 3次モード



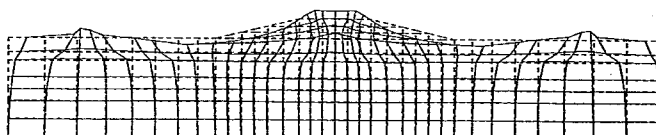
GEO. SCALE 12,300
DIS. SCALE 1,000

(4) 4次モード



GEO. SCALE 12,300
DIS. SCALE 1,000

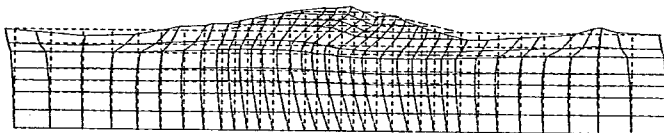
(5) 5次モード



GEO. SCALE 12,300
DIS. SCALE 1,000

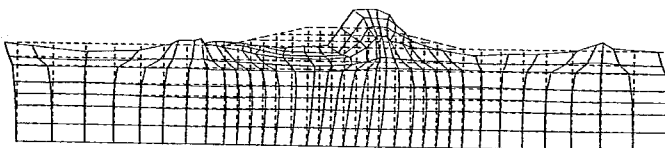
(6) 6次モード

図 2 ~ 3 (3) ~ (6)



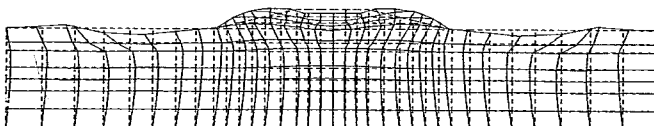
GEO. SCALE 12,300
DIS. SCALE 1,000

(7) 7次モード



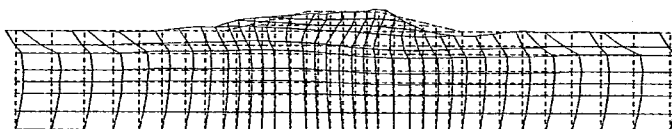
GEO. SCALE 12,300
DIS. SCALE 1,000

(8) 8次モード



GEO. SCALE 12,300
DIS. SCALE 1,000

(9) 9次モード



GEO. SCALE 12,300
DIS. SCALE 1,000

(10) 10次モード

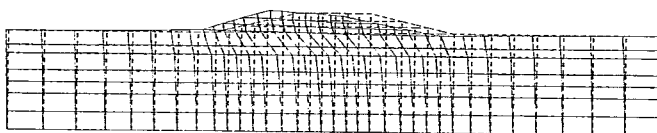
図2~3 (7)~(10)

(4) モデル 2 - 2

表 2 - 4 固有振動数・刺激係数 (1 ~ 50 次)

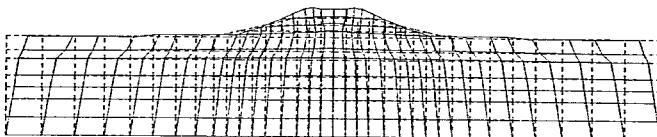
次	振動数 Hz	周期 Sec	刺激係数
1	3.6284	0.2755	1.028
2	5.0592	0.1977	0.900
3	5.2431	0.1907	-1.511
4	6.1001	0.1639	-0.000
5	6.9565	0.1438	0.334
6	7.8792	0.1269	0.000
7	8.0073	0.1249	0.964
8	8.4681	0.1181	0.819
9	9.3501	0.1070	0.000
10	9.7329	0.1027	0.000
11	9.8880	0.1011	0.318
12	10.112	0.0989	1.362
13	10.743	0.0931	-0.000
14	11.118	0.0899	0.276
15	11.212	0.0892	-0.000
16	11.736	0.0852	-0.185
17	12.645	0.0791	0.000
18	13.081	0.0764	0.167
19	14.029	0.0713	0.000
20	14.262	0.0701	0.112
21	14.472	0.0691	-0.000
22	14.793	0.0676	0.560
23	15.414	0.0649	-0.416
24	16.590	0.0603	-0.000
25	17.142	0.0583	-0.000

次	振動数 Hz	周期 Sec	刺激係数
26	17.521	0.0571	0.261
27	17.833	0.0561	-0.000
28	17.939	0.0557	0.380
29	18.459	0.0542	-0.087
30	18.750	0.0533	0.000
31	18.784	0.0532	-0.120
32	19.395	0.0516	0.505
33	19.541	0.0512	-0.000
34	19.955	0.0501	-1.183
35	20.110	0.0497	0.000
36	20.669	0.0484	0.000
37	20.981	0.0477	0.402
38	21.319	0.0469	-0.000
39	21.401	0.0467	-1.153
40	21.762	0.0460	0.706
41	22.296	0.0449	-0.000
42	23.069	0.0433	-0.000
43	23.245	0.0430	0.193
44	23.929	0.0418	-0.679
45	23.931	0.0418	-0.000
46	24.143	0.0414	0.431
47	24.298	0.0412	-0.000
48	25.321	0.0395	0.157
49	25.534	0.0392	-0.000
50	25.766	0.0388	-0.049



GEO. SCALE 12.300
DIS. SCALE 1.000

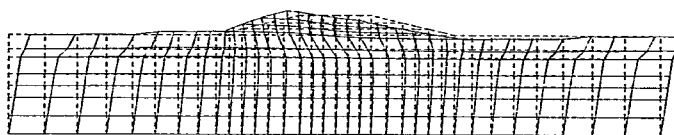
(1) 1 次モード



GEO. SCALE 12.300
DIS. SCALE 1.000

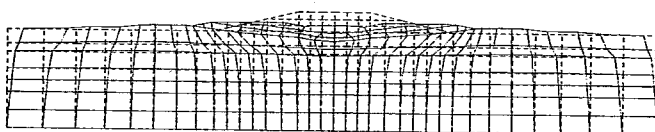
(2) 2 次モード

図 2 - 4 (1)~(2)



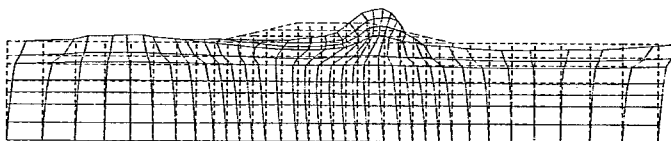
GEO. SCALE  12.300
 DIS. SCALE  1.000

(3) 3次モード



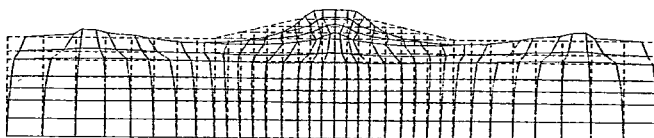
GEO. SCALE  12.300
 DIS. SCALE  1.000

(4) 4次モード



GEO. SCALE  12.300
 DIS. SCALE  1.000

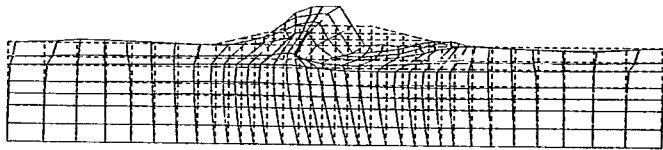
(5) 5次モード



GEO. SCALE  12.300
 DIS. SCALE  1.000

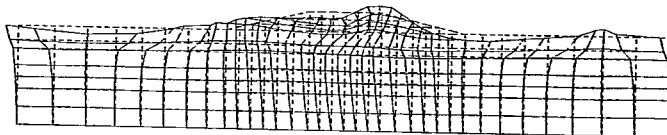
(6) 6次モード

図 2 - 4 (3)~(6)



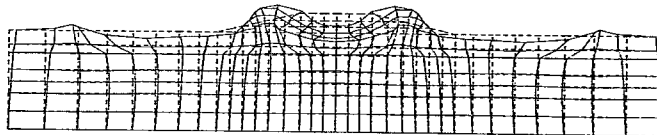
GEO. SCALE $\frac{1}{12,300}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1,000}$

(7) 7 次モード



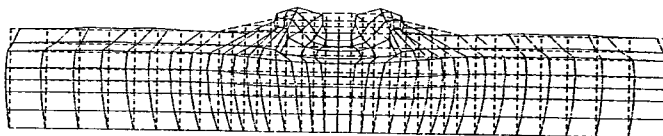
GEO. SCALE $\frac{1}{12,300}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1,000}$

(8) 8 次モード



GEO. SCALE $\frac{1}{12,300}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1,000}$

(9) 9 次モード



GEO. SCALE $\frac{1}{12,300}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1,000}$

(10) 10 次モード

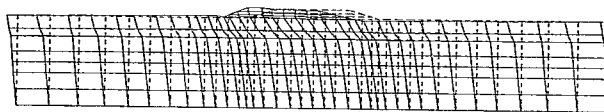
図 2 - 4 (7)~(10)

(5) モデル2-3

表2-5 固有振動数, 刺激係数 (1~50 次)

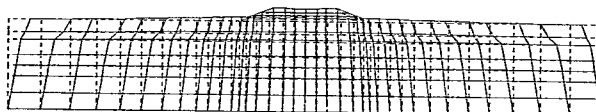
次	振動数 Hz	周期 Sec	刺激係数
1	4.541	0.2202	1.707
2	5.187	0.1928	0.000
3	5.589	0.1789	0.785
4	6.907	0.1448	-0.000
5	7.399	0.1352	-0.248
6	8.650	0.1156	0.000
7	9.158	0.1092	-1.188
8	9.643	0.1037	1.036
9	10.171	0.0983	0.000
10	10.434	0.0958	0.000
11	10.466	0.0955	1.097
12	11.226	0.0891	-0.000
13	11.358	0.0880	-0.079
14	12.023	0.0832	0.101
15	12.907	0.0775	-0.000
16	13.232	0.0756	-0.049
17	13.343	0.0749	-0.000
18	14.416	0.0694	-0.179
19	15.370	0.0651	0.015
20	15.592	0.0641	-0.000
21	16.128	0.0620	-0.000
22	16.961	0.0590	-0.384
23	17.660	0.0566	-0.551
24	18.130	0.0552	-0.000
25	18.380	0.0544	-0.106

次	振動数 Hz	周期 Sec	刺激係数
26	18.574	0.0538	-0.000
27	19.151	0.0522	-0.371
28	19.222	0.0520	-0.000
29	19.497	0.0513	-0.895
30	20.032	0.0499	0.000
31	20.412	0.0489	0.674
32	20.416	0.0498	-0.000
33	20.696	0.0483	-0.159
34	21.080	0.0473	0.000
35	21.352	0.0468	-1.067
36	21.429	0.0467	0.000
37	22.052	0.0453	0.165
38	22.399	0.0446	0.000
39	22.772	0.0439	0.329
40	24.674	0.0405	0.566
41	24.999	0.0400	-0.000
42	25.152	0.0398	0.000
43	25.364	0.0394	-0.276
44	26.124	0.0383	0.000
45	26.199	0.0382	0.528
46	27.018	0.0370	0.435
47	27.372	0.0365	-0.000
48	27.516	0.0363	0.000
49	27.770	0.0360	-0.079
50	28.447	0.0352	0.000



GEO. SCALE 13.520
DIS. SCALE 1.000

(2) 2次モード



GEO. SCALE 13.520
DIS. SCALE 1.000

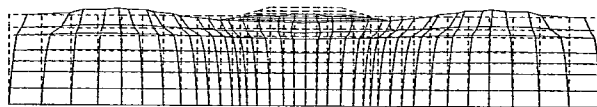
(1) 1次モード

図2-5 (1)~(2)



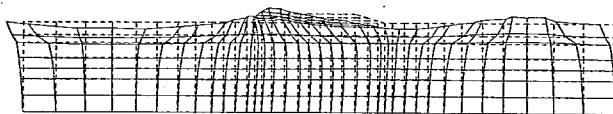
GEO. SCALE $\frac{1}{13.520}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1.000}$

(3) 3 次モード



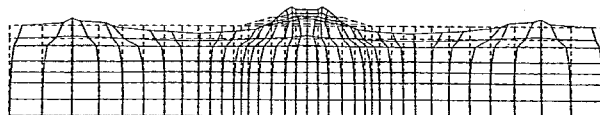
GEO. SCALE $\frac{1}{13.520}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1.000}$

(4) 4 次モード



GEO. SCALE $\frac{1}{13.520}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1.000}$

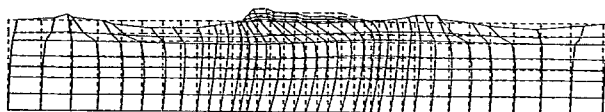
(5) 5 次モード



GEO. SCALE $\frac{1}{13.520}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1.000}$

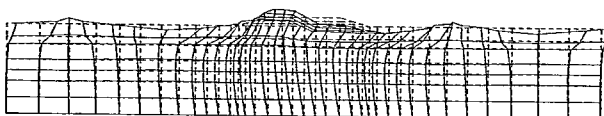
(6) 6 次モード

図 2 - 5 (3)~(6)



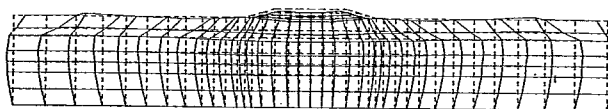
GEO. SCALE 13.520
DIS. SCALE 1.000

(7) 7 次モード



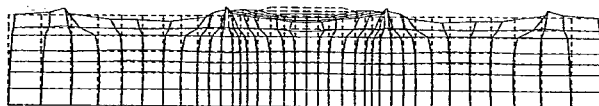
GEO. SCALE 13.520
DIS. SCALE 1.000

(8) 8 次モード



GEO. SCALE 13.520
DIS. SCALE 1.000

(9) 9 次モード



GEO. SCALE 13.520
DIS. SCALE 1.000

(10) 10 次モード

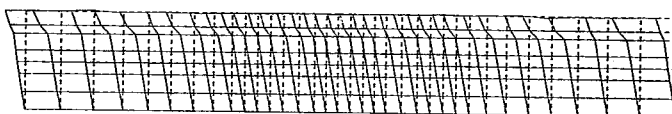
図 2 ~ 5 (7)~(10)

(6) モデル 2 - 4

表 2 - 6 固有振動数 刺激係数 (1 ~ 50 次)

次	振 動 数 Hz	周 期 Sec	刺 激 係 数
1	4.8164	0.2076	1.947
2	5.1661	0.1936	0.000
3	6.0468	0.1654	-0.060
4	7.0443	0.1420	-0.000
5	7.9448	0.1259	0.242
6	8.7045	0.1149	0.000
7	9.5160	0.1051	0.509
8	10.165	0.0984	-1.819
9	10.202	0.0980	-0.000
10	10.806	0.0925	0.224
11	10.867	0.0920	0.000
12	11.476	0.0871	-0.000
13	12.056	0.0829	-0.037
14	12.317	0.0812	0.110
15	13.496	0.0741	0.000
16	13.812	0.0724	0.000
17	14.640	0.0683	-0.054
18	15.902	0.0629	-0.029
19	16.540	0.0605	-0.000
20	17.747	0.0563	0.000
21	18.062	0.0554	-0.069
22	18.387	0.0544	0.024
23	18.953	0.0528	0.000
24	19.477	0.0513	0.000
25	19.522	0.0512	-0.773

次	振 動 数 Hz	周 期 Sec	刺 激 係 数
26	19.992	0.0500	0.000
27	20.037	0.0499	-0.769
28	20.104	0.0497	-0.000
29	20.198	0.0495	-0.918
30	20.730	0.0482	0.515
31	21.171	0.0472	0.000
32	21.308	0.0469	-0.931
33	21.478	0.0466	0.267
34	21.726	0.0460	0.000
35	22.760	0.0440	-0.047
36	22.850	0.0438	-0.000
37	23.193	0.0431	0.000
38	23.209	0.0431	-0.029
39	23.647	0.0423	0.141
40	23.727	0.0421	0.000
41	24.883	0.0402	0.000
42	26.044	0.0384	-0.000
43	26.158	0.0382	-0.644
44	26.286	0.0380	-0.000
45	26.543	0.0377	-0.474
46	28.429	0.0352	0.403
47	28.433	0.0352	0.000
48	28.543	0.0350	0.082
49	28.664	0.0349	-0.000
50	28.908	0.0346	-0.864



GEO. SCALE 12-320
DIS. SCALE 1-000

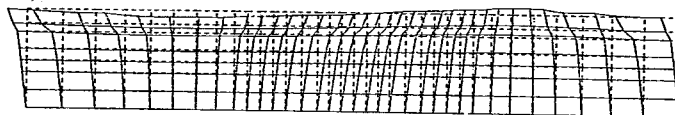
(1) 1 次モード



GEO. SCALE 12-320
DIS. SCALE 1-000

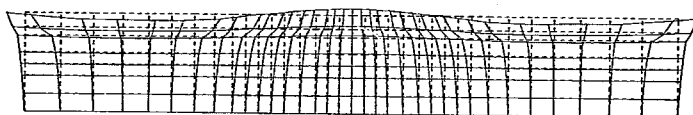
(2) 2 次モード

図 2 - 6 (1)~(2)



GEO. SCALE 12.320
DIS. SCALE 1.000

(3) 3次モード



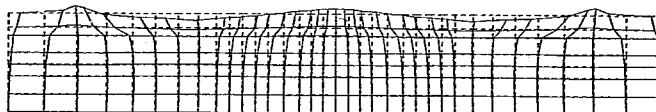
GEO. SCALE 12.320
DIS. SCALE 1.000

(4) 4次モード



GEO. SCALE 12.320
DIS. SCALE 1.000

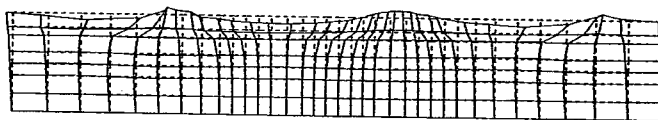
(5) 5次モード



GEO. SCALE 12.320
DIS. SCALE 1.000

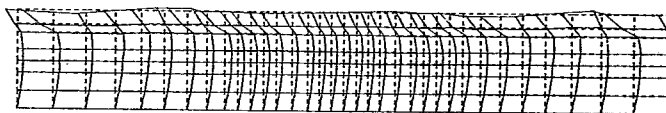
(6) 6次モード

図 2 - 6 (3)~(6)



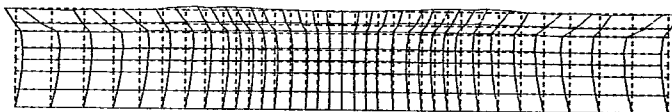
GEO. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 12.320
 DIS. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 1.000

(7) 7 次モード



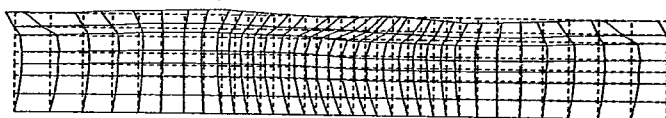
GEO. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 12.320
 DIS. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 1.000

(8) 8 次モード



GEO. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 12.320
 DIS. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 1.000

(9) 9 次モード



GEO. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 12.320
 DIS. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 1.000

(10) 10 次モード

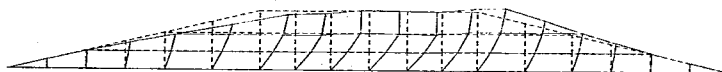
図 2 - 6 (7)~(10)

(7) モデル 2 - 5

表 2 - 7 固有振動数，刺激係数 (1 ~ 50 次)

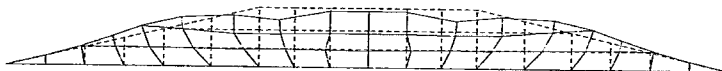
次	振 動 数 Hz	周 期 Sec	刺 激 係 数
1	1 0 0 5 0	0.0 9 9 5	- 0.8 7 0
2	1 3 9 2 2	0.0 7 1 8	- 0.0 0 0
3	1 5 8 7 3	0.0 6 3 0	- 0.4 4 7
4	2 0 0 2 8	0.0 4 9 9	- 0.0 0 0
5	2 0 4 1 7	0.0 4 9 0	0.3 7 8
6	2 3 7 7 4	0.0 4 2 0	0.0 0 0
7	2 3 8 3 1	0.0 4 2 0	- 0.3 7 0
8	2 6 6 7 4	0.0 3 7 5	- 0.0 0 0
9	2 7 5 0 4	0.0 3 6 4	- 0.7 0 2
10	2 8 3 5 1	0.0 3 5 3	- 0.0 8 6
11	2 8 5 7 8	0.0 3 5 0	- 0.0 0 0
12	3 0 1 3 8	0.0 3 1 8	0.0 8 6
13	3 1 9 6 0	0.0 3 1 3	- 0.0 0 0
14	3 4 2 5 6	0.0 2 9 2	- 0.0 0 0
15	3 4 3 6 8	0.0 2 9 1	0.6 3 9
16	3 5 0 5 1	0.0 2 8 5	0.3 6 5
17	3 8 0 1 3	0.0 2 6 3	- 0.0 0 0
18	3 8 6 9 9	0.0 2 5 8	0.2 7 3
19	4 0 5 5 7	0.0 2 4 7	- 0.0 0 0
20	4 1 1 2 1	0.0 2 4 3	0.3 7 4
21	4 8 0 0 4	0.0 2 0 8	0.0 0 0
22	4 8 3 3 0	0.0 2 0 7	0.5 6 5
23	4 8 7 3 6	0.0 2 0 5	- 0.0 0 0
24	4 8 9 8 6	0.0 2 0 4	- 0.1 8 9
25	4 9 4 7 4	0.0 2 0 2	0.0 0 0

次	振 動 数 Hz	周 期 Sec	刺 激 係 数
26	5 0 1 8 8	0.0 1 9 9	- 0.5 9 2
27	5 3 4 3 9	0.0 1 8 7	- 0.0 5 8
28	5 3 6 4 4	0.0 1 8 6	0.0 0 0
29	5 4 6 2 5	0.0 1 8 3	- 0.0 0 0
30	5 6 5 3 4	0.0 1 7 7	- 0.0 0 0
31	5 6 6 7 8	0.0 1 7 6	- 0.3 6 5
32	5 7 5 7 6	0.0 1 7 4	0.1 0 3
33	6 0 8 9 4	0.0 1 6 4	- 0.4 9 4
34	6 2 6 4 3	0.0 1 6 0	0.0 0 0
35	6 3 4 0 9	0.0 1 5 8	0.2 3 8
36	6 5 4 0 1	0.0 1 5 3	- 0.0 0 0
37	6 5 7 0 1	0.0 1 5 2	0.1 4 3
38	6 8 7 7 8	0.0 1 4 5	0.3 3 0
39	6 9 2 0 7	0.0 1 4 4	- 0.0 0 0
40	7 0 3 0 7	0.0 1 4 2	0.0 0 0
41	7 1 0 8 4	0.0 1 4 1	- 0.1 7 9
42	7 1 1 9 6	0.0 1 4 0	- 0.0 0 0
43	7 3 7 7 1	0.0 1 3 6	0.0 3 9
44	7 4 5 3 2	0.0 1 3 4	0.2 5 0
45	7 7 8 8 4	0.0 1 2 8	- 0.0 0 0
46	8 0 1 3 9	0.0 1 2 5	- 0.0 0 0
47	8 0 4 0 7	0.0 1 2 4	0.1 9 8
48	8 2 2 1 0	0.0 1 2 2	0.4 1 2
49	8 2 5 9 1	0.0 1 2 1	- 0.0 0 0
50	8 5 4 9 6	0.0 1 1 7	- 0.0 6 0



DEP. SCALE 4.067
DIS. SCALE 1.000

(1) 1 次モード



DEP. SCALE 4.067
DIS. SCALE 1.000

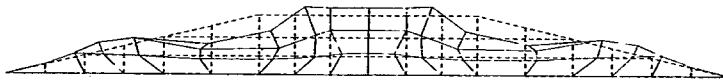
(2) 2 次モード



DEP. SCALE 4.067
DIS. SCALE 1.000

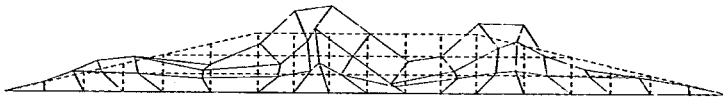
(3) 3 次モード

図 2 - 7 (1)~(3)



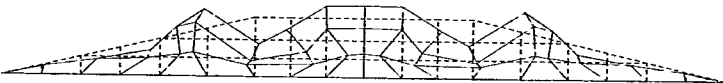
GEO. SCALE 1:4.067
DIS. SCALE 1:1.000

(4) 4次モード



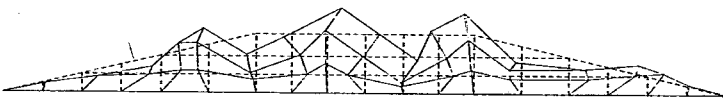
GEO. SCALE 1:4.067
DIS. SCALE 1:1.000

(5) 5次モード



GEO. SCALE 1:4.067
DIS. SCALE 1:1.000

(6) 6次モード



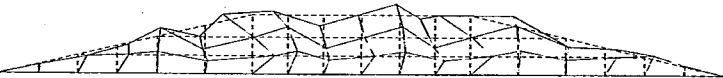
GEO. SCALE 1:4.067
DIS. SCALE 1:1.000

(7) 7次モード



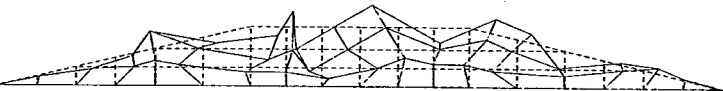
GEO. SCALE 1:4.067
DIS. SCALE 1:1.000

(8) 8次モード



GEO. SCALE 1:4.067
DIS. SCALE 1:1.000

(9) 9次モード



GEO. SCALE 1:4.067
DIS. SCALE 1:1.000

(10) 10次モード

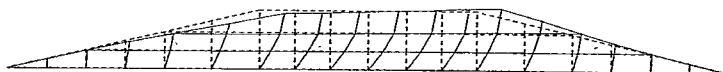
図 2-7 (4)~(10)

(8) モデル 2-6

表2-8 固有振動数，刺激係数（1～50次）

次	振動数 Hz	周期 Sec	刺激係数
1	9.905	0.1009	-0.849
2	12.511	0.0799	-0.000
3	15.591	0.0641	-0.446
4	18.045	0.0554	-0.000
5	20.118	0.0497	-0.382
6	21.839	0.0458	0.000
7	23.490	0.0426	-0.409
8	25.267	0.0396	-0.000
9	26.323	0.0380	0.000
10	26.520	0.0377	0.182
11	27.007	0.0370	0.707
12	28.025	0.0357	0.059
13	28.362	0.0341	-0.000
14	30.282	0.0330	0.000
15	32.047	0.0312	-0.461
16	33.119	0.0302	0.164
17	35.122	0.0285	-0.000
18	36.086	0.0277	0.000
19	37.606	0.0266	0.569
20	38.949	0.0257	0.021
21	38.412	0.0254	0.000
22	41.254	0.0242	-0.000
23	43.683	0.0229	-0.326
24	46.934	0.0213	0.000
25	47.069	0.0212	-0.628

次	振動数 Hz	周期 Sec	刺激係数
26	47.689	0.0210	0.000
27	48.255	0.0272	-0.226
28	48.861	0.0205	0.232
29	49.688	0.0201	0.000
30	50.822	0.0197	-0.000
31	51.077	0.0196	0.575
32	51.990	0.0192	-0.000
33	53.669	0.0186	-0.285
34	54.596	0.0183	-0.170
35	57.519	0.0174	-0.000
36	58.416	0.0171	-0.000
37	60.047	0.0167	0.360
38	63.168	0.0158	0.239
39	64.147	0.0156	0.000
40	66.512	0.0150	0.000
41	67.829	0.0147	0.021
42	68.810	0.0145	0.350
43	68.818	0.0145	-0.000
44	69.344	0.0144	-0.300
45	70.116	0.0143	0.093
46	72.196	0.0139	-0.000
47	72.903	0.0137	-0.314
48	74.313	0.0135	-0.000
49	74.638	0.0134	0.000
50	75.899	0.0132	-0.186



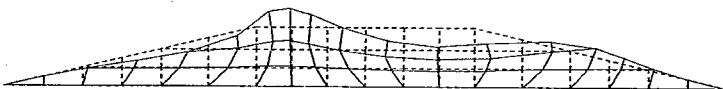
GEO. SCALE 1:1000
DIS. SCALE 1:1000

(1) 1次モード



GEO. SCALE 1:1000
DIS. SCALE 1:1000

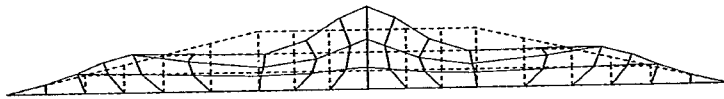
(2) 2次モード



GEO. SCALE 1:1000
DIS. SCALE 1:1000

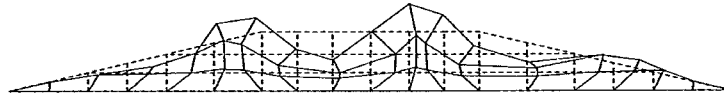
(3) 3次モード

図2-8 (1)~(3)



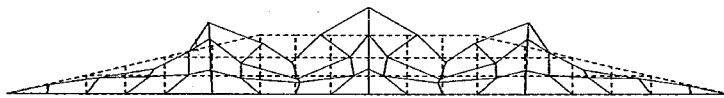
GEO. SCALE 1:4.067
DIS. SCALE 1:1.000

(4) 4次モード



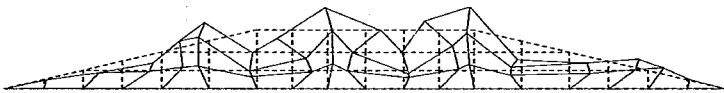
GEO. SCALE 1:4.067
DIS. SCALE 1:1.000

(5) 5次モード



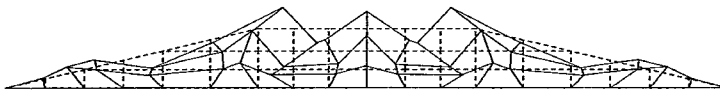
GEO. SCALE 1:4.067
DIS. SCALE 1:1.000

(6) 6次モード



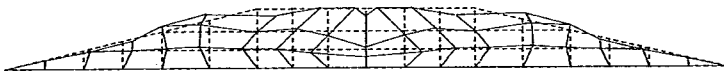
GEO. SCALE 1:4.067
DIS. SCALE 1:1.000

(7) 7次モード



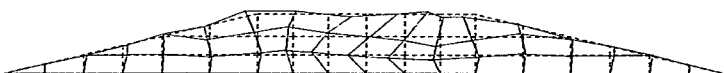
GEO. SCALE 1:4.067
DIS. SCALE 1:1.000

(8) 8次モード



GEO. SCALE 1:4.067
DIS. SCALE 1:1.000

(9) 9次モード



GEO. SCALE 1:4.067
DIS. SCALE 1:1.000

(10) 10次モード

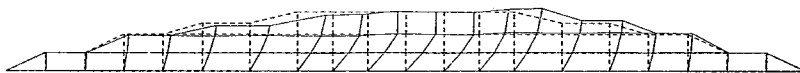
☒ 2-8 (4)~(10)

(9) モデル 2-7

表 2-9 固有振動数, 刺激係数 (1~50 次)

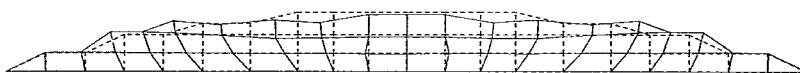
次	振動数 Hz	周期 Sec	振動係数
1	1.0042	0.0996	-0.877
2	1.3218	0.0757	-0.000
3	1.4719	0.0679	-0.514
4	1.7963	0.0557	-0.000
5	1.8869	0.0530	-0.353
6	2.2038	0.0454	0.204
7	2.2077	0.0453	0.000
8	2.5628	0.0390	0.000
9	2.5635	0.0390	0.230
10	2.7757	0.0360	0.000
11	2.8362	0.0353	-0.284
12	2.9303	0.0341	-0.084
13	3.0010	0.0333	-0.000
14	3.1527	0.0317	0.401
15	3.3170	0.0300	-0.000
16	3.4407	0.0291	0.000
17	3.4446	0.0290	-0.255
18	3.6348	0.0275	0.096
19	3.6973	0.0270	0.000
20	3.7605	0.0266	-0.155
21	3.8194	0.0263	-0.000
22	3.8681	0.0259	0.317
23	4.4142	0.0227	-0.000
24	4.4446	0.0225	0.107
25	4.5172	0.0221	-0.000

次	振動数 Hz	周期 Sec	刺激係数
26	4.5208	0.0221	0.363
27	4.9221	0.0200	0.172
28	4.9933	0.0200	0.000
29	5.3573	0.0186	0.000
30	5.3365	0.0186	-0.029
31	5.4334	0.0184	0.195
32	5.4377	0.0184	0.000
33	5.5074	0.0182	0.000
34	5.7505	0.0174	0.045
35	6.0380	0.0166	0.047
36	6.3316	0.0158	0.000
37	6.4604	0.0155	-0.000
38	6.4604	0.0155	0.080
39	6.8147	0.0147	0.000
40	6.8308	0.0146	0.064
41	6.9598	0.0144	0.117
42	7.0158	0.0143	-0.000
43	7.3520	0.0136	-0.000
44	7.3716	0.0136	-0.090
45	7.5557	0.0132	-0.068
46	7.8987	0.0127	0.000
47	8.0258	0.0125	0.105
48	8.1556	0.0123	0.000
49	8.2786	0.0121	-0.044
50	8.3419	0.0120	-0.035



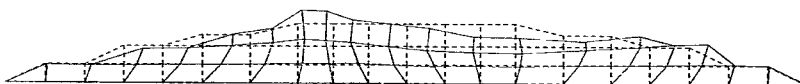
GEOM. SCALE 1/400
DIS. SCALE 1/1000

(1) 1次モード



GEOM. SCALE 1/400
DIS. SCALE 1/1000

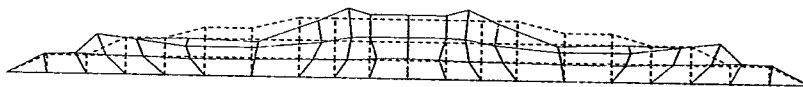
(2) 2次モード



GEOM. SCALE 1/400
DIS. SCALE 1/1000

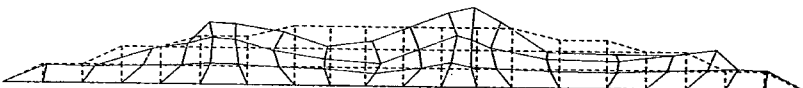
(3) 3次モード

図 2-9 (1)~(3)



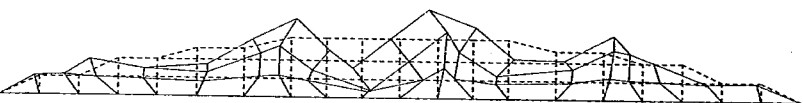
GEO. SCALE $\frac{1}{4.067}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1.000}$

(4) 4次モード



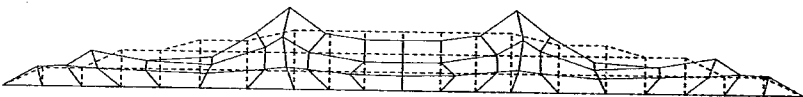
GEO. SCALE $\frac{1}{4.067}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1.000}$

(5) 5次モード



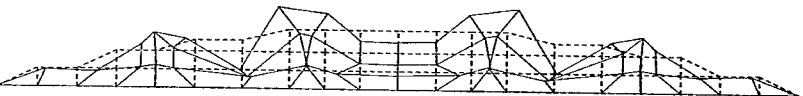
GEO. SCALE $\frac{1}{4.067}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1.000}$

(6) 6次モード



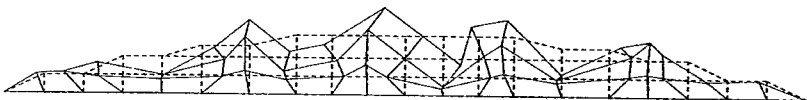
GEO. SCALE $\frac{1}{4.067}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1.000}$

(7) 7次モード



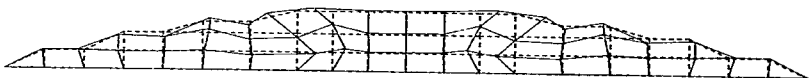
GEO. SCALE $\frac{1}{4.067}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1.000}$

(8) 8次モード



GEO. SCALE $\frac{1}{4.067}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1.000}$

(9) 9次モード



GEO. SCALE $\frac{1}{4.067}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1.000}$

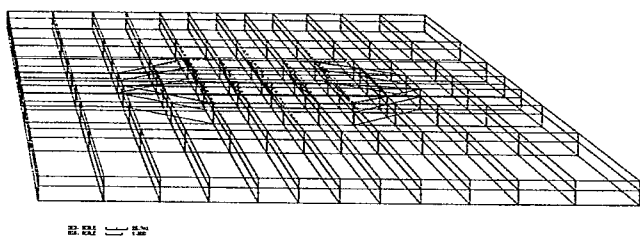
(10) 10次モード

図 2-9 (4)~(10)

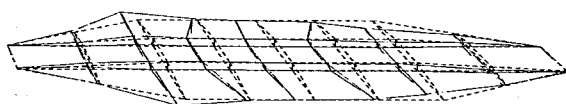
(10) モデル 2-8

表 2-10 固有振動数・刺激係数 (1~50 次)

次数	振動数 Hz	周期 Sec	刺激係数 X	刺激係数 Y	次数	振動数 Hz	周期 Sec	刺激係数 X	刺激係数 Y
1	3.740	0.267	6.252	0.000	26	6.403	0.156	0.000	0.000
2	3.964	0.252	0.000	1.948	27	6.412	0.156	-7.603	0.000
3	3.985	0.251	0.000	0.000	28	6.418	0.156	0.000	0.058
4	4.052	0.247	0.000	0.000	29	6.423	0.156	0.000	0.000
5	4.078	0.245	0.000	0.668	30	6.447	0.155	0.000	0.215
6	4.313	0.232	0.000	0.000	31	6.449	0.155	0.000	0.000
7	4.461	0.224	0.000	4.909	32	6.458	0.155	1.316	0.000
8	4.568	0.219	2.416	0.000	33	6.464	0.155	0.000	0.000
9	4.772	0.210	0.000	0.000	34	6.472	0.155	0.000	0.619
10	4.776	0.209	0.000	6.072	35	6.472	0.155	0.000	0.000
11	5.003	0.200	0.000	0.000	36	6.505	0.154	0.115	0.000
12	5.334	0.187	1.933	0.000	37	6.555	0.153	0.000	0.000
13	5.671	0.176	0.000	5.836	38	6.587	0.152	0.000	1.695
14	5.671	0.176	0.000	0.000	39	6.596	0.152	1.087	0.000
15	5.675	0.176	0.000	0.000	40	6.601	0.151	0.000	0.000
16	5.875	0.170	0.804	0.000	41	6.624	0.151	0.000	0.000
17	5.910	0.169	0.000	0.000	42	6.631	0.151	4.200	0.000
18	5.965	0.168	0.000	0.151	43	6.640	0.151	0.000	0.000
19	5.969	0.168	0.000	0.000	44	6.641	0.151	0.776	0.000
20	6.077	0.165	0.239	0.000	45	6.687	0.150	0.000	0.000
21	6.080	0.164	0.000	0.000	46	6.708	0.149	0.000	6.746
22	6.179	0.162	0.000	2.673	47	7.021	0.142	0.000	0.000
23	6.179	0.162	0.000	0.000	48	7.096	0.141	0.000	0.127
24	6.179	0.162	0.762	0.000	49	7.168	0.140	4.716	0.000
25	6.346	0.158	0.000	0.000	50	7.195	0.139	0.000	0.000

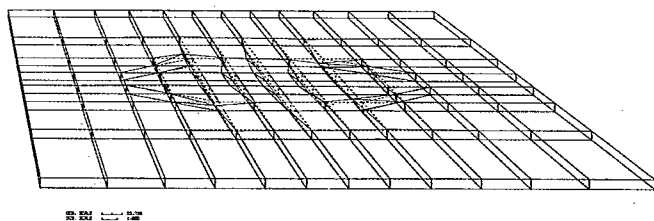


(a) 全体モード

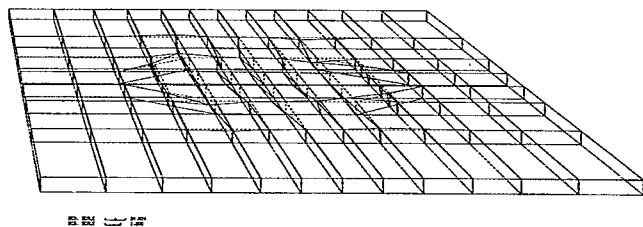


GEO. SCALE 1:25.116
DIS. SCALE 1:1,000

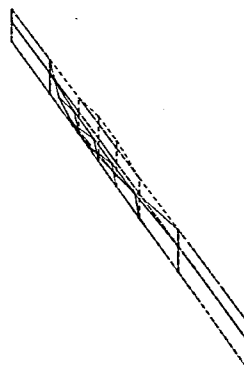
(b) 盛土



(c) 上層



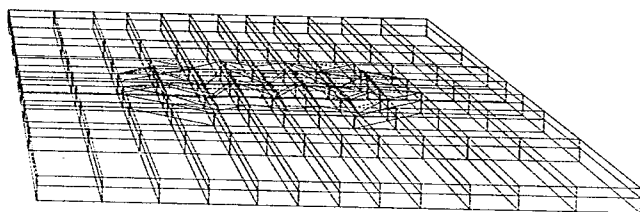
(d) 下層



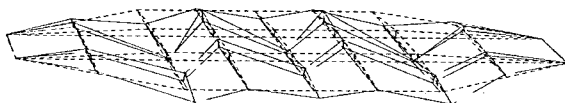
GEO. SCALE 1:25.741
DIS. SCALE 1:1,000

(e) 中央断面

図2-10 (I) 1次モード

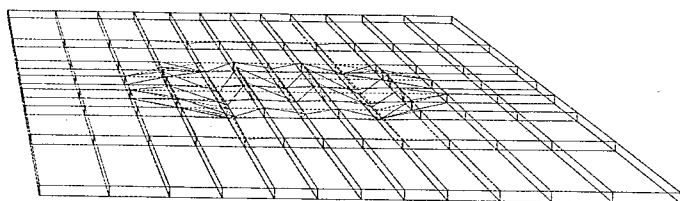


(a) 全体モード

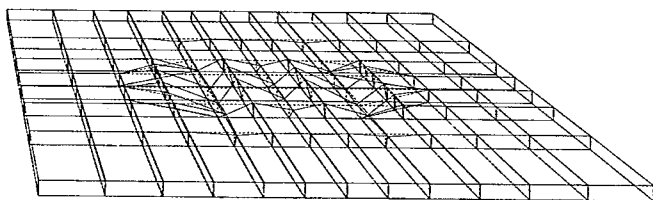


DEO. SCALE 25.116
DIS. SCALE 1.000

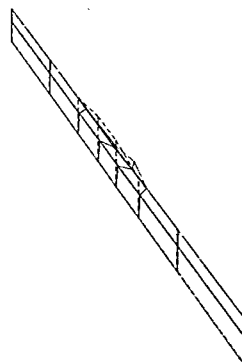
(b) 盛土



(c) 上層



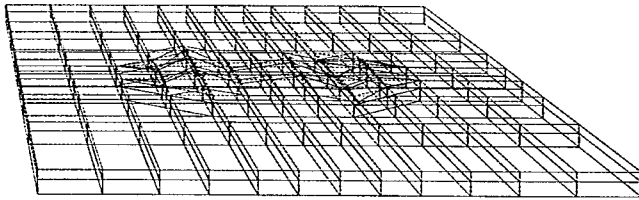
(d) 下層



DEO. SCALE 25.741
DIS. SCALE 1.000

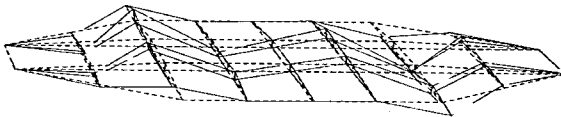
(e) 中央断面

図2-10 (2) 2次モード



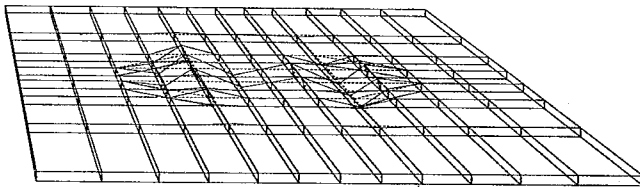
単位長

(a) 全体モード



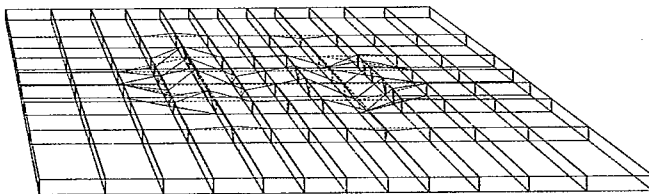
GEO. SCALE 1:25.118
DIS. SCALE 1:1,000

(b) 盛土



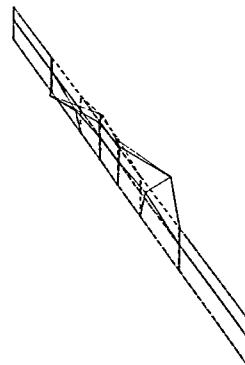
単位長

(c) 上層



単位長

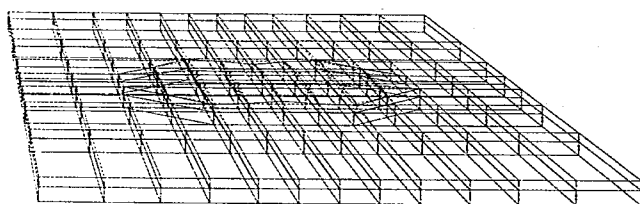
(d) 下層



GEO. SCALE 1:25.741
DIS. SCALE 1:1,000

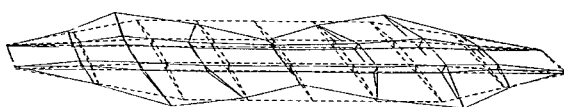
(e) 中央断面

図 2-10 (3) 3次モード



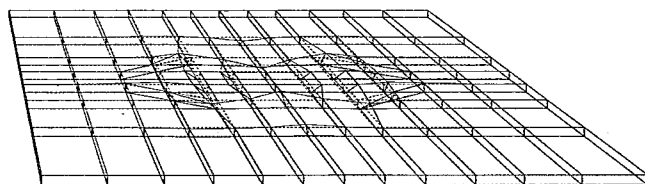
25.116 1.000

(a) 全体モード



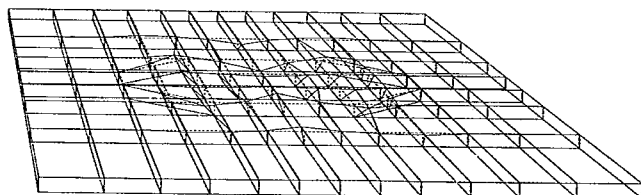
GED. SCALE 25.116
DIS. SCALE 1.000

(b) 盛土部



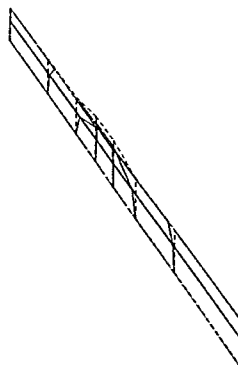
25.116 1.000

(c) 上層



25.116 1.000

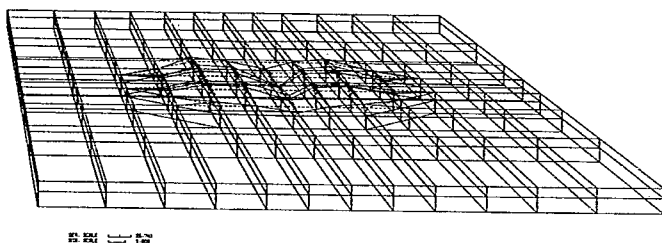
(d) 下層



GED. SCALE 25.741
DIS. SCALE 1.000

(e) 中央断面

図 2 - 10 (4) 4 次モード

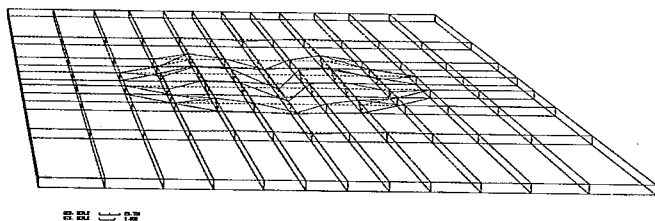


(a) 全体モード

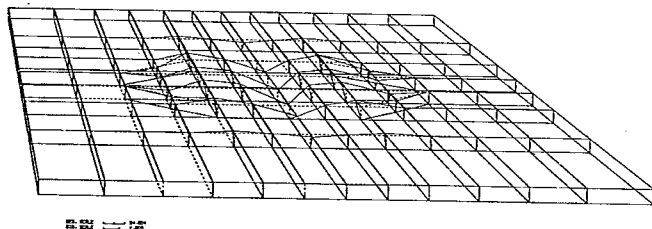


GEOM. SCALE 1:25.116
DIS. SCALE 1:1.000

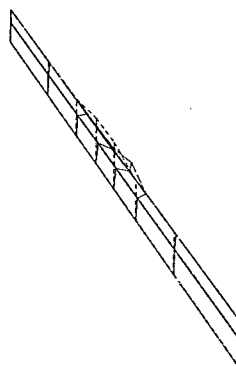
(b) 盛土部



(c) 上層



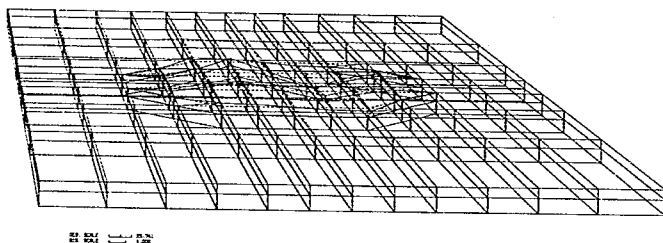
(d) 下層



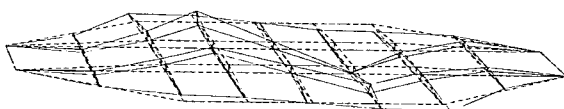
GEOM. SCALE 1:25.741
DIS. SCALE 1:1.000

(e) 中央断面

図 2-10 (5) 5 次モード

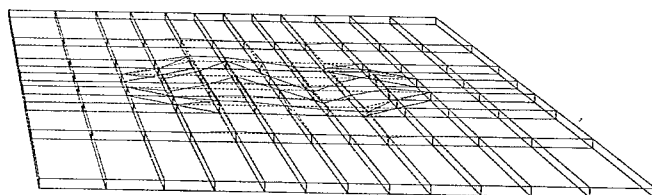


(a) 全体モード



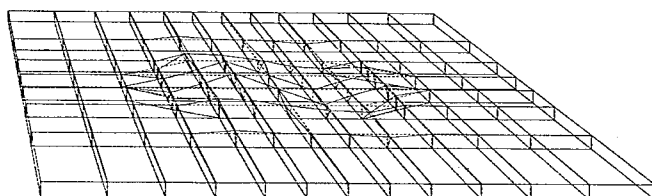
DEO. SCALE 25.116
DIS. SCALE 1.000

(d) 下層



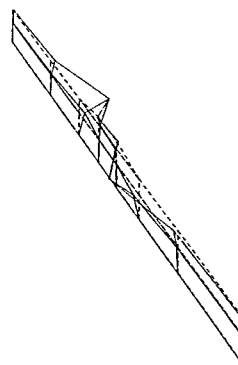
DEO. SCALE 25.741
DIS. SCALE 1.000

(c) 上層



DEO. SCALE 25.741
DIS. SCALE 1.000

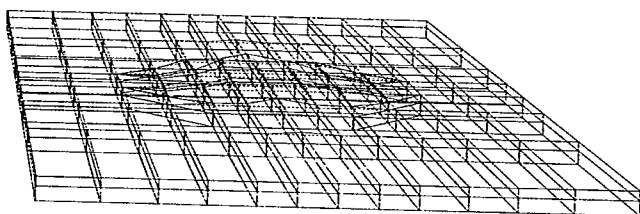
(b) 盛土



DEO. SCALE 25.741
DIS. SCALE 1.000

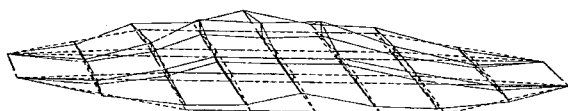
(e) 中央断面

図 2-10 (6) 6次モード



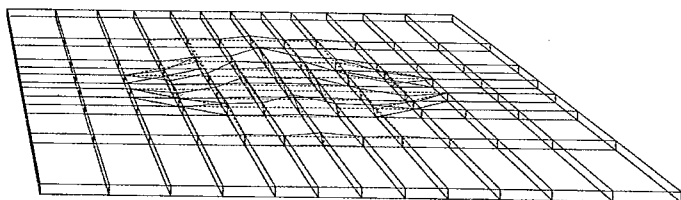
25.116

(a) 全体モード



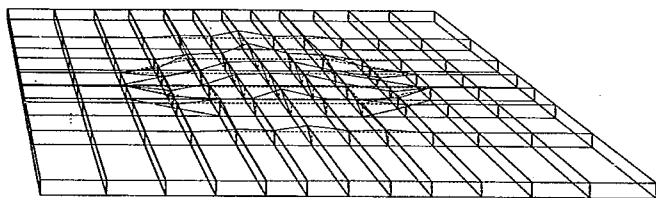
GEO. SCALE 25.116
DIS. SCALE 1.000

(b) 盛土



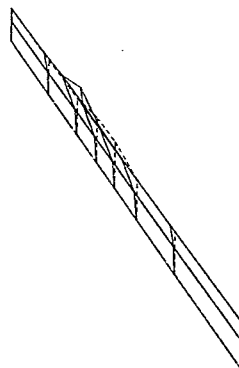
25.741

(c) 上層



25.741

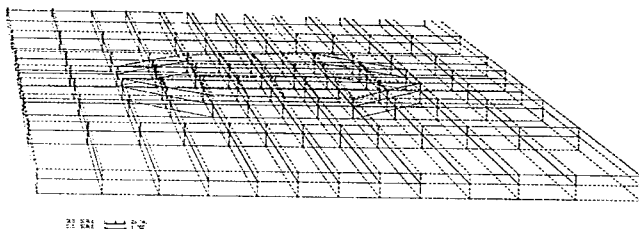
(d) 下層



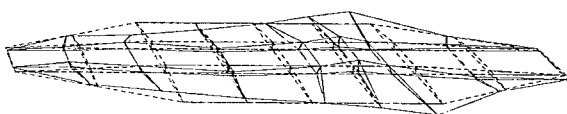
GEO. SCALE 25.741
DIS. SCALE 1.000

(e) 中央断面

図 2-10 (7) 7 次モード

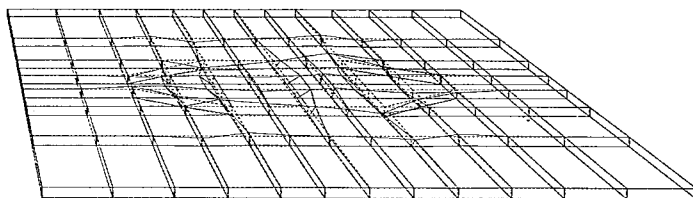


(a) 全体モード



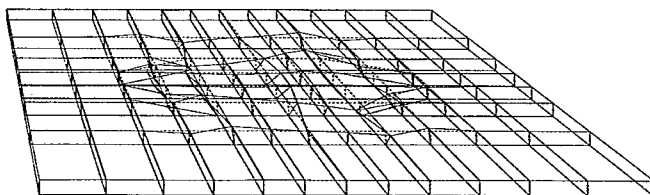
GEOM. SCALE 1:25,116
DIS. SCALE 1:1,000

(b) 盛土



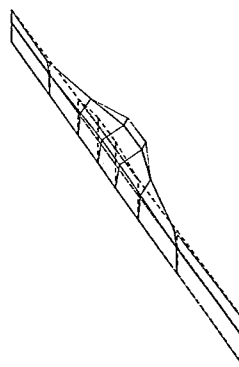
GEOM. SCALE 1:25,116
DIS. SCALE 1:1,000

(c) 上層



GEOM. SCALE 1:25,116
DIS. SCALE 1:1,000

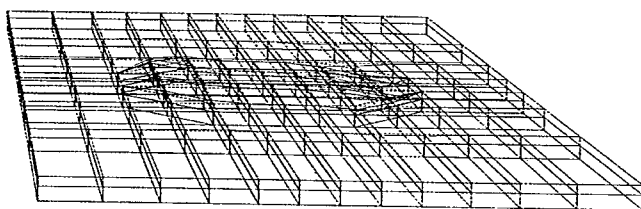
(d) 下層



GEOM. SCALE 1:25,741
DIS. SCALE 1:1,000

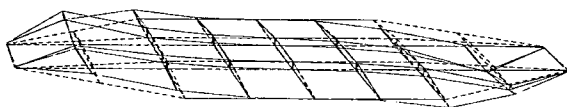
(e) 中央断面

図2-10 (8) 8次モード



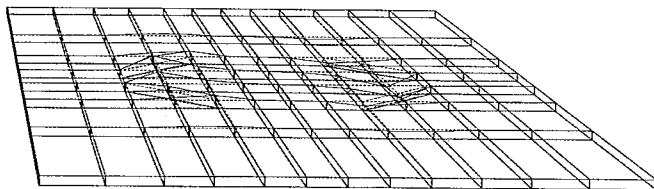
25.116

(a) 全体モード



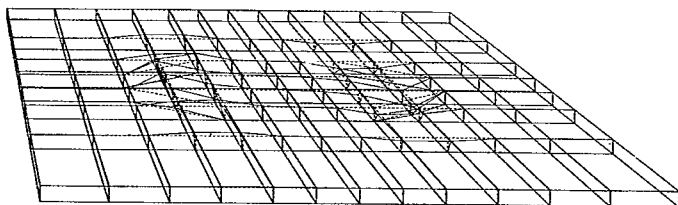
DEP. SCALE 25.116
DIS. SCALE 1.000

(b) 盛土



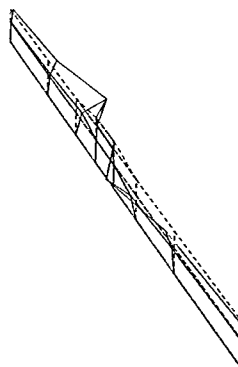
25.116

(c) 上層



25.116

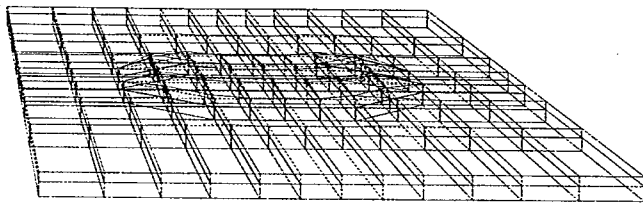
(d) 下層



DEP. SCALE 25.741
DIS. SCALE 1.000

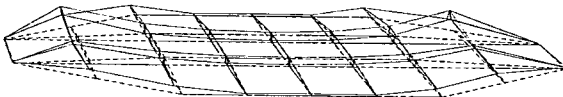
(e) 中央断面

図2-10 (9) 9次モード



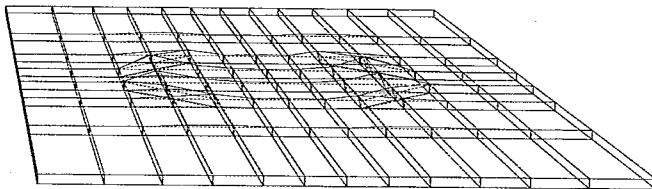
25.116 1.000

(a) 全体モード



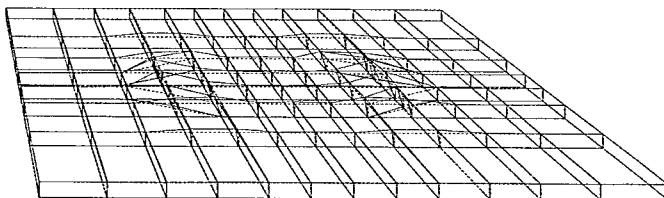
DEO. SCALE 25.116
DIS. SCALE 1.000

(b) 盛土部



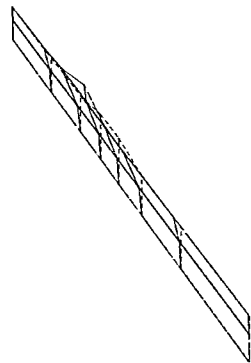
25.116 1.000

(c) 上層



25.116 1.000

(d) 下層



DEO. SCALE 25.741
DIS. SCALE 1.000

(e) 中央断面

図 2-10 10 次モード

2-2 正弦波による定常応答解析（モデル2-1）

1～13 %の間の25種類の振動数（表2-11）の正弦波に対するモデル2-1の定常応答を計算した。

計算は、入力加速度波形の半周期を15度ずつずらし、合計12ステップに分割して行なった。減衰定数は、実験結果との対応を考え限界減衰に対し、1%、2%、10%とした。また、モデル・アナリシスでは1～10次の振動モードを考慮した。

表2-11 正弦波の周波数（1～13 %）

番 号	振動数	摘 要	番 号	振動数	摘 要
1	1.0		14	6.0	
2	2.0		15	6.49	4次固有振動数
3	3.0		16	7.0	
4	3.4		17	7.28	5次固有振動数
5	3.8		18	7.6	
6	3.99	1次固有振動数	19	8.0	
7	4.0		20	8.18	6次固有振動数
8	4.2		21	9.0	
9	4.6		22	10.0	
10	5.0		23	11.0	
11	5.12	2次固有振動数	24	12.0	
12	5.36	3次固有振動数	25	13.0	
13	5.5				

図2-11に示す盛土部および地盤部の代表的な7点における加速度共振曲線（絶対応答加速度／基部における入力加速度）を図2-12～図2-18に、変位共振曲線（相対応答変位／基部における入力変位）を図2-19～図2-25に示す。実線が減衰定数2%、破線が減衰定数10%である。

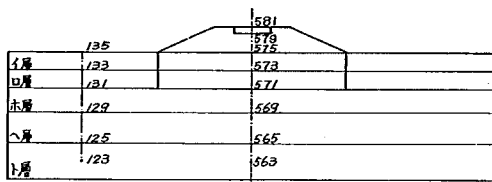


図 2-11 モデル 2-1

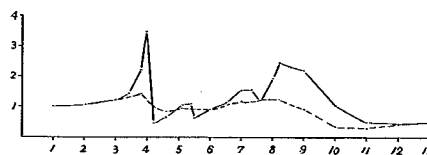


図 2-12 絶対加速度共振曲線 (563 点)

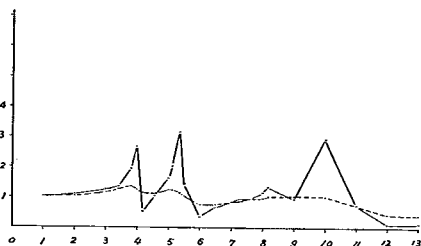


図 2-13 絶対加速度共振曲線 (123 点)

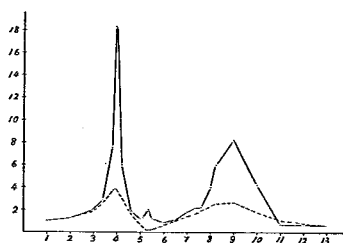


図 2-14 絶対加速度共振曲線 (571 点)

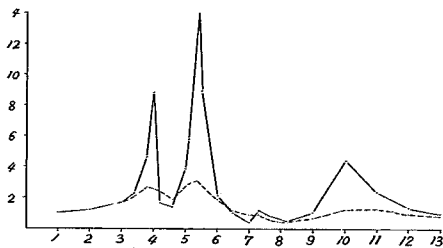


図 2-15 絶対加速度共振曲線 (131 点)

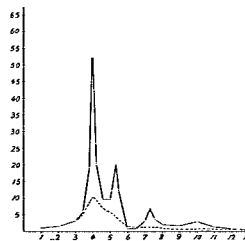


図 2-16 絶対加速度共振曲線 (575 点)

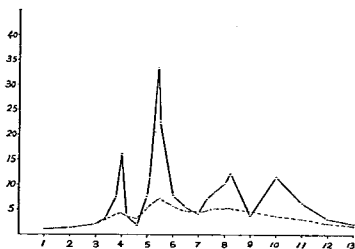


図 2-17 絶対加速度共振曲線 (135 点)

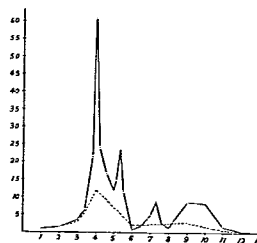


図 2-18 絶対加速度共振曲線 (579 点)

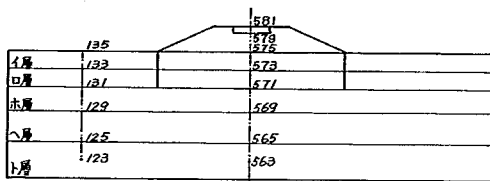


図 2-11 モデル 2-1

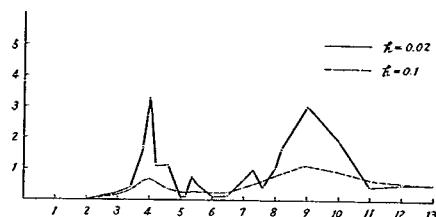


図 2-19 変位共振倍率 (563 点)

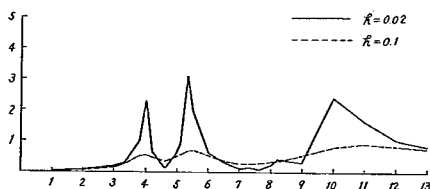


図 2-20 変位共振倍率 (123 点)

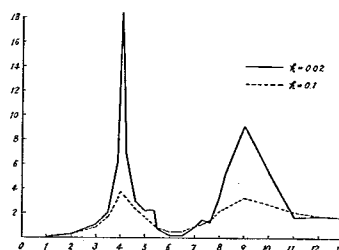


図 2-21 変位共振倍率 (571 点)

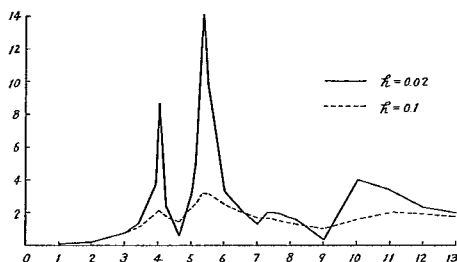


図 2-22 変位共振倍率 (131 点)

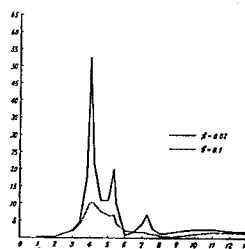


図 2-23 変位共振倍率 (575 点)

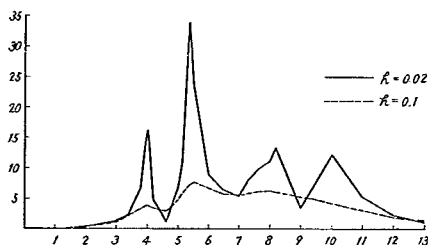


図 2-24 変位共振倍率 (135 点)

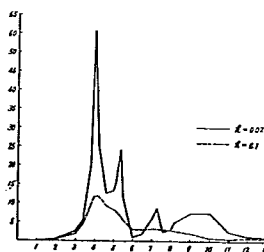


図 2-25 変位共振倍率 (579 点)

2-3 地震動波形およびランダム波形による応答解析

(1) 地震動波形による応答解析

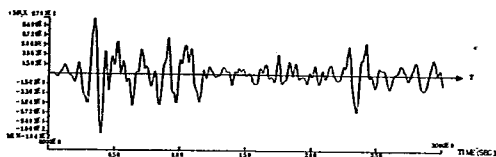
盛土中央断面（モデル2-1）に対して実験で実際に模型に入力された（振動台上で記録された）El-Centro N-S成分の3秒間の加速度波形（実時間で15秒間－付録Bにパワースペクトルを示す－）を用いて、 $\frac{1}{100}$ 秒ピッチで応答解析を行なった。減衰定数は2%であり、モデル・アナリシスでは1～10次の振動モードを考慮した。

入力加速度および図2-11に示した地盤部と盛土部の代表的な6点の絶対加速度と変位の時間応答を図2-26に示す。また、3秒間の応答中の盛土部および地盤部の代表的な節点における最大応答絶対加速度および最大応答変位を示すと表2-12のようになる。さらに、最大応答絶対加速度の最大入力加速度に対する比と最大応答変位の最大入力変位（123点の最大応答変位を代用）に対する比を等高線の形で表わすと図2-27、図2-28のような分布を示す。

次にトンネル下地盤（Point579）の応答変位が最大となる時間とその前後 $\frac{1}{100}$ 秒ずつ4ステップ、合計9ステップの変位、主ひずみ、主応力の分布を、それぞれ、図2-29、図2-30、図2-31に示す。

表2-12 加振台に入力されたEl-Centro N-S成分地震動波形（3秒間）による盛土部および地盤部の最大応答（ $h=0.02$ ）

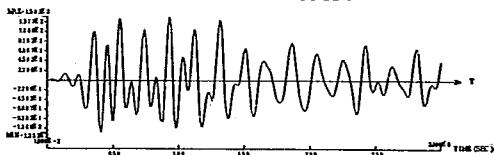
節点	絶対加速度応答		変位応答		節点	絶対加速度応答		変位応答	
	応答値(gal)	倍率($\frac{\text{gal}}{\text{gal}}$)	応答値(cm)	倍率($\frac{\text{cm}}{\text{cm}}$)		応答値(gal)	倍率($\frac{\text{gal}}{\text{gal}}$)	応答値(cm)	倍率($\frac{\text{cm}}{\text{cm}}$)
入力	104.7	1.0			入力	104.7	1.0		
123	100.7	0.96	0.0535	1.0	563	119.3	1.14	0.0472	1.0
125	150.3	1.44	0.1026	1.92	565	203.0	1.94	0.0904	1.67
					567	252.5	2.41	0.1187	2.22
129	217.9	2.08	0.1611	3.01	569	287.0	2.74	0.1422	2.66
131	277.1	2.65	0.2191	4.10	571	326.5	3.12	0.1825	3.41
133	456.5	4.36	0.3864	7.22	573	380.3	3.63	0.3335	6.22
135	682.3	6.52	0.5323	9.95	575	482.5	4.61	0.5585	10.44
					577	532.0	5.08	0.6154	11.50
					579	574.7	5.49	0.6561	12.26
					581	597.5	5.71	0.644	12.04



(1) 入力加速度波形

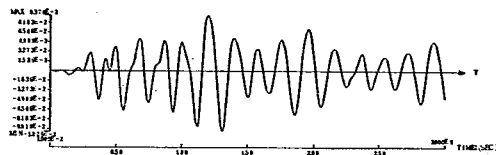
	135	581
1層	133	573
2層	131	571
3層	129	569
4層	125	565
5層	123	563

図 2-11 モデル 2-1



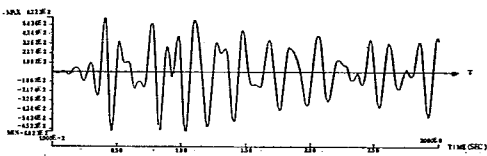
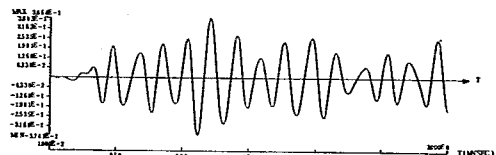
(a) 絶対加速度応答

(2) 125 点の応答 (b) 変位応答



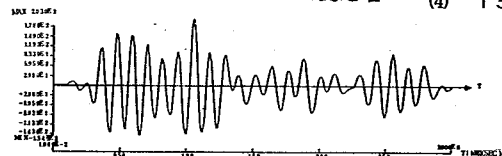
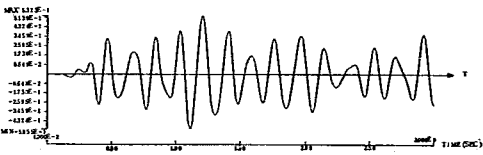
(a) 絶対加速度応答

(3) 133 点の応答 (b) 変位応答



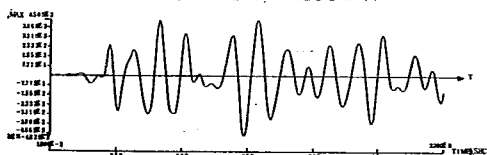
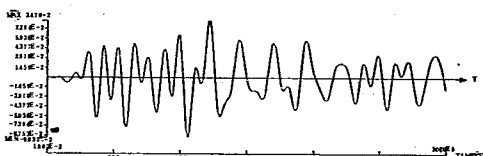
(a) 絶対加速度応答

(4) 135 点の応答 (b) 変位応答



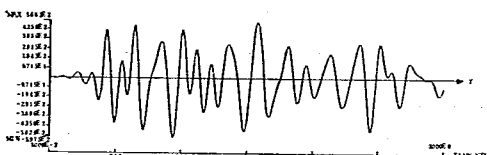
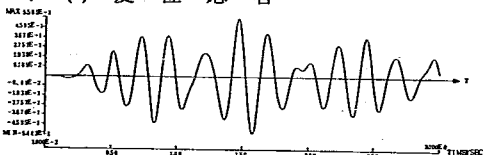
(a) 絶対加速度応答

(5) 565 点の応答 (b) 変位応答



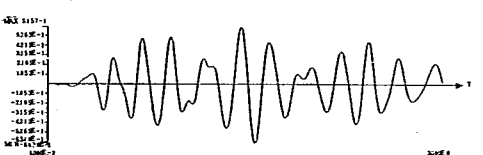
(a) 絶対加速度応答

(6) 575 点の応答 (b) 変位応答



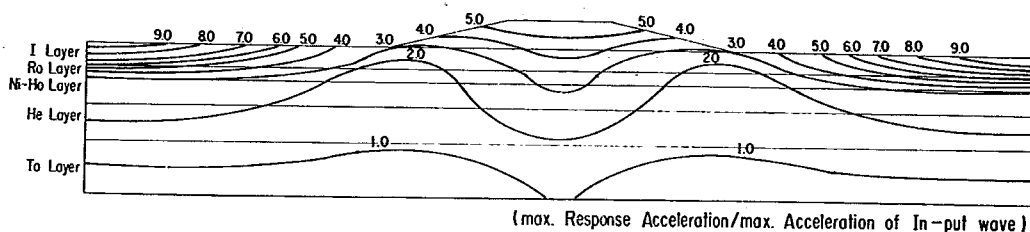
(a) 絶対加速度応答

(7) 581 点の応答



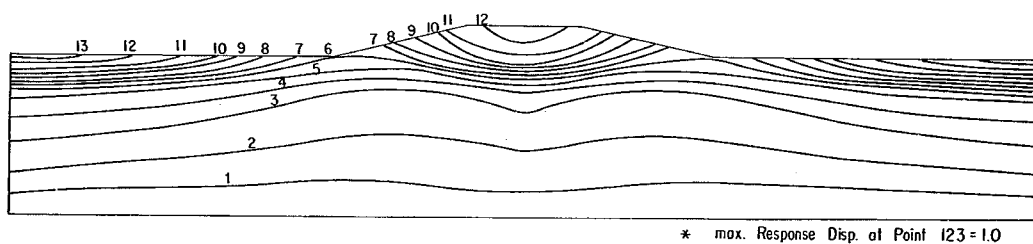
(b) 変位応答

図 2-26 加振台に入力された El-Centro N-S 成分による応答 ($h=0.02$)



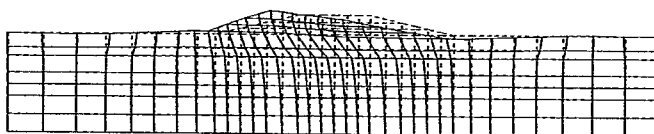
Distribution of Maximum Response of Absolute Acceleration by El Centro NS ($h=0.02$)

図 2 - 27 最大応答加速度倍率 (最大応答絶対加速度/最大入力加速度) の分布
EL Centro NS, $h=0.02$



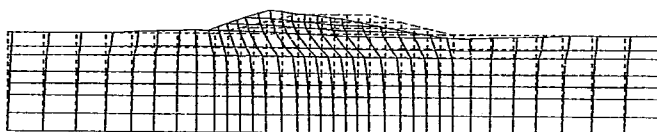
Distribution of Maximum Response of Displacement by El Centro NS ($h=0.02$)

図 2 - 28 最大応答変位倍率 (最大応答相対変位/123点の最大応答相対変位) の分布
EL Centro NS, $h=0.02$



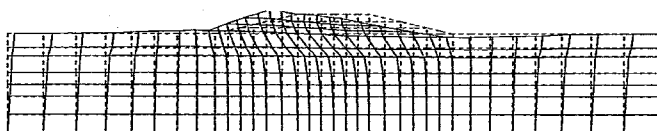
GEO. SCALE 12.300
DIS. SCALE 2.579E-1

(1) $T = 1.55$ 秒



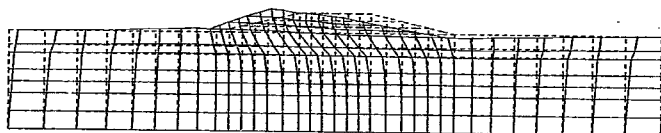
GEO. SCALE 12.300
DIS. SCALE 4.246E-1

(2) $T = 1.56$ 秒



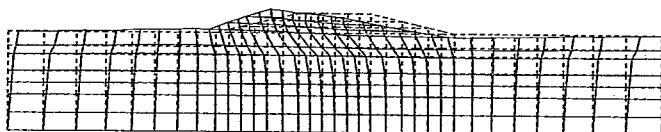
GEO. SCALE 12.300
DIS. SCALE 5.540E-1

(3) $T = 1.57$ 秒



GEO. SCALE 12.300
DIS. SCALE 6.335E-1

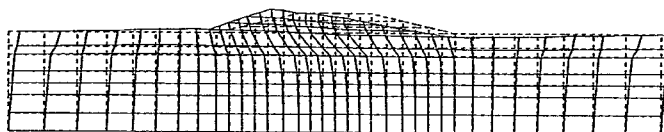
(4) $T = 1.58$ 秒



GEO. SCALE 12.300
DIS. SCALE 8.561E-1

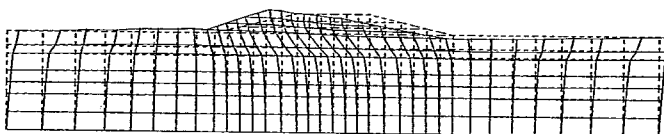
(5) $T = 1.63$ 秒

图 2-29 变位分布 (1)~(5)



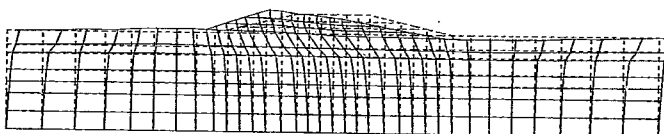
GEO. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 12.300
 DIS. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 6.203E-1

(6) $T = 1.60$ 秒



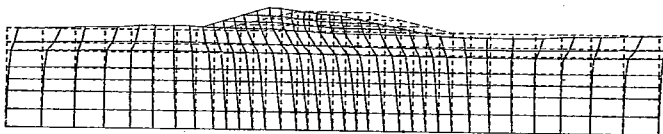
GEO. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 12.300
 DIS. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 5.311E-1

(7) $T = 1.61$ 秒



GEO. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 12.300
 DIS. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 3.881E-1

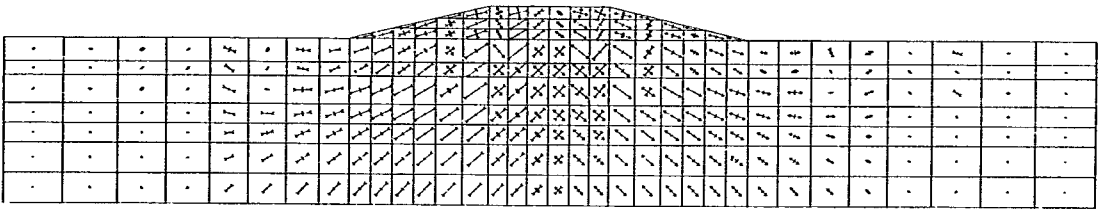
(8) $T = 1.62$ 秒



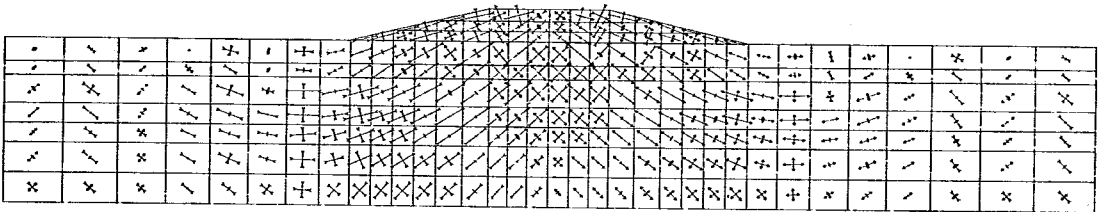
GEO. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 12.300
 DIS. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 2.364E-1

(9) $T = 1.63$ 秒

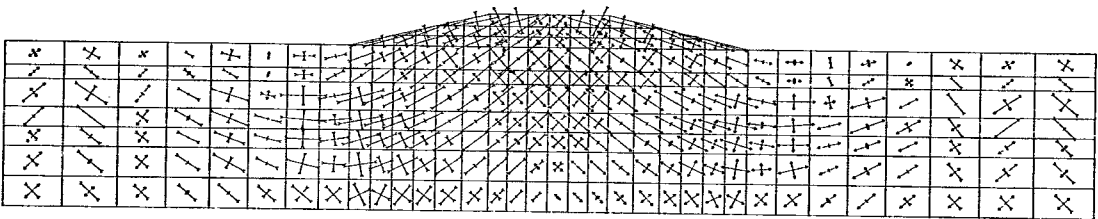
图 2-29 变位分布 (6)~(9)



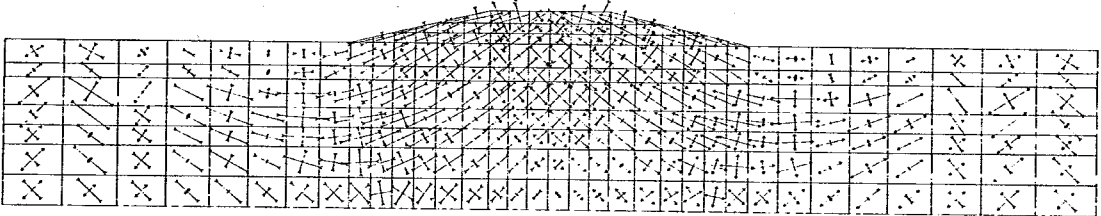
(1) $T = 1.55$ 秒



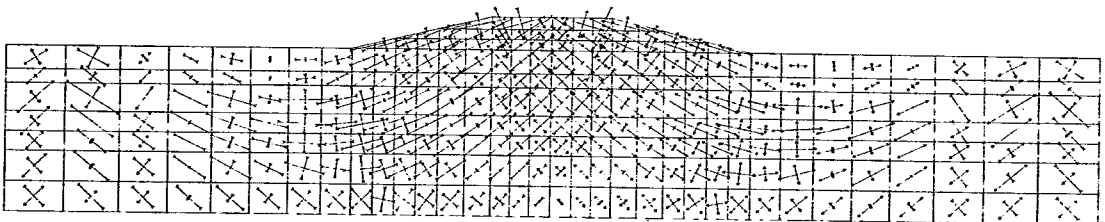
(2) $T = 1.56$ 秒



(3) $T = 1.57$ 秒

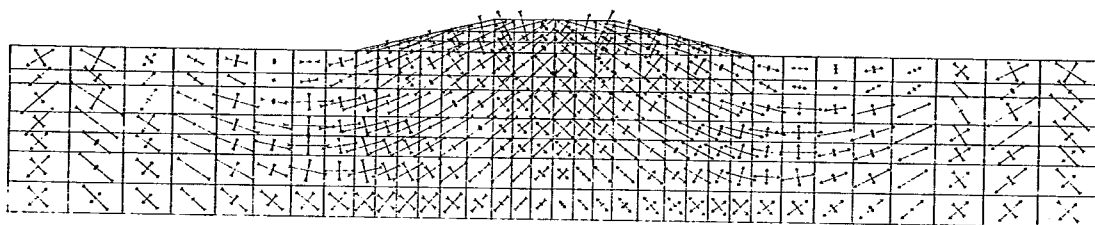


(4) $T = 1.58$ 秒

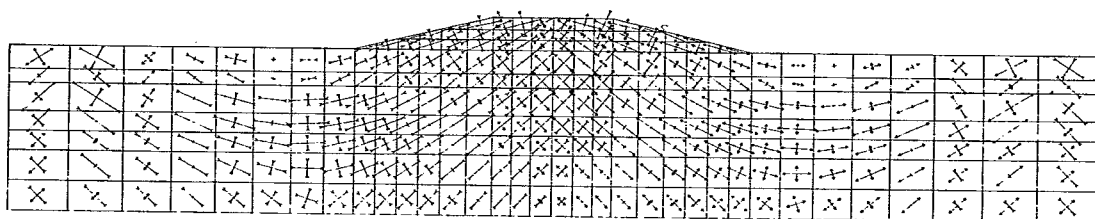


(5) $T = 1.59$ 秒

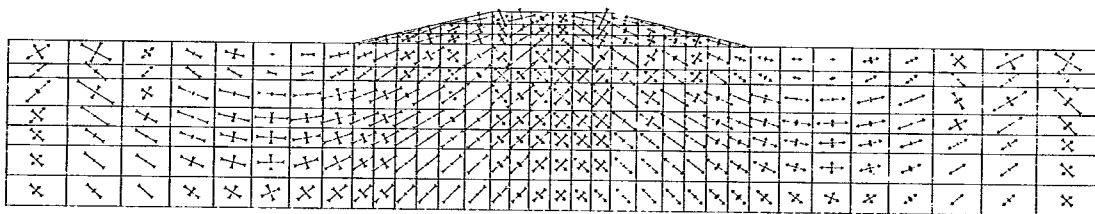
図2-30 主ひずみ分布 (1)~(5)



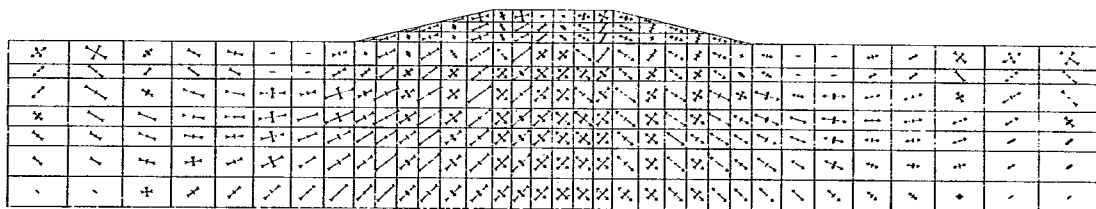
(6) $T = 1.60$ 秒



(7) $T = 1.61$ 秒

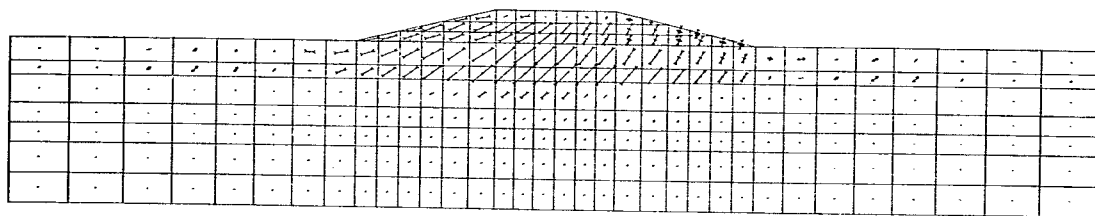


(8) $T = 1.62$ 秒

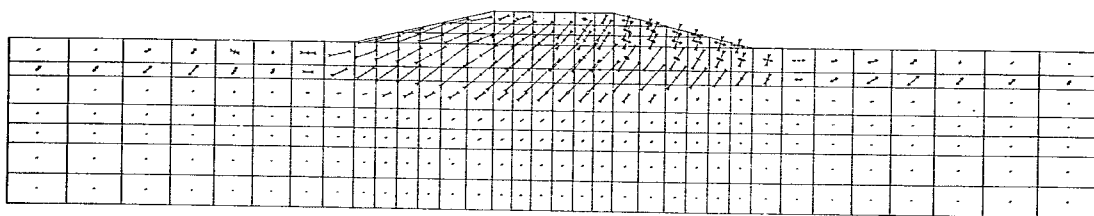


(9) $T = 1.63$ 秒

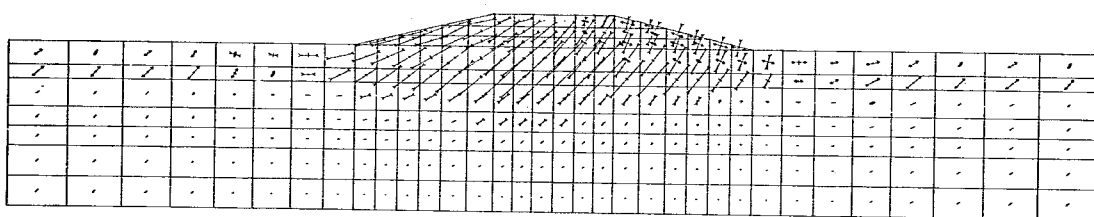
図 2-30 主ひずみ分布 (6)~(9)



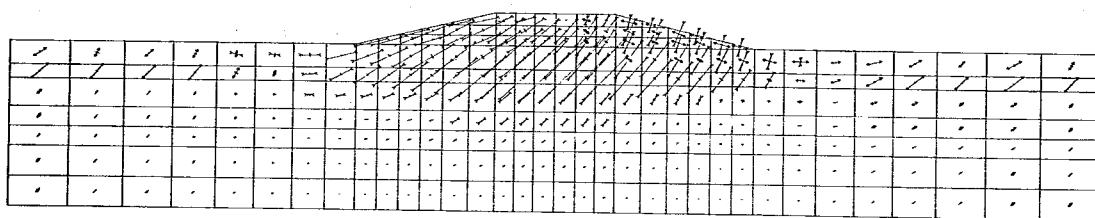
(1) $T = 1.5 \text{ 5 秒}$



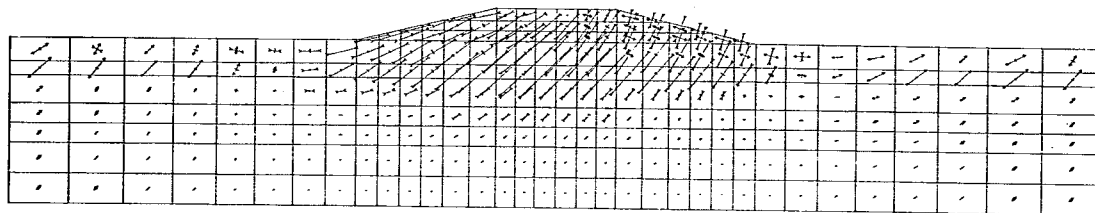
(2) $T = 1.5 \text{ 6 秒}$



(3) $T = 1.5 \text{ 7 秒}$

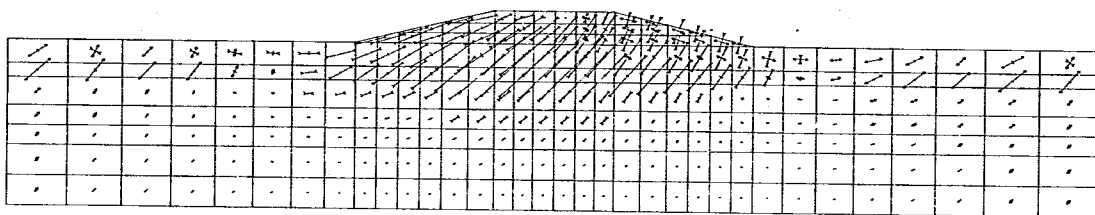


(4) $T = 1.5 \text{ 8 秒}$

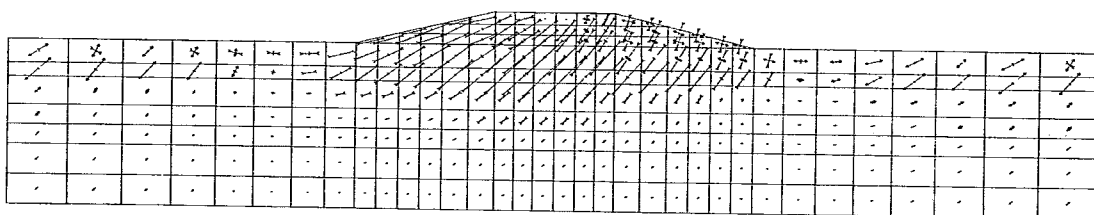


(5) $T = 1.5 \text{ 9 秒}$

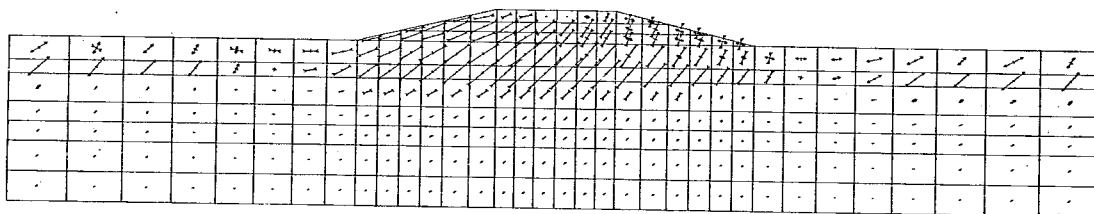
图 2 - 31 主应力分布 (1)~(5)



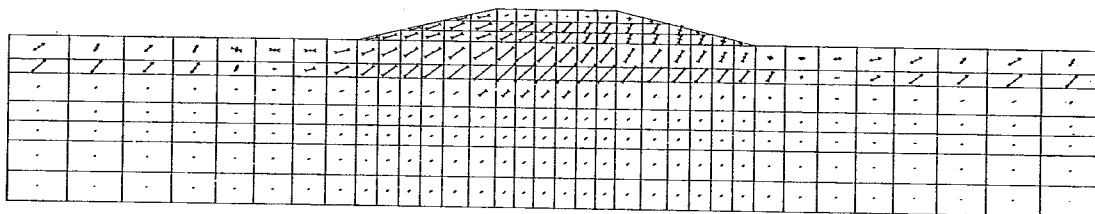
(6) $T = 1.60$ 秒



(7) $T = 1.61$ 秒



(8) $T = 1.63$ 秒



(9) $T = 1.63$ 秒

图 2-31 主应力分布 (6)~(9)

(2) ランダム波形による応答解析

盛土中央部断面（モデル2-1）に対し、実験で実際に模型に入力された（振動台で記録された）ランダム波形の3秒間の記録（実時間に直すと15秒間→付録Bにパワースペクトルを示す）を用いて、 $1/100$ 秒ピッチで応答解析を行なった。減衰定数は2%であり、モーダル・アナリシスでは1～10次の振動モードを考慮した。

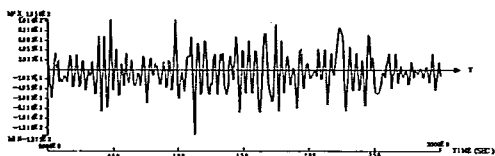
入力加速度および図2-11に示した地盤部および盛土部の代表的な6点の絶対加速度応答変位応答を図2-32に示す。また、3秒間の応答中の盛土部および地盤部の代表的な節点における最大応答絶対加速度、および、最大応答変位を表すと表2-13、のようになる。

表2-13 加振台に入力されたランダム波形（3秒間）による最大応答（ $h = 0.02$ ）

節点	絶対加速度応答		変位応答		節点	絶対加速度応答		変位応答	
	応答値 (gal)	応答倍率 (gal/gal)	応答値 (cm)	応答倍率 (cm/cm)		応答値 (gal)	応答倍率 (gal/gal)	応答値 (cm)	応答倍率 (cm/cm)
入力	137.5	1.0			入力	137.5	1.0		
123	92.4	0.672	0.0384	1.0	563	128.8	0.94	0.0454	1.18
125	122.9	0.894	0.0716	1.86	565	168.9	1.23	0.0891	2.32
					567	221.4	1.61	0.119	3.10
129	175.4	1.28	0.106	2.76	569	263.2	1.91	0.147	3.82
131	167.1	1.22	0.127	3.31	571	331.2	2.41	0.207	5.39
133	274.4	1.99	0.183	4.77	573	468.4	3.41	0.358	9.32
135	602.3	4.38	0.281	7.32	575	440.5	3.20	0.494	12.86
					577	485.9	3.53	0.520	13.54
					579	625.9	4.55	0.565	14.71
					581	673.0	4.89	0.583	15.18

さらに、絶対応答加速度の最大入力加速度に対する比と最大応答変位の最大入力変位（123点の最大応答変位を代用）に対する比を等高線の形で表わすと図2-33、図2-34のようになる。

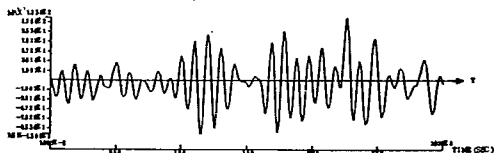
次に、トンネル下地盤（Point 597）の応答変位が最大となる時間とその前後 $1/100$ 秒ずつ4ステップ、合計9ステップの変位、主ひずみ、主応力の分布をそれぞれ、図2-35、図2-36、図2-37に示す。



(1) 入力加速度波形

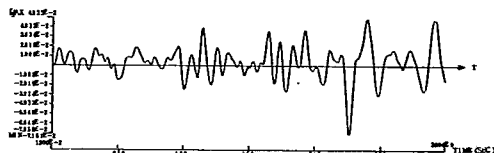
		581
	135	575
1層	133	573
0層	131	571
床層	129	569
へ層	125	565
1層	123	563

図 2-11 モデル 2-1

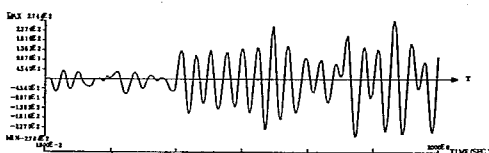


(a) 絶対加速度応答

(2) 125 点の応答

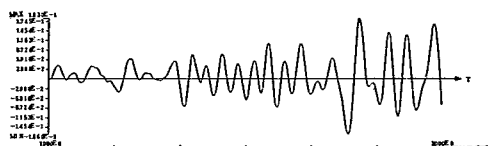


(b) 変位応答

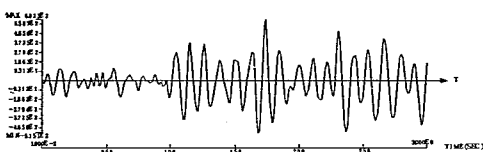


(a) 絶対加速度応答

(3) 133 点の応答

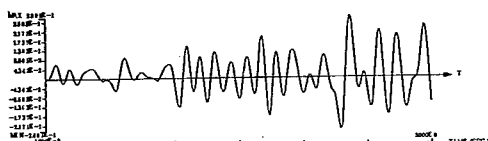


(b) 変位応答

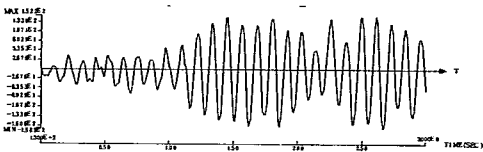


(a) 絶対加速度応答

(4) 135 点の応答

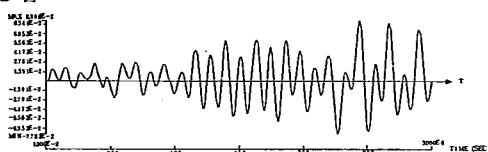


(b) 変位応答

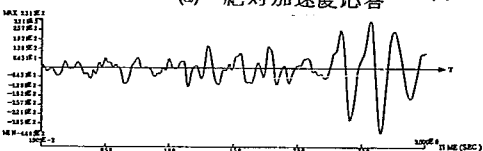


(a) 絶対加速度応答

(5) 565 点の応答

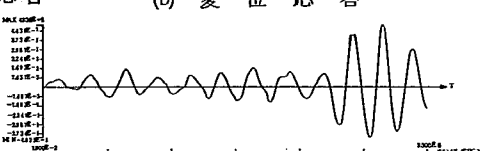


(b) 変位応答

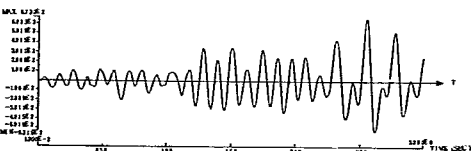


(a) 絶対加速度応答

(6) 575 点の応答

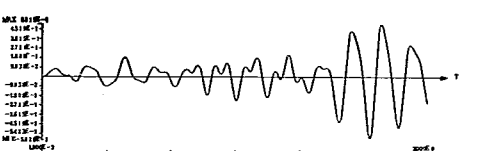


(b) 変位応答



(a) 絶対加速度応答

(7) 581 点の応答



(b) 変位応答

図 2-26 加振台に入力された El-Centro N-S 成分による応答 ($h=0.02$)

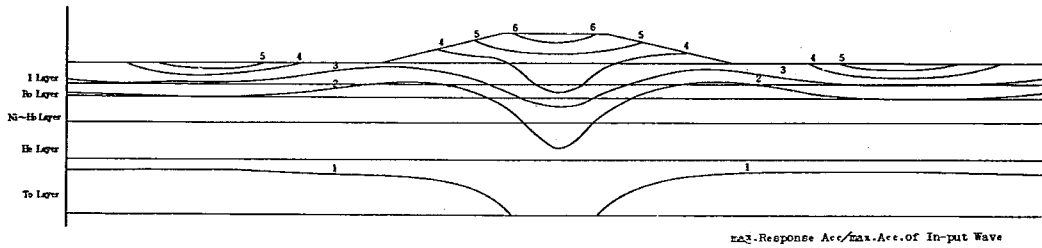


図 2 - 33 最大応答加速度倍率 (最大応答絶対加速度 / 最大入力加速度) の分布
ランダム波、 $h = 0.02$

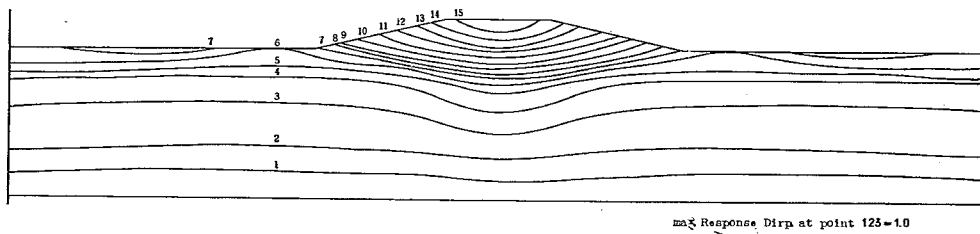
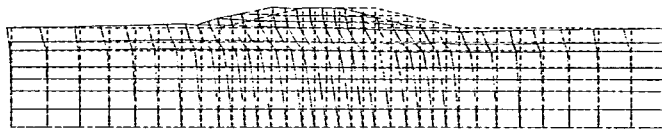
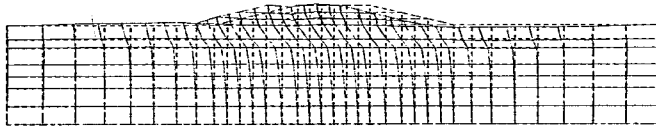


図 2 - 34 最大応答変位倍率 (最大応答相対変位 / 123 点の最大応答相対変位) の分布
ランダム波、 $h = 0.02$



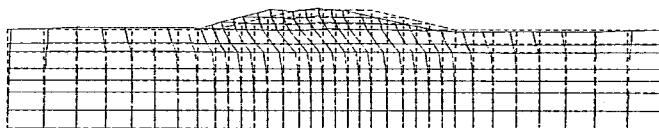
GEO. SCALE 12.300
DIS. SCALE 3.24E-1

(1) $T = 2.52$ 秒



GEO. SCALE 12.300
DIS. SCALE 4.46E-1

(2) $T = 2.53$ 秒



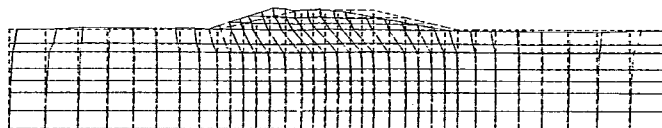
GEO. SCALE 12.300
DIS. SCALE 5.41E-1

(3) $T = 2.54$ 秒



GEO. SCALE 12.300
DIS. SCALE 5.86E-1

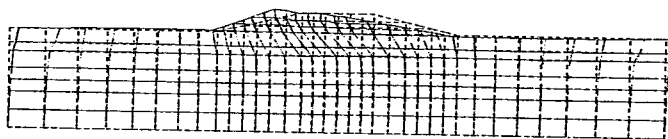
(4) $T = 2.55$ 秒



GEO. SCALE 12.300
DIS. SCALE 5.57E-1

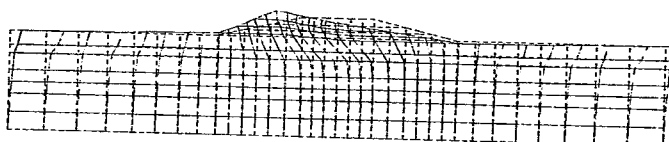
(5) $T = 2.56$ 秒

图 2 - 35 变位分布 (1)~(5)



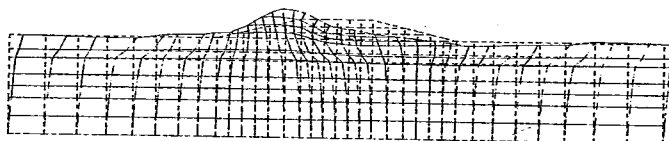
GEO. SCALE $\frac{1}{12.300}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{4.673E-1}$

(6) $T = 2.57$ 秒



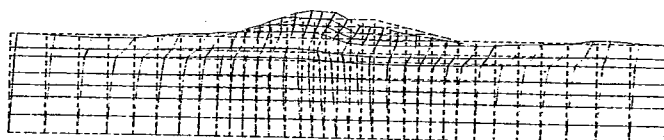
GEO. SCALE $\frac{1}{12.300}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{3.313E-1}$

(7) $T = 2.58$ 秒



GEO. SCALE $\frac{1}{12.300}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{1.957E-1}$

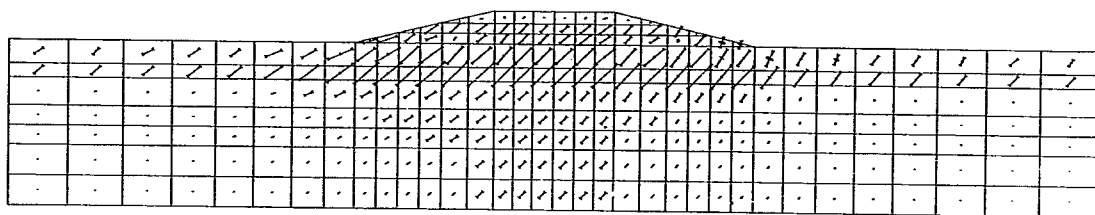
(8) $T = 2.59$ 秒



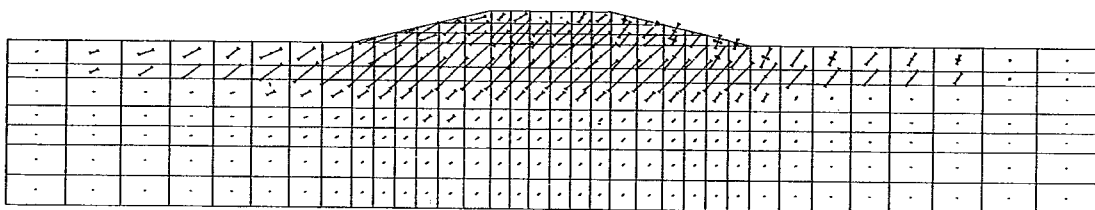
GEO. SCALE $\frac{1}{12.300}$
 DIS. SCALE $\frac{1}{2.153E-1}$

(9) $T = 2.60$ 秒

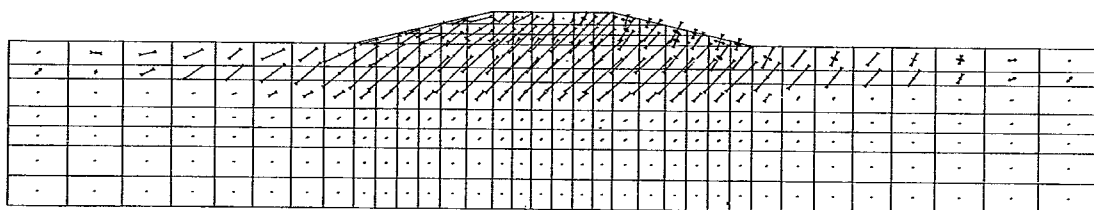
图 2-35 变位分布 (6)~(9)



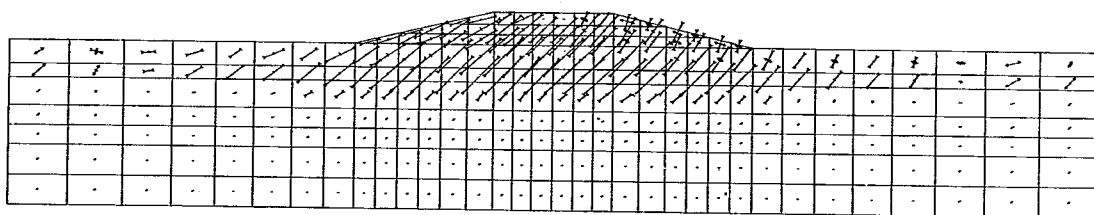
(1) $T = 2.52$ 秒



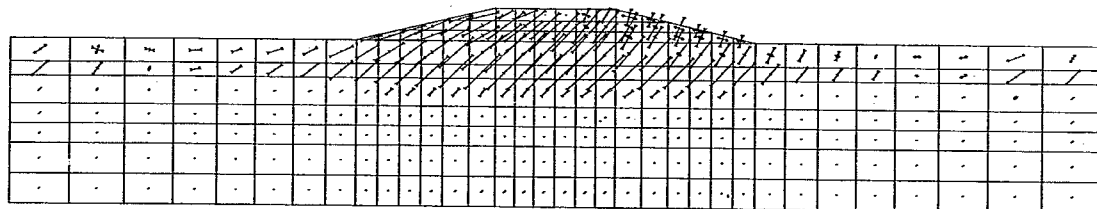
(2) $T = 2.53$ 秒



(3) $T = 2.54$ 秒

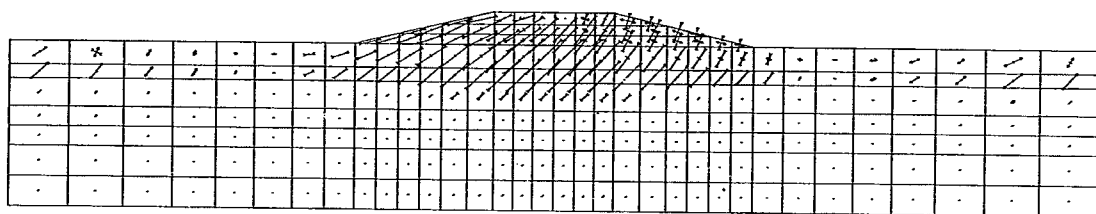


(4) $T = 2.55$ 秒

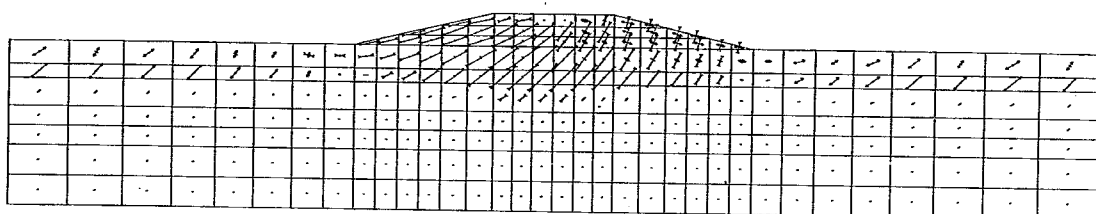


(5) $T = 2.56$ 秒

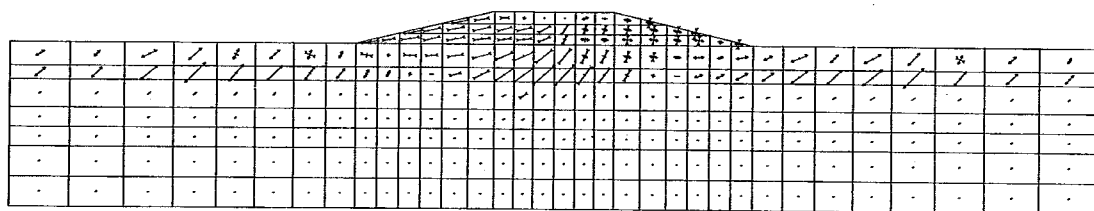
図 2-36 主ひずみ分布 (1)~(5)



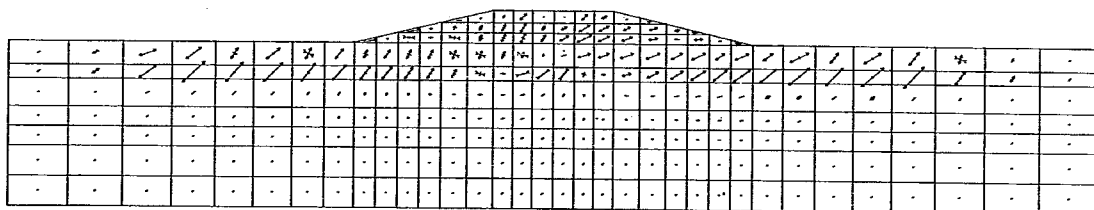
(6) $T = 2.57$ 秒



(7) $T = 2.58 \text{ 秒}$

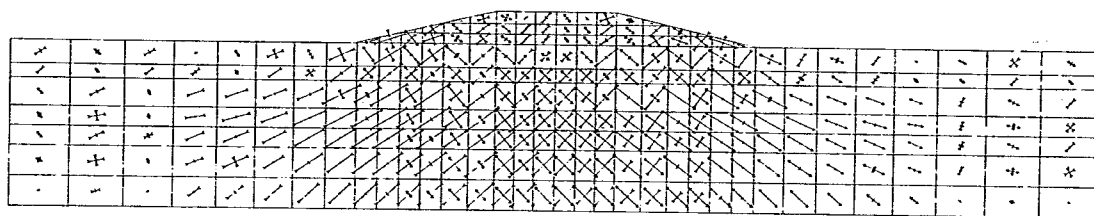


(8) $T = 2.59$ 秒

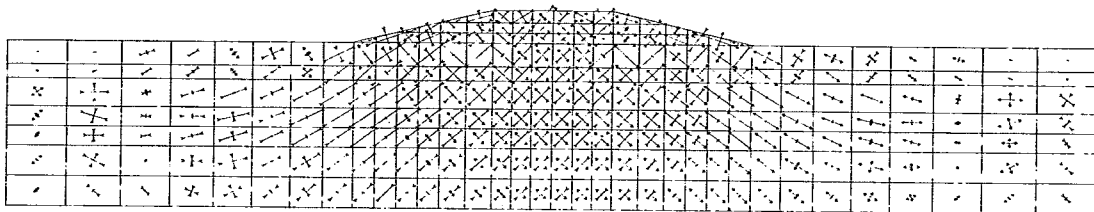


(9) $T = 2.60$ 秒

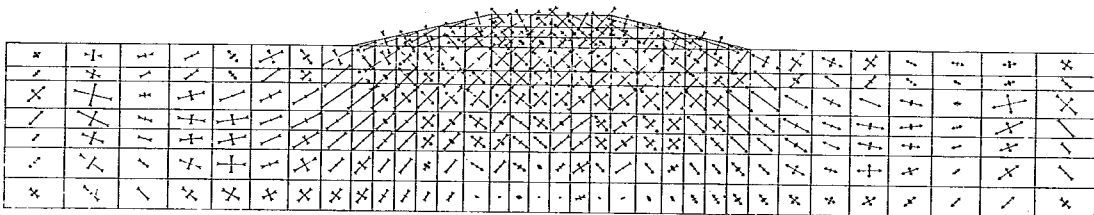
図 2-36 主ひずみ分布 (6)~(9)



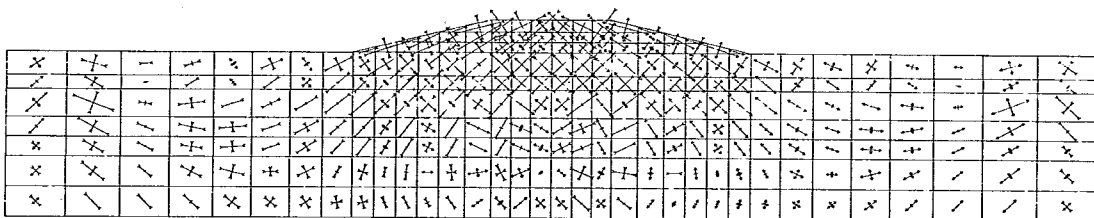
(1) $T = 2.5 \text{ 2 秒}$



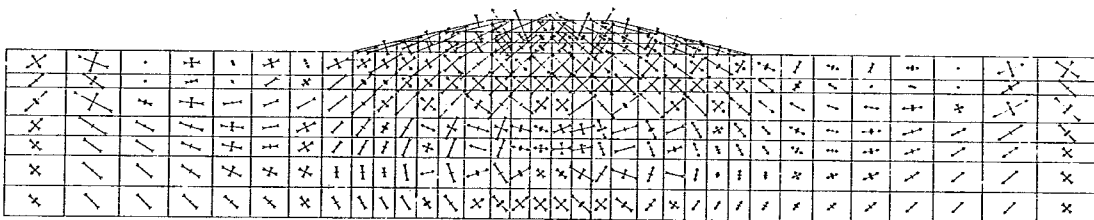
(2) $T = 2.5 \text{ 3 秒}$



(3) $T = 2.5 \text{ 4 秒}$

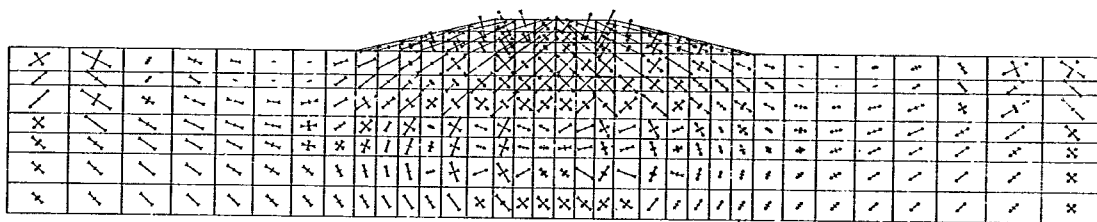


(4) $T = 2.5 \text{ 5 秒}$

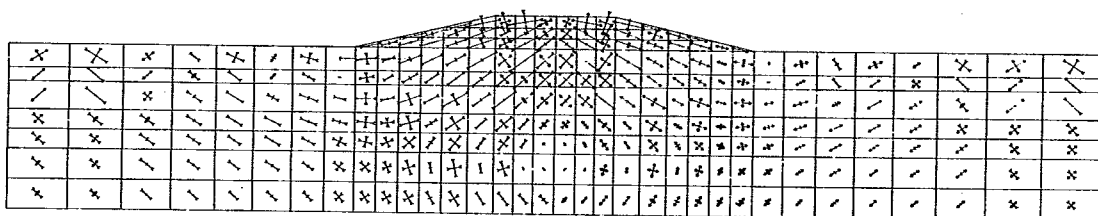


(5) $T = 2.5 \text{ 6 秒}$

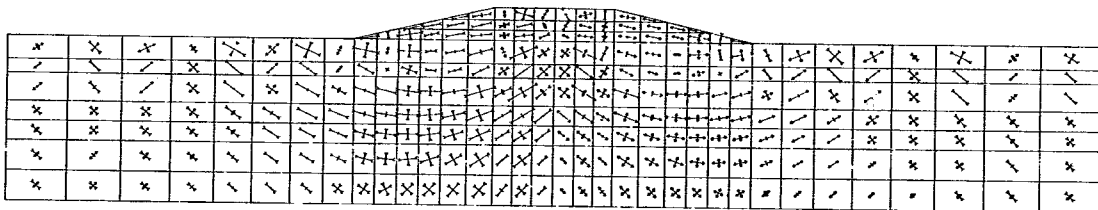
图 2-37 主应力分布 (1)~(5)



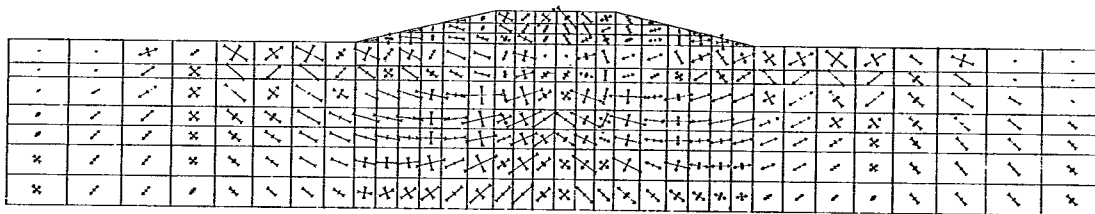
(6) $T = 2.57$ 秒



(7) $T = 2.58$ 秒



(8) $T = 2.59$ 秒

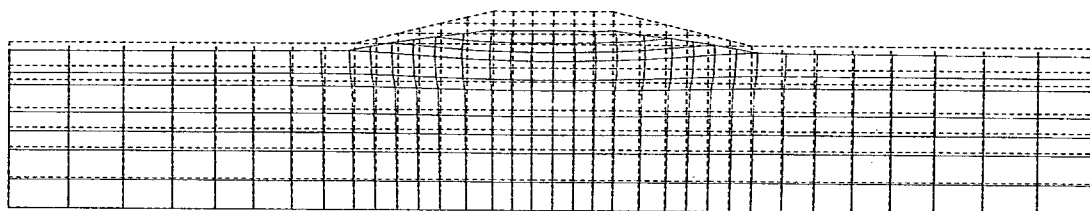


(9) $T = 2.60$ 秒

图 2-37 主应力分布 (6)~(9)

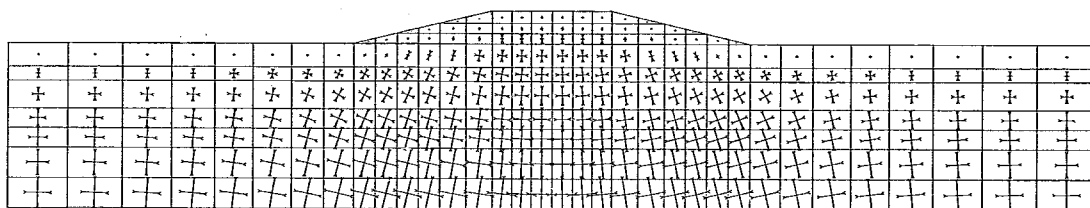
2-4 静的解析

モデル2-1に対して自重による静的変形解析を行なった。この結果を図2-38に示す。



Geo. Scale 1:100
Dis. Scale 1:1000

(a) 変位



(b) 応力

図2-38 自重による変位および応力分布

3. 解析結果の検討および実験結果との比較

3-1 固有振動解析

固有振動数および固有振動モードから、次のことが指摘できる。

- (1) 二次元モデルでは、1次はせん断振動モード、2次は上下振動モード、3次は逆位相のせん断振動モードである。刺激係数から判断すると上下振動モードは応答に対する影響は小さく、せん断振動モードが支配的である。
- (2) 刺激係数は、50次になっても、まだかなり大きな値となる次数がある。
- (3) 地盤の軟質度和上載荷重の影響で地盤だけの場合にはニ～ホ層が、盛土が存在する場合には盛土下のイ～ロ層およびニ～ホ層が、それぞれ一番大きく変形する。
- (4) 盛土が存在することにより、盛土周辺の地盤は複雑な振動モードを示す。
- (5) 三次元モデルの固有振動モードから推定すると、地盤表面に比較し、盛土頂面の応答変位は非常に大きくなる。たとえば、軸直角方向振動で刺激係数の大きい7次、10次モードでは、盛土頂部は地盤表面の2.5倍～4倍の変位量を、軸方向振動の刺激係数の大きい1次、8次モードでは7～15倍もの変位量を示している。

盛土の振動モードは、1次が軸方向のせん断振動モードであるほかは、複雑な振動モードを示しており、単純な評価ができない。また、盛土全体の軸直角方向の一樣せん断振動モードが予想されたが、これが現われていない。これらの点については、モデル化の方法、解析方法と精度を含めて、今後検討する必要がある。

3-2 応答解析結果

(1) 正弦波による定常応答解析結果

(a) 共振振動数

共振振動数は減衰定数1%の場合には、盛土頂面では、3.99% (1次固有振動数)、地盤部表面では5.36% (3次固有振動数)である。これに対して実験結果では、盛土頂面で3.7% (実験4、変位計2)、地盤表面で4.9% (実験4、変位計1)であり、共振振動数はいずれも解析結果の方が大きくなっている。しかし、その差は7～11%であり、この違いは平面ひずみ状態を仮定したこと、実験模型の弾性係数が層内で均一に仕上がっていたとは考えられないこと、などを考慮すれば、両者は良く一致していると言えよう。

(b) 深さ方向の増幅倍率

減衰定数1%の場合の基盤に対する変位の増幅倍率は、盛土の頂面 (Point 581) では120.67倍、地盤部表面 (Point 135) では65.43倍であり、両所における増幅倍率の比は1.84である。また、この比は減衰定数が増加するにつれ、わずかに小さくなる ($h=1\%$: 1.84、 $h=2\%$: 1.79、 $h=10\%$: 1.54)。

実験結果によれば、基盤に対する変位の増幅倍率は地盤表面で70～90倍、盛土中央部で210～280倍であり、両者の比は約3で解析結果より大きい傾向にある。

(c) 共振曲線

盛土中央トンネルの変位と加速度の共振曲線を実験値と解析結果を比較して示すと図3-1、3-2のようになる。

1次共振振動数は前述したように、両者は比較的よく一致している。しかし、実験結果で

は、 $8 \sim 10 \%$ 付近に2次と見られる顕著な共振点が認められるが、解析結果では、はっきり現われていない。各層ごとにせん断振動の1次固有振動数を求めると、盛土が 9.07% 、イ層が 9.86% 、へ層+ト層が 8.87% であり実験結果に見られる二次共振点は現象的にはこれらの層の共振により引起こされていると考えられる。

(2) 地震動波形およびランダム波形による応答解析結果

(a) 応答倍率

最大応答変位および最大応答絶対加速度は盛土およびその下のイ～ロ層に大きな値が集中しているのが認められる(図2-28、34)。モデル周辺のイ～ロ層にも非常に大きな応答が現われているが、これは境界における水平方向拘束がないための影響によるものと考えられる。

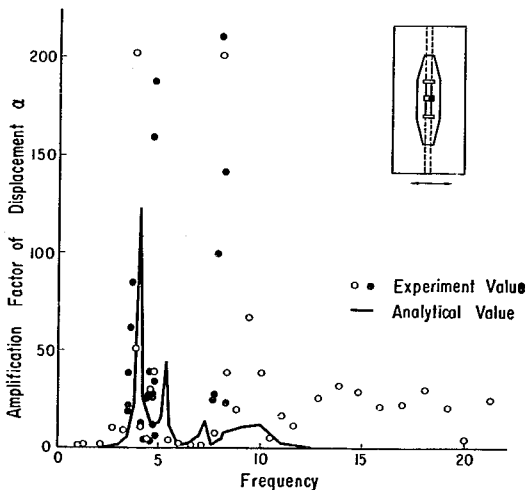


図3-1 変位共振曲線(盛土頂面中央)

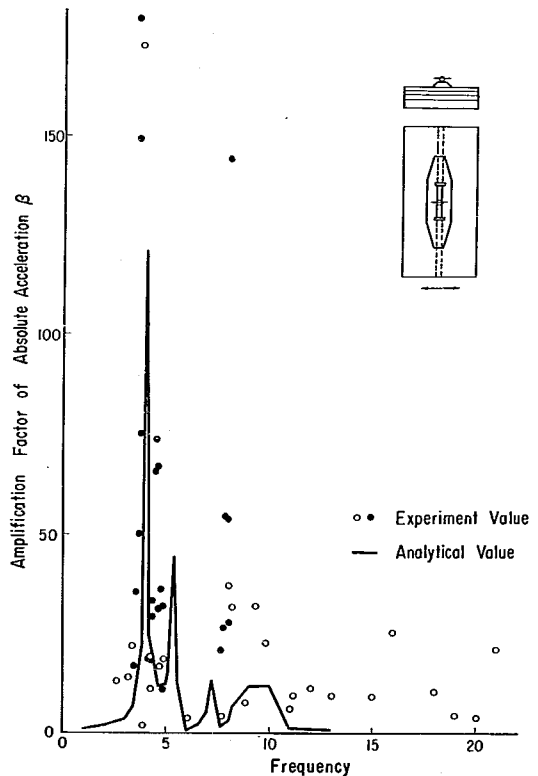


図3-2 加速度共振曲線(盛土頂面中央)

(b) ひずみ量の検討

ひずみ分布図から El-Centro、ランダム波形のいずれの場合も時間に関係なく、盛土周辺のイ層、ロ層、ニ～ホ層が他に比較して非常に大きなひずみを生じている。

El-Centro NS 成分地震動加速度波形による最大せん断ひずみ量は約 0.072 (El Centro: $T = 1.59$ 秒) である。この値は底面に最大加速度が約 100 gal の地震動波形が作用した場合であるが、模型縮尺 (長さ $\frac{1}{50}$ 、時間 $\frac{1}{5}$) からこれを実モデルに直すと 2200 gal の最大加速度をもつ地震動波形が作用した場合に相当する。地盤の減衰定数を 0.1 とした場合には、応答変位は応答スペクトル曲線から推定して減衰定数が 0.02 の場合の約 $\frac{2}{5}$ になると考えられる。したがって、縮尺率を考慮して上記のひずみ量から原型において水面下 200 m の基盤 (模型の基盤面に相当する) に最大加速度が 100 gal の El Centro NS 成分 (模型に入力された地震動加速度波形) が作用した場合の最大せん断ひずみは約 2×10^{-3} となる。

この場合、模型地表面の最大加速度は約 700 gal となっており、原型では減衰定数を 0.1 とすれば、平均スペクトル曲線から推定してその最大加速度は約 470 gal となる。

なお、実験模型地盤の弾性係数はせん断波の伝播速度から求めた微小なひずみ (10^{-6} 程度) に相当するものであり、解析結果から推定される上記の最大せん断ひずみ量はこれよりかなり大きな値となっている。

4. 結 論

盛土部の長手方向に直交する断面に対する二次元平面ひずみ解析結果から、次の事項が指摘できる。

- (1) 減衰定数を1%とした場合の盛土頂面および地盤表面の一次共振振動数は、実験結果より7～11%程度高い。
- (2) 減衰定数を1%とした場合の1次共振点における基盤に対する変位の増幅倍率は、盛土頂面で120.3倍(実験:210～280倍)、地盤表面で65.3倍(実験:70～90倍)である。両所における変位の増幅倍率の比は約2で、実験結果の約3倍に比較するとわずかに低い傾向を示している。
- (3) 地震動波形による応答解析(減衰定数2%)では、変位、加速度とも盛土およびその下のイ層、ロ層に大きな値が集中する。また、最大せん断ひずみもこの部分に生じ、その値は 7.2×10^{-2} である。実地盤における最大せん断ひずみは応答スペクトル曲線から推定して、地盤の減衰定数を10%とし、水面下200mの基盤に最大加速度100galのEl Centro NS成分地震動加速度波形が作用した場合を考えると 2×10^{-3} 程度になる。この場合、実物の地盤表面の最大加速度は同じく応答スペクトル曲線から推定すると約470galである。

三次元モデルの固有振動解析結果は以下の点につき、今後、モデル化の手法、解析方法と精度を含めて検討する必要がある。

- (1) 1次が盛土の軸方向のせん断振動モードであるほかは、複雑な振動モードを示す。
- (2) 盛土全体の軸直角方向の一樣せん断振動モードが現われていない。

付録 A 動的系の縮合

§1 概 説

lumped mass systemにおいては、動的自由度を減少させるため、複数の要素の質量をまとめて、適当に節点に割り振ることをよく行なうが、consistent mass systemではこのような節点への割り振りの物理的意味がはっきりしない。そこで、本報告書で示した解析では Guyan らによって提案された動的自由度を静的な縮合過程で 130 元まで減少させるという手法が用いられているのにこれについて簡単に示し、このような縮合を行なうことによる精度を検討するため 2 例の数値計算を行なったのでこれについて述べる。

§2 Guyan の縮合法

この方法は静的解析において、剛性行列の次数を縮少すると同様な手法を質量行列に対しても適用し、等価質量行列を作るものである。

まず、剛性行列 $[K]$ 、変位ベクトル $\{u\}$ 、変位ベクトルに対応する力のベクトル $\{F\}$ を次のように分割する。

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、変位ベクトル $\{u_1\}$ は動的解析の自由度として含まれるすべての変位であり、 $\{u_2\}$ は静的解析には用いられるが、新しい等価質量マトリックスを構成する場合には用いない変位である。 $\{u_2\}$ を $\{u_2\}$ に対応する力のベクトル $\{P_2\}$ がすべて零であるように選べば、静的つり合い式から $\{u_2\}$ は次のように決定される。

$$\{u_2\} = -[K_{22}]^{-1} [K_{21}] \{u_1\} \quad (2)$$

すなわち、 $\{u_1\}$ と $\{u_2\}$ は独立ではなくなり、式(2)で示される一定の関係で結ばれることになるが、これは、 $\{u\}$ につきのような座標変換を施したのと同じである。

$$\text{ここで、} [T] = \begin{bmatrix} I \\ -[K_{22}]^{-1} [K_{21}] \end{bmatrix} \quad (3)$$

もし、構造物の運動エネルギーおよびひずみエネルギーが、それぞれ、

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \{\dot{u}\}^T [M] \{\dot{u}\} \\ V &= \frac{1}{2} \{u\}^T [K] \{u\} \end{aligned} \quad (4)$$

で表わされると、自由振動の平衡方程式は次のようになる。

$$[M] \{\ddot{u}\} + [K] \{u\} = \{0\} \quad (5)$$

式(4)に式(3)の座標変換を施すと

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \{\dot{u}_1\}^T [T]^T [M] [T] \{\dot{u}_1\} \\ V &= \frac{1}{2} \{u_1\}^T [T]^T [K] [T] \{u_1\} \end{aligned} \quad (6)$$

となり、自由振動の平衡方程式は次のようになる。

$$[M_{red}] \{\ddot{u}_1\} + [K_{red}] \{u_1\} = \{0\} \quad (7)$$

ここで、 $[M_{red}]$ 、 $[K_{red}]$ が縮合質量行列、縮合剛性行列であり、

$$\begin{aligned} [M_{red}] &= [T]^T [M] [T] \\ [K_{red}] &= [T]^T [K] [T] \end{aligned} \quad (8)$$

である。

式(8)を展開すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \{M_{red}\} &= \{M_{11}\} - \{M_{12}\} \{K_{22}\}^{-1} \{K_{12}\}^T - \{K_{12}\} \{K_{22}\}^{-1} \{M_{12}\}^T - \{M_{22}\} \{K_{22}\}^{-1} \{K_{12}\}^T \\ \{K_{red}\} &= \{K_{11}\} - \{K_{12}\} \{K_{22}\}^{-1} \{K_{12}\}^T \end{aligned} \quad (9)$$

縮合剛性行列はもとの剛性行列の性質がなにも失なわれておらず、論理的にも正しいものであるが、動的問題における縮合質量行列は、変換行列 $\{T\}$ と質量の分布に論理的関係がないため、単に静的な縮合を行なったというにすぎない。したがって、式(7)から求められる $\{u_1\}$ は近似的な解である。

§3 縮合法による解の精度の検討

縮合法を用いた場合の精度の検討はいままでにも行なわれた例があるが、これらは主として板の曲げ振動問題を対象としたものが多かった。

板の曲げ解析においては、一般に、たわみ成分 W に対する質量の分布が他の $W_{,x}$, $W_{,y}$ 等の回転角成分や $W_{,xx}$, $W_{,yy}$, $W_{,xy}$ 等の曲率成分の項に対する質量分布よりも格段に大きいため、たわみ成分に動的自由度を縮合すれば比較的良好な結果が得られると考えられる。しかし、今回行なったような二次元および、三次元解析においては成分間における質量分布に差がなく、しかも弾性係数が一様ではなく、最大値と最小値が 1 : 20 もの開きがあり、要素形状も必ずしもよいとは言えない。そのため、この種の問題に縮合法がどの程度の精度を示すかを検討するため、次の 2 種類のケースに対して試算を行なった。

- (1) 図 A-1 に示す高さ 45 cm、長さ 280 cm、3 層より成る地盤モデルを対象として次の 3 種類の要素分割に対して、全自由度を考慮した Jennings の iteration 法と 90 元の動的系に縮合して Housholder / Bisection 法で計算した結果を比較した。

表 A-1 計算モデル

モデル	要素分割	節点数	全自由度数	縮合自由度	モデル形状および縮合節点
a	7 × 15	105	169	90 (u 方向のみ)	図 B-2
b	16 × 29	464	840	90 (u 方向のみ)	図 B-3
c	28 × 29	812	1512	90 (u 方向のみ)	図 B-4

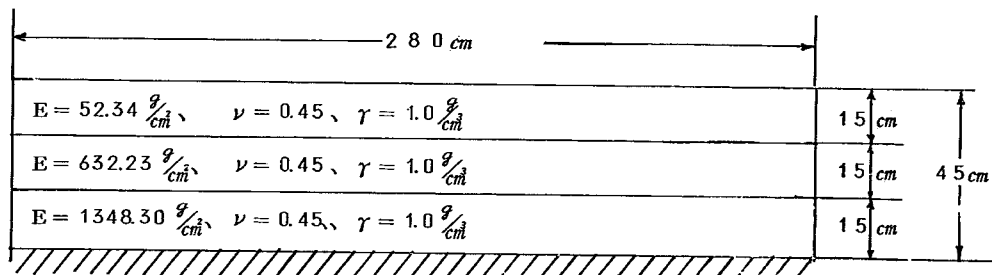


図 A-1 対象モデル

使用要素は変位関数を線形に仮定した平面ひずみ三角形要素である。境界条件は底面は u 、 v とも固定、側面は v のみ固定とし、その他はフリーとした。

固有振動数の計算結果を表A-2に示す。ここで誤差とは、全自由度モデルに対する縮合モデルの差の比を表わしている。

表A-2 固有振動数における全自由度モデルと縮合モデルの比較

モデル		a			b			c		
		全自由度 モデル	縮合モデル	誤差	全自由度 モデル	縮合モデル	誤差	全自由度 モデル	縮合モデル	誤差
自由度数		169	90	(%)	840	90	(%)	1512	90	(%)
固有振 動 数 (Hz)	1	1.97716	1.97733	0.01	1.95832	2.02053	3.2	1.95419	2.02579	3.7
	2	2.08818	2.08926	0.05	2.04283	2.11460	3.5	2.03547	2.11776	3.9
	3	2.33045	2.33456	0.17	2.25043	2.34902	4.4	2.23962	2.35319	5.0
	4	2.75461	2.76734	0.47	2.54628	2.69676	5.9			
	5	3.13874	3.16449	0.80	2.87850	3.10354	7.8			
	6	3.70726	3.76515	1.6						
	7	4.18228	4.26411	1.7						
	8	4.83154	4.96839	2.8						
	9	5.06477	5.08278	0.4						
	10	5.15768	5.29504	2.7						
Total System Time (min) (CDC 6600)		4.9	4.3	—	101	8.4	—	15.4	14.3	—

- (2) モデル2-2およびモデル2-5に対して全自由度を考慮した Jenning の iteration 法による計算を行ない、本文中の表2-4および2-7の結果と比較した。固有振動数による比較結果を表A-3に示す

表A-3 固有振動数における全自由度モデルと縮合モデルの比較

モデル		モデル 2 - 1			モデル 2 - 5		
		全自由度モデル	縮合モデル	誤差 (%)	全自由度モデル	縮合モデル	誤差 (%)
自由度数		1668	130		240	120	
固有振動数 (Hz)	1	3.570	3.628	1.6	10.048	10.050	0.02
	2	4.769	5.059	6.1	13.864	13.922	0.42
	3	4.922	5.243	6.5	15.622	15.872	1.60
	4	5.565	6.101	9.6	19.190	20.028	4.37
	5	6.199	6.956	12.2	19.397	20.417	5.26
	6		7.879		21.518	23.775	10.49
	7		8.007		22.289	23.832	6.92
	8		8.468		24.210	26.675	10.18
	9		9.350		25.581	27.504	7.52
	10		9.732		26.690	28.351	6.22
Total System Time (分) (CDC 6600)		—	—	—	6.9	5.5	—

以上の試算結果から次の点がわかった。

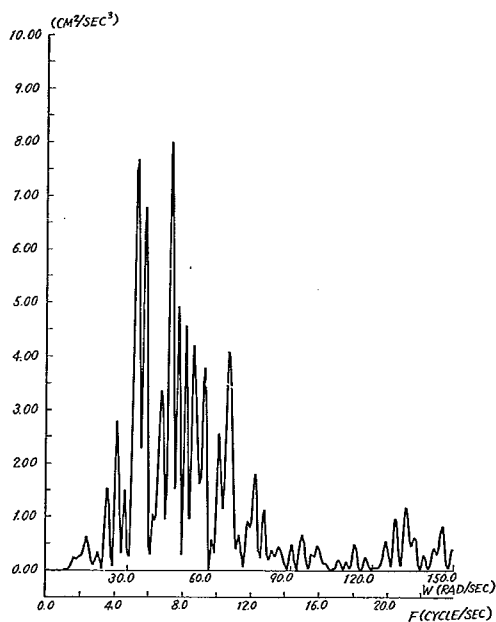
1. 縮合した自由度がもとの自由度に比べ少なくなる程、精度が悪くなる。
2. 分割された要素形状が悪い程、縮合過程に生ずる誤差は大きくなる。
3. 次数の高いモード程、精度は悪くなる。
4. モデル2-2の固有振動数の誤差は1次で1.6%、5次で12.2%である。したがって、モデル1-1、1-2、2-1、2-3、2-4についてもこの程度の誤差が含まれていると考えられる。
5. モデル2-5の固有振動数の誤差は1次で0.02%10次で6.22%である。したがって、モデル2-6、2-7についてもこの程度の誤差が含まれていると考えられる。

参考文献

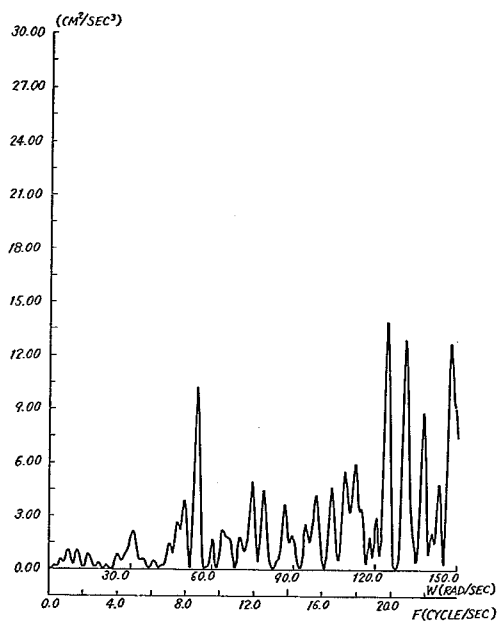
- 1) Guyan, R.J.; Reduction of Stiffness and Mass Matrices, AIAA Journal, 3, 1965, p. 580.
- 2) 河島佑男; 動的応答解析, コンピューターによる構造工学講座Ⅱ-4-A, 培風館, pp. 90~93.
- 3) Przemieniecki, J. S.; Theory of Matrix Structural Analysis, McGraw-Hill, 山田, 川井 共訳 マトリックス構造解析の基礎理論, 培風館, pp. 264~265.
- 4) 戸川隼人 他; 計算技術および数値計算法, コンピューターによる構造工学講座Ⅱ-1-A, 培風館, pp. 135~155.
- 5) 竹中、武田、渡部; 有限要素法による動的解析の一考案、土木学会第27会学術講演会概要集, S-47・10, pp. 73~76.
- 6) CRC; ASKA-DYNANにおける固有値の精度に関する一考案, CRC DYNAN Rept 5, S 48, 1.

付録B 応答解析に用いた地震動波形およびランダム波形のパワースペクトル

応答解析に用いた EI Centro NS 成分地震動加速度波形およびランダム波形のパワースペクトルを図B-1に示す。これらの波形は実験中に加振台上で記録されたもので、時間軸は $\frac{1}{5}$ に縮められている。



(a) EI Centro NS



(b) ランダム波形

図B-1 応答解析に用いた加速度波形のパワースペクトル

沈埋トンネルの耐震性に関する調査報告
沈埋トンネルおよび盛土の地震応答解析

土研資料第851号
昭48.12(1973)

栗林栄一、岩崎敏男

キーワード

沈埋トンネル・盛土・地震応答解析

本報告書は昭和47年度に実施した沈埋トンネルと盛土の模型振動実験結果を検証し、さらに、地盤の構成や減衰特性に対する考慮を加えて実構造物の動的性質を推定するための資料を得ることを目的として実施した沈埋トンネルと盛土の地震応答解析結果をとりまとめたものである。



郵便はがき

は 十
い 円
っ 切
て 手
下 を
さ

2 8 0 - □ □

建設省土木研究所
振動研究室 御中

千葉県千葉市穴川
四丁目十二番五二号

No.089

No.

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第 8 5 1 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

