

粒度構成が異なる砂質土層の非線形せん断振動応答に関する研究

日大生産工（院）○熊膳 和也 日大生産工 木田 哲量
日大生産工 澤野 利章 日大生産工 阿部 忠

1.はじめに

地震の被害は、構造物の耐震性や地質条件により大きな差異が現れる。特に地質条件は、地震波が地盤を介し構造物へ伝播されることから、構造物に作用する振動を決定する要因の一つとされている。中でも構造物が多く構築されている平野部の表層地盤は、沖積層などの比較的軟弱な地盤で構成されているため、地震による振動が増幅される可能性が高い。また、これらの軟弱地盤は、砂質土のような粒状物質を含むことから、地震等による強制振動を受けると非線形振動応答となるものと考えられる。この非線形振動応答では、砂質土層は共振振動数の特定が困難となり、地震被害の拡大につながる可能性が大きい地盤とされている。

本研究では、沖積層の一部を構成する砂質土層を想定した供試体を作製し、非線形振動応答の解明を行なうこととする。実在する地盤は、様々な粒径の土粒子が堆積しているが、その組み合わせを特定することができないことから、JIS 規格に定められたセメント試験に用いる標準砂（以下 JIS 標準砂と称す）をふるい分けた後、任意の粒度に再配合した供試体を作製し、応答加速度を測定する。この実験結果から、砂質土層の粒度配合が共振振動数や非線形特性に及ぼす影響について考察する。

2.実験概要

2-1.供試体に用いる砂

供試体には、粒径 $75\mu\text{m}$ から 2mm までの土粒子を含む、粒度分布が広い JIS 標準砂を使用する。JIS 標準砂は乾燥状態とし、粗砂成分である粒径 $850\mu\text{m}$ 以上と、中砂及び細砂成分で

ある粒径 $850\mu\text{m}$ 未満の 2 種類にふるい分ける。これを 11 種類の配合により混合し、供試体使用する砂とする。表—1 に JIS 標準砂の配合率を示し、粒径 $850\mu\text{m}$ 以上の土粒子の配合率により X % JIS 標準砂と称する。

また、X % JIS 標準砂における土質力学的性質を表 - 2 に、粒径加積曲線を図 - 1 に示す。

表 - 1 各砂の配合率

JIS標準砂の 粒度配合	850 μm 以上 質量配合率	850 μm 未満 質量配合率
0%	0%	100%
10%	10%	90%
20%	20%	80%
30%	30%	70%
40%	40%	60%
50%	50%	50%
60%	60%	40%
70%	70%	30%
80%	80%	20%
90%	90%	10%
100%	100%	0%

表 - 2 各砂の土質力学的性質

JIS標準砂の 粒度配合	最大密度 (g/cm^3)	最小密度 (g/cm^3)	均等係数	曲率係数
0%	1.79	1.60	4.17	1.04
10%	1.81	1.61	4.58	1.02
20%	1.82	1.65	4.62	1.15
30%	1.85	1.69	5.00	1.32
40%	1.81	1.65	5.67	1.25
50%	1.79	1.60	6.06	1.34
60%	1.75	1.59	5.79	1.72
70%	1.75	1.56	4.80	2.41
80%	1.70	1.54	3.13	1.81
90%	1.67	1.52	1.53	1.00
100%	1.51	1.47	1.47	0.97

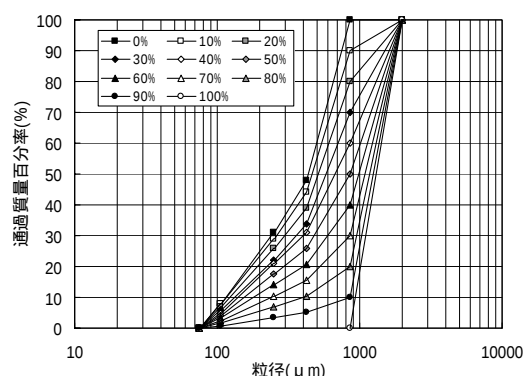


図 - 1 粒径加積曲線

Study on the Non-Linear Shearing Vibration Response
of Sandy Layer that different Granular Composition
by Kazuya KUMAZEN, Tetsukazu KIDA,
Toshiaki SAWANO and Tadashi ABE

2-2.供試体

供試体型枠は、せん断面の寸法を 300 × 300mm とし、内側にゴムシートが貼り付けてある鋼製の軽量溝型枠を一段とした独立構造としている。上下の軽量溝型枠間に直径 15mm の鋼製のベアリングを挟み、高さ 410mm まで積み上げたものを用いる。この供試体型枠は、上下の拘束がなく一層ごとに独立しているため、せん断振動が生じ易い構造となっている。この型枠に粒度調整を行なった JIS 標準砂を投入し、砂層高さ 400mm としたものを供試体とする。供試体概要を図 - 2 に示す。

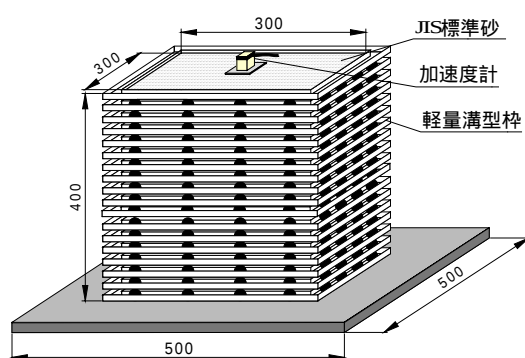


図 - 2 供試体

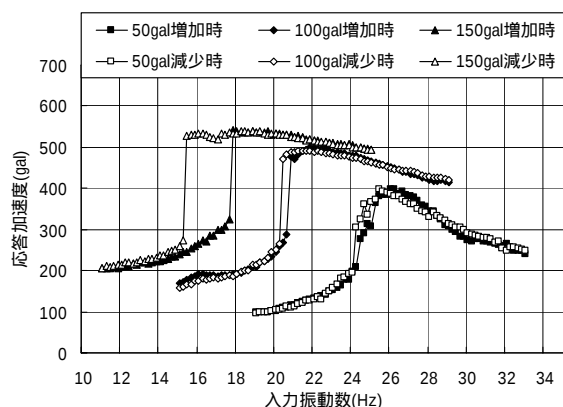


図 - 3 0%JIS 標準砂の実験結果

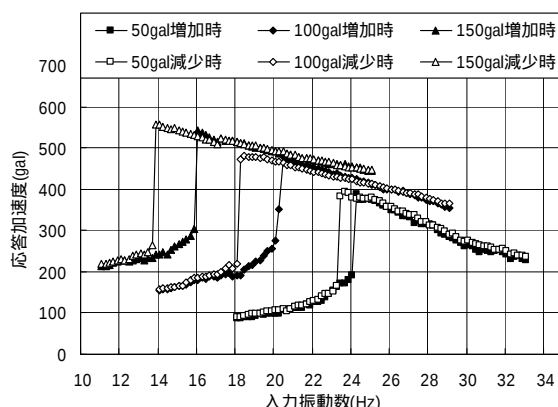


図 - 4 20%JIS 標準砂の実験結果

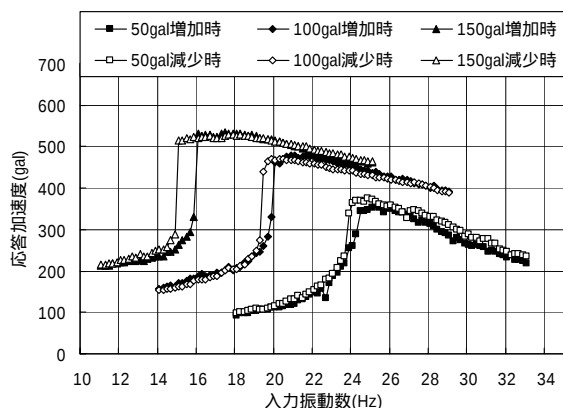


図 - 5 40%JIS 標準砂の実験結果

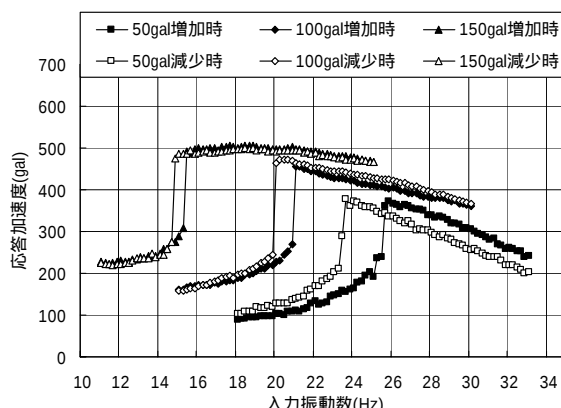


図 - 6 60%JIS 標準砂の実験結果

2-3.実験方法

本実験では、油圧式二軸振動台を使用し、供試体に強制水平振動を与えることとする。任意の粒度に調整した JIS 標準砂の供試体を作製し、入力加速度を 50gal、100gal、150gal でそれぞれ一定に保ちながら、入力振動数を 0.2Hz 刻みに増加、減少させ、振動台に設置した加速度計から入力加速度、砂層上の加速度計から応答加速度を測定する。なお加速度計は、小型ひずみゲージ式加速度計（許容加速度 2 G、重量 38g）を用いる。

3.実験結果および考察

3-1.応答加速度曲線

図 - 3 ～ 8 は、各供試体における応答加速度曲線を示したグラフである。これより、すべての供試体において、入力加速度の増加につれて共振振動数が低い振動数に移行する砂の材料特性により生じる現象が確認できる。また、共振振動数付近において応答加速度が急激に変化するジャンピング現象が見られる。以上のことから、供試体を構成する土粒子が砂と称される物

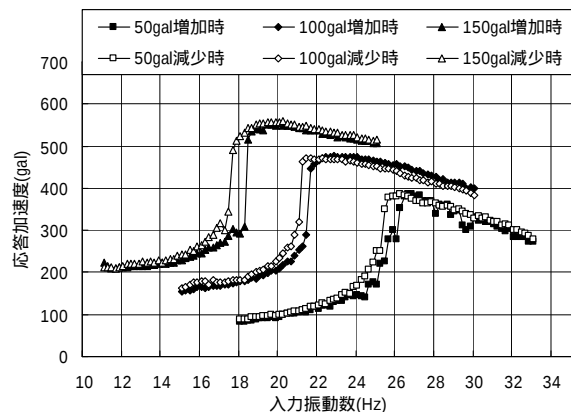


図 - 7 80%JIS 標準砂の実験結果

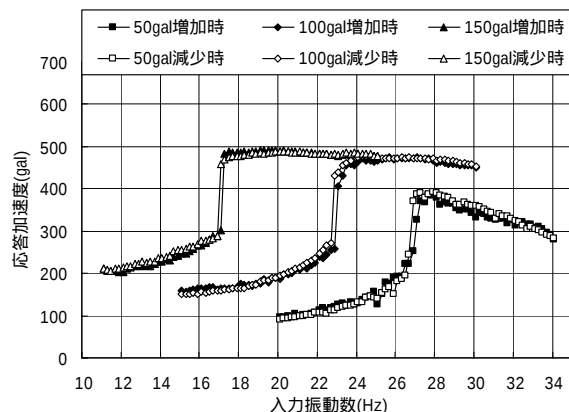


図 - 8 100%JIS 標準砂の実験結果

表 - 3 ジャンピング現象が発生する振動数

	ジャンピング現象が発生する振動数(Hz)										
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
50gal増加時	24.4	24.8	24.2	24.2	24.4	25	25.6	24.8	26.2	26.8	27
50gal減少時	24.2	24	23.4	24	23.8	24	23.6	24.4	25.4	26.6	26.8
増加時と減少時の差	0.2	0.8	0.8	0.2	0.6	1	2	0.4	0.8	0.2	0.2
100gal増加時	20.8	22.6	20.4	20.4	20	19.8	21	20	21.6	22.6	23
100gal減少時	20.4	20.8	18.2	19	19.4	18.8	20	19.8	21.2	22.4	22.8
増加時と減少時の差	0.4	1.8	2.2	1.4	0.6	1	1	0.2	0.4	0.2	0.2
150gal増加時	17.8	18.2	16	16.4	16	15.6	15.4	15.8	18.4	18.8	17.2
150gal減少時	15.4	15.2	13.8	15.2	15	13.6	14.8	15.6	17.6	18.2	17
増加時と減少時の差	2.4	3	2.2	1.2	1	2	0.6	0.2	0.8	0.6	0.2

質であり、土粒子の粒径配合が異なる場合においても、非線形性を確認することができた。

また表 - 3 は、各供試体におけるジャンピング現象が発生する振動数の推移を示した表である。これよりすべての供試体において、ジャンピング現象が発生する振動数は、入力振動数増加時の方が高い値を示していることがわかる。しかし、供試体中に含まれる粒径 $850\mu\text{m}$ 以上の土粒子の混入量が増加するにつれて、入力振動数増加時と減少時の差が小さくなっていることがわかる。本実験では、供試体体積が一定であることから、粒径 $850\mu\text{m}$ 以上の土粒子が増加するほど、供試体中に含まれる土粒子の数が減少する。これより、入力加速度増減に係わる非線形性は、土粒子の数の減少に伴い薄れたものと推測される。

3-2.最大応答加速度倍率

図 - 9、10 は、各供試体における最大応答加速度倍率の推移を示したグラフである。これより最大応答加速度倍率は、粒径 $850\mu\text{m}$ 以上の配合率が増すほど減少し、50%JIS 標準砂を境に増加している。ここで表 - 2 より、各供試体

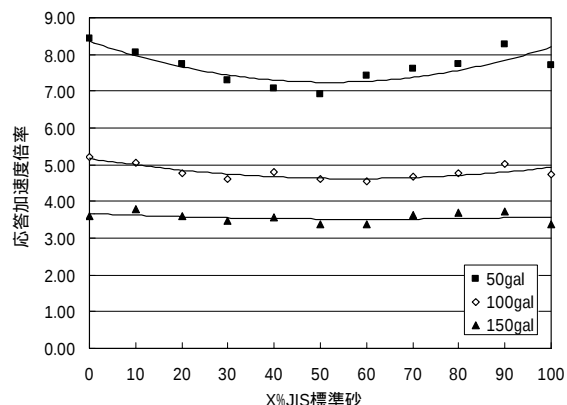


図 - 9 最大応答加速度倍率 (増加時)

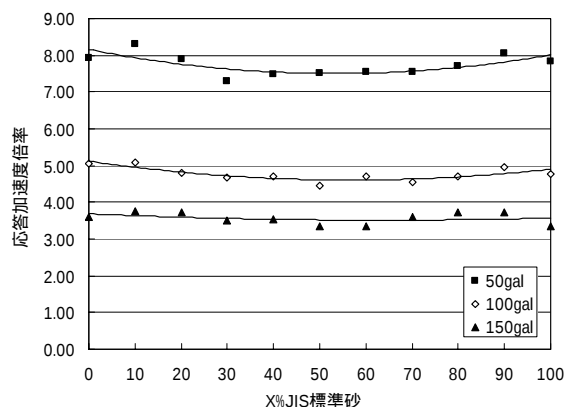


図 - 10 最大応答加速度倍率 (減少時)

の均等係数は、最大応答加速度倍率同様に50%JIS 標準砂を最大値としている。均等係数は砂の粒度分布の良否を示す係数であり、高い値ほど良い粒度分布とされている。これより、最も高い均等係数である50%JIS 標準砂が小さい最大応答加速度倍率を示し、均等係数が低くなるほど粒子間の摩擦が減少するため、最大応答加速度倍率が小さく推移するものと考えられる。

また、入力加速度及び入力振動数増加時、減少時別の近似曲線式を以下に示す。

$$Y=0.000414x^2-0.0513x+8.83 \text{ (50gal増加時)}$$

$$Y=0.000167x^2-0.0225x+5.38 \text{ (100gal増加時)}$$

$$Y=0.000043x^2-0.0606x+3.73 \text{ (150gal増加時)}$$

$$Y=0.000231x^2-0.0293x+8.43 \text{ (50gal減少時)}$$

$$Y=0.000161x^2-0.0215x+5.32 \text{ (100gal減少時)}$$

$$Y=0.000044x^2-0.0646x+3.75 \text{ (150gal減少時)}$$

ここで、Y：最大応答加速度倍率

x：粒径 850 μm 以上の配合率

上式及び図 - 9、10 より、入力振動数増加時と減少時ともに、入力加速度が大きくなるに伴い、応答加速度倍率の推移が直線的になっていることがわかる。これより応答加速度倍率は、大きい入力加速度で振動させるほど、粒度構成による影響が小さくなるものと推測される。

3-3.共振振動数

表 - 4 は各供試体における共振振動数の推移を表す。さらに図 - 11、12 は、各供試体における共振振動数と最大密度の関係を示す。尚、本実験では供試体を十分に締固めていることを考慮し、最大密度から考察を行なうこととする。すべての入力加速度において、最大密度が増加するに伴って共振振動数が低くなることからわかる。本実験では、供試体がさまざまな粒度分布となるよう各粒径を調整して実験を行なったが、結果として最大密度が 1.51 g/cm³ から 1.85g/cm³の範囲内では粒度分布には関係なく、最大密度が増加するにつれて、共振振動数は低くなった。

4.まとめ

粒径 75 μm から 2 mm の土粒子で異なる粒度配合により構成された供試体においても、ジ

表 - 4 共振振動数

JIS標準砂 の粒度配合	共振振動数(Hz)					
	50gal 増加時	100gal 増加時	150gal 増加時	50gal 減少時	100gal 減少時	150gal 減少時
0%	25.4	22.2	17.8	25.6	21.2	18.2
10%	26.4	21.8	18.2	25.2	20.4	15.8
20%	24.2	20.4	16	23.6	18.4	14
30%	25.6	20.6	16.4	24.8	19.4	17.2
40%	25.8	21	17.4	24.8	19.8	17.8
50%	26.2	20.6	16	24.8	19.8	13.8
60%	25.8	21	17.6	23.6	20.2	18.4
70%	25.4	21.8	17.4	24.8	21.6	16
80%	26.8	22.8	17.4	26.2	21.6	20.2
90%	27.8	23.4	19.4	27.2	23.2	19.8
100%	27.8	25.6	19.6	27.8	24.4	18.4

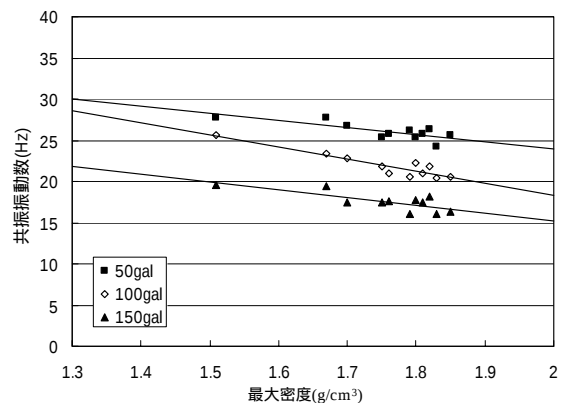


図 - 11 最大密度と共振振動数（増加時）

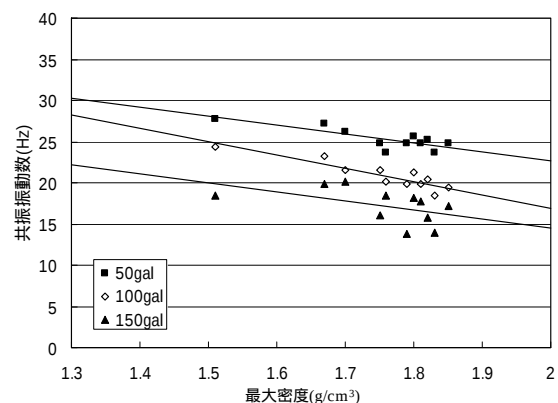


図 - 12 最大密度と共振振動数（減少時）

ャンピング現象及び砂の材料特性による現象が確認できた。しかし、供試体の土粒子の数が減少して粒状性が低下すると、非線形性が薄れるものと考えられる。

最大応答加速度倍率は、粒径 850 μm 以上の配合率が 50%までが増加し、以降の場合は減少している。これは、均等係数に起因しているものと推測される。

共振振動数は、供試体の砂を広い粒度分布により配合したが、粒度分布には依存せず最大密度に依存しているものと考えられる。

今後は、粒度変化に伴う共振振動数の推移をより明確にするため、各供試体における砂の伝播速度を測定し、解析を進めたいと考える。