

衝撃加速度による土の締固め度の予測

Estimating the Degree of Soil Compaction by an Impact Acceleration Measuring Method

後藤 彰* 能登繁幸**

Akira GOTO and Shigeyuki NOTO

土に落下させたランマーに生じる衝撃加速度は、その土の密度や強度と密接に関係するものと思われる。そこで、この衝撃加速度を盛土の締固め管理に用いることを考え、本研究に着手した。この報告は、北海道内各地で採取した試料土を用いて、衝撃加速度試験を始めた各種土質試験を実施し、衝撃加速度と密度や強度の相関の程度、適切なランマー形状や落下高さなどについて検討した結果をまとめたものである。

検討の結果、衝撃加速度は土質により異なるが、最大せん断応力や粘着力、内部摩擦角、一軸圧縮強度とある程度相関関係があること、ランマー形状により衝撃加速度の大きさやそのバラツキに差がでること、ランマーの落下高さの違いは衝撃加速度の周波数分析結果にはあまり影響を及ぼさないことなどが明らかになり、衝撃加速度の土の締固め管理への利用可能性をある程度示すことができた。

《締固め；衝撃加速度；密度；品質管理》

When a rammer is dropped on the ground, impact acceleration is produced. This impact acceleration relates to soil density and strength. It was considered to be potentially useful for soil compaction control, and an investigation was made.

This report describes the results of experiments which were carried out on soil samples from many sites in Hokkaido to investigate the correlation between impact acceleration and soil density or strength, and the influence of shape of rammer and drop height.

The result of many tests were the following. (1) There is some correlation, which varies with soil type, between impact acceleration and maximum shear stress, cohesion and the internal friction angle, unconfined compressive strength. (2) The measured impact acceleration and its scattering are dependent on the shape of the rammer. (3) The drop height does not influence the result of the frequency analysis of the measured impact acceleration. The results show that measurements of rammer impact acceleration can be utilized in soil compaction control.

Keywords: compaction, impact acceleration, density, quality control.

まえがき

道路盛土や河川堤防などの土構造物は、それぞれの目

*土質研究室員 **同室長

的に応じた工学的特性を満足しなければならない。道路盛土ではのり面の安定を保ち、重交通に耐えるだけの強さと不同沈下による不陸を生じないような均一性が、ま

た、河川堤防では浸透流やパイピングによるり面崩壊や堤防破壊を生じないように緊密性が要求される。これらの特性は、通常、盛土を十分固めることによって得られるものであり、それぞれの土構造物に応じた品質基準が設定され、締固め管理が実施されている。

現在、一般に採用されている盛土締固め管理方法としては、いわゆる密度管理が主体となっている。ところがこの方法は、個々の盛土材料についての締固め試験と所定の転圧後における密度測定を行う必要があり、手間暇のかかる管理方法であるとの意見が多い。近年の大型機械による大土工では、密度管理が迅速施工のネックになっており、また、対象土が多くの種類である場合には、管理が煩雑となっているのも事実である。

以上の背景から、土質研究室では盛土締固めの管理試験方法の簡略化や迅速化についての提案をいくつか行ってきたが、より一層の改善を図るべく、新たに加速度計を用いた管理方法の可能性についての試験研究を始めたところである。この研究は、ランマーを土に落下させたときのランマー自体の衝撃加速度が、土の密度や強度と密接に関係するものとの予想をもとに進めている。今回は両者の相関の程度、適切なランマーの形状、落下高などについて検討した結果を報告するものである。

1. 衝撃試験機の概要

落下方式による衝撃試験機は、加速度受振器の校正などに利用されている¹⁾。土の場合も締固め度の大きさによる密度の違いに応じて衝撃加速度が変化すると考えて、図-1に示すような方式の試験機を使用して試験を行った。つまり、土質試験法の突固めによる土の締固め試験法に準じた方法で、スパーサーディスク、底板、カラーなどでセットしたモールドに試験用試料を詰めて、その上にランマーを落下させる方法とした。このランマーには衝撃加速度を測定するための加速度計が取付けられており、支持台の脚は3点支持となって、それぞれに水平調整用のネジが取付けられている。また、支持台には水準器を取付けてランマーが一定の落下速度を保てるよ

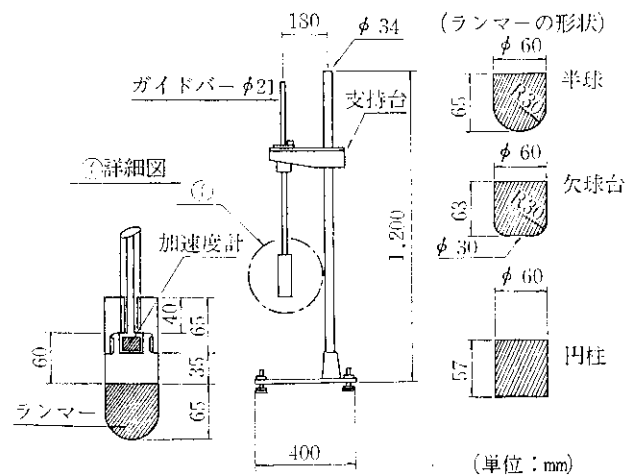


図-1 衝撃試験機

うになっている。ランマーの重量は、ガイドバーを含めて4.5 kgfである。これは、土の突固め試験を第2法で行っていることから、落下衝撃試験による締固め過ぎを極力少なくする必要があるためである。モールドの試料に接する面のランマーの形状は、図-1の斜線部に示す3種である。ここでは、ランマー形状が半円のものを半球、一部底面が平坦なものを欠球台、底面が平坦なものを円柱と呼ぶことにする。

2. 試験方法

試験はランマー形状が異なる3種について、モールドに詰めた試験用試料にランマーを落下させてランマーの衝撃加速度を測定した。昭和60年度は、同一試料で落下高を変化させて衝撃加速度を測定する方法とランマー形状を1種に絞り、北海道各地から採取した含水調整した試料について突固め試験を行い、その後、一定の高さからランマーを落下させて衝撃加速度の測定を行う2種類の方法で試験を行った。また、昭和61年度は60年度で行った試験より、さらに、試験用試料を増やしてより緻密な各種ランマーの試料に対する反応度合を検討した。この落下衝撃試験は、加速度計を直接ランマーに取付ける方法であるから、ランマーの落下により測定される衝撃加速度の値や衝撃波の周波数分布がかなり大きな

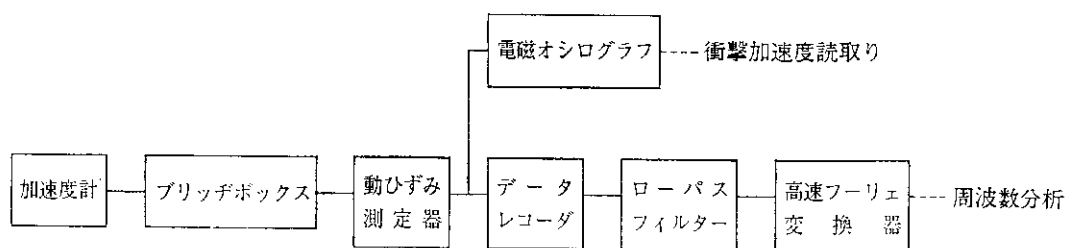


図-2 落下衝撃試験測定ブロック図

値となることが予想されたため、加速度計はひずみゲージ式の容量 200 G と 500 G を使用した。この加速度計を 61 年度には容量 1,000 G の圧電形加速度計に変更した。

一方、衝撃加速度の記録は動的な衝撃波であるため、応答周波数が低いペン方式の記録計では記録の追従がむずかしく、衝撃加速度の読取りに誤差が生じる。このため、記録計は光学系の直視式電磁オシログラフを使用し、同時に周波数分析のための記録をデータレコーダで行った。この周波数分析には、A-D 変換が 8 bit で演算速度が 4 μ s、一命令の実行時間が 500 ms の性能を具備する高速フーリエ変換器で行った。なお、落下衝撃試験の測定方法を 図-2 に示す。

3. 試験結果および考察

3.1 各ランマーの落下高と土質が変化した場合の衝撃加速度

落下衝撃試験による衝撃加速度の測定値は、落下するランマーの落下エネルギーとモールドに詰めた試料の硬さ度合との兼ねいで、その大きさは決定されるものと思われる。このうち、落下エネルギーの大きさはランマーの重量、高さおよびその形状などの因子によって影響を受ける。このような各種要因を加味して、各ランマーの落下高を変化させて落下衝撃試験を行った結果が表-1 である。同表の標準砂(豊浦産)を除く他の試料は、表 3 から砂質土系および粘性土系の土を選出して、最も、衝

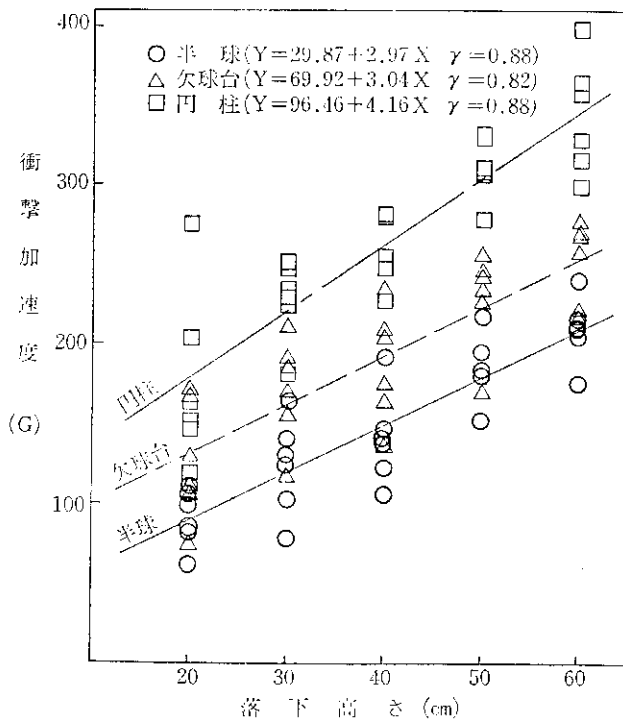


図-3 衝撃加速度と落下高さの関係

撃加速度が大きく出現するとみられる含水比で調整した試料を用いて衝撃試験を行ったものである。同表には、個々の落下高ごとに、測定を 4~5 回程度行ったときの、衝撃加速度の実測値の範囲と、その平均値および実測値のバラツキ量を表わす標本偏差²⁾と、その割合を示したものである。また、次の各項は表-1 および 2 をもとに考察を加えたものである。

3.1.1 ランマーと衝撃加速度

図-3 は表-1 にある標準砂を除いた他の 6 試料について、個々の落下高から落下衝撃試験を行って測定した衝撃加速度の平均値とランマーの落下高との関係をランマーの種類別に求めたものである。同図から、衝撃加速度は半球のランマーが最も小さく、落下高の変化に対する反応も、他のランマーより勾配が緩く鈍い反応を示すようである。一方、円柱のランマーは他のランマーより落下高の変化に対して、最も顕著な衝撃加速度の反応を示しており、その値も大きい。また、欠球台のランマーは、この両者の中間的な反応度合を示しているが、落下高に対する反応度合が半球のランマーと同程度の勾配を示していることから、衝撃加速度と落下高の関係はむしろ半球のランマーと似た傾向にあるようである。このようなことから、ランマーの個々の落下高における衝撃加速度は、当然、落下高が高いほど大きな値を示し、なおかつ、ランマーが 3 種とも同一重量であることから、試料に接するランマーの接地面の形状に左右されることが判明した。つまり、ランマーの底面が平坦で、しかも底面積が大きなランマーほど衝撃加速度は大きくなる傾向を示しており、しかも、ランマーの落下高の変化に対して敏感に反応するものと思われる。

3.1.2 ランマーの落下高と測定値のバラツキ

図-4 は各ランマーの個々の落下高さにおける衝撃加速度の標本偏差を平均値に対する百分率で表わし、落下高との関係を求めたものである。標本偏差は衝撃加速度のバラツキ量を表わす指標であることから、この指標の出方いかんによって、衝撃加速度が精度よく測定できているか否かを判定することができる。ところで、表-1 から底面が平坦なランマーの標本偏差は、半球のランマーより大きくなる。しかも、試料との接地面が大きいランマーほど標本偏差が大きくなる傾向がみられる。しかし、各ランマーのバラツキ具合の比較では、この標本偏差で検討するより標本偏差の割合で行った方が、より鮮明な傾向を示すことから、図-4 には各ランマーの標本偏差の割合を個々の落下高さごとに示したものである。

同図から、まず半球ランマーについて考察すると、標本偏差の割合は最大で 8.4%、最低で 5.5% となってお

表-1 各ランマーの落下衝撃試験結果

試料	ランマーの種類 落下高さ (cm)	半 球					欠 球 台					円 柱				
		20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60
	衝撃加速度															
標準砂	測定値 (G)	10.1 }	17.5 }	23.7 }	28.4 }	34.6 }	16.4 }	20.8 }	29.2 }	35.0 }	35.7 }	48.8 }	74.5 }	80.2 }	82.2 }	95.3 }
		14.9	22.6	29.4	36.6	40.7	24.1	35.1	38.8	50.3	54.8	81.3	106.1	120.0	118.3	131.4
	平均値 \bar{x} (G)	12.9	19.8	26.1	32.4	37.3	20.3	26.5	33.5	41.2	45.4	65.7	91.2	97.3	104.7	118.1
	標本偏差 S (G)	1.26	1.37	1.48	2.16	1.56	2.22	3.04	2.80	3.79	4.83	10.0	9.98	11.96	8.19	8.77
	S/ \bar{x} ×100 (%)	9.77	6.92	5.67	6.67	4.18	10.94	11.47	8.36	9.20	17.64	15.22	10.94	12.29	7.82	7.43
砂質土 A	測定値 (G)	52.3 }	63.0 }	83.4 }	139.6 }	178.2 }	59.3 }	94.9 }	122.5 }	154.1 }	206.4 }	89.0 }	153.0 }	205.2 }	241.4 }	278.0 }
		69.4	82.3	116.8	162.9	230.0	86.3	141.5	150.9	182.7	248.9	145.6	207.9	240.2	314.1	315.7
	平均値 \bar{x} (G)	60.6	73.2	103.9	151.4	202.6	73.7	114.5	134.0	167.8	220.4	118.2	179.2	225.9	277.1	297.0
	標本偏差 S (G)	7.82	7.41	12.37	9.47	18.70	13.09	19.20	10.68	12.65	17.35	20.07	23.61	12.78	29.06	15.50
	S/ \bar{x} ×100 (%)	12.90	10.12	11.91	6.25	9.23	17.76	16.77	7.97	7.54	7.87	16.98	13.18	5.66	10.49	5.22
砂質土 B	測定値 (G)	82.0 }	116.2 }	138.6 }	183.4 }	187.6 }	103.0 }	158.5 }	169.8 }	223.6 }	237.2 }	125.0 }	185.4 }	226.9 }	288.8 }	295.1 }
		86.0	136.8	143.2	216.7	220.7	115.2	182.7	180.1	246.5	288.7	168.5	254.9	283.1	339.6	347.3
	平均値 \bar{x} (G)	83.8	123.3	141.1	194.1	207.6	110.1	168.9	173.7	231.7	265.7	145.8	228.1	246.2	309.0	314.9
	標本偏差 S (G)	1.66	8.13	2.24	13.24	14.18	4.51	9.46	3.92	9.02	19.43	15.78	27.34	22.02	22.96	20.27
	S/ \bar{x} ×100 (%)	1.98	6.59	1.59	6.82	6.83	4.10	5.60	2.26	3.87	7.31	10.82	11.99	8.94	7.43	6.44
シルト A	測定値 (G)	94.4 }	101.9 }	139.7 }	160.9 }	181.5 }	144.8 }	158.0 }	177.0 }	232.9 }	243.7 }	254.6 }	221.6 }	235.5 }	290.6 }	335.2 }
		103.7	161.2	154.4	185.8	229.5	190.4	197.1	231.2	262.4	263.5	278.8	250.9	301.6	384.7	384.8
	平均値 \bar{x} (G)	98.6	139.4	145.5	179.4	208.5	167.0	183.8	202.2	244.3	255.8	265.4	233.8	279.8	327.1	362.6
	標準偏差 S (G)	3.66	22.61	6.08	10.44	18.5	16.77	15.16	19.51	13.12	7.60	10.82	11.02	28.37	38.33	17.70
	S/ \bar{x} ×100 (%)	3.71	16.22	4.18	5.82	8.87	10.04	8.25	9.65	5.37	2.97	4.08	4.71	10.14	11.72	4.88
シルト B	測定値 (G)	92.0 }	125.1 }	125.6 }	154.7 }	167.8 }	115.5 }	131.0 }	153.5 }	218.4 }	208.1 }	133.1 }	207.7 }	238.4 }	301.4 }	311.6 }
		114.8	135.6	145.0	206.5	236.4	142.2	168.8	168.5	235.6	219.2	171.8	231.3	276.6	311.7	344.1
	平均値 \bar{x} (G)	105.5	130.0	136.4	181.3	188.8	127.7	154.1	161.5	224.5	214.0	151.7	221.9	253.0	305.5	326.8
	標本偏差 S (G)	8.43	3.84	7.59	19.43	26.39	12.26	18.31	6.71	7.61	4.87	14.24	8.76	15.21	3.87	15.28
	S/ \bar{x} ×100 (%)	7.99	2.95	5.56	10.72	13.98	9.60	11.88	4.15	3.39	2.28	9.39	3.95	6.01	1.27	4.68
粘土 A	測定値 (G)	78.8 }	97.7 }	110.4 }	169.3 }	201.2 }	94.1 }	187.0 }	198.2 }	230.5 }	259.9 }	130.5 }	226.4 }	271.6 }	311.5 }	373.2 }
		89.1	104.4	132.3	787.6	222.9	116.3	200.7	217.6	253.5	286.3	178.8	271.0	288.9	351.2	416.7
	平均値 \bar{x} (G)	82.8	101.5	121.9	180.1	213.9	106.1	191.4	208.2	240.6	275.4	162.2	250.1	278.8	328.7	396.0
	標本偏差 S (G)	4.36	2.81	8.91	7.38	8.50	8.97	5.72	7.09	9.37	10.18	18.61	17.93	9.22	14.96	15.69
	S/ \bar{x} ×100 (%)	5.27	2.77	7.31	4.10	3.97	8.45	2.99	3.41	3.89	3.70	11.47	7.17	3.31	4.55	3.96
粘土 B	測定値 (G)	102.8 }	142.8 }	187.6 }	198.0 }	216.1 }	156.1 }	191.2 }	217.6 }	232.2 }	258.8 }	169.9 }	222.8 }	265.3 }	290.2 }	340.8 }
		112.8	199.2	198.9	236.6	253.5	181.6	222.6	245.2	267.9	282.3	220.9	270.8	300.5	320.4	364.6
	平均値 \bar{x} (G)	107.6	162.8	191.2	215.9	239.3	170.4	208.9	232.6	254.0	267.0	201.5	246.2	278.1	305.2	355.8
	標本偏差 S (G)	3.92	22.09	4.51	17.11	13.99	9.39	12.87	13.40	13.52	9.51	19.76	18.12	13.54	11.22	9.63
	S/ \bar{x} ×100 (%)	3.64	13.57	2.36	7.92	5.85	5.51	6.16	5.76	5.32	3.56	9.81	7.36	4.87	3.68	2.71

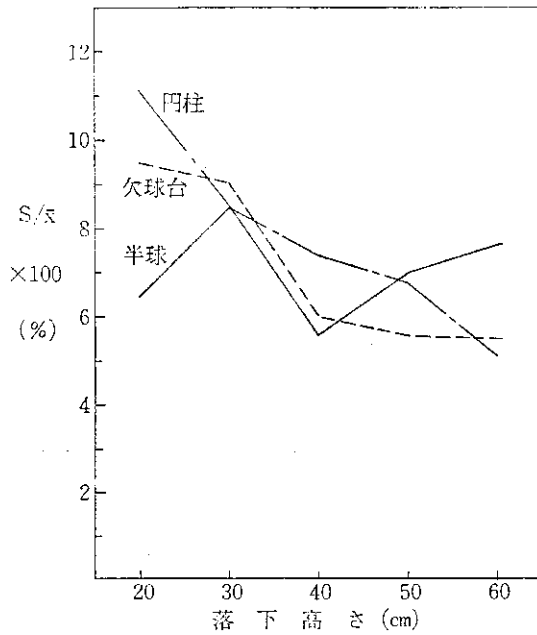


図-4 各ランマーの落下高の変化による偏差の割合

り、そのほかでも 6.4~7.5% で推移していることから、半球ランマーの落下高による衝撃加速度のバラツキ具合は、ほぼ、この変動幅で落ちつくものと思われる。一方、欠球台や円柱のランマーの落下高が低くなると、標本偏差の割合は大きくなり、特に、円柱のランマーにその傾向が強く現われるようである。しかし、その反面、ランマーの落下高が高くなると、標本偏差の割合は小さくなり、落下高が 50 cm を越えると、むしろ、半球ランマーより小さくなって、測定精度はかなり向上するものと思

われる。つまり、落下高の変化に対する標本偏差の割合は、円柱ランマーに顕著に現われており、落下高が大きくなるほど衝撃加速度のバラツキが少なくなって信頼度の高いデータが得られる。しかし、欠球台ランマーは落下高が 40 cm を越えると、標本偏差は緩い下り勾配に変化するようである。いずれにしても、円柱および欠球台ランマーは、ランマーの落下高が大きくなるほど信頼度の高い良好な衝撃加速度の測定値が得られることから、これら両者のランマーは落下高を高くした場合に非常に有利になると思われる。

3.1.3 土質とランマーの衝撃加速度

土の分類は粒度試験やコンシステンシー限界試験などの方法によって行われるが、このように分類された土の種類によっても衝撃加速度の大きさは変化するものと思われる。表-1 からランマーの種類を無視して、土の種類別に分けて整理した場合の衝撃加速度の標本偏差の割合は、標準砂で 9.2%、砂質土で 7.3%、シルト質系で 7.0% および粘土質系で 5.9% となり、土粒子が細かい成分を多く含む土にバラツキの割合が小さくなる傾向がみられた。この傾向は、かなり高い信頼性があると思われるが、標準砂を除く個々の土質の試料が 1~3 試料と少なく、バラツキの割合も砂質土系で 4.6~10.3%、シルト質系で 5.1~8.2% と同一種の土質にもかかわらず、個々の試料によって開きがあることや、粘土質系は 1 試料のみで検討を加えたことなどの理由から、この傾向をそのまま踏しゅうすることはできないと思われる。しかしながら、標準砂で行った試験結果が示すように、モールド内の試

表-2 試料を乾燥側と湿潤側に分けた場合の落下衝撃試験結果

落下高	ランマーの形状	半 珠		欠 球 台		円 柱	
	試料 計算値	乾 燥 側	湿 潤 側	乾 燥 側	湿 潤 側	乾 燥 側	湿 潤 側
20 cm	平均値 \bar{x} (G)	81.32	47.19	109.99	56.11	163.71	82.11
	標本偏差 S (G)	23.50	15.58	38.87	22.77	55.95	35.89
	$S/\bar{x} \times 100$ (%)	28.90	33.02	35.34	40.58	34.18	43.71
30 cm	平均値 \bar{x} (G)	106.34	60.68	135.71	69.94	193.23	97.68
	標本偏差 S (G)	29.73	19.56	42.24	25.91	58.75	41.09
	$S/\bar{x} \times 100$ (%)	27.96	32.23	31.13	37.05	30.40	42.07
40 cm	平均値 \bar{x} (G)	131.09	72.48	159.87	81.28	221.24	109.93
	標本偏差 S (G)	33.49	23.88	45.47	29.09	59.96	42.91
	$S/\bar{x} \times 100$ (%)	25.55	32.95	28.44	35.79	27.10	39.03
$S/\bar{x} \times 100$ の平均 (%)		27.47	32.73	31.64	37.81	30.56	41.60

料が軟弱化すると、衝撃加速度のバラツキ具合が大きくなることは確かなようである。この傾向を端的に示したのが表-2である。同表は昭和61年度に全道各地から採取した試料について、土の突固め試験と同一試料を用いて落下衝撃試験を行った結果で、衝撃加速度を乾燥側と湿潤側にふり分けて示したものである。これは、落下衝撃試験から得た衝撃加速度を土の締固め曲線に照合して、締固め曲線の最適含水比を境に、含水比が小さい方を乾燥側に、含水比が高い方を湿潤側に衝撃加速度をふり分けて試料の湿潤状態による衝撃加速度のバラツキ具合を検討したものである。この結果、衝撃加速度は、いずれのランマーの場合も乾燥側に比べて湿潤側の標準偏差の割合が大きくなっており、湿潤側の衝撃加速度にバラツキが大きいことを物語っている。この傾向は、ランマーの落下高が変化しても変わらず、しかも、試料に接するランマーの底面積が大きなランマーほど、衝撃加速度のバラツキ量が大きくなる様子を示している。

3.2 試料厚が変化した場合の衝撃加速度

衝撃加速度の大きさに影響を及ぼす諸因子は前述のとおりであるが、このほかに、モールドに詰めた試料の厚さいかんで衝撃加速度の発現に影響を与えることが考えられる。したがって、試料の層厚と衝撃加速度の関係を求めたのが図-5である。同図は表-2の場合と同様の考え方で、落下衝撃試験を1層目と3層目および5層目で行ったときの衝撃加速度を突固め曲線の最適含水比を境に、乾燥側と湿潤側にふり分けて示したものである。また、同図の落下衝撃試験はランマーの落下高を30 cmにとり、欠球台のランマーで行ったときのものである。この試験結果から、衝撃加速度の発現状況は、層厚がある程度以上の厚さを示すと、層厚の大きさに影響されなくなるようである。しかし、湿潤側の1層目が約2.5 cmと非常に薄くなるために、3層目および5層目に比べて衝撃加速度がやや大きくなる傾向がみられるが、これは、試料が高含水で軟弱化しているために、ランマーの落下により試料が追いだされて、ランマーがスパーサーディスクまで到達してしまうためと思われる。一方、乾燥側の衝撃加速度は、1層目にやや大きめの値がみられるものもあるが、層厚が3層目以上になると、層厚の変化による衝撃加速度への影響はほとんどみられない傾向を示しており、湿潤側についても同様のことがいえる。以上のことから、モールドに詰める試料厚は3層目以上、つまり、7.5 cm以上の厚さがあれば落下衝撃試験に十分供し得るものと思われる。

3.3 衝撃加速度の周波数分析

本落下衝撃試験のように、加速度を用いて行う振動測

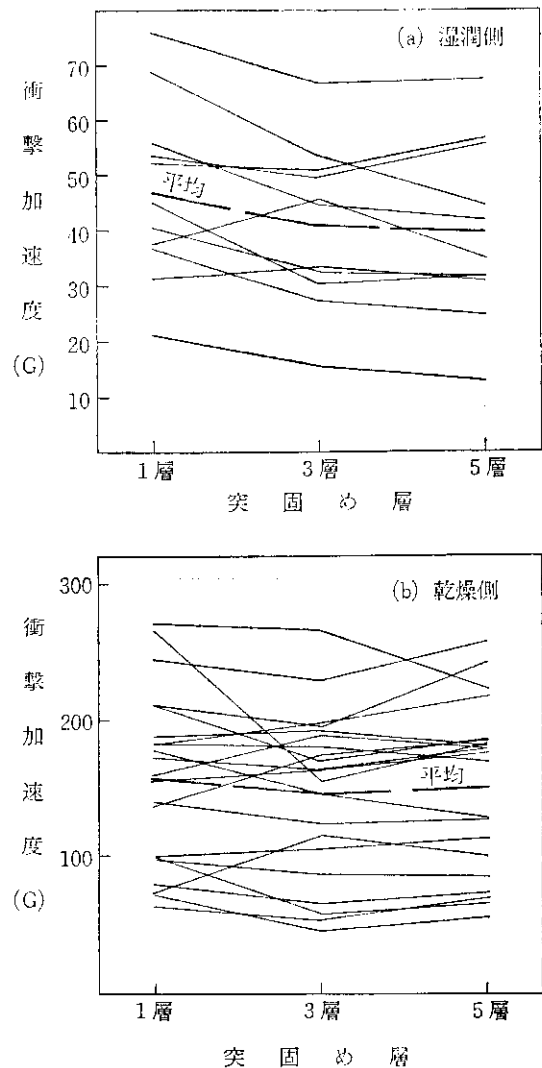


図-5 層厚における衝撃加速度

定では、その対象となる物質の種類によって振動特性が異なるものと予想される。このため、落下衝撃試験で得た各ランマーの衝撃波は、データレコーダーで記録し、この記録波形をFFTで解析して、衝撃加速度の周波数分布状態を検討した。

3.3.1 ランマーの落下高が変化した場合の周波数分析結果

本試験方法はランマーをモールドに落下させて、その衝撃加速度を測定する方法であるから、ランマーの落下時におけるモールドやスパーサーディスクなどはね返り現象が心配となる。このため、これら試験器具の影響度を検討する必要があり、しかも、この影響度の解明には周波数分析が最も有効な手段となることから、図-6にランマーの落下高を変化させて行った場合の衝撃加速度の周波数分析結果を載せた。同図における試料は標準砂を、ランマーは半球を用いて行った場合の試験結果であ

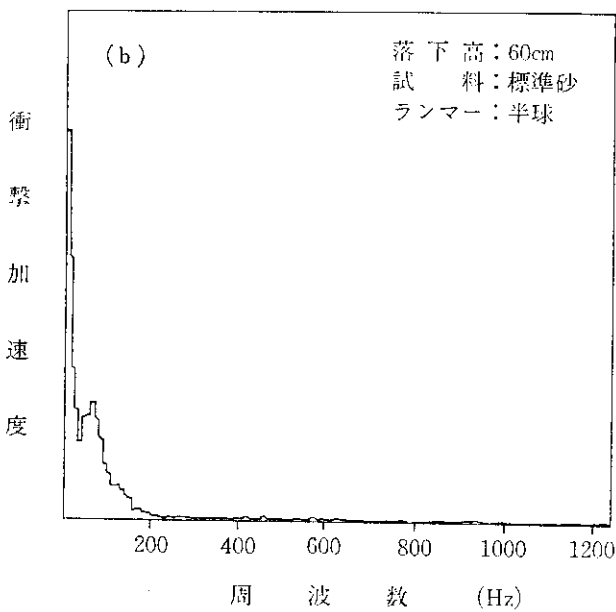
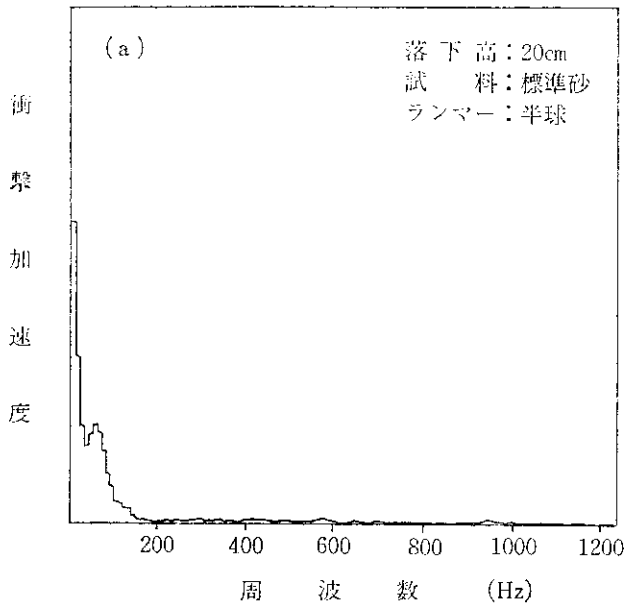


図-6 ランマーの落下高による周波数分析結果

り、このときの周波数分布状況はランマーの落下高を変化させても、その分布状態に大きな変化がみられなかった。これは、突固め試験に用いた試験器具が鉄製であるために固有振動数が高く、砂や粘土などの固有振動数が低い土材料³⁾では、その影響が現われてこないのかも知れない。

3.3.2 ランマーの種類と試料を変えた場合の周波数分析結果

落下衝撃試験による衝撃加速度の周波数分析は、衝撃を受ける試料の種類や含水状態などの因子によって、その分布状態が大きく変化することが考えられる。図-7は試料に自然状態の標準砂を用いて、落下高60cmで落下衝撃試験を行った場合の衝撃加速度の周波数分析結果であり、図-8は粘性土の試料を用いて、落下高40cmで落下衝撃試験を行ったときの周波数分析結果である。このうち、図-8(a)は衝撃加速度曲線が最も大きく先鋭化するとみられる低含水に調整した試料で落下衝撃試験を行った場合で、(b)は同一試料を用いて高含水の軟弱な状態に調整した試料で落下試験を行った場合の周波数分析結果である。まず、図-7より標準砂の周波数分布状況をみると、半球および欠球台のランマーでは、周波数成分が低い周波数域に片寄る傾向がみられる。一方、円柱のランマーは、周波数成分が高い周波数域まで広がる傾向を示し、他の2形状のランマーとは異なった周波数の分布状況を示した。図-8では(a)および(b)は、同一試料にもかかわらず周波数の分布形態が異なっており、明らかに、試料が含有する含水量の状態で周波数の分布形態が変化するものと思われる。しかも、含水比が大きい、軟弱な試料の状態では、図-7と同様、周波数の分布状況が、ランマーの種類によってその差が顕著に現われている。しかし、(a)の含水比が小さい乾燥した試料では、ランマーの種類による周波数の分布状態に差がなくなるようである。

以上のことから、ランマーの種類による周波数の分布

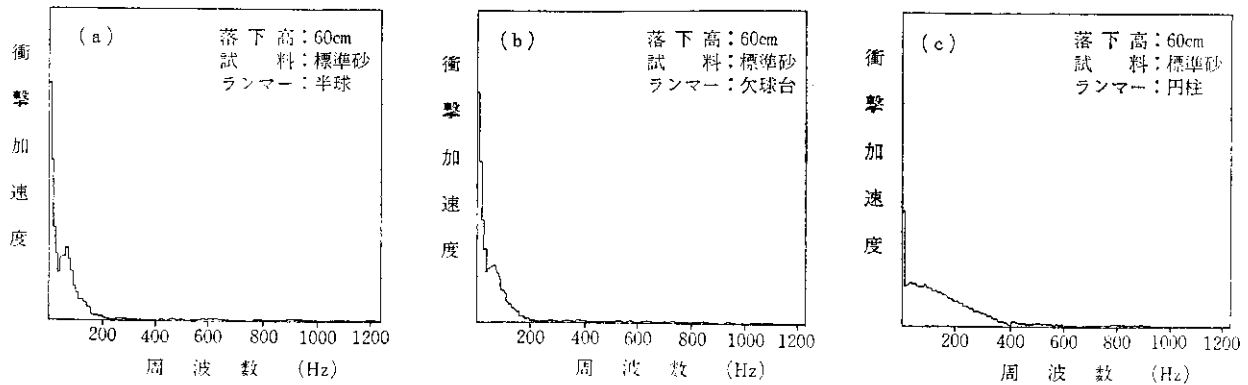


図-7 各ランマーの周波数分析結果 (標準砂)

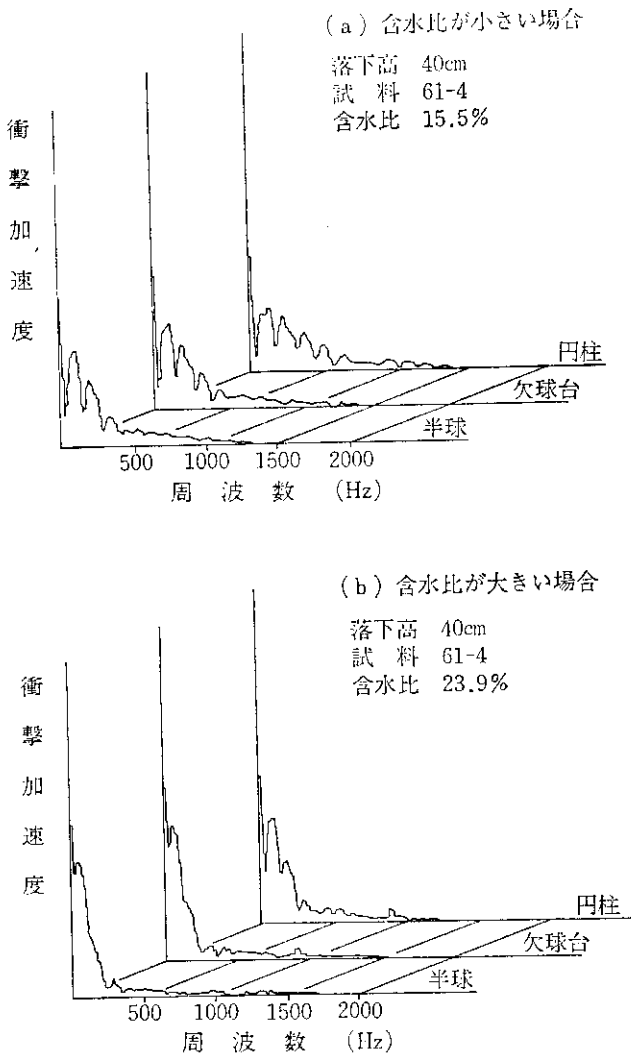


図-8 各ランマーの周波数分析結果(粘性土)

状況は、軟らかい試料ではランマーの底面が球状の半球のランマーより平坦な円柱のランマーに周波数の主成分が高周波数域まで分布する傾向があるといえる。しかし、試料が硬くなると、半球や欠球台のランマーによる周波数分布の主成分が高周波数域まで分布するため、ランマーの種類による差がなくなるようである。このように、ランマー形状が異なる場合や締固めた土の試料が含有する含水量の状態によっても周波数の分布状態が変化することから、含水比を媒介にした試料の締固めいかんでその分布状態が大きく変化するものと思われる。したがって、測定した衝撃加速度の周波数分布状態によって、その土の締固め状況がある程度感知できるものと思われる。

3.4 各種土質の土質試験結果と衝撃加速度

3.4.1 土質試験結果

各種土質を用いて落下衝撃試験を行い、得られた衝撃

加速度の大きさを土の締固め度の検討を行う場合、あらかじめ、その土質の物理的性質や力学的性質など基本的性質を把握しておく必要がある。表-3はその試験結果であり、同表の土質分類は日本統一土質分類表²⁾で行った判別であるが、試料採取個所の現場条件や地理的条件などから、60年度の試料は火山灰⁴⁾として取扱った。また、61年度は主たる採取試料を砂質土系や粘性土系にまで広げ、土質の種類による各ランマーの反応度合をみた。同表の締固め試験は、突固め試験方法の2.4-b法で行った試験結果である。このうち、60年度の料試は、最適含水比が広範囲に散在しており、一部の試料は40%を越える高含水の最適含水比を示す試料もみられた。また、61年度は最適含水比が13.4~34.5%で、比較的20%前後の試料が多く、最大乾燥密度は1.2~1.8 t/m³であった。

60年度における落下衝撃試験は、落下高を30 cmとして欠球台ランマーで行ったものであるが、61年度は、3種類のランマーを用いて落下高さを20~40 cmに変化させて落下衝撃試験を行った。本項では前述の各ランマーの比較検討結果をもとにして、ランマーを半球で、その落下高を40 cmで落下衝撃試験を行ったときの衝撃加速度を検討した結果を述べる。

3.4.2 衝撃加速度曲線と各試験曲線の関係

道路土工における盛土の締固め管理は各種の方法があり、現在では、現場密度の乾燥密度規定による管理方法が一般的となっている。したがって、本落下衝撃試験による土の締固め度の検討は、含水比を媒介にして突固め試験で得た乾燥密度と衝撃加速度を比較することにより視覚的判断ができる。他方、その土質の力学的要素も盛土の締固め度を左右する大切な因子のひとつであることから、力学的性質と衝撃加速度の関連性を見いだすことにも重要な意義がある。

図-9は突固め試験で得た乾燥密度の締固め曲線をベースにして、力学的性質曲線と衝撃加速度曲線との関連性を求めたものである。力学的性質曲線は、一軸圧縮試験で得た一軸圧縮強度曲線と一面せん断試験で得た鉛直応力 $\sigma=2\text{kgf/cm}^2$ のときの最大せん断応力曲線である。図-9によれば、衝撃加速度曲線の最大は土の種類にかかわらず、突固め曲線の最適含水比よりやや乾燥側で発生する傾向がみられるようである。この傾向を端的に表わしたのが図-10である。同図は61年度の16試料について、突固め試験で得た乾燥密度の最適含水比と衝撃加速度のピーク時の含水比を抽出して、含水比を横軸に両者の出現状況を棒グラフに示したものである。同図から、明らかに衝撃加速度のピークは乾燥密度の最適含水比よ

表-3 土質試験結果

調査年度	測定項目 試料名	自然含水比 W_n (%)	比重 G_s	コンシステンシー限界			粒度試験			試験		日本統一土質分類	縮熱減量 (%)	締固め試験	
				液性限界 WL (%)	塑性限界 WP (%)	塑性指数 IP (%)	2000 μ m以上	2000 \sim 74 μ m	74 μ m以下	均等係数 U_c	曲率係数 U_c			最通含水比 (%)	最大乾燥密度 (t/m^3)
昭和60年度	60-1	36.8	2.631	36.3	35.1	1.3	3.7	44.4	51.9	115	6.34	ML	4.07	24.6	1.447
	60-2	88.1	2.583	70.1	60.8	9.3	0.4	45.9	53.7	—	—	MH	14.17	41.5	1.022
	60-3	69.8	2.711	NP	NP	NP	36.2	48.7	15.1	42.9	3.53	S-M	5.71	41.2	1.111
	60-4	71.8	2.659	53.5	45.9	7.6	0.8	10.8	88.4	—	—	CH	10.59	34.2	1.295
	60-5	24.5	2.716	31.9	29.9	2.1	14.1	55.3	27.6	51.1	3.99	SM	6.45	30.8	1.315
	60-6	59.9	2.631	58.8	54.5	4.3	48.4	14.3	37.3	1318	0.24	SM	7.28	27.3	1.302
昭和61年度	61-1	31.4	2.699	76.2	32.2	44.0	18.6	55.6	25.8	144	4.14	SC	6.53	20.4	1.590
	61-2	53.4	2.760	79.7	42.5	37.2	12.2	34.1	53.7	50.0	1.50	MH	11.62	27.8	1.442
	61-3	52.5	2.698	119.3	36.3	83.0	0	51.1	48.9	—	—	SC	6.92	26.0	1.399
	61-4	39.6	2.665	56.5	27.4	29.1	7.6	39.2	53.2	109.1	1.09	CH	4.56	20.7	1.617
	61-5	39.2	2.593	71.6	36.9	34.7	0	15.8	84.2	—	—	MH	10.90	30.0	1.340
	61-6	40.8	2.668	72.9	33.6	39.3	0	49.7	50.3	—	—	CH	6.75	23.4	1.535
	61-7	31.6	2.665	64.1	30.8	33.3	2.3	41.8	55.9	—	—	CH	4.45	20.5	1.623
	61-8	29.2	2.703	NP	NP	NP	11.3	63.2	25.5	62.81	16.18	SM	6.44	20.1	1.528
	61-9	59.9	2.615	78.9	51.4	27.5	0	42.3	57.7	30.00	0.64	MH	11.12	34.5	1.234
	61-10	12.2	2.721	NP	NP	NP	12.4	77.6	130	6.17	0.88	S-M	3.14	13.4	1.799
昭和61年度	61-11	50.0	2.760	83.7	39.2	44.5	0.8	17.0	82.2	—	—	MH	9.36	30.9	1.401
	61-12	38.9	2.708	NP	NP	NP	3.1	72.0	34.9	82.61	22.88	SM	7.47	29.2	1.410
	61-13	28.6	2.740	NP	NP	NP	1.4	68.6	300	11.80	2.56	SM	5.86	24.2	1.513
	61-14	19.8	2.749	NP	NP	NP	19.8	64.3	15.9	105.26	16.84	SM	3.52	15.6	1.800
	61-15	56.6	2.636	62.2	29.6	32.6	0	3.3	96.7	—	—	CH	6.35	20.8	1.528
	61-16	20.7	2.665	NP	NP	NP	4.2	52.3	43.5	—	—	SM	3.18	17.8	1.669

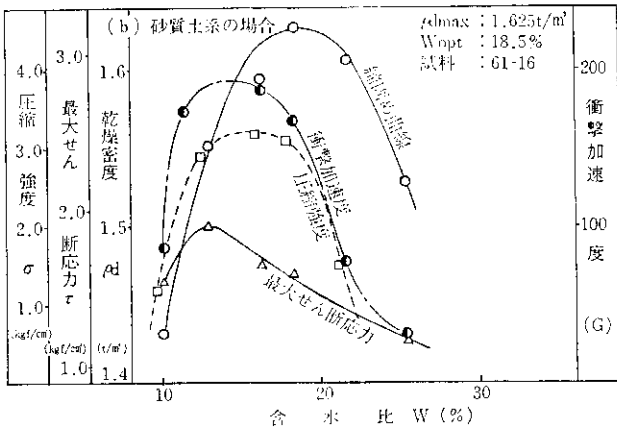
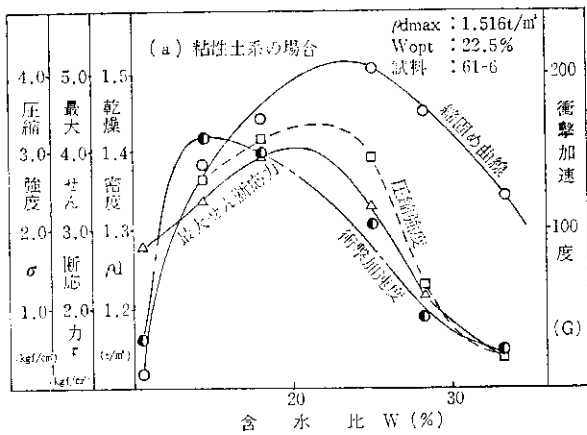


図-9 衝撃加速度曲線と各試験曲線の関係

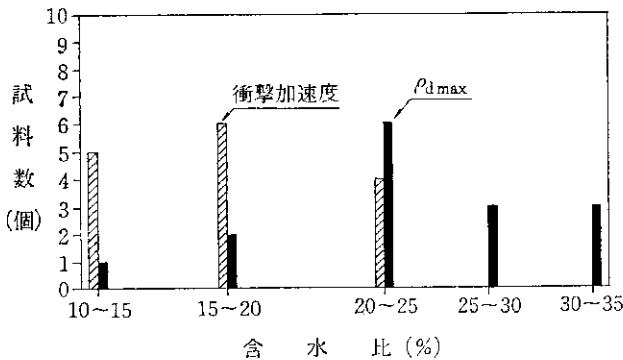


図-10 ρ_d と衝撃加速度曲線のピーク時における含水比の比較

り乾燥側で発生する頻度が多く、そのほとんどは25%以下の含水比であった。

また、一面せん断試験で得た最大せん断応力曲線や一軸圧縮強度曲線は、いずれの土質の場合もその曲線の最大が締固めの曲線の最大より乾燥側で発生しており、しかも曲線の傾向は、含水比を媒介に衝撃加速度曲線と似通った軌跡形態をたどるようである。これは、締固めた土の最大圧縮強さは最適含水比の位置より少し乾燥側に

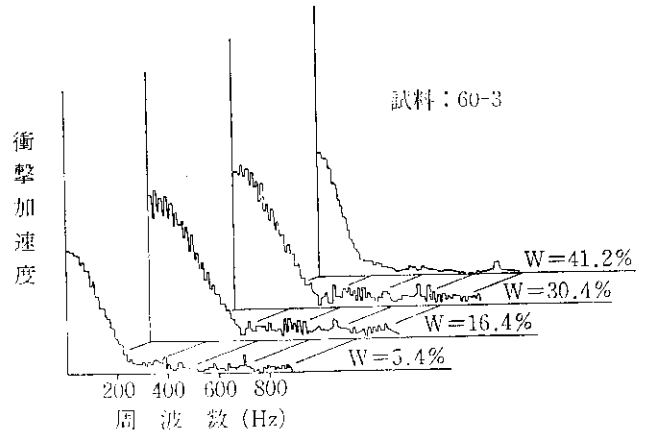


図-11 周波数分析結果(火山灰, 欠球台)

ずれた含水比で起こるとい報告⁵⁾と一致するものである。したがって、土の力学的性質曲線は、その形状や最大を示す含水比の位置が衝撃加速度曲線と似通っていることから、両者の関係は含水比を媒介に密接な相関関係を有するものと思われる。また、これらの傾向はいずれの土質でも同様である。この衝撃加速度の測定と同時に衝撃波をデータレコーダで記録しているが、FFTによる周波数分析結果を図-11に示した。同図は火山灰の試料であるが、いずれの場合も試料に含まれる含水量の状態によって、周波数の分布状況は大きく変化している。いわゆる、個々の含水比で行った衝撃加速度の周波数分布は、締固め曲線が含水比の状態によって変化する挙動形態と似通った傾向を示した。しかしながら、必ずしも最適含水比の位置で周波数の主成分が高周波数域まで分布するわけではないようである。むしろ、同図の最適含水比が41.2%と高含水域で発生しているところや、衝撃加速度のピークが含水比17%付近で発生して、この含水比付近で周波数の主成分が最大の周波数分布を示していることから、含水比の大小による周波数の分布状況は衝撃加速度曲線との結びつきの方が強く、衝撃加速度の適合でその分布状況は変化するものと思われる。したがって、前述のように衝撃加速度曲線が土の力学的性質曲線と密接な相関関係を有することから、衝撃加速度の周波数分析結果からでも、その試料が内在する力学的性質を究明できる材料のひとつとしてとらえることができるかも知れない。

3.4.3 乾燥密度と衝撃加速度の関係

乾燥密度の大きさは、その土が含有できる含水量の大きさと、土粒子が占める量の大きさと兼ね合いで決定される。この乾燥密度の大きさが変化するに伴い、衝撃加速度の大きさも変化することが考えられることから、両者の関係を見いだすことで衝撃加速度の値から乾燥密度の予測が可能となるものと思われる。図-12は乾燥密度

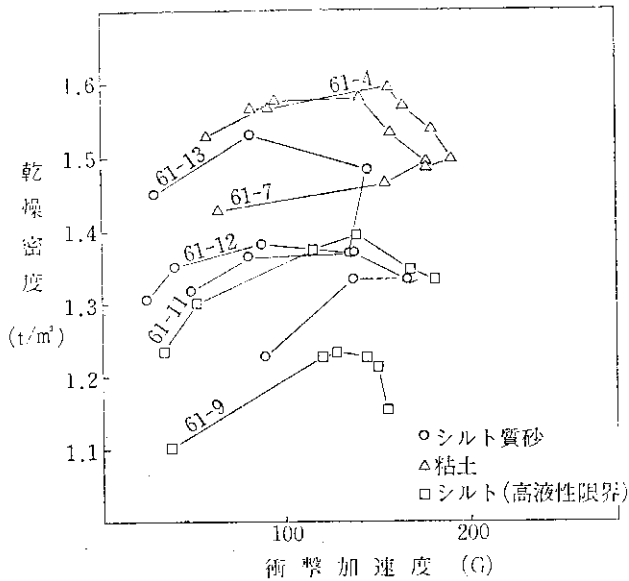


図-12 乾燥密度と衝撃加速度の関係

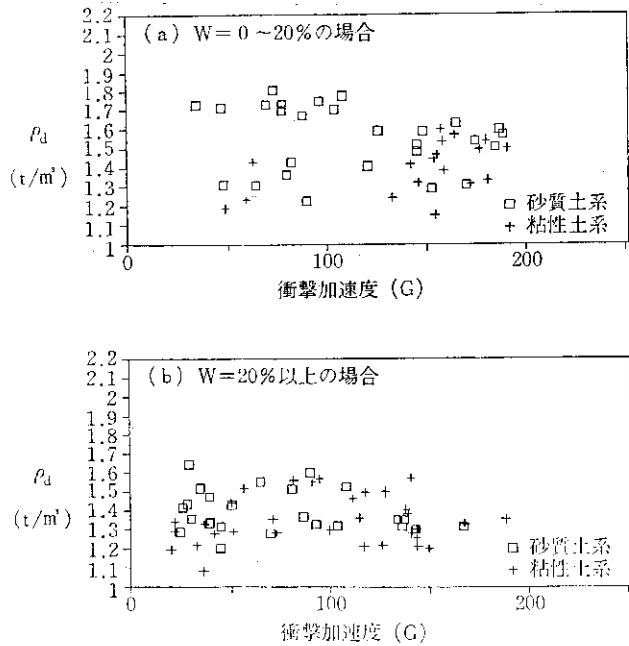


図-13 個々の含水比群における ρ_d と衝撃加速度の関係

と衝撃加速度の関係は土質が異なる数種類の試料について求めたものである。同図から、乾燥密度の出現状況が個々の試料によって異なり、なおかつ、乾燥密度が衝撃加速度の大きさに対応した出方を示していないことから、両者の関係は比例的な相関関係を示すのではなく、その土がほどよい含水比と密度の状態を示すときに衝撃加速度が最大値を示すものと思われる。

一方、図-13は、両者の関係を個々の含水比群に分割して求めたものである。一見、同図からでは両者の関係をほどよくみきわめることに困難であるが、図-10にみら

れるように、砂質土系や粘性土系の土に限らず衝撃加速度の最大が最適含水比より乾燥側の $W=10\sim 20\%$ 付近に多く発生して、この含水比領域で衝撃加速度が高いレベルに集中していることや、低含水比および高含水比領域に高レベルの衝撃加速度が見当たらないことなどから、両者の関係は一部限定された範囲の条件下でなりたつのかも知れない。しかし、乾燥密度のピークと衝撃加速度のピークが一致しないことや、試料の種類によって乾燥密度の大きさが異なることなどの要因も相まって、両者の関係をほどよく導びくことには困難をきわめる。

3.4.4 最大せん断応力と衝撃加速度の関係

図-14は、土の力学的性質のひとつである最大せん断応力 (τ) と衝撃加速度の関係を求めたものである。この最大せん断応力 τ は、垂直応力が 2 kgf/cm^2 のときの一面せん断試験結果であり、この垂直応力を盛土高に換算すると、ほぼ 10 m (γd を 1.8 t/m^3 として計算) 以上に相当する。平面道路における土工の盛高は、 10 m を越えて施工することがきわめてまれであることや、垂直応力を変えて衝撃加速度との関係を求めても、両者間の関係

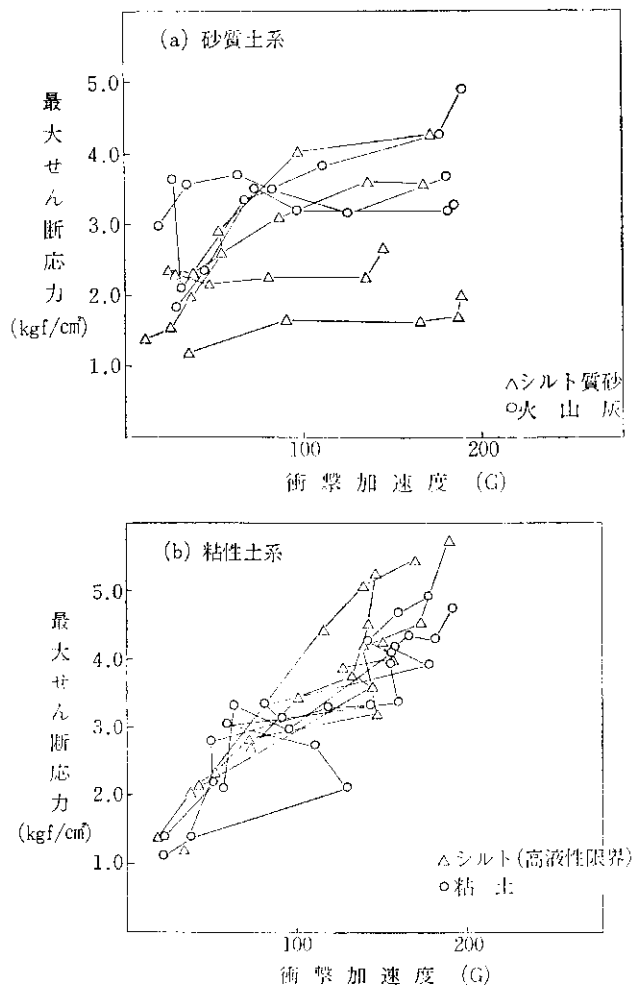


図-14 最大せん断応力と衝撃加速度の関係

に大きな変化がない⁶⁾ことなどの理由から、同垂直応力のときの最大せん断応力で検討を行ったものである。また、同図の最大せん断応力と衝撃加速度の関係は、シルト質砂と火山灰の砂質土系の土を同図(a)に、高液性限界のシルトと粘土の粘性土系の土を同図(b)に分けて、個々の試料ごとに示した。同図(a)から、最大せん断応力の大きさは、衝撃加速度の大きさに比例した出方を示す試料が一部みられるものの、大部分の試料は衝撃加速度との間に相関関係なく、個々の試料ごとに出力が異なるようである。一方、同図(b)では、衝撃加速度の大きさが、ほぼ、最大せん断応力に対応した出力を示していることから、両者間には良好な相関関係を有するものと思われる。また、図-15に示す個々の含水比群に分割して両者の関係を求めた場合では、粘性土系において、同図(a)では衝撃加速度が高いレベルに集中しているものの、同図(b)では最大せん断応力の大きさに比例した衝撃加速度の出力を示していることなどから良好な相関関係が期待できるものと思われる。

一方、砂質土系では、(b)に示すように高含水比領域で最大せん断応力の大きさに比例した衝撃加速度の大きさを示しており、特に含水比30%以上でかなり良好な相関関係が期待できるようである。しかし、20%以下の含水比領域では測定値のバラツキが大きく、しかもせん断力の大きさは、土の粘着力の大きさに決定されることなどの理由から、土粒子の強さとかみ合わせで上の強度が決まる砂質土系の土では、大きな期待はできないものと

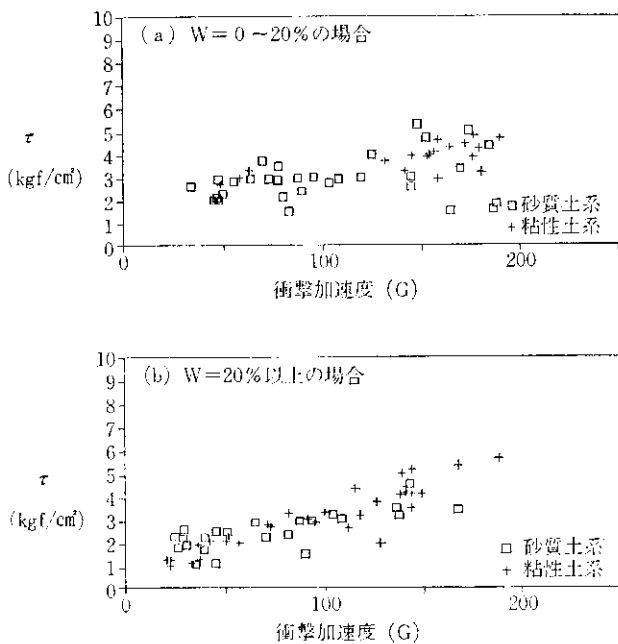


図-15 個々の含水比群における τ と衝撃加速度の関係

思われる。

3.4.5 粘着力および内部摩擦角と衝撃加速度の関係

土のせん断強さは、粘着力 (c) と内部摩擦角 (ϕ) で表わされることから、一面せん断試験から得たせん断応力の c と ϕ を求め、衝撃加速度との関係を個々の試料ごとに示したのが図-16, 17である。これらの図から、 c および ϕ と衝撃加速度の関係は、図-16(b)の粘性土系の土

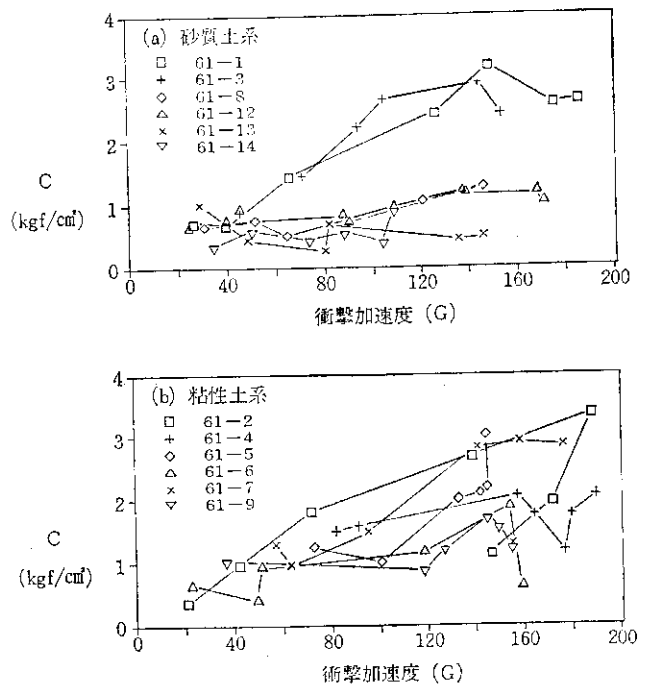


図-16 C と衝撃加速度の関係

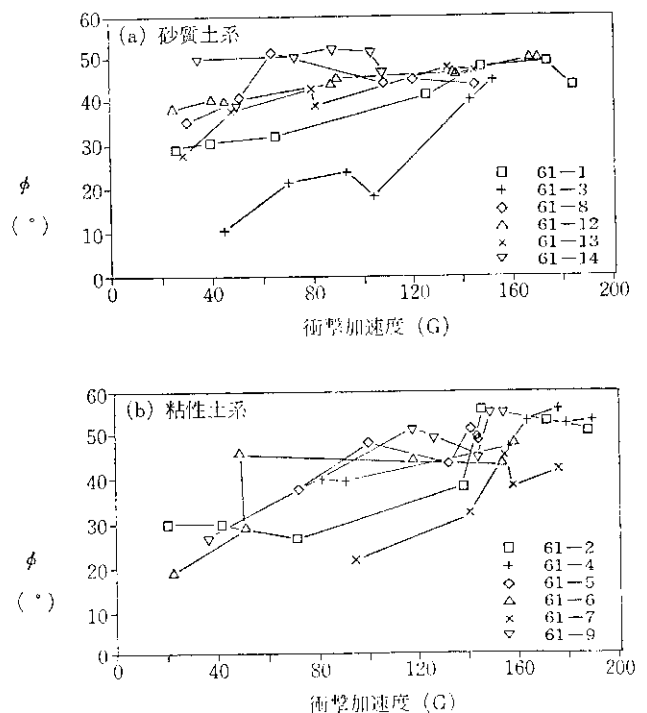


図-17 ϕ と衝撃加速度の関係

において粘着力の大きさにほぼ対応した衝撃加速度の値を示しているが、同図(a)の砂質土系の土では、個々の試料によって出方が異なる様相を示している。また、図-17に示す ϕ と衝撃加速度の関係において、相対的にはほぼ衝撃加速度の大きさに対応した ϕ の値を示している試料が多く見られた。特に、(b)の粘性土系の土にこの傾向が強く現われているようである。

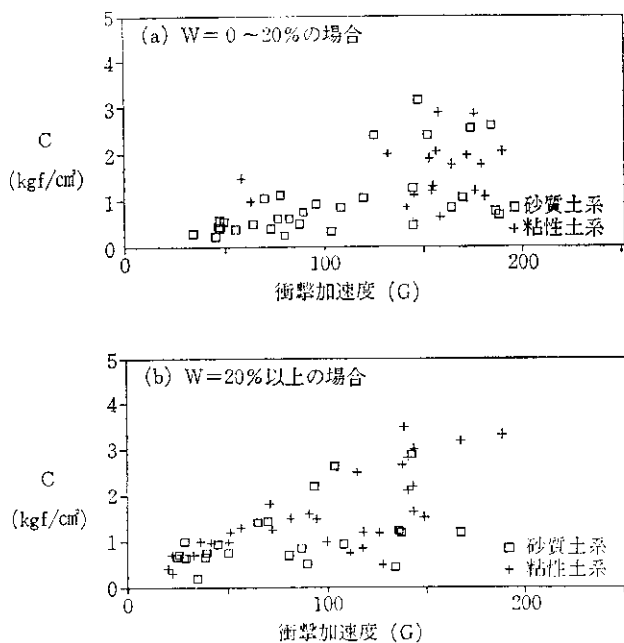


図-18 個々の含水比群における C と衝撃加速度の関係

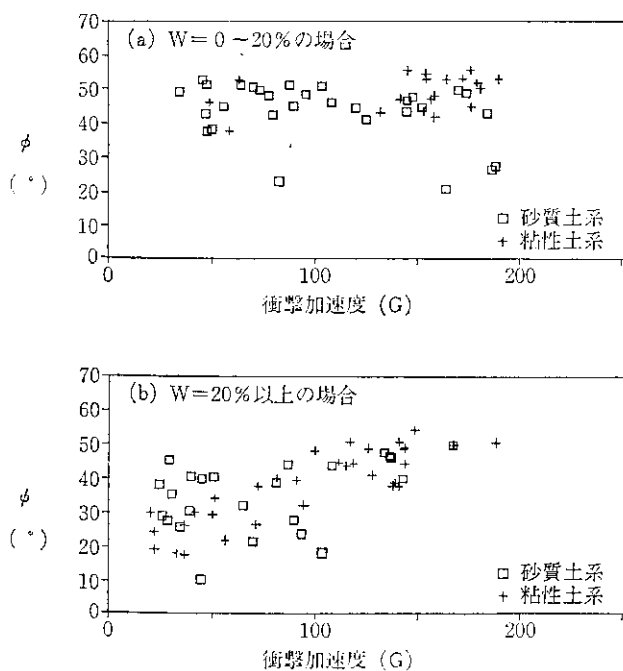


図-19 個々の含水比群における ϕ と衝撃加速度の関係

一方、図-18および19に示したように、個々の含水比群に分割して c および ϕ と衝撃加速度の関係を求めた場合では、 c や ϕ がせん断応力の強度因子であることから、前項の c と衝撃加速度の関係の傾向がうかがわれる。つまり、 c および ϕ と衝撃加速度の関係は粘性土系の土に良好な相関関係がみられる。しかし、この関係は、いずれの場合も含水比が20%以上の湿潤側領域に限られるようである。また、この含水比は、ほぼ最適含水比付近であることから、 c および ϕ と衝撃加速度の関係は個々の試料が持つ最適含水比より湿潤側でなりたつものと思われる。一方、砂質土系の土では図-19(b)の高含水比領域の一部試料に良好な関係がみられることや、図-16(a), 17(a)に示すように、一部の試料にせん断力の強度因子が衝撃加速度の大きさに対応した出方を示していることなどから、あるいは個々の試料ごとに求めた方がよいのかもしれない。

3.4.6 一軸圧縮強度と衝撃加速度の関係

一軸圧縮試験は、土の力学的性質を知る上でその試験の簡便さなどから、最も広く実用的に利用されている。図-20は、この一軸圧縮試験で得た圧縮強度と衝撃加速度の関係を求めたものである。一軸圧縮試験は土の突固め試験後、一度ほぐして、再度、成型しなおして行ったものである。同図は前項と同様、土の種類によって衝撃加速度の出方が異なることが考えられることから、砂質土系と粘性土系に分けて示したものである。同図から、衝撃加速度と一軸圧縮強度(q_u)の関係は、砂質土系お

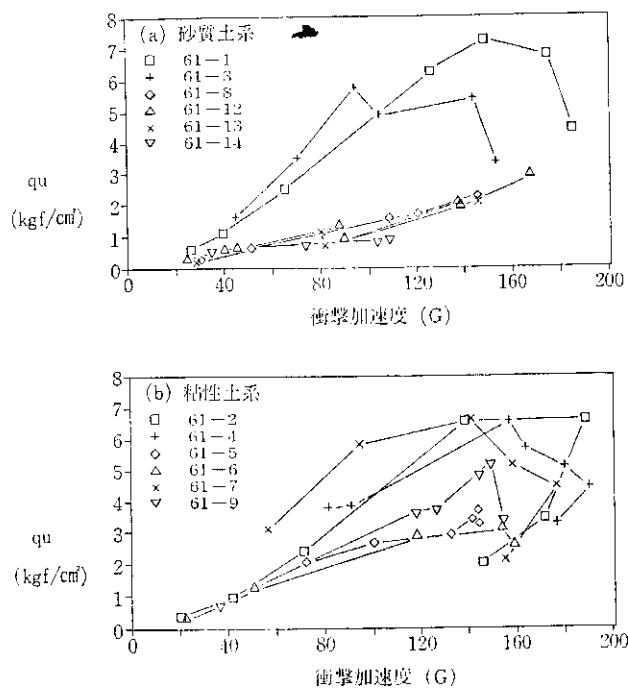
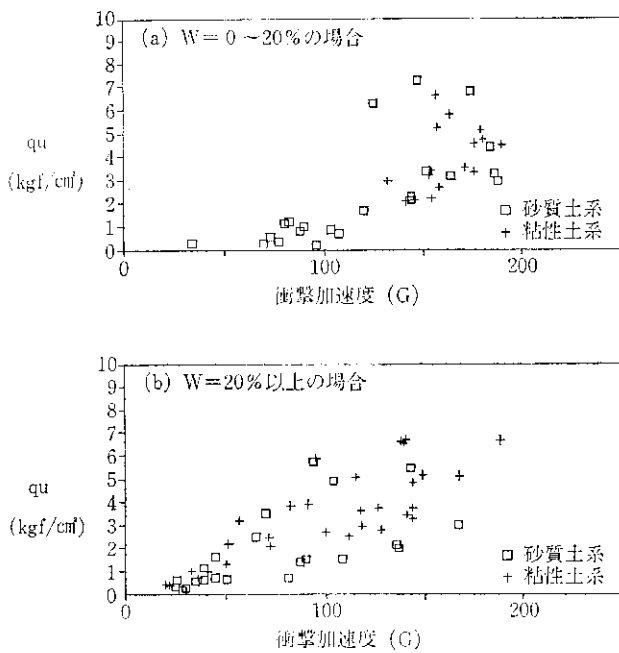


図-20 q_u と衝撃加速度の関係



図—21 個々の含水比群における q_u と衝撃加速度の関係

よび粘性土系とも大方のところ、ほぼ q_u の大きさに対応した衝撃加速度の値を示しているが、個々の試料によって出方が異なるようである。一方、図-21に示した個々の含水比群に分割して、 q_u と衝撃加速度の関係を求めた場合では、砂質土系では含水比の大きさにかかわらず、ほぼ比例的な傾向を示しているのに対し、粘性土系では同図(b)に示すように、かなり高含水比領域で比例的傾向がみられる程度である。これは、個々の含水比領域で片寄った傾向を示したためであろうと推察するが定かではない。しかしながら、マクロ的な見地から両者の関係を考察すると、ほぼ q_u の大きさに対応した衝撃加速度の値を示していることから、粘性土系の土であってもある程度の相関関係が期待できるものと思われる。

まとめ

以上の結果をまとめると、次のようである。

1. 落下衝撃試験による衝撃加速度は、円柱のランマーが最も大きく、次いで欠球台のランマー、半球のランマーの順となる。
2. ランマーの種類による衝撃加速度の標本偏差の割合は、半球が落下高さに左右されない標本偏差の割合を示すのに対し、欠球台と円柱では落下高が大きくなるにつれ、標本偏差は小さくなる傾向がある。
3. 土質の種類による衝撃加速度は、粗粒分を多く含む土に測定のパラッキが大きい。
4. 落下衝撃試験による衝撃加速度は、ランマーの落

下高に関係なく、最適含水比より湿潤側に測定精度が悪い。

5. 落下衝撃試験におけるモールド内の試料は、突固め後の厚さが7.5 cm (3層目分) 以上必要である。

6. 衝撃加速度の周波数分析では、同一試料であれば、ランマーの落下高が変化しても周波数分布に変化がない。

7. 土の状態による衝撃加速度の周波数分布は、その主成分が硬い土では高い周波数域まで分布し、軟かい土では低い周波数域に分布する。

8. ランマーの種類による周波数分布は、その主成分が軟らかい土では円柱が最も高い周波数域まで分布し、次いで欠球台、半球の順となるが、硬い土ではその差がなくなる。

9. 衝撃加速度曲線や力学的性質曲線のピークは、締固め曲線の最適含水比より乾燥側にある。

10. 周波数分布の主たる成分が最も高周波数域まで分布するときは、最適含水比の状態にある試料ではなく、衝撃加速度が最大を示すときの含水比の状態のときである。

11. 乾燥密度と衝撃加速度の関係は個々の試料によって異なり、ほどよい含水比と密度のときに最大の衝撃加速度を示す。

12. 最大せん断応力と衝撃加速度の関係は、砂質土系より粘性土系に良好な相関関係がみられる。

13. 粘着力および内部摩擦角と衝撃加速度の関係は、粘性土系の最適含水比より湿潤側で良好な相関関係がみられる。

14. 一軸圧縮強度と衝撃加速度の関係は、砂質土系および粘性土系ともほぼ比例的傾向がうかがわれ、特に高含水比状態では強い相関が認められる。

あとがき

各種形状のランマーを用いて行う落下衝撃試験は、その試料に火山灰系、砂質土系および粘性土系を使用して衝撃加速度の測定を行い、この評価単位で土の締固め度への適用性の可否を試みたものである。その結果、衝撃加速度の出現状況は、土の力学的性質の挙動形態と似通った軌跡を示すことが判明し、この評価単位で土の力学的性質を予測する場合に有効な手だてとなる。また、これらの試験結果を踏まえながら、現場における落下衝撃試験を行って、より現実的な慣用性のある締固め度予測方法を提案したいと考えている。

終わりに、多大な知識と技術指導を提供して頂いた土質研究室実験主任遠藤宣世氏に対し、深く感謝の意を表

が
固
れ
が
の
土
分
が
締
分
で
っ
加
系
み
お
高
そ
て
隻
通
予
厨
予
土
表
月

する。

参 考 文 献

- 1) 吉川英一； 振動および衝撃測定，昭和41年12月20日発行。
- 2) 土質試験法改定委員会； 土質試験法，昭和54年2月30日。
- 3) 土質工学会； 地震と地盤，昭和40年3月25日発行。
- 4) 能登繁幸，川西 是，奥田 稔，原田厚子； 道内火山灰土の土工上の分類について，土質工学会北海道支部技術報告集，第25号，昭和60年2月。
- 5) 松尾新一郎； 土質安定工便覧，昭和47年12月12日発行。
- 6) 能登繁幸，遠藤宣世，後藤 彰； 衝撃加速度による土の締固め度の予測（第1報），土質工学会北海道支部技術報告集，第26号，昭和61年2月。

*

*

*