

粗粒材料の動的変形特性について

On the Dynamic Deformation Characteristics of Coarse Gravels

張 強* 奥村 哲夫** 成田 国朝** 大根 義男**
Qiang ZHANG Tetsuo OKUMURA Kunitomo NARITA Yoshio OHNE

ABSTRACT Although a great deal of coarse gravel materials such as crushed rocks and round gravels are widely utilized in the construction of rockfill dams and often encountered as foundation materials, informations on their dynamic properties are far less available as compared to finer materials like clay, silt and sand, mainly because the maximum particle size (D_{max}) should be restricted in the laboratory to hold a certain accuracy of test results. In the present paper, dynamic deformation characteristics of gravel materials are investigated through a series of cyclic triaxial tests on specimens prepared in four similar gradations by varying the maximum size of particles.

Concluding remarks are summarized as follows: ① the modulus of rigidity (G) of crushed rocks increases proportionally with the increase in the maximum particle size (D_{max}) in log-scale plotting, an experimental formula is proposed to evaluate the modulus value in the field for real construction materials. ② the reference strain (γ_r) is hardly influenced by the value of D_{max} , having a constant value in the range of $D_{max} > 9.52\text{mm}$. ③ damping factor (h) shows a slight increase with the increase in D_{max} . ④ dynamic deformation properties of crushed rocks are considerably influenced by the size of specimens in the test.

1. はじめに

礫、碎石のような粗粒材料は、構造物周辺の埋め戻し材や盛土材として広く用いられている。またロックフィルダムでは大量の粗粒材を構築材料として利用している。

粗粒材を用いた構造物の地震時安定性を合理的に評価するためには、材料の動的強度・変形特性を知ることが必要である。しかし、粗粒材の動的特性を室内で求めるためには大型の装置を用いた実験が必要であるが、この種の実験は技術的にも経済的にもさほど容易ではなく、粗粒材料の動的特性に関する研究は砂や粘土ほど進展していないのが現状である。

本研究は、異なる最大粒径で相似な粒度に調整した4種類の砕石材について動的変形特性試験を行い、剛性率や減衰定数に与える最大粒径の影響を実験的に調べるとともに、原位置の材料を代表し得る相似粒度を用いた小さな供試体の実験から、現実の大粒

径の物性値を推定する方法について検討を加えたものである。

2. 試料および実験方法

(1) 試料

実験に用いた試料は、堆積岩を砕いたかなり角ばった粒径の市販の砕石材（最大粒径30mm）であり、この原材料に対して最大粒径 D_{max} が19.1, 9.52, 4.76および2.0mmで相似な粒度となるように人工的に調整したA～Dの4種類である。各試料の粒度分布および物理的性質を図-1および表-1に示す。なお、表には別に行った豊浦砂(T-1, T-2)、チャート(砕石材:E-1, E-2)および他の研究機関^{2), 3)}によるもの(N-1～N-3, K-1, K-2)もあわせて示している。

供試体は直径 $d=100\text{mm}$ 、高さ $h=220\text{mm}$ の円柱形である。一般に、供試体直径 d と試料の許容最大粒径 D_{max} との比 d/D_{max} は静的な三軸圧縮試験試験において5～6以上とされている。本実験の場合、粒径の一番大きな $D_{max}=19.1\text{mm}$ の砕石材で d/D_{max}

* 愛知工業大学 客員研究員(揚州工学院)

** 愛知工業大学 土木工学科(豊田市)

表-1. 試料の物理的性質

試料名	比重 Gs	最大粒径 D _{max} (mm)	U ₀	2.0mm以下 含有率(%)	供試体 d×h(mm)	試料 状態	d/D _{max}	供試体の平均 間隙比(e ₀)
A	2.700	19.1	7.05	18.7	100×220	気乾	5.2	0.573
B	2.700	9.52	7.05	35.0	100×220	気乾	10.5	0.550
C	2.700	4.76	7.05	59.3	100×220	気乾	21.0	0.582
D	2.700	2.00	7.05	100	100×220	気乾	50.0	0.601
T-1(豊浦砂)	2.645	0.25	1.4	100	100×220	気乾	400	0.757
T-2(豊浦砂)	2.645	0.25	1.4	100	50×100	飽和	200	0.631
E-1(碎石)	2.762	4.76	9.01	50.0	50×100	気乾	10.5	0.577
E-2(碎石)	2.762	4.76	9.01	50.0	100×220	気乾	21.0	0.613
N-1(碎石, 西尾 ²⁾)	2.688	50.8	13.8	18.0	300×600	気乾	5.9	0.399
N-2(碎石, 西尾 ²⁾)	2.688	25.4	13.2	29.8	300×600	気乾	11.8	0.460
N-3(碎石, 西尾 ²⁾)	2.688	9.52	12.6	49.5	300×600	気乾	31.5	0.428
K-1(砂, 国生 ²⁾)	2.701	2.00	2.00	100	300×700	飽和	4.7	0.803
K-2(碎石, 国生 ²⁾)	2.744	64.0	7.45	5.0	300×700	飽和	150	0.490

(試料A~D: D_{max}>10mmの表乾比重D_s=2.660, 飽乾比重D_b=2.622, 吸水率Q=1.434%)

は約5となりほぼこの条件を満たしている。供試体の作成は、直径約10mmの突き棒を用いて全体を6層に分けて締固めて行った。供試体の密度は、電動バイブレータを用いた締固め試験結果から相対密度Dr≒85%を目標とした(e_{min}=0.407, e_{max}=1.827)。

供試体へのゴム膜のわん入を防止するために、供試体を包むゴムメンブレンは、厚さ0.5mmと2.0mmのものを2枚用意した。すなわち、厚さ0.5mmのメンブレンを用いてモールド内で供試体を作成し、約40cmhgの負圧で供試体を自立させモールドを除去した後、供試体表面の凹部を粘土で埋めて、その上から厚さ2mmのスリーブを装着した。

また、載荷面と供試体端面の接触点数が少ないと実験値に誤差が入り易くなる。そこで供試体端部に意識的に細かい粒子を多く集め、載荷板との接触の改善を図った。

(2) 実験方法

実験に用いた装置は電気・油圧サーボ方式の繰返し三軸試験機である。軸荷重の計測は試料キャップの上部に設置した荷重変換器により、また軸変位は試料キャップに固定した金属製のターゲットの動きを非接触型変位変換器(ギャップセンサー)により測定している。

供試体への繰返し載荷は、所定の拘束圧で等方圧密された供試体に対し、排水(気)状態で逐次わず振幅を漸増させるステージテストの方式を採用し

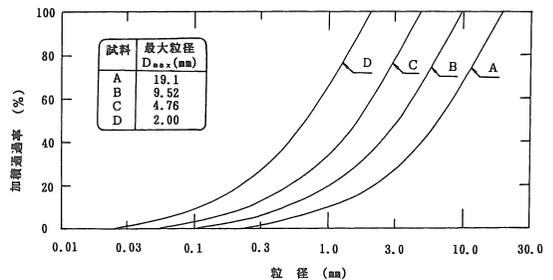


図-1. 実験に用いた碎石の粒径加積曲線

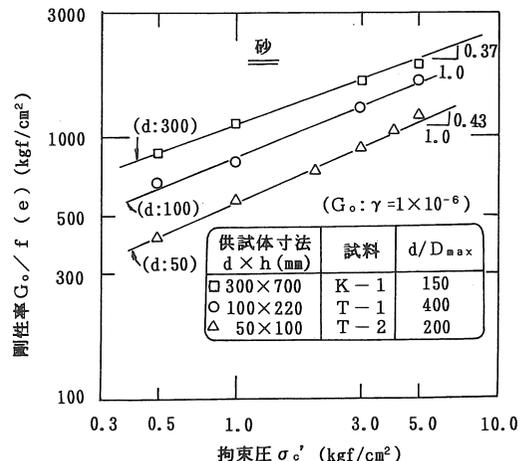


図-2. G₀/f(e)~σ'₀'関係に及ぼす供試体寸法の影響(砂)

た。圧密圧力は0.5~5.0kgf/cm²の間で4種類変化させた。1ステージの载荷回数は10回、また载荷方式は応力制御とし、波形は1.0Hzの正弦波である。剛性率と減衰定数は10波目の記録から求めた(ポアソン比 $\nu_d=0.4$ と仮定)。

3. 実験結果と考察

(1) 供試体寸法の違いが剛性率に及ぼす影響

相似粒度に調整された試料の剛性率の特性を調べる前の予備実験として、剛性率Gに与える供試体の大きさの影響について検討を加えた。図-2および図-3はこの結果である。図-2は、最大粒径2.0mm以下の砂の $G_0/f(e)$ (G_0 は $\gamma=10^{-6}$ におけるGの値、 $f(e)$ は $(2.17-e)/(1+e)$)と有効拘束圧 σ_c' との関係を示したもので、供試体直径dと最大粒径 D_{max} の比 d/D_{max} はいずれの実験も150以上である。本実験による豊浦砂のT-1とT-2を比較してみると、供試体直径の大きい $d=100$ mmのG値は $d=50$ mmの約1.5倍となっていることが分かる。また、図には $d=300$ mm供試体による国生ら²⁾の結果(E-1)も示しているが、G値は $d=100$ mmの値と比べ4割ほど大きな値となっている。

図-3は碎石(E-1, E-2, $D_{max}=4.76$ mm)の結果を前図と同様に整理したもので($d/D_{max}>10$)、碎石についても供試体直径が大きいほどGの値が大きくなることが知られる。これは、直径が大きい供試体ほど粒子の配列が均一でかみ合わせも平均的に良く、また供試体作成時の供試体に与えるエネルギーも供試体直径が大きいほど大きくなってより安定した粒子構造が形成されるため、Gの値が高くなった等の理由によるものと考えられる。

また、図-2および図-3の $G_0/f(e) \sim \sigma_c'$ 関係の近似線(直線)のこう配をみると、個々の図において大きな差は認められない。従って、供試体寸法の違いがGの拘束圧依存性に与える影響は、同一粒度の場合無視できると言える。

静的な三軸圧縮試験においては、 d/D_{max} が十分に大きく($d/D_{max}>5 \sim 6$)、供試体高さhとdの比 h/d が同じで、端面摩擦や試料キャップの固定条件等が基本的に同じである場合、強度に与える供試体寸法の違いによる影響はほとんどないとされている。しかし剛性率Gの値に関しては、本実験の範囲内ではあるが、 $d/D_{max}>10$ であっても供試体

寸法の影響が明確に認められた。これについては今後解明すべき問題として残される。

(2) 剛性率の拘束圧依存性

clean sand や正規圧密粘土の剛性率Gに影響を及ぼす主要な因子は拘束応力 σ_c' と間隙比eであり、またGと σ_c' については広い範囲のひずみレベルに対して両対数紙上で直線関係が存在し、実験式として次式の関係で表せることが一般に知られている⁴⁾。

$$G = A(\gamma) \cdot f(e) \cdot \sigma_c'^m \quad \text{--- (1)}$$

ここに、 $A(\gamma)$ および $m(\gamma)$ はせん断ひずみ γ の関数である。図-4は、代表例として、試料B($D_{max}=9.52$ mm)について $G/f(e)$ と σ_c' の関係を整理し

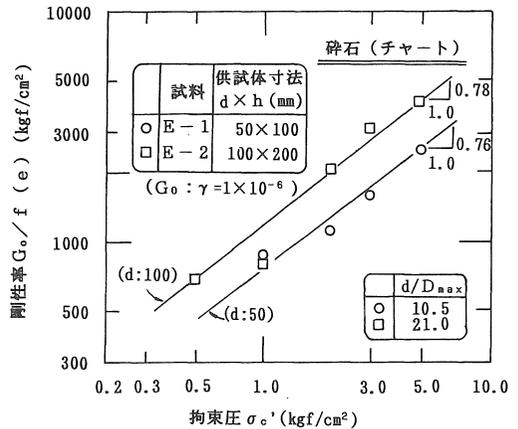


図-3. $G_0/f(e) \sim \sigma_c'$ 関係に及ぼす供試体寸法の影響(碎石)

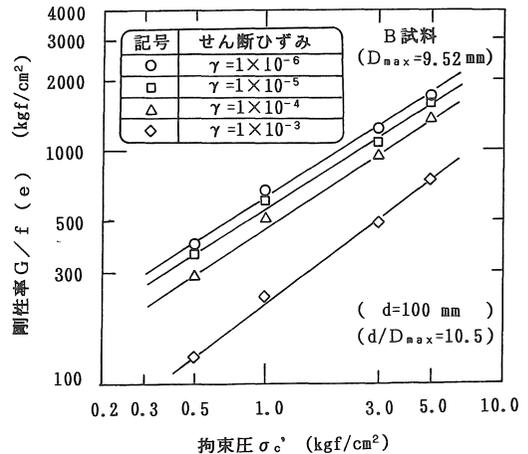


図-4. $G/f(e)$ と拘束圧 σ_c' の関係

たもので、粗粒材に対しても式(1)の関係が成り立つことが確認される。

(3) 剛性率のひずみ依存性

図-5は、Gのひずみ依存性を調べたものである(試料B)。図を見ると、Gは拘束圧が高いほど大きな値を示し、またいずれの拘束圧においてもγの増大に伴ってG値が低下しており、clean sandや正規圧密粘土と類似の傾向にあることが分かる。図-6は図-5と同一の試料Bについて、任意のγに対するGを $\gamma=1 \times 10^{-6}$ のGで除して正規化した G/G_0 とγの関係で整理した結果である。図より、拘束圧が大きいかほど $G/G_0 \sim \gamma$ 関係は右側に移動しており、Gのひずみ依存性が小さく現れる傾向にあることが分かる。

Gのひずみ依存性に与える拘束圧の影響をもう少し詳しく調べるために、Gの値が1/2に低下した時のGに対応するせん断ひずみ γ_r (規準ひずみ)と拘束圧の関係をA~Dの全試料について整理すると図-7が得られる。図を見ると、規準ひずみ γ_r は拘束圧の増大に伴って大きな値を示しており、碎石材についても、Gのひずみ依存性に及ぼす拘束圧の影響は砂や粘土と同様に扱うことができると言える。また、同図の太い実線はA~D試料に対する $\gamma_r \sim \sigma_c'$ 関係の平均的な値を直線近似したもので、近似線は次式の形で表示することができる。

$$\gamma_r = 5.2 \times 10^{-4} \cdot \sigma_c'^{0.30} \quad \text{----- (2)}$$

また、図-6には比較の意味で豊浦砂(T-1)の結果も示しているが、碎石材の結果は豊浦砂の左方にプロットされ、γの増大に伴うGの低下が顕著に現れている。図-8は拘束圧をパラメータに選び、規準ひずみ γ_r と最大粒径 D_{max} との関係を示したものである。図より、規準ひずみ γ_r は D_{max} の増大に伴って低下しており、粗粒土ほどGのひずみ依存性が著しく現れるというこれまでの研究結果に一致したのとなっていることが分かる。また、規準ひずみ γ_r は、拘束圧の大きさに関係なく最大粒径 $D_{max} \approx 10 \sim 20 \text{mm}$ でほぼ一定値を示している。このことは、小さな供試体による実験結果から粒径の大きな実粒度の規準ひずみ γ_r (ひずみ依存性)を推定することが可能であることを意味している。

(4) 剛性率と最大粒径

図-9は、試料A~Dについて拘束圧をパラメー

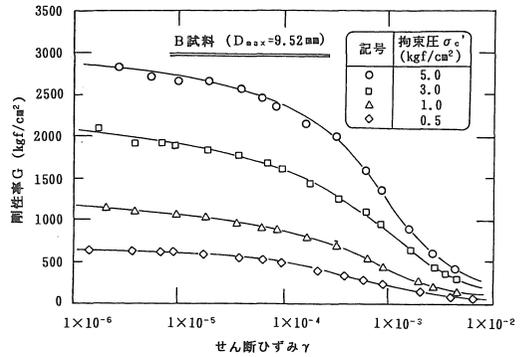


図-5. 碎石のG~γ関係(試料:B)

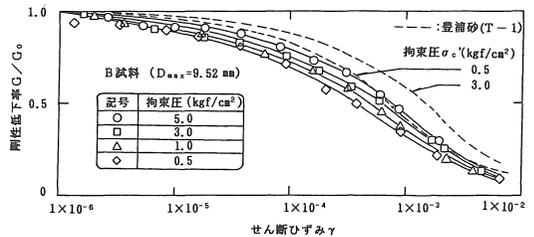


図-6. 剛性率Gのひずみ依存性(試料:B)

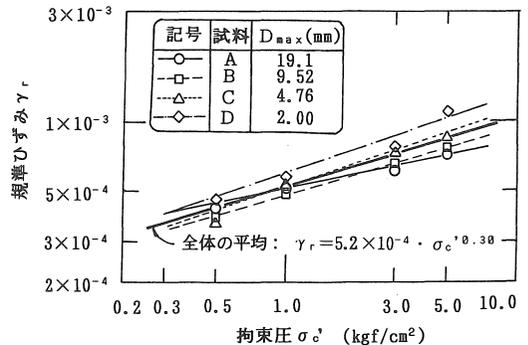


図-7. 規準ひずみ γ_r と拘束圧 σ_c' の関係

々に選び、 $G_0/f(e)$ と最大粒径 D_{max} との関係で整理したものである。図より、両者の関係はいずれの拘束圧においても両対数紙上での比例関係が認められ、 $G_0/f(e) \sim D_{max}$ 関係は次式の形で表すことができる。

$$G_0/f(e) = A(\sigma_c') \cdot D_{max}^{B(\sigma_c')} \quad \text{--- (3)}$$

ここに、 $A(\sigma_c')$ は各拘束圧ごとの直線の $D_{max} =$

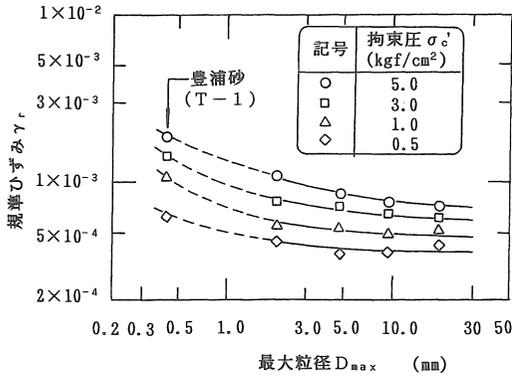


図-8. 規準ひずみ γ_r と最大粒径 D_{max} の関係

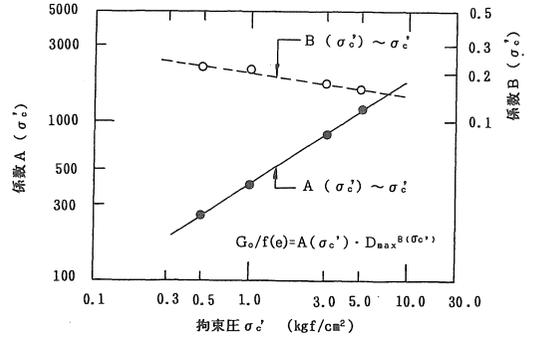


図-10. 係数 $A(\sigma_c')$ 、 $B(\sigma_c')$ と拘束圧 σ_c' の関係

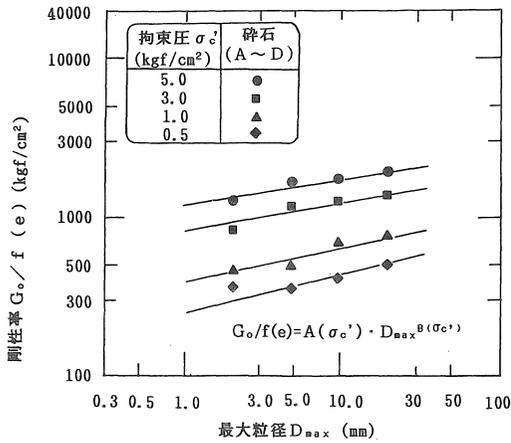


図-9. $G_o/f(e)$ と最大粒径 D_{max} の関係

表-2. G_o の推定値と実験値の比較

試料	D_{max} (mm)	拘束圧 σ_c' (kgf/cm ²)	G_o 実験値 (kgf/cm ²)	G_o 推定値 (kgf/cm ²)	実験値-推定値 実験値
A	19.1	0.5	775.2	776.9	0.22(%)
		1.0	1236.2	1204.9	2.53
		3.0	2173.9	2273.1	4.57
		5.0	3236.2	3205.1	0.97
B	9.52	0.5	681.6	716.5	5.12
		1.0	1175.1	1095.3	6.79
		3.0	2164.5	2100.9	2.94
		5.0	2915.5	2835.9	2.73
C	4.76	0.5	560.0	569.1	1.63
		1.0	993.1	897.0	9.68
		3.0	1740.0	1690.1	2.87
		5.0	2717.4	2451.9	9.77
D	2.00	0.5	556.5	454.0	18.42
		1.0	680.7	704.7	3.53
		3.0	1569.9	1461.1	6.91
		5.0	1930.5	2000.5	3.63

1.0mmにおける値、 $B(\sigma_c')$ は直線のこう配である。

図-10は、式(3)の係数 $A(\sigma_c')$ および $B(\sigma_c')$ の値と拘束圧 σ_c' の関係を両対数紙上にプロットした結果であり、両係数は拘束圧を関数として次式で表すことができる。

$$A(\sigma_c') \cong 400 \cdot \sigma_c'^{0.66} \quad \text{----- (4)}$$

$$B(\sigma_c') \cong 0.21 \cdot \sigma_c'^{-0.15} \quad \text{----- (5)}$$

式(4)は拘束圧 σ_c' が高いほど $A(\sigma_c')$ 値が大きい、すなわち式(3)において D_{max} を一定とした場合 σ_c' が高いほど G の値が大きいことを意味しており、前述の式(1)と同形である。また式(5)の $B(\sigma_c')$ 値は、拘束圧の増大に伴って若干の減少傾向を示しているが、これは、高い拘束圧では粒径の変化(増大)に比較して拘束圧の影響が卓越すること、また拘束圧が高いほど粒子の破碎が起こり易くなること、な

どの理由によるものと考えられる。しかし、図-9に示した各拘束圧に対する直線のこう配の比較から分かるように、 $B(\sigma_c')$ 値の低下の度合は大きなものではない。

さて、式(4)および式(5)を式(3)に代入して整理すると次式が得られる。

$$G_o = 400 \cdot f(e) \cdot \sigma_c'^{0.66} \cdot D_{max}^{(0.21 \sigma_c'^{-0.15})} \quad \text{----- (6)}$$

表-2は、 G_o の実験値と式(6)による推定値を比較した結果である。両者の差はCおよびD試料の一部で若干大きく現れているが、全体的には5%程度に収まっている。したがって、微小ひずみレベルでの剛性率 G_o を式(6)を用いて推定することが可能であるように考えられる。

(5) 提案式の検証

上述の実験結果の整理から、粗粒材(碎石)の G_0 値は間隙比 e と最大粒径 D_{max} を関数として式(6)により推定でき、また規準ひずみ γ_r も拘束圧 σ_c' の関数として表示できることが分かった(式2)。以下にこれらの提案式の精度を検証する。

剛性率 G の非線形性を表すモデルとして Hardin-Drnevich モデルが広く用いられている。

$$G/G_0 = 1 / (1 + r/\gamma_r) \text{ ----- (7)}$$

このモデルによれば、 G_0 および γ_r 値が与えられれば任意のひずみレベルに対する剛性率 G を知ることができる。

図-11は、式(2)および式(6)から γ_r および G_0 値を求め、試料A ($D_{max}=19.1mm$)の $G \sim \gamma$ 関係を推定した結果である。図において推定値を実線で示しているが、拘束圧別に各々の記号で示した実験値と比較して大きな差は生じておらず、本提案式はほぼ妥当なものであると言える。

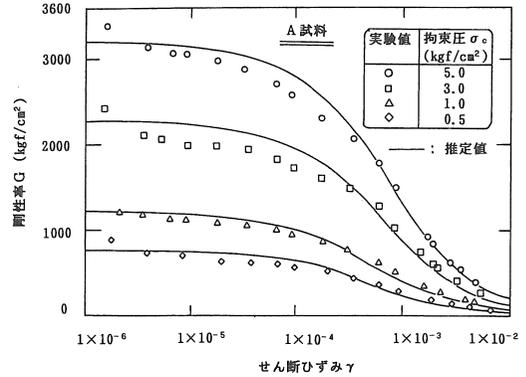


図-11. $G \sim \gamma$ 関係の推定値と実験値の比較

(6) 減衰定数

図-12は、試料E (碎石)の減衰定数 h とせん断ひずみ γ の関係を示したものである。図中実線で示した $h \sim \gamma$ 関係の各拘束圧に対する平均曲線は直径100mmの供試体による結果、破線は同様に50mmの結果である。図を見ると、同一の供試体直径において、 h の値は拘束圧が高いほど小さくなっており、砂や粘土と同一の傾向を示していることが分かる。しかし供試体直径の違いによる影響ははっきりと現れており、小さな供試体による h は $\gamma > 10^{-4}$ の範囲で2~3%低くなっている。

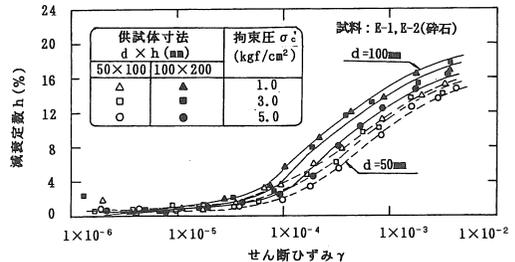


図-12. 供試体寸法の違いと減衰定数 (試料: E-1, E-2)

図-13は、試料の最大粒径が減衰定数 h に及ぼす影響を調べたもので、 $\gamma = 3 \times 10^{-4}$ における $h \sim D_{max}$ 関係を拘束圧別に整理している(試料A~D, $d = 100mm$)。図より、最大粒径の増大に伴って h の値は大きくなっていることが分かる。またこの傾向は高い拘束圧ほど顕著に現れている。

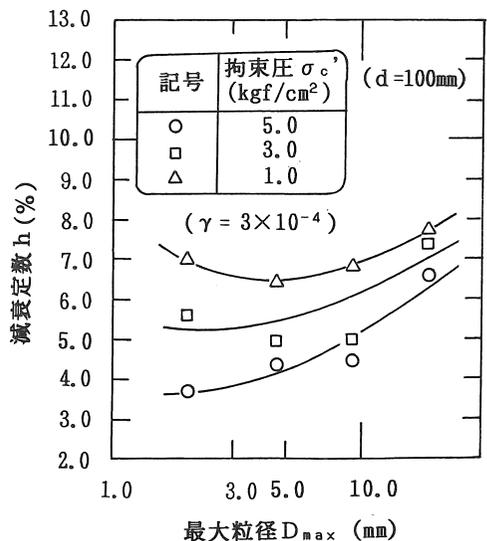


図-13. 減衰定数 h と最大粒径 D_{max} の関係 (試料: A~D)

4. 結論

本実験により得られた主要な結論は次の通りである。

(1) 相似粒度に調整された碎石の微小ひずみ ($\gamma = 10^{-6}$) における剛性率 G_0 は試料の最大粒径 D_{max} に対して両対数紙上で比例関係が認められ、実験式と

して式(3)が提案される。

(2) 碎石のGのひずみ依存性は clean sand の結果の延長上にあり、小さいひずみレベルからGの低下が認められる。また最大粒径 $D_{max} = 2 \sim 20 \text{mm}$ の範囲において、規準ひずみ γ_r は拘束圧を関数として式(2)の形で表すことができる。

(3) 剛性率ほど明確ではないが、減衰定数 h は最大粒径の増大により増大する傾向が認められる。

(4) 提案した剛性率Gの推定手法は粒径の比較的大きな他の実験値との比較において大きな差が認められなかった。従って、相似粒度に調整した小さな供試体の実験結果から実粒度のG \sim γ 関係を推定することの可能性が確かめられた。

(5) 碎石の剛性率および減衰定数は供試体直径の違いによる影響を大きく受ける。

《参考文献》

- 1) 奥村哲夫(1990)：フィルダムの基礎地盤と堤体材料の動的強度・変形特性に関する研究
- 2) 国生剛治・江刺靖行・桜井彰雄(1980)：広いひずみ範囲における粗粒土の動的変形特性と減衰特性、電力中央研究所報告 No. 380002.
- 3) 西尾伸也・玉置克之・町田泰法(1985)：大型三軸試験装置による碎石の動的変形特性、第20回土質工学研究発表会, pp. 603~604.
- 4) Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y. (1978) : Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading, Soils and Foundations, Vol. 18, No.1, pp. 39~56.

(受理 平成 4年 3月20日)