

種々の地盤材料の履歴減衰係数について

On the hysteretic damping ratio of various geomaterials

室蘭工業大学工学部 ○正 員 木幡行宏 (Yukihiro Kohata)
 室蘭工業大学大学院 学生員 佐々木朋子 (Tomoko Sasaki)

1. まえがき

地震時の地盤と構造物の相互作用の検討においては、地盤の変形係数や履歴減衰係数を求めることが必要となる。地盤の変形係数や履歴減衰係数には、ひずみレベル依存性や拘束圧依存性があることは広く知られている。著者らは、種々の地盤に対するせん断剛性比のひずみレベル依存性について、公表されたデータを収集・再整理し、その定式化を行うことによって、限界状態設計法に必要な地盤種別によるせん断剛性比のひずみレベル依存性の表現を試みた¹⁾。本報告では、その際に得られた履歴減衰係数のひずみレベル依存性について再整理し、種々の地盤材料の履歴減衰係数について比較・検討するとともに、せん断剛性比と履歴減衰係数の関係について検討する。なお、データ収集にあたっては、不攪乱試料による繰返し変形特性試験（繰返し三軸試験あるいは繰返しねじりせん断試験）結果を重点的に収集することとした。

2. 履歴減衰係数のひずみレベル依存性

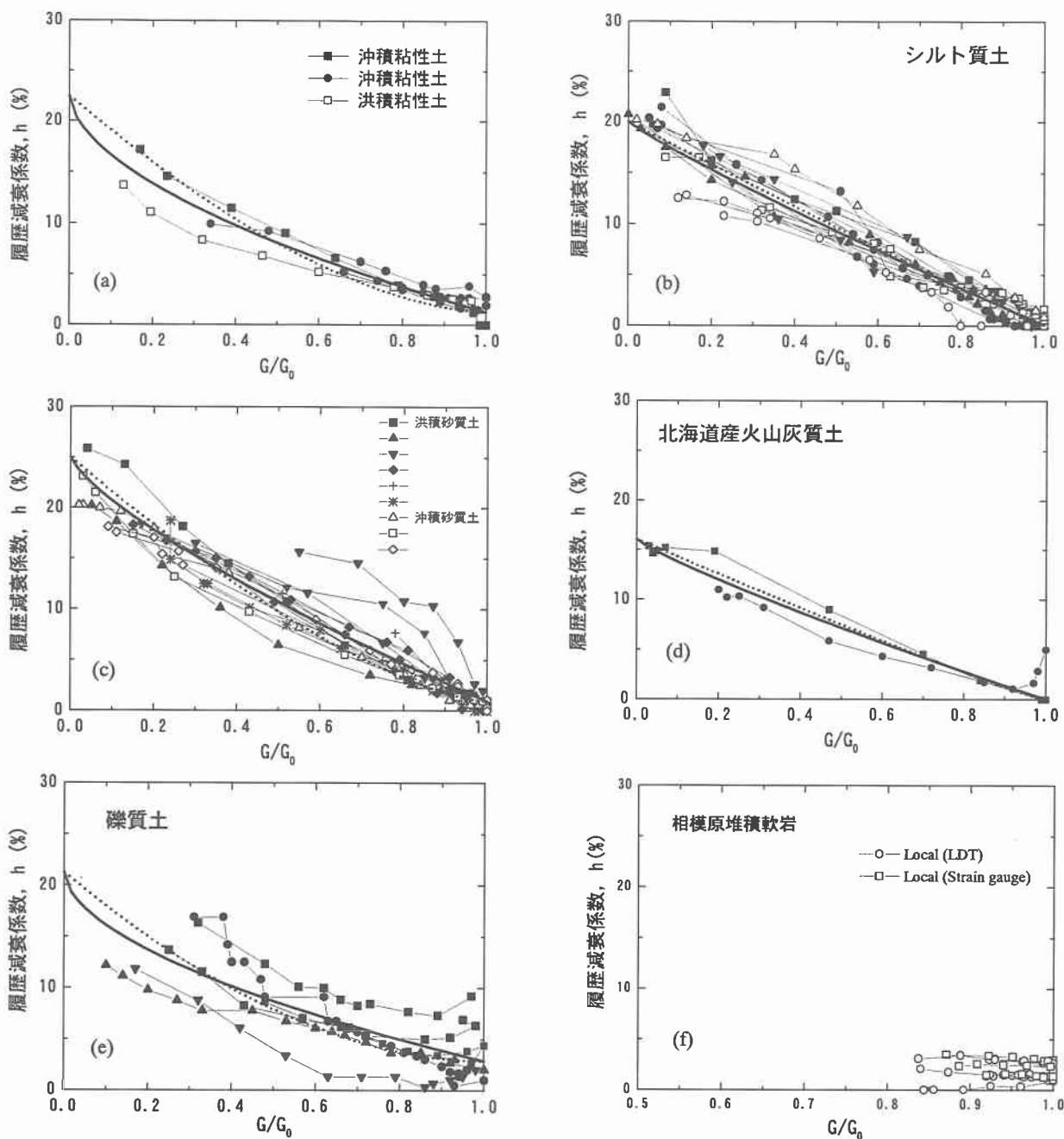
図-1(a)~(f)に、種々の地盤材料に対する履歴減衰係数 h のひずみレベル依存性を示す。一般に、履歴減衰係数に対する影響要因には、ひずみレベル依存性のほかに、拘束圧依存性、載荷周波数依存性および変位量の測定方法や試験方法（三軸とねじり）の違い、粘性土の場合には塑性指数などが挙げられる。

図-1(a)は、沖積粘性土^{2,3)}と洪積粘性土³⁾の $h \sim \gamma$ 関係の比較である。図において、■と□はデータ範囲の平均的な $h \sim \gamma$ 関係を代表的に示した。同一地点での試料（図中、■と□）では、同じひずみレベルで洪積粘性土に比べて沖積粘性土の h のほうが大きい傾向にある。一般に、粘性土の h は、同じひずみレベルで比較すると、塑性指数が大きい粘性土ほど h は小さくなることが知られているが、図-1(a)においても、全般的には、地質年代による違いよりも、塑性指数の違いによる影響が大きいようである。図-1(b)には、シルト質土^{4~6)}の $h \sim \gamma$ 関係を示す。ひずみレベルの増大とともに、 h が線形的に増加する傾向が見られる。図-1(c)は、沖積砂質土^{5,7)}と洪積砂質土^{5,7,8)}の $h \sim \gamma$ 関係の比較である。地質年代による顕著な違いは見られない。 h は、 $\gamma = 0.01\%$ 付近から、ひずみの増加に伴い、増加傾向を示しているが、その増加率は、他の地盤材料に比べて大きい傾向にある。図-1(d)には、北海道産火山灰質土^{9,10)}の例を示す。 γ が $0.01 \sim 0.1\%$ の範囲で、 h の増加率は、砂質土よりは小さく、粘性土よりは大きい傾向にある。 γ が $0.1 \sim 0.3\%$ 程度の範囲で、 h の増加率はさらに大きくなるが、その後は、 h

がほぼ一定の値に収束している。一方、 0.01% 以下では、砂質土や粘性土の h に比べて小さい。図-1(e)は、礫質土^{11,12)}の $h \sim \gamma$ 関係である。データのバラツキが大きいようであるが、これは、収集したデータの試験における拘束圧が異なるためである。他の地盤材料においても拘束圧が異なるデータがあるが、礫質土ほど顕著な差が見られないことから、礫質土の h に及ぼす拘束圧の影響は大きいと考えられる。全体的には、他の地盤材料に比較すると、微小ひずみレベルにおける h が大きい傾向にある。また、ひずみレベルの増加に伴う h の増加率は、他の地盤材料に比べて小さい。図-1(f)は、相模原堆積軟岩¹³⁾の $h \sim \gamma$ 関係である。軟岩の繰返し三軸試験で等方応力状態から繰返し載荷を行う場合、ひずみレベルが大きくなると、上部キャップが供試体上端より離れてしまうために、大ひずみまでの試験は通常、困難である。なお、せん断ひずみは、ポアソン比を 0.5 と仮定し、片振幅軸ひずみの 1.5 倍として算出した。また、軸ひずみは、ベディングエラーの影響がない正確な軸ひずみ測定、すなわち、供試体側面において測定されたものである。図より、微小ひずみレベルから 0.05% 程度までの範囲で、 h は $1 \sim 3\%$ 程度でほぼ一定値を示している。一方、西ら¹⁴⁾によれば、 0.1% 以上のひずみレベルでは、 h は顕著な増加傾向にあると報告されているが、供試体側面での軸変位量測定による三軸圧縮試験では、ピーク時の軸ひずみは $0.2 \sim 0.4\%$ であることや上述したような試験装置に起因する問題から、 0.1% 以上での h の正確な測定は難しく、未解明な部分が多い。

以上より、収集したデータの範囲において、土質種類毎に $h \sim \gamma$ 関係についてまとめると以下のようなものである。

- ①粘性土では、塑性指数の影響を強く受ける。また、他の地盤材料に比べて、 γ が 0.01% 以上で、同じひずみレベルにおける h の値は小さい傾向にある。
- ②シルト質土では、ひずみの増大に伴う h の増加率はほぼ一定である。
- ③砂質土では、地質年代による影響はあまり見られない。 γ が 0.01% 以上で、 h は顕著な増加傾向を示す。また、 h の増加率は、他の地盤材料に比べて大きい。
- ④北海道産火山灰質土では、微小ひずみレベルにおける h は、他の地盤材料に比べて小さいが、 $0.01 \sim 0.1\%$ の範囲では、同じひずみレベルで粘性土と砂質土の中間的な値を示す。
- ⑤礫質土では、 h は拘束圧の影響を強く受けるが、全体的には微小ひずみレベルにおいて、他の地盤材料に比べて大きな値を示す。ひずみの増加に伴う h の増加率は比較的小さい。



図－2 種々の地盤材料における履歴減衰係数とせん断剛性比の関係

表－1 (2)式および(3)式におけるパラメータの値

パラメータ	粘性土	シルト質土	砂質土	北海道産火山灰質土	礫質土
h_0	1.3	0.1	0.95	0.05	2.9
h_{max}	22.5	20.0	25.0	16.1	21.3
(2)式の β	1.65	1.05	1.45	1.1	1.87
(3)式の β	0.56	0.90	0.75	0.85	0.55

図－2 (a)～(f)は、種々の地盤材料に対する履歴減衰係数 h とせん断剛性比 G/G_0 の関係を示したものである。なお、図中の破線は、(2)式によるフィッティングカーブを、実線は、(3)式によるフィッティングカーブをそれぞれ示す。フィッティングにおいては、(2)式と(3)式に対して

h_{max} と h_0 の物理的な意味合いを考慮して、同じ値を用いることとした。また、 h_{max} および h_0 は、それぞれの地盤材料に対する $h \sim G/G_0$ 関係における $G/G_0=1$ および $G/G_0=0$ における h の平均値を採用した。ただし、 h_{max} は、 $h \sim G/G_0$ 関係の平均曲線を $G/G_0=0$ まで外挿して求めた。

表-1には、(2)式と(3)式に対するそれぞれのパラメータの値を示す。

図-2(a)は、沖積粘性土と洪積粘性土のまとめである。 $h \sim G/G_0$ 関係においては、地質年代による違いはあまりみられない。また、 G/G_0 が減少するにつれて、 h は線形的に増加し、 $G/G_0=0.3$ 付近から h の増加率が大きくなる傾向にある。本報告における提案式は、ひずみの小さい範囲では、線形性が卓越し、ひずみが大きくなるとともに、 h の増加率が大きくなる特徴を持つ。したがって、図-2(a)に示すような場合には、(2)式に比べて、 $h \sim G/G_0$ 関係をよく表現し得る。図-2(b)には、シルト質土の $h \sim G/G_0$ 関係を示す。シルト質土の場合には、 $h \sim G/G_0$ 関係がほぼ線形関係にあるため、(2)式と(3)式による違いはあまり見られない。さらに、図中には示していないが、(1)式の適用も十分可能であると考えられる。図-2(c)は、沖積砂質土と洪積砂質土の比較である。図中、▼で示される洪積砂質土のデータは、 G/G_0 が1に近い範囲で h が他のデータに比べて大きい、これは初期せん断による影響と考えられる。このデータを除くと、 $h \sim G/G_0$ 関係に、地質年代の違いは見られないようである。また、 G/G_0 が1~0.6の範囲では、 $h \sim G/G_0$ 関係は線形性が卓越し、その後、 G/G_0 の減少と共に h の増加率がわずかに大きくなっている。したがって、この場合においても、(2)式に比べて、(3)式は $h \sim G/G_0$ 関係をよく表現している。図-2(d)は、北海道産火山灰質土の例である。 $h \sim G/G_0$ 関係における G/G_0 の減少に伴う h の増加率は、軟岩を除く他の地盤材料に比べて小さい。図-2(e)には、礫質土の $h \sim G/G_0$ 関係を示す。 G/G_0 が0.9~1.0の範囲では、 G/G_0 の減少に伴って h は減少し、0.6~0.9の範囲では h はほぼ一定、その後、 G/G_0 の減少に伴い、 h は増加傾向を示す。本報告で収集したデータの範囲では、この傾向は礫質土に顕著であり、このような特徴を表現するには、(3)式よりも(2)式が有利である。図-2(f)は、相模原堆積軟岩の $h \sim G/G_0$ 関係である。 G/G_0 の値が0.85~1.0程度の範囲にしかデータがないため、横軸のスケールを0.5~1.0で示した。また、 G/G_0 の範囲が小さく、この範囲で h はほぼ一定であることから、(2)式および(3)式によるフィッティングは意味がないと考えた。図より、相模原堆積軟岩の場合には、 G/G_0 が0.85程度まで減少しても h が小さい値でかつほぼ一定であることが分かる。

4. まとめ

種々の地盤材料に対する $h \sim \gamma$ 関係および $h \sim G/G_0$ 関係について、公表されたデータを収集・再整理することによって、種々の地盤材料の履歴減衰係数について比較・検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 微小ひずみレベルでの h の値は、北海道産火山灰質土が最も小さく、礫質土がもっとも大きい。
- (2) γ が0.01%~0.1%の範囲における h は、同じひずみレベルで粘性土が最も小さい。また、0.01%以上で砂質土の h は顕著な増加傾向を示す。
- (3) 軟岩の h は、微小ひずみレベルから $\gamma=0.05\%$ の範囲でほぼ一定値を示す。
- (4) 本報告における提案式は、種々の地盤材料に対して、

微小ひずみレベルから大ひずみレベルに至る広いひずみ範囲における $h \sim G/G_0$ 関係をよく表現し得ることが示された。

参考文献

- 1) 木幡行宏、村田修：せん断剛性比のひずみレベル依存性に関する定式化、第55回土木学会年次学術講演会講演概要集、3-A、pp.196-197、2000。
- 2) 澁谷ら：いくつかの沖積粘性土地盤のせん断剛性率（その2）室内繰返し試験による測定、第28回土質工学研究発表会講演集、pp.1039-1042、1993。
- 3) 土山ら：濃尾平野における地盤の動的変形特性のモデル化、第26回土質工学研究発表会講演集、pp.819-822、1991。
- 4) 安田ら：動的変形特性試験における拘束圧の加え方、第28回土質工学研究発表会講演集、pp.899-900、1993。
- 5) 安田ら：地層境界における動的変形特性の深度分布、第29回土質工学研究発表会講演集、pp.771-772、1994。
- 6) 斉藤ら：新潟市周辺平野部における地下深部の地盤特性、第34回土質工学研究発表会講演集、pp.269-270、1999。
- 7) 土山ら：濃尾平野における地盤の動的変形特性のモデル化、第26回土質工学研究発表会講演集、pp.819-822、1991。
- 8) 青木ら：不攪乱砂試料の繰返し変形特性における初期せん断応力の影響、第27回土質工学研究発表会講演集、pp.863-866、1992。
- 9) 塩谷ら：表層が火山灰層より成る地盤の動的変形特性、第25回土質工学研究発表会講演集、pp.837-840、1990。
- 10) 土岐ら：北海道に分布する火山灰の動的変形特性、第27回土質工学研究発表会講演集、pp.943-946、1992。
- 11) 安田ら：凍結砂礫供試体の動的変形特性に及ぼす応力・ひずみ履歴の影響、第27回土質工学研究発表会講演集、pp.867-868、1992。
- 12) 内田ら：不攪乱礫試料と再調整試料の繰返し変形特性の比較、第29回土質工学研究発表会講演集、pp.893-894、1994。
- 13) 土の動的変形定数試験方法基準化委員会：室内繰返し載荷試験による堆積軟岩の変形特性に関する全国一斉試験の実施と試験結果の解析、土と基礎、Vol.42, No.11, pp.89-92、1994。（1999年国際地盤工学会TC29一斉試験結果の追加データを含む）。
- 14) 西ら：泥岩の動せん断剛性率と減衰比、第18回土質工学研究発表会講演集、pp.799-802、1983。
- 15) 国生剛治、本山隆一：等価線形解析の大ひずみレベルへの適用の試み（せん断剛性比、減衰定数のひずみ依存性の定式化）、第33回地盤工学研究発表会講演集、pp.773-774、1998。