

高有機質土の動的変形特性に関する研究

近江 健吾¹・風間 基樹²・渦岡 良介³・仙頭 紀明⁴・森 友宏⁵

¹東北大学大学院博士前期課程 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8759 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail:ohmi@soil1.civil.tohoku.ac.jp

²東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8759 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail:kazama_motok@civil.tohoku.ac.jp

³東北大学大学院准教授 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8759 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail:uzuoka@civil.tohoku.ac.jp

⁴東北大学大学院助教 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8759 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail:nsentoh@civil.tohoku.ac.jp

⁵東北大学大学院博士後期過程 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8759 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail:mori@soil1.civil.tohoku.ac.jp

本研究では、仙台市とその周辺部の3地点において、高有機質土の不攪乱試料を採取し、中空ねじりせん断試験により動的変形特性を求めた。高有機質土の等価せん断剛性比は砂と粘土に比べて弱い非線形性を示した。等価減衰定数は既往の研究と同程度の値になった。また、解析手法として等価線形解析(SHAKE)、全応力解析(双曲線モデル、R-Oモデル)、オンライン実験を用い、地震応答解析を行った。高有機質土の構成モデルとして双曲線モデルは減衰定数が過大評価されること、R-Oモデルにおいては破壊せん断応力を過大に評価することが示された。加えて最大応答値分布は、解析手法によらず高有機質土層の下端より速度、せん断ひずみ、変位が急激に増幅することが確認できた。

Key Words : *highly organic soil, dynamic deformation properties, seismic response analysis, torsional shear test*

1. はじめに

1978年に発生した宮城県沖地震において、仙台市東部の苦竹・卸町周辺に建物被害が集中した。苦竹・卸町周辺には高有機質土が厚いところで5mほど分布しており、この高有機質地盤の増幅特性が建物被害に大きな影響を及ぼしたと考えられる。しかし、東北地方の高有機質土についての動的変形特性について詳細な調査はほとんど行われていない。

一方で、仙台市内の都市化は確実に進んでおり、78年の宮城県沖地震以降に開発された沖積低地では、次の宮城県沖地震で建物やライフラインに大きな被害が発生するものと考えられる。それらの事態に備えて、高有機質地盤の動的変形特性のデータを蓄積し、地震応答を精度よく求めることで地震被害を予測し、被害の低減を図ることが重要である。

本研究では、まず仙台市とその周辺部の3地点において、高有機質土の不攪乱試料を採取し、中空ねじりせん断試験により動的変形特性を求めた。加えて、これまで高有機質土の研究でデータとして数多く蓄積されている、自然含水比、強熱減量、分解度、圧密降伏応力等を得るために物性試験と力学試験を実施した。これらの基本的物性と動的変形特性の関係を求めて、既往のデータとの比較を行い、その相違について考察した。また、試験結果を基にしてパラメータを決定した種々の地震応答解析を行い、高有機質土の動的変形特性が表層地盤の地震応答に及ぼす影響と解析手法の違いが応答に及ぼす影響について考察した。

2. サンプリング試料の物理・力学的性質

表-1 サンプリング試料の物性

Sample ID	Sampling Point	Depth (m)	w_n (%)	L_i (%)	H^* (%)	ρ_t (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	e	C_c	P_c (kPa)
SCG-1	Shichigo	0.5-0.8	202-431	37.7	90.1	1.063-1.165	0.244-0.371	2.154	6.17	3.44	29
SCG-2	Shichigo	0.5-0.8	206-512	32.4	67.2	1.038-1.114	0.233-0.288	1.994	5.43	2.32	37
HND-1	Hinode Park	2.4-2.7	84-474	9.25	73.6	1.388-1.504	0.726	2.485	1.50	0.31	89
HND-2	Hinode Park	3.4-3.7	209-251	48.7	93.4	1.063-1.138	0.372	1.916	5.34	3.70	68
HND-3	Hinode Park	4.4-4.7	186-206	18.0	88.1	1.178-1.183	0.406	2.363	4.74	2.80	52
HND-4	Hinode Park	5.4-5.7	102-221	32.8	81.1	1.155-1.165	0.391	2.121	5.93	4.15	69
EBI-1	Shibata.E	3.1-3.4	336-375	38.4	92.7	1.100-1.128	0.247	2.138	8.22	4.35	26
EBI-2	Shibata.E	4.1-4.4	123-279	17.2	97.3	1.169-1.300	0.325	2.403	3.30	1.26	33

*水洗法による

(1) サンプリング方法

サンプリングは仙台市若林区七郷地区2地点，仙台市宮城野区日の出町公園1地点，柴田町E地区の計4地点で行った。七郷地区は，仙台市の中でも高有機質土が地表面に近い深度より現れている地域である。そこで刈り取りの終了した水田の表土を取り除き，30cmの塩化ビニル管を人力で押し込む方法でサンプリングを行った。日の出町公園と柴田町E地区では，固定ピストン式シンウォールサンプリングを行った。なお，サンプリングした試料は，シンウォールサンプリング試料はチューブを30cmに切断し，塩ビ管サンプリング試料とともに乾燥を防ぐために十分湿らせた布をかぶせて温度変化の少ない場所で保管した。

(2) 試験結果

採取試料に対して基本的な物性試験と定ひずみ圧密試験を実施した。定ひずみ圧密試験は，ひずみ速度0.015(%/min)の条件で行った。それら各種試験から得られた結果を表-1に示す。表-1によると自然含水比 w_n は100-500%の広範囲にわたり，北海道の高有機質土¹⁾と比較すると分解度 H に差は見られず，強熱減量 L_d (有機物含有量に相当する)²⁾はやや低い値を示した。



(a) 動的変形特性試験後の供試体



(b) 動的変形特性試験後の炉乾燥供試体

図-1 (a) (b) 供試体の状況

3. 動的変形特性

(1) 中空ねじり繰返しせん断試験

サンプリングした試料の動的変形特性を求めるために，中空ねじり繰返しせん断試験を行った。供試体は外形7cm，内径3cm，高さ10cmの中空円筒である。試料は試料押し抜き器を用いて慎重に取り出し，中空円筒供試体の作成は地盤工学会基準(JGS0550-1998)のトリミング法に準拠した。供試体の排水を促すために供試体外周面に1cm幅のろ紙を8枚，同様に内周面に4枚用いた。試験後の供試体および炉乾燥供試体の状況は図-1のようになった。供試体は炉乾燥に伴い最大50%程度の高さに収縮した。

表-2 試験結果一覧

Sample ID.	Mark	σ'_c (kPa)	w_c (%)	G_0 (MN/m ²)	OCR
SCG-2	●	20	359	1.58	1.9
SCG-2	■	50	250	3.53	—
SCG-1	◆	20	360	1.54	1.5
SCG-1	▲	50	183	3.28	—
HND-1	○	35	85	7.93	2.5
HND-2	□	35	197	3.90	1.9
HND-3	◇	35	183	3.94	1.5
HND-4	△	35	191	3.64	2.0
EBI-1	▼	10	351	2.40	2.6
EBI-2	▽	13	250	2.46	2.5

メンブレンの材質はラテックスとし、厚さは0.3mmである。供試体下部ペデスタルと上部キャップに埋め込まれた金属製リブは、等間隔に6枚、高さが0.2cm、厚さが0.14cmである。各供試体に対して背圧は15kPa、拘束圧は表-2に示す条件で行った。七郷地区の試料では、正規圧密と過圧密状態の2種類の有効拘束圧とし、その他の試料では有効上載圧に等しい圧密圧力とした。せん断ひずみレベルは $2.5 \times 10^{-3}\%$ から15%まで12~14段階に増加させた。各ひずみ履歴は三角波とし、非排水条件で1段階につき11波载荷した。今回の実験でB値は0.84~0.96となった。背圧自体が低いこと、繊維内の空気を完全に水に置き換えることが難しいためややB値が低くなったと考えられる。

(2) 試験結果

試験結果から求めた等価せん断剛性比 G/G_0 とせん断ひずみの関係を図-2に示す。なお、比較のため、安田と山口の式²⁾で求めた砂および粘土の結果を併記した。砂は $D_{50}=0.2\text{mm}$, $\sigma'_c=50\text{kPa}$, 粘土は $D_{50}=0.0075\text{mm}$, $\sigma'_c=50\text{kPa}$ として求めた。図-2より、七郷の高有機質土は拘束圧が低いほど、等価せん断剛性比が小さくなった。また、七郷と日の出町公園の高有機質土の試験結果は、砂と粘土と比べて弱い非線形性を示していることがわかる。HND-1の試料の試験は、他の日の出町公園の試料と比較して砂分が多かったため、非線形性が強く現れたと考えられる。全体として、拘束圧が低いほど非線形性が強くなる傾向が見られる。ゆえに、柴田町E地区の高有機質土の非線形性がやや強く現れた要因として拘束圧の低さが関係していると思われる。

図-3は試験結果から求められた等価減衰定数 h とせん断ひずみの関係である。等価減衰定数 h はせん断ひずみが増加するにつれて大きくなっていくことがわかる。その大きさは、砂や粘土と比較して小さい。また、拘束圧の違いによる明確な差は確認することができないが、概ね既往の研究による高有機質土の等価減衰定数 h に近い値を示している。

初期等価せん断剛性 G_0 と圧密後の含水比 w_c の関係と図-4に示す。図-4から圧密後の含水比が高いほど初期等価せん断剛性が低下する傾向が見られる。また、今回の実験結果から得られた初期等価せん断剛性の低下傾向は能登らによる既往の研究とほぼ同程度である。

能登と熊谷は、北海道の高有機質土を用いて圧密後の含水比 $w_c(\%)$ と有効拘束圧 $\sigma'_c(\text{kPa})$ を用いた初期等価せん断剛性 $G_0(\text{MN/m}^2)$ の実験式を提案した¹⁾。なお、この式は正規圧密状態の試料から求められた式である。図-5に今回の実験結果を能登と熊谷の予測式で正規化した値と過圧密比OCRの関係を示す。図より、OCRが増加するにつ

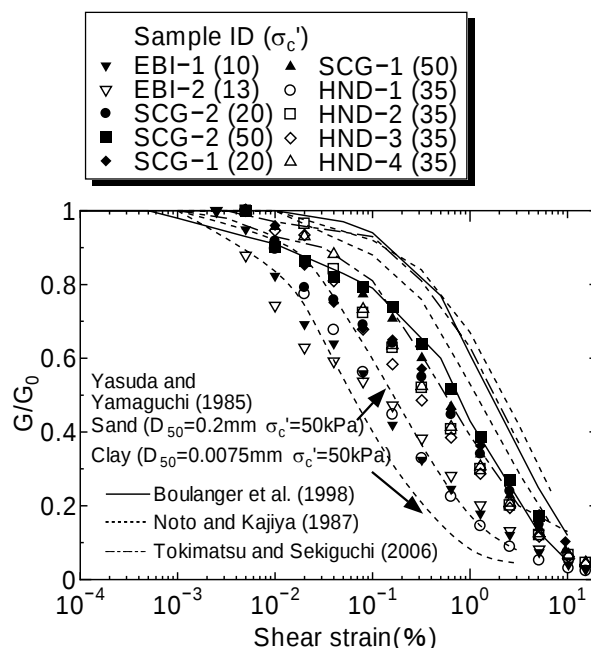


図-2 等価せん断剛性比 G/G_0 とせん断ひずみの関係^{2,3,4,5)}

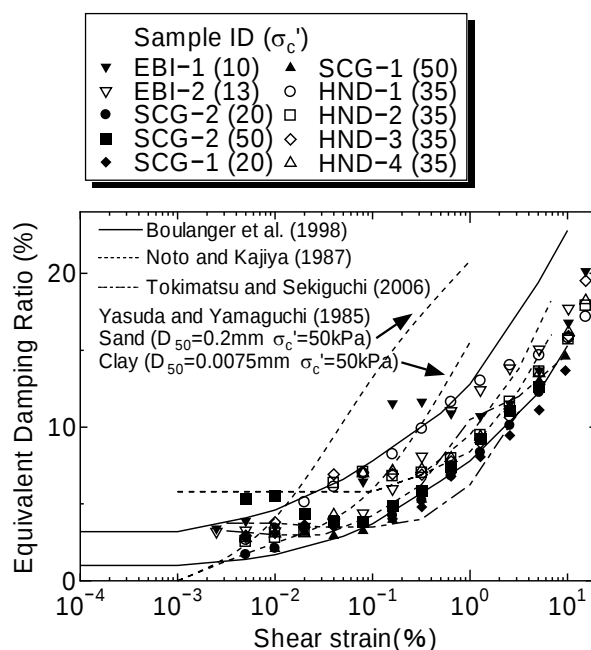


図-3 等価減衰定数 h とせん断ひずみの関係^{2,3,4,5)}

れて、縦軸の値が増加していく傾向が見られる。この傾きを最小二乗法によって求め、能登と熊谷の式に過圧密の影響を考慮する項として追加した式を以下に示す。

$$G_0 = 13.7 w_c^{-0.67} \sigma'_c{}^{0.55} OCR^{0.48} \quad (1)$$

なお、データのばらつきが大きいことやデータ数が少ないことから、継続して研究を進めデータを蓄積し、更な

表-3 解析モデルとパラメータ

Layer No.	Soil Type	Depth (m)	Thick. (m)	γ_t (g/cm ³)	V_s (m/s)	G_0 (tf/m ²)	γ_r	α	r	$G-\gamma$ $h-\gamma$
1	B	1.0	1.0	1.60	180	5289	2.0×10^{-3}			S004
2	B	2.0	1.0	1.60	180	5289	2.0×10^{-3}			S004
3	Pt	3.0	1.0	1.39	77	841	1.0×10^{-3}	1.5	1.9	HND-1
4	Pt	4.0	1.0	1.14	59	405	4.8×10^{-3}	0.5	1.9	HND-2
5	Pt	5.0	1.0	1.18	58	405	3.5×10^{-3}	0.7	1.9	HND-3
6	Pt	8.0	3.0	1.17	58	402	3.5×10^{-3}	0.7	1.8	HND-4
7	Gs	11.2	3.2	1.80	270	13390	8.9×10^{-4}			S002
8	M	12.4	1.2	1.70	230	9177	3.1×10^{-3}			C004
9	Gs	17.5	5.1	1.80	300	16530	8.9×10^{-4}			S003
10	M	20.0	2.5	1.70	210	7650	3.1×10^{-3}			C004
Base	R	—	—	2.00	400	—	—	—	—	—

地下水位 GL-2m

る検討が必要であると考えられる。

4. 地震応答解析

(1) 解析方法

対照地点は宮城野区日の出町公園内である。既往のボーリングデータ⁶⁾と今回行ったボーリング調査から表-3のように深さ20mの地盤モデルを作成した。高有機質土層(Pt)の物性パラメータは室内土質試験ならびに動的変形試験から決定し、その他の物性パラメータは文献⁶⁾を参考に決定した。地下水位はGL-2mに設定した。用いた解析手法は等価線形解析(SHAKE)と2種類の構成モデルを用いた全応力解析(双曲線モデルとR-Oモデル)、第6層のPt層を中空ねじりせん断試験装置を用いた要素実験層に置き換えたオンライン実験である。双曲線モデルとR-Oモデルは相似比2のMasing則を適用した。オンライン実験の第3~5層はR-Oモデルを、それ以外の層は双曲線モデルとした。試料は日の出町公園深さ3.2~3.4mから採取した不攪乱試料で32kPaの等方圧密圧力を作用させた。圧密後の含水比は250%であった。解析深度と採取深度が異なる理由は、第6層の試料が不足していたことPt層の湿潤密度が水に近いため深度の違いが拘束圧に及ぼす影響が小さいことを考慮したためである。供試体は前述した方法と同じ方法で作成した。

第3~6層のPt層の動的変形特性について、双曲線モデルとR-Oモデルによる計算結果と実験結果の比較を図-6に示す。双曲線モデルは、約1%を超えるせん断ひずみでは減衰定数を過大に評価していることがわかる。R-Oモデルは、せん断剛性比と減衰定数を概ね表現できていることがわかる。ただし、せん断ひずみが1%を越えたあたりから、実験値よりもせん断剛性比を過大に評価する傾向がある。

入力地震波を図-7に示す。この地震波は、仙台市被害想定⁹⁾で今回の調査地点に最も近いメッシュで用いられた地震波で第三紀層上部($V_s=700\text{m/s}$)における上昇波(E)

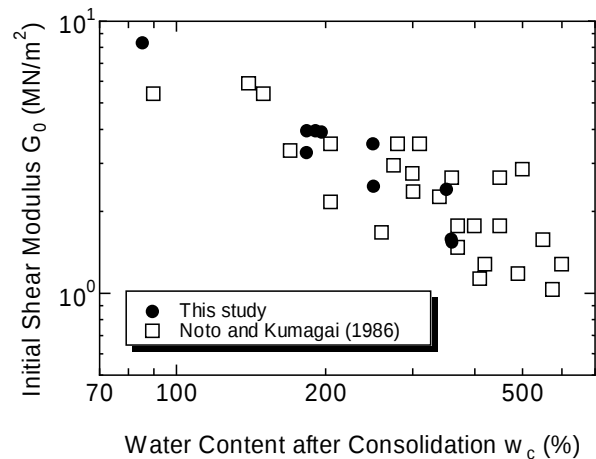


図-4 初期等価せん断剛性 G_0 と圧密後の含水比 w_c の関係¹⁾

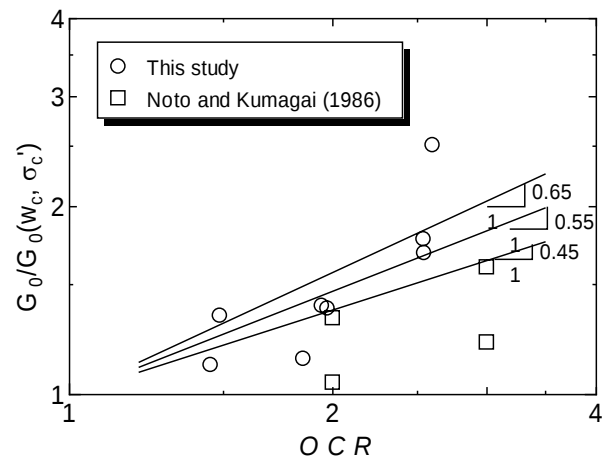


図-5 能登と熊谷の式で正規化された G_0 とOCRの関係¹⁾

である。全応力解析とオンライン実験ではOS法⁷⁾を用いて時間積分を行い、積分時間間隔は0.01秒とした。レーリー減衰は剛性比例型とし、 $\beta=0.001975$ と設定した。

(2) 解析結果

図-8に最大応答値の深度分布を示す。いずれの手法もPt層の下端であるGL-8mより速度と変位が大きく増幅していることがわかる。せん断ひずみは第6層で最も大きくなり、双曲線モデルでは約4%、以下はオンライン実験、等価線形解析、R-Oモデルの順に小さくなった。地表面変位は最も大きい双曲線モデルで約14cm、最も小さい等価線形解析の9cmと比較して1.6倍の差が開いた。最大加速度は最も大きいR-Oモデルの約450Galと最も小さい双曲線モデルの約180Galで2.5倍もの顕著な差が見られた。最大せん断応力についても同様の傾向が確認された。これらの差が生じた原因として、構成モデルの特性と図-6に示した実験値のフィッティング精度が考えられる。すなわち、双曲線モデルはせん断ひずみが無限大になると、せん断応力はある上限値に収束するのにに対し、R-Oモデルはせん断応力が無限大になる性質があるためである。また、図-6において、せん断ひずみが1%を越えたあたりから双曲線モデルの減衰定数がかなり過大評価されていること、両モデルによるせん断剛性比の評価の違いが影響しているものと考えられる。

図-9は地表面における速度応答スペクトル($h=0.05$)を示したものである。比較のために入力波の速度応答スペクトルも示した。図より、周期1秒と2.2秒付近において、解析手法の違いが顕著に現れている。1秒付近ではR-Oモデルの応答が最も大きく、双曲線モデルは最も小さい。一方で、2.2秒付近ではその差が小さくなるものの、逆にR-Oモデルが小さくなっていくことがわかる。

図-10には第6層における応力-ひずみ関係を示す。ここでオンライン実験の応力-ひずみ関係が最も実地盤の

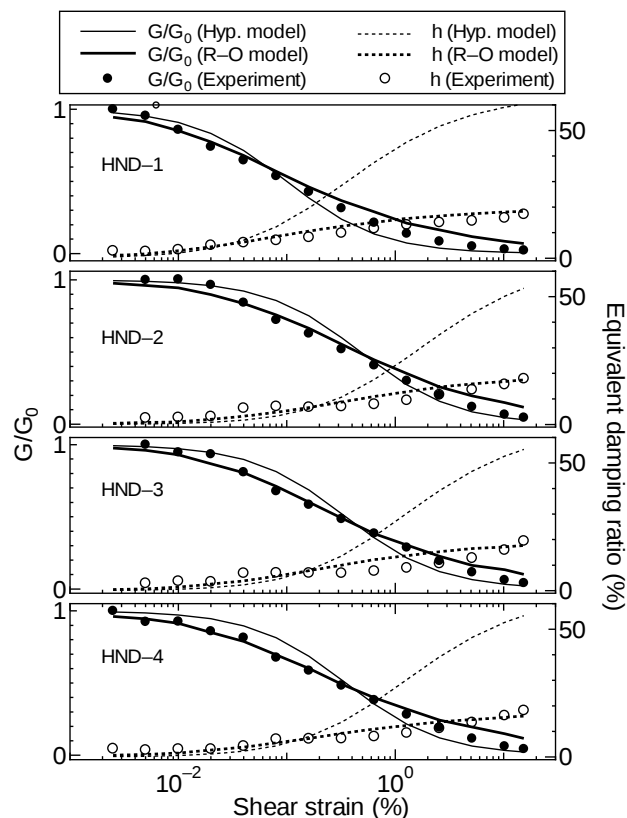


図-6 動的変形特性

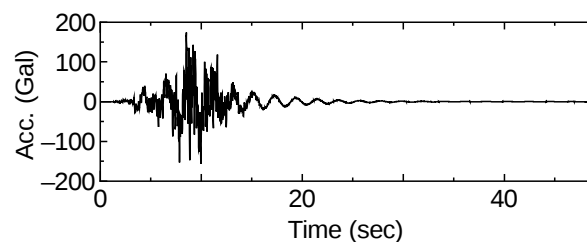


図-7 入力地震波⁶⁾

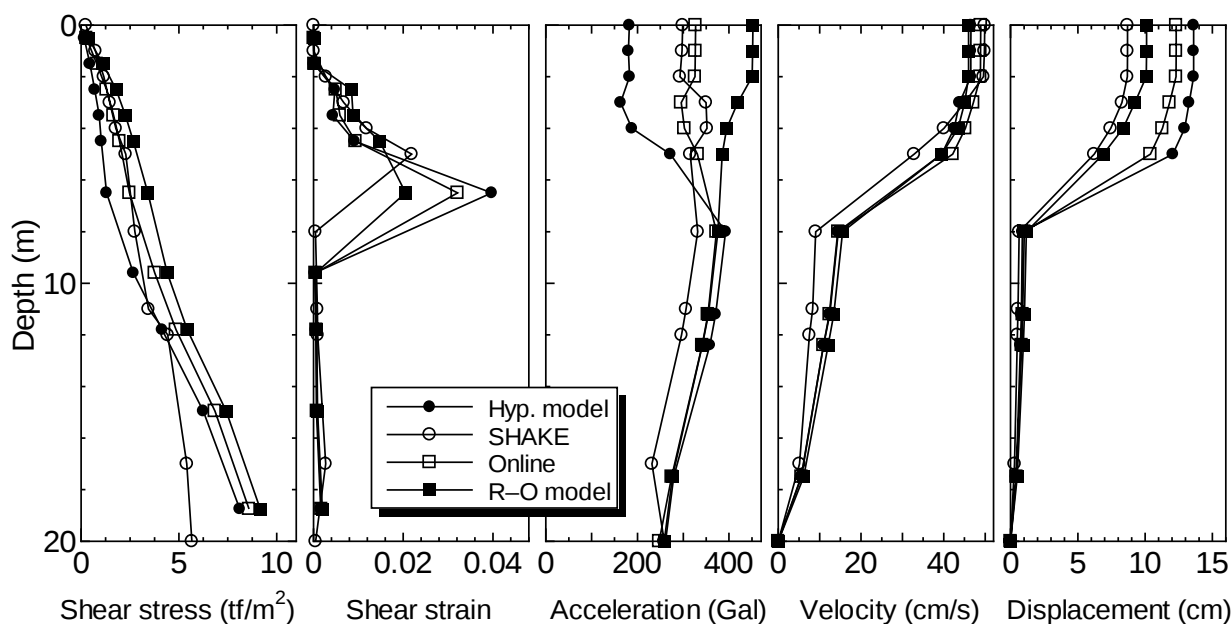


図-8 最大応答値の深度分布

それに近いと考えるれば、R-Oモデルは剛性を過大に評価しているものの、高有機質土の応力-ひずみ関係の特徴をよく表していると言える。一方で、双曲線モデルは減衰を過大に評価しているためにオンライン実験の結果と大きく異なる挙動を示している。この双曲線モデルの挙動を改善するためには、高有機質土の非排水せん断強度(τ_d)を考慮して規準ひずみ $\gamma_r(=\tau_d/G_0)$ を決定する必要があるものと考えられる。

5. 結論

仙台市内および周辺地区の高有機質土の動的変形特性を中空ねじり繰返しせん断試験から求めた。また、試験結果を用いて種々の地震応答解析ならびにオンライン実験を行った。以下に得られた結論を示す。

- 等価せん断剛性比とせん断ひずみの関係は砂と粘土に比べて弱い非線形性を示した。一方、既往の研究と比較すると非線形性がやや強く表れ、拘束圧が低いほど等価せん断剛性比は小さくなった。
- 等価減衰定数は砂と粘土よりも小さく、既往の研究と同程度の値となった。
- 初期等価せん断剛性 G_0 は過圧密履歴の影響を受けていることがわかった。能登と熊谷の G_0 の実験式に過圧密の影響を考慮する項を追加した実験式を提案した。
- 双曲線モデルは中ひずみレベル以上のせん断ひずみで減衰定数を過大に評価し、加速度とせん断応力を過小評価した。
- R-Oモデルでは高有機質土の応力-ひずみ関係をよく表現できているものの、大ひずみレベルのせん断ひずみでせん断応力を過大に見積もり、応答加速度も過大評価した。

謝辞：本研究は(社)東北建設協会「建設事業に関わる技術開発支援制度」による研究助成を頂きました。サンプリングに際し、美土里ネットひがしの木村勇治氏、(株)テクノ長谷の加藤彰氏、高橋一雄氏にご協力頂きました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 能登繁幸，熊谷守晃：泥炭の動的変形特性に関する実験的研究，土木試験所月報，No.393，pp.12-21，1986。

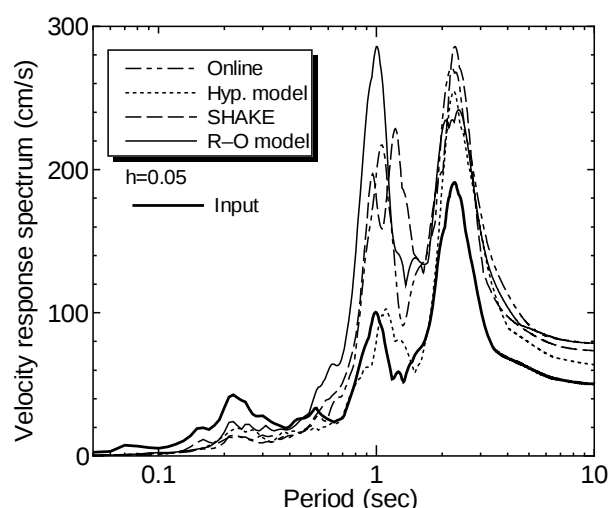


図-9 地表における速度応答スペクトル

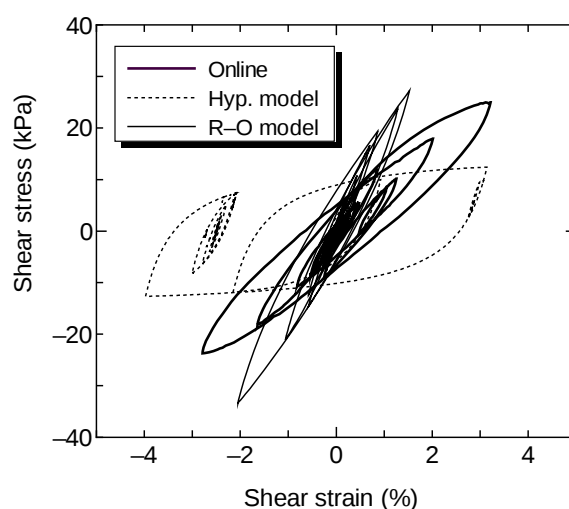


図-10 第6層における応力-ひずみ関係

- 2) 安田進，山口勇：種々の不攪乱土における動的変形特性，第20回土質工学研究発表会，pp.539-542，1985。
- 3) Boulanger, R. W., Arulnathan, R., Harder Jr., L. F., Torres, R. A., Driller, M. W. :Dynamic properties of Sherman Island peat, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 124(1), ASCE, pp.12-20, 1998.
- 4) 能登繁幸，加治屋安彦：泥炭の動的変形特性に関する実験的研究（第2報），土木試験所月報，No.406，pp.14-24，1987。
- 5) 時松孝次，関口徹：K-NET・JMA小千谷の強震記録に見られる土の非線形性状と室内試験から求めた動的変形特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第603号，pp.63-68，2006。
- 6) 仙台市：仙台市地震被害想定調査報告書，2002。
- 7) 中島正愛，石田雅利，安藤和博：サブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法，日本建築学会構造系論文集，第417号，pp.107-117，1990。

(2007.06.29 受付)