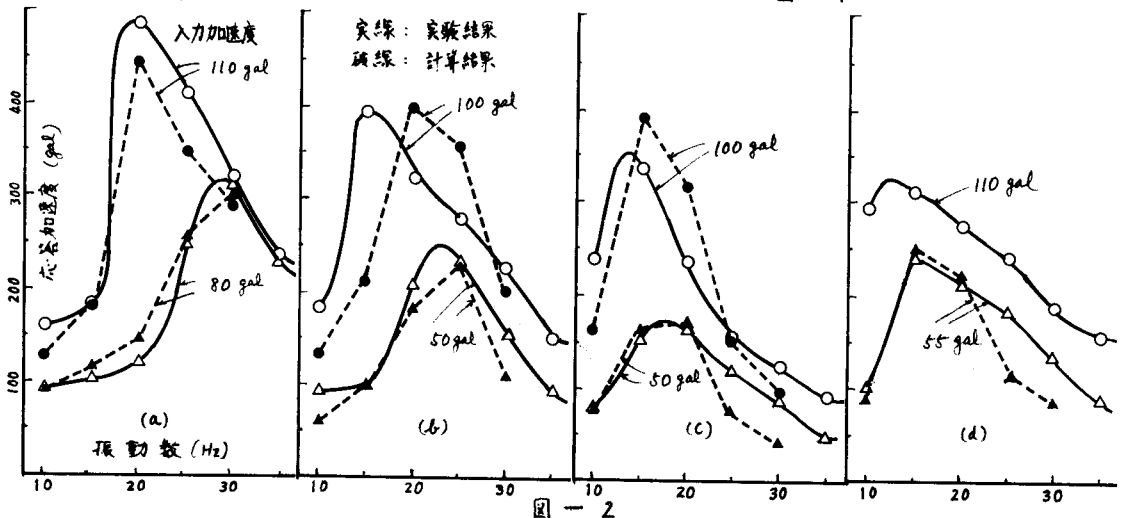
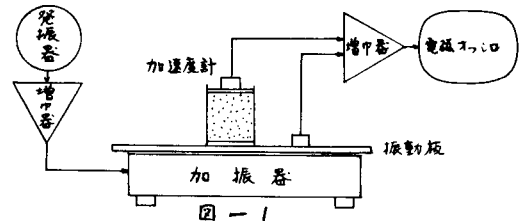


I. まえがき 土構造物の動的挙動は、近年、重要な問題として各方面で検討が進められている。ただし、その多くは、土質材料の弾塑性からなされていて、粘弾性を基礎とするものは少ない。その理由は、土質材料が示す動的な非線形挙動に対し、多数に時をも含んだ構成方程式の確立が容易でないことにあるようである。

本報告は、せん断振動をうける砂柱の応答特性を再現できる非線形粘弾性モデル、および構造解析に用い得るようなこれを一般化した構成方程式を与えるものである。

II. 砂のせん断振動実験 実験に供した砂は、天然砂と碎石とを混合調整したもので、最大粒径4.76mm、均等係数1.6を有する。この材料を木製型枠に入れた内径10cmのゴムスリーブにつめ、乾燥密度1.8を目標に締めを行ない、高さ10cm、15cmの試験片を作製した。実験は、乾燥砂と湿潤砂の両方のについて行なった。湿潤砂の実験には、まず所定の乾燥砂試験片をつくり、それに加水して得られた飽和状態に近いものを試験片とした。試験片への加振は、電磁式振動小型加振器(Model 113, Electro-Series)によった。装置の概要を図-1に示す。入力正弦波のみとし、入力加速度振幅を約30, 50, 100 galの3種とし、それぞれ5 Hzから50 Hzの間と片道約25秒で往復掃引加振した。測定量は加振板および試験片上面での加速度のみである。試験片上面にはスリーブのゆるみを防止する目的で蓋板をとりつけた。加速度計をこの上に設置した。蓋板と加速度計の重量は147.5 grであった。なお、試験片の上面に1137 grの重量を加えた実験も行なった。図-2は試験結果の一部である。(a), (b), (c)は乾燥砂の実験結果であり、特に高さ9.7 cm, 14.3 cm, 9.9 cm, 上載重量147.5 gr, 147.5 gr, 1284.5 grである。(d)は高さ14.3 cm上載重量147.5 grの湿潤砂の実験結果である。図の縦軸には応答加速度をとっているため、直接比較することはできないが、換算すれば、香川氏の実験結果*に酷似していることがわかる。これらの図に共通する骨格架左傾の特徴から、砂の復元力特性の主体は軟化バネであること、また入力増大に対して応答倍率が減少していることから、乱流減衰を有することがわかる。



Ⅲ. 非線形粘弾性材料モデルの応力・ひずみ関係式. 上に述べたような非線形バネと非線形減衰と同時に有するような粘弾性モデルで、陽な応力・ひずみ関係式が得られるものは数例にすぎない。いくつかの組合せを検討した結果、実験値にかなりよい近似を示すモデルに図-3の非線形三要素 Voigt モデルを得た。他のモデルの場合と同様、このモデルについても、直列要素の非線形特性には応力と変数とする関数と、並列要素の非線形特性にはひずみまたはひずみ速度と変数とする関数を用い、陽な関係式が導ける。この図中の各要素の特性と

バネ G_M の特性: $\tau = G_M \cdot g \left(\left| \frac{\tau}{G_M} \right| \right) \dot{\gamma}$

バネ G_N の特性: $\tau' = G_N \cdot S(\dot{\gamma}_2) \dot{\gamma}_2$

減衰 μ の特性: $\tau'' = \mu \cdot t(\dot{\gamma}_2) \dot{\gamma}_2$

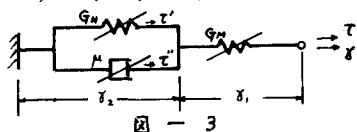


図-3

によりあらわし得るものとすれば、図のモデルの応力・ひずみ関係式は(1)式のようになる。

$$\tau = \frac{G_M G_N g \cdot S \left(\left| \frac{\tau}{G_M} \right| \right) \left(\dot{\gamma} - \frac{\tau}{G_M g} \right) + \frac{G_M g}{\left(1 + \frac{\tau}{g} \frac{dg}{d\tau} \right)} \dot{\gamma} - \frac{G_M g}{\mu \cdot t \left(\left| \frac{\tau}{G_M} \right| \right) \cdot \left(1 + \frac{\tau}{g} \frac{dg}{d\tau} \right)} \tau \quad (\text{複号で之の順}) \quad (1)$$

非線形特性に: $g \left(\left| \frac{\tau}{G_M} \right| \right) = e^{-\delta \left| \frac{\tau}{G_M} \right|}$, $S(\dot{\gamma}_2) = 1 + \beta |\dot{\gamma}_2|$, $t(\dot{\gamma}_2) = e^{-\alpha |\dot{\gamma}_2|}$ の関数を用い、せん断加振される柱の振動解析を行なった結果が図-2に●▲と破線で記入されている。解析に用いた材料定数を一括して表-1に示す。異なる入力に対しても、同一の材料定数を用いて望ましい解を得たのは図-2(c)の場合のみである。(a),(b)に対しては定数の値を僅かに変更して、実験曲線に近い共振曲線をつくることができたが、湿潤砂(d)の曲線に対しては、解のあてはめは困難であった。このことは、乾燥砂には図-3のモデルの適用が可能であるが、湿潤砂にはこれでは復元力機構あるいは減衰機構に不足があるものと考えてよい。

表-1

	入力	α	β	δ	G_M	G_N	μ
	$\frac{g}{cm^2}$				$\frac{kg}{cm^2}$	$\frac{kg}{cm^2}$	$\frac{kg \cdot sec}{cm^2}$
(a)	110	1100	100	500	4.0	2.7	0.075
	80	1200	50	500	4.0	3.5	0.075
(b)	100	900	50	75	5.0	4.5	0.07
	50	1100	50	75	5.5	4.5	0.09
(c)	100						
	50	860	15	50	6.1	3.5	0.075
(d)	55	1100	100	200	6.2	3.8	0.038

さて、(1)式の形のみでは、二次元、三次元の構造解析に用いることはできない。構造解析には一般応力・ひずみ関係式が与えられていなければならない。諸等と著者(1)式の一般化式をよめて図-3の非線形粘弾性材料の構成方程式を示す。材料を等方とする。そうすれば、応力・ひずみの偏量成分、体積成分のかわりに(1)式と同様の関係が成立する。 G_M, G_N, μ とせん断バネ係数、せん断減衰係数、 S, t, g とそれらの非線形特性関数、 K_M, K_N, ν と対応する体積バネ係数、体積減衰係数、 φ, ψ, θ とそれらの非線形特性関数とすれば、構成方程式は次式によって与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_{ij} &= 2 G_M \cdot S \cdot \left(\dot{\epsilon}'_{ij} - \frac{\sigma'_{ij}}{2 G_M} \frac{1}{g} \right) + 2 \mu \cdot t \cdot \left\{ \dot{\epsilon}'_{ij} - \frac{1}{2 G_M g} \left(\dot{\sigma}'_{ij} - \frac{\sigma'_{ij}}{g} \frac{\partial g}{\partial \sigma'_{ij}} \dot{\sigma}'_{ij} \right) \right\} \quad (i, j = 1, 2, 3) \\ \sigma_{kk} &= 3 K_N \cdot \varphi \cdot \left(\dot{\epsilon}_{kk} - \frac{\sigma_{kk}}{3 K_N} \frac{1}{\theta} \right) + 3 \nu \cdot \psi \cdot \left\{ \dot{\epsilon}_{kk} - \frac{1}{3 K_N \theta} \left(\dot{\sigma}_{kk} - \frac{\sigma_{kk}}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma_{kk}} \dot{\sigma}_{kk} \right) \right\} \quad (k = 1, 2, 3) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 S, t はVoigt鎖に生ずるせん断ひずみ強度の関数、 g は全応力に対するせん断応力強度と $2 G_M$ との比の関数、同様に、 φ, ψ はVoigt鎖に生ずる体積ひずみ絶対値の関数、 θ は全応力に対する主応力和絶対値と $3 K_M$ との比の関数である。

Ⅳ. あとがき. 本研究は関西電力株式会社の委託研究に対する成果の一部である。研究の実施には関係の皆様から貴重な御意見、御協力を頂戴した。心からの謝意を表する。また、実験および計算結果の整理には、山下雅弘君に負うところが多い。併せて謝意を表する。

※ 香川泉幸、地盤モデルとしての砂の振動性状について、土木学会論文報告集 No. 275, 1978-7