

京都大学工学部 正員 赤井 浩一
 京都大学大学院 学生員 堀 正幸
 同 同 岡 二三生

1. はしがき

土質材料のもつ動的特性と波動伝播現象からとらえるべく shock-tube を用いた土中の波動伝播実験を行ない、その装置、実験方法ならびに実験結果について第1報¹⁾で報告した。本報告では前回から引き続き行なってきた実験の結果と土試料のもつ物性と関連させて考察し、また粘弾性理論の立場から若干の解説をつけ加えている。

2. 実験の概要

実験装置と方法についてはすでに第1報で述べているので省略する。用いた試料は砂質ロームであり、砂分 70 %, シルト分 29 %, 粘土分 1 % の粒径分布である。また標準突き固の試験による最適含水比は 12 % であり、その最大乾燥密度 ρ_{max} は 1.89 g/cm^3 とある。前報では同じ試料で、含水比を 5~7 % として実験を行なったが、今回は主に 11~13 % の高含水比のもの、気乾状態のものについて試験した。なお、11~13 % の試料では見かけ密度を $1.7 \sim 2.1 \text{ g/cm}^3$ の範囲内で調節した。したがって、飽和度は 50~90 % の広範囲にわたっている。

入力としての shock-tube で得た圧力波のピーク値はとの試験でも 1.3 kg/cm^2 とした。この圧力レベルで応力波伝播によって生じるひずみレベルは $10^{-4} \sim 10^{-3}$ とあった。

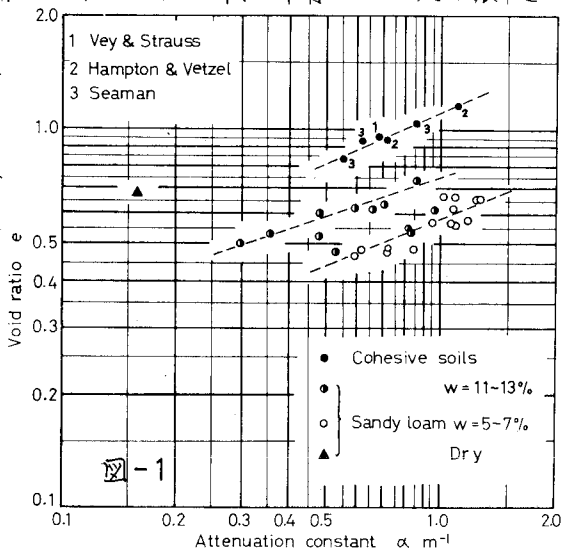
3. 実験結果

a. 応力の減衰 土中を伝播する波動は距離と共に次第に波動エネルギーを熱に変換することによってその振巾を減少していく。すなわち、土中を伝播する応力波によってひきおこされる土の運動状態を考えると上述の波動の減衰機構として次のような因子を考えることができる。(1)土粒子間の摩擦、(2)土粒子骨格および水を含めた土の粘性、(3)土粒子と水、空気との相互作用。いま、応力振巾をエネルギーの指標と考えることにすると上の因子をすべて包含して応力の距離に対する減衰は次式で表現できる。これは波動問題の解析上の手法が実験によって確かめられたという点で極めて重要と思われる。

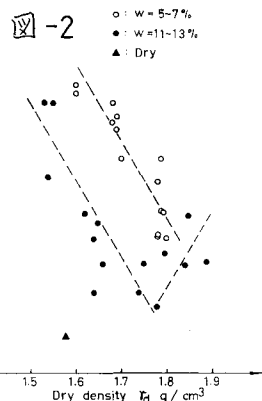
$$\Sigma' = \exp(-\alpha x) \quad (1)$$

ここに、 Σ' : 表面ピーク応力で除した無次元化応力、 α : 減衰係数 (m^{-1})、 x : 伝播距離 (m)。

減衰係数 α は波動の性質と土の種類、物性(面げき比、含水比など)に依存する。shock-tube で与える波動の性質は一定であるから、結局 α は砂質ロ



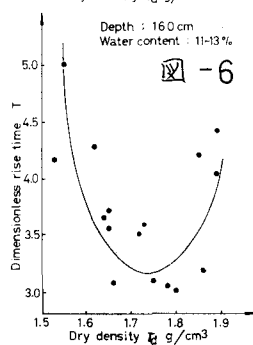
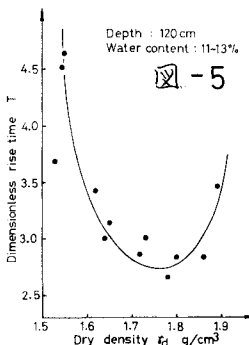
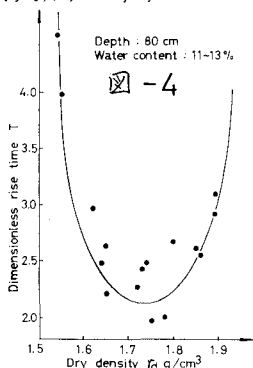
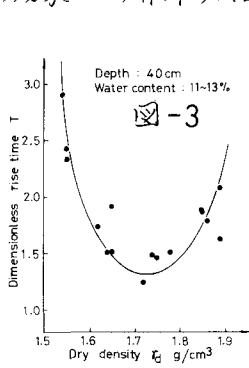
一ムの物性によることになる。図-1は崩れき比 e と α の関係が含水比とパラメーターにして示されたものである。同時に粘性土に関する他の研究者による同種の実験結果から(1)式による整理をしたものもプロットされている。図より粘性土と砂質ロームとによって、また同じ砂質ロームでも含水状態によってその傾向が異なる。前者の両の相違は、上述の減衰機構の因子(1)と(2)による差である。すなわち粘性土は土の持つ粘性の影響が優性であり、砂質ロームでは土粒子間摩擦による影響が優性である。一方、後者の相違は因子(3)によるものである。したがって、乾燥状態での試料では水と土粒子の相互作用による影響がなくなり、同じ崩れき比の湿潤土に比べ減衰は極めて微小になっている。含水比 $w = 11 \sim 13\%$ は最適含水比を含んでおり、 α と乾燥密度 ρ_d の相関関係が明瞭になると思われる。図-2は図-1の結果を α と ρ_d の関係で再プロットしたものである。これより、 $w = 5 \sim 7\%$ のものは ρ_d の増加とともに土粒子骨格の強化をもたらし、 α が減少する。一方、 $w = 11 \sim 13\%$ のものは $\rho_d \div 1.75 \text{ g/cm}^3$ までは同じ傾向であるが、さらに ρ_d が増加すると再び α が増加し土粒子構造骨格が軟弱となる傾向を示している。最適含水比の $\rho_d = 1.89 \text{ g/cm}^3$ であるからそれより若干低い ρ_d (約 1.75 g/cm^3)で波動伝播時のエネルギー吸収が最小であることが理解できる。



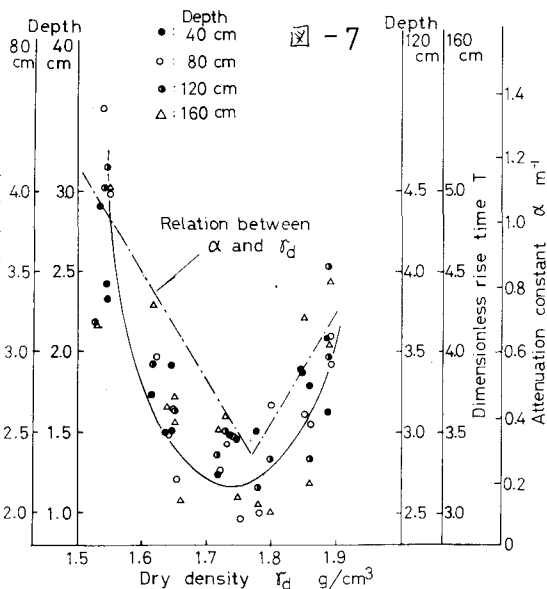
b. 波形の変化 shock-tube で与えられる圧力波形は立ち上がりが鋭く、その後、指数関数的に減少していくものである。その継続時間は約 20 msec である。ところが、波動となって土中に伝播していくにつれて応力の振巾が減衰するだけでなく波形そのものが変化する。すなわち、丸味を帯び、立ち上がり時間も継続時間も増加していく。この現象は土の非線形特性(応力、ひずみレベルに依存する非線形性)と、土粒子と水、空気の間で相互作用に起因するものと考えられる。これについては4.で若干ふれることにし、ここでは、実験結果をもとに考察する。結果を定量的に評価するために次式で無次元化立ち上がり時間 T を定義する。

$$T = \frac{t_x}{t_0} \quad (2)$$

ここに、 t_0 : 入力波形の立ち上がり時間(実験を通じての平均: 2.4 msec), t_x : 各深さでの応力波形の立ち上がり時間。すなわち、 T が大きいほど波形の変化(崩れ)が大であり、小さいほど小である。また T は伝播距離とともに直線的に増加した。つぎに試料の各深さ (40 cm , 80 cm , 120 cm , 160 cm) における ρ_d と T の関係がそれぞれ図-3～図-6に示されている。ただし、結果は含水比 $w = 11 \sim 13\%$ のものである。これらの図より $\rho_d = 1.7 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$



で最も T が小さく、波形の変化が小さくあり、それ以上でも以下でも波形の変化が大となることわがかる。図-7 はさきの4つの図を重ね合わせ、同時に α と δ の関係を記入したものである。すなわち、波形の変化と波動の減衰との間には δ に関して全く同じ傾向にあることが理解できる。すなわち、土粒子と水、空気の間で行なわれる相互作用がエネルギー吸収に及ぼす影響と波形の変化に及ぼす影響は全く同じであり、しかも、 $\delta_{\max}$ より若干小さい δ ($1.758/\text{cm}^3$) において土粒子構造骨格の軟弱化と上述の相互作用に関する変曲点が存在することが推測される。なお、気乾状態にある試料では波形の変化が湿潤土に比べ極めて小さくあり、深さ160cmにおいてさえ $T=1.8$ であった。



C. 波速 前報で報告したように $w=5\sim 7\%$ の試料については間げき比の減少とともに波速が増加し、しかも拘束圧との関係については Hardin, Richardt の研究にあるように両対数紙上く直線関係という結果を得た。しかし、不飽和土中を伝播する波動の速度はなお複雑である。波速と間げき比の関係を飽和度をパラメーターにプロットしたのが図-8である。これより、各飽和度に注目すると間げき比の減少とともに波速は増加するが、同じ間げき比に注目すると飽和度の小さいほど波速が大きいという結果である。このことは不飽和土の場合、土粒子と水とのカップリングにより速度は減少するという事実を示唆するものである。波速と減衰係数の関係は、粘弾性理論の立場から考察する場合重要である。図-9は、 $w=11\sim 13\%$ の試料について α と C の関係でプロットしたものである。図-1と図-8で説明したことから土粒子骨格の強化に伴う減衰係数の減少と波速の増大、または、その逆の現象を定性的にこの図から読みとることができる。粘弾性理論によると減衰係数 α 、円振動数 p 、位相速度 C 、対数減衰率 δ_c の間に次の関係式が成立する。

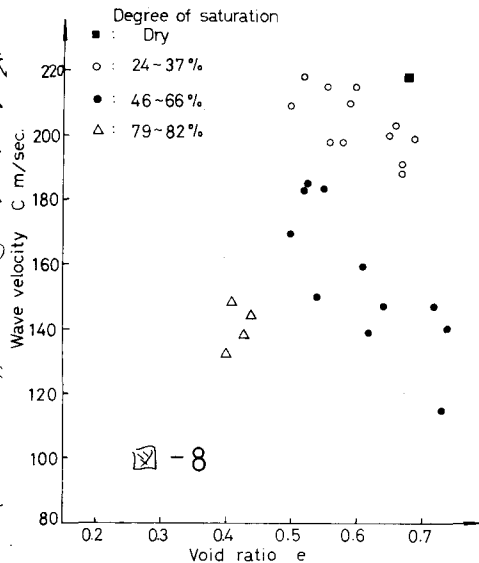
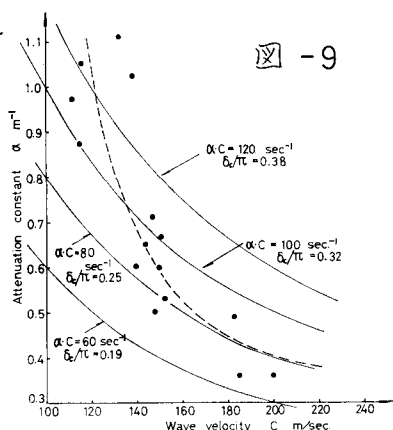


図-9は、 $w=11\sim 13\%$ の試料について α と C の関係でプロットしたものである。図-1と図-8で説明したことから土粒子骨格の強化に伴う減衰係数の減少と波速の増大、または、その逆の現象を定性的にこの図から読みとることができる。粘弾性理論によると減衰係数 α 、円振動数 p 、位相速度 C 、対数減衰率 δ_c の間に次の関係式が成立する。

$$\alpha = \frac{p}{2C} \cdot \frac{\delta_c}{\pi} = \frac{p}{C} \cdot h \quad (3)$$

ここに、 h : 減衰定数 ($= \delta_c / 2\pi$)。図には、 $\alpha C = 60, 80, 100, 120 \text{ sec}^{-1}$ の曲線を記入すると同時に式(3)において、 $p = 2\pi f$ (f :



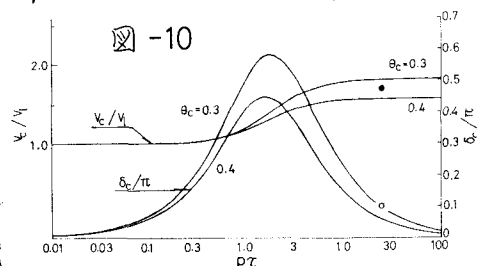
振動数 (c.p.s.) = $2\pi \times 100$ を代入して求めた $\delta c/\pi$ の値を計算しておいた。これより、実験結果は $\alpha \cdot c = \text{一定}$ の曲線に乗るのではなく、土の物性によって変形特性が異なる。すなわち、同一の圧カレベルに対してむしろ圧カレレベルが異なるために、 $\delta c/\pi$ あるいは減衰定数 δ が変化することによって種々の $\alpha \cdot c$ の値をもつことになる。

4. 考 察

不飽和土としての砂質ロームの試料内に伝播する波動特性をその物性との関連で述べてきたが、土のもつ種々の特性を数学的表現するに耐える理論は少ない。M. A. Biot は、土粒子とその間けきを飽和している水との間に相互力があるとしていわゆる多孔性物質内の波動特性を導いている。しかし、さらに一般的に不飽和土中の波動特性に関する理論的研究は皆無といって過言でない。筆者らは、これまで不飽和土中を波動が伝播する際に生じる上で述べてきたような種々の各相間の相互作用の結果、現象論的には粘弾性材料の挙動を呈するとして線型粘弾性理論の立場から考察とすすめてきた。力学モデルとしては、土の体積変化を弾性、偏差応力、偏差ひずみ間に spring-Voigt モデルを用いて波動特性を導いた。その結果、それは Biot の導いた多孔性物質内の波動特性と同一のものであることがわかった。位相速度 V_c と円振動数 p の関係、対数減衰率 δc と p の関係はそれぞれ次式で与えられる。

$$\frac{V_c}{V_s} = \sqrt{2} / \left[\sqrt{\frac{1 + \theta c^2 \tau^2 p^2}{1 + \tau^2 p^2}} - \frac{1 + \theta c \tau^2 p^2}{1 + \tau^2 p^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\frac{\delta c}{\pi} = \sqrt{2} \frac{V_c}{V_s} \left[\sqrt{\frac{1 + \theta c^2 \tau^2 p^2}{1 + \tau^2 p^2}} - \frac{1 + \theta c \tau^2 p^2}{1 + \tau^2 p^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$



ここに、 V_s : ゼロ振動数での位相速度、 θ_c : 無限大およびゼロ振動数での位相速度の2乗の比、 τ : 遅延時間。上式の計算例 ($\theta_c = 0.3, 0.4$) が図-10に示されている。土の振動数領域での対数減衰率の傾向が図-10の形になることはすでに報告した²⁾。気乾状態の砂質ロームの試料による波動伝播実験から得た結果を用いて上述の数学モデルの考察を行なう。減衰係数 δ から求めた $\delta c/\pi$ は 0.11 となり図-10には白マルでプロットされており、 $\theta_c = 0.3 \sim 0.4$ と考えられる。一方、波速 $V_c = 218 \text{ m/sec}$ であり、同一の物性をもつ試料について側方拘束した状態で静的圧縮試験を行なった結果、弾性変形係数は 270 kg/cm^2 となった。この係数に相当する波速 V_s は 127 m/sec であるから $V_c/V_s = 1.7$ を得て黒マルで図にプロットしてある。やはり、 $\theta_c = 0.3 \sim 0.4$ で説明がつく。位相速度も対数減衰率も入力振動数によって変化する。したがって、複雑な入力波形をもつ波動では、含まれる振動数成分によって波速と減衰が異なり、伝播過程に波形の変化と減衰が生じることになるが、これについては現在考慮中である。つぎに土の変形特性は線形ではなくひずみレベルでの非線形性が生じる。例えば、図-7より今回の実験でのひずみレベル $10^{-4} \sim 10^{-3}$ の範囲で $\delta c/\pi$ は 0.19 ~ 0.38 あるいは減衰定数 δ は 0.095 ~ 0.19 と変化している。すなわち、土中の波動特性は土のもつ時間依存性とひずみレベル依存性に特徴づけられ、前者は上記の式(4)、(5)で、後者は式中に表われる θ_c で表現できるのではないと思われる。

参考文献 1) 赤井, 坂, 安藤, 瀬上, "Shock-tubeを用いた土中の波動伝播実験" 土木学会 第26回年度学術講演会, 概要集 1971.

2) 赤井, 坂, "線形粘弾性内および多孔性物質内の波動特性の比較考察" オワ同土工学会研究発表会, 1972.