

III-44 Shock-tube を用いた土中の波動伝播実験

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

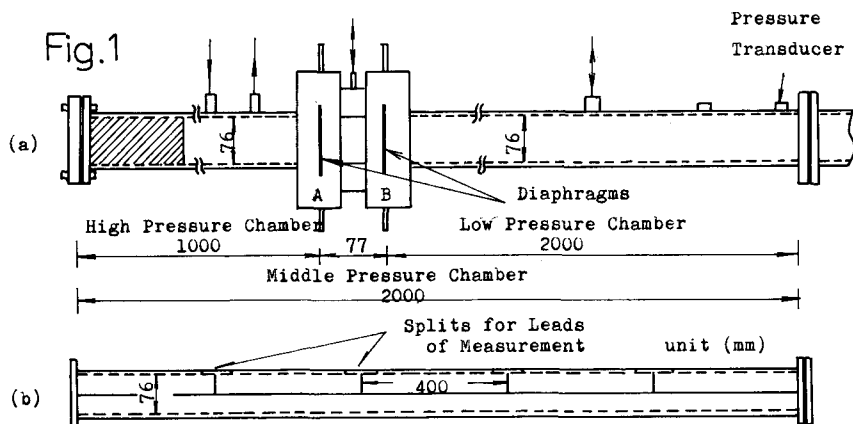
〇安藤 信夫

霜上 民生

1. まえがき 地震波の震源から地表面までの伝播過程における波動特性の研究、あるいは土が応力波に対して影響をおよぼす減衰特性の研究、ならびに急速载荷による土中の波動効果を含めた土の動的挙動を調べる上に、一次元応力波伝播問題の研究は重要な意義を有している。従来の一次元応力波伝播実験では、供試体ロッドの一端を錘により打撃し、パルス応力を加え、ロッド内を伝播する応力をピックアップするという手法が多く用いられてきた。しかし、打撃による表面圧力は、安定したパルス波形が得られない、応力レベルの調整がむづかしいなどの問題点があった。一方、今回衝撃载荷装置として用いた Shock-tube では安定した波形をもつ衝撃波が得られ、またその圧力レベルの調整も容易であるなどこの種の実験の载荷装置としてすぐれたものである。

2. 実験装置

(1) Shock-tube 本実験に用いた Shock-tube の形状と寸法を Fig. 1 (a) に示す。これは、窒素ガスにより作動する 2 段隔膜方式のものである。すなわち、Shock-tube は 2 枚の隔膜 A, B により高压、中压、低压の 3 室に隔てられた鉄管から成る。ここで、Shock-tube の作動過程を簡単に説明する。まず、高压、中压、低压の各室に高压ガスを吸入しその圧力をそれぞれ所定の圧力 p_1, p_2, p_3 ($p_1 > p_2 > p_3$) にセットする。例えば $p_2 = p_1 / 2, p_3 = 0$ のときを想定する。(実際の実験もこのような圧力条件で行なわれた。) この場合、各室を隔てているアルミニウムの隔膜は一定の破壊圧力 p_R により破壊し、 $p_1 > p_R > p_2 = p_1 / 2$ の関係が保たれるようにセットする。この状態においては各室間の圧力差はそれぞれ $p_1 / 2$ であって p_R より小さいため隔膜は破壊しない。次に中圧室の圧力を抜き去ると高压室と中圧室の圧力差は p_R を越え隔膜 A が破壊し、ほとんど同時に隔膜 B も破れ急激な高压ガスの膨張が衝撃波となり低压室に伝播される。このさい低压室の長さが管の内径の 10 倍以上あれば、一様な衝撃波を得ることができる。また隔膜 A, B には厚さ 0.05 mm, 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm のア



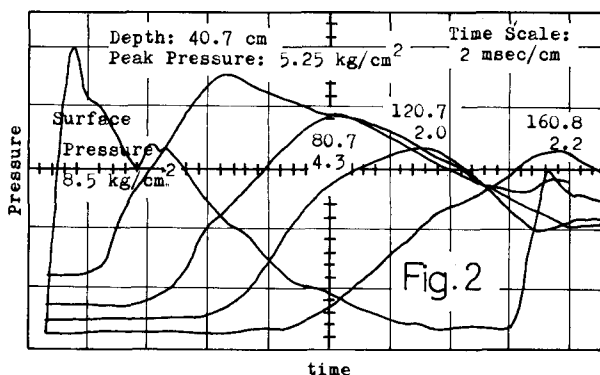
ルミ板が用いられた。

(2) 土供試体部分 低圧室の末端に接続される土供試体部分の形状と寸法はFig.1(b)に示されるように内径76mm, 長さ2mである。このように長い供試体を用いるのは、土中を伝わる応力波が供試体の最終端(反力端)で発生する反射波の影響をできるだけ除外するためと、波速の観測精度を向上させるためである。この供試体部分は取り外しが可能な5つのセグメントからなり、実験用に製作した長さ40cm, 内径74mmの特殊モールドで突固めた土試料を挿入しやすいように考慮されている。供試体部分の鉄管の内面は十分研磨されており、土供試体にはテフロンシート(厚さ0.1mmと0.4mm)を2重に巻き、管の内面での摩擦を減じ、できるだけ正確な拘束一次元状態をつくり出すようにしている。各セグメントの頂部に設けた切欠きは、土中に埋め込んだ各種ピックアップのリード線を引き出すためのものである。

3. 実験方法と結果

土試料として砂質ロームが用いられた。この実験シリーズにおいて試料の含水比は5~7%とほぼ一定に保たれ、供試体作成時に突固め回数を調節することにより、見かけ密度として 1.7 g/cm^3 , 1.8 g/cm^3 および 1.9 g/cm^3 の3種類が使用された。これより間けき比を求めると、それぞれ0.66~0.67, 0.56~0.58 および 0.47~0.49であり、いずれもほぼ一定の間けき比が保たれた。

供試体の衝撃端に作用する衝撃圧力は、低圧室の末端から5cmの距離の点に取りつけられた圧力変換器によって観測される。Fig.2はこの表面圧力と供試体内各深さの点における応力をシンクロスコープで記録した一例である。Shock-tubeにより得られる表面圧力波形はFig.2からも知れるように、衝撃面を含んで0.6~1.4msecで急激に立ち上がり、最大圧力に達したのち指数的に減衰してゆく。したがって、最大圧力 σ_0 に達したときからの時間を t とすれば、表面圧力はほぼ次の形に近似することができる。



$$\sigma(0, t) = \sigma_0 \exp(-\alpha t) \quad (t: \text{sec}) \quad (1)$$

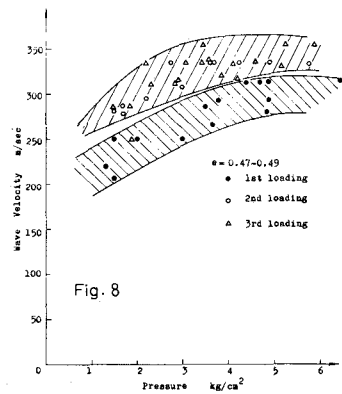
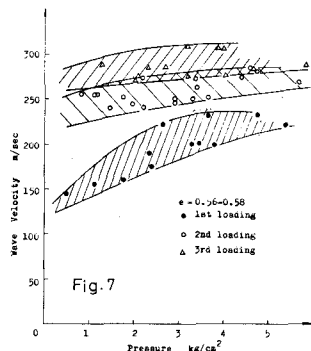
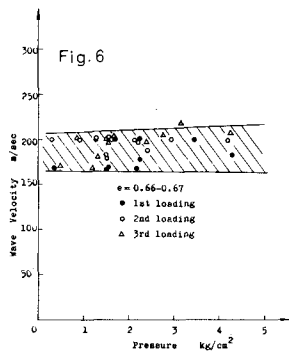
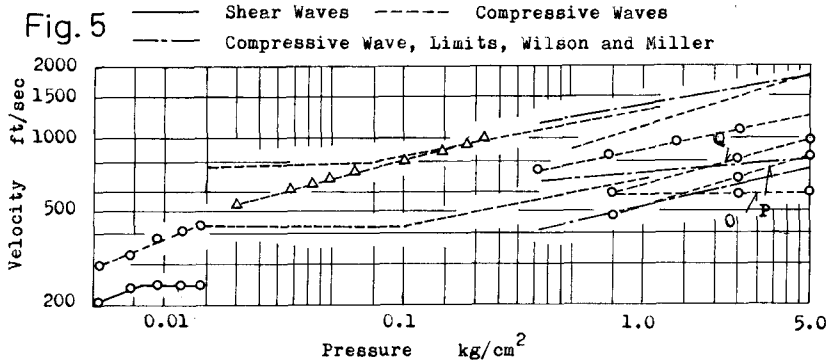
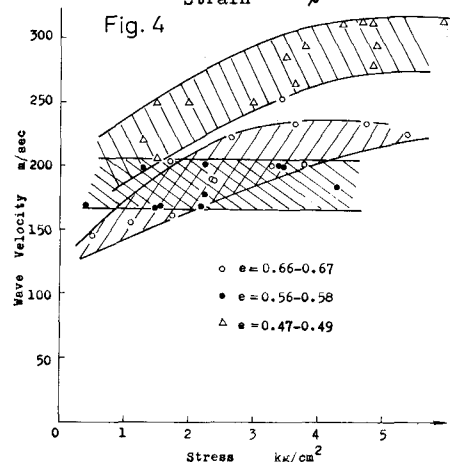
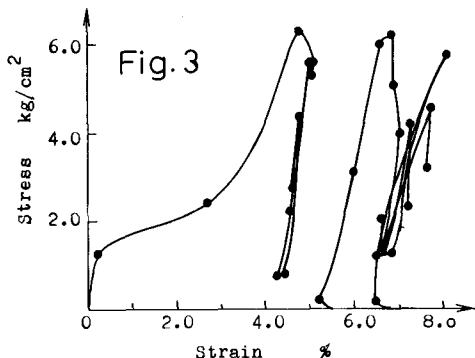
ここに、 α は減衰パラメーターであり、表面圧レベルによって異なるが実験を通じて140~250の値であった。応力の大きさによる土中の応力波伝播特性を調べるために表面での最大圧力 σ_0 は、約 $2 \text{ kg/cm}^2 \sim 8 \text{ kg/cm}^2$ まで7段階に分けられた。さらに繰り返し载荷による効果を調べるために1つの供試体につき3回の繰り返し载荷が行なわれた。

Fig.2のようなシンクロスコープによる観測結果は、次の3点について考察された。(a) 応力波の波速 (b) 応力波の伝播とともに生じる波形の変化および応力の減衰 (c) 応力波伝播時に生じる土の応力-ひずみ履歴。(c)については、土中の1つの測点について応力と同時に新たに工夫された静電容量式⁽¹⁾の土中ひずみ計によりひずみの観測も行ない動的応力-ひずみ曲線を得たのであるが、現在、さらにひずみ計自身の精度を検討中であり、ここではFig.3にその一例を掲げるにとどめる。

(a) 波速 応力波の wave front の波速が、距離と到達時間とから求められた。従来、土中を伝わる波動の波速は、周波数、拘束圧力、振巾、土の固けき率など種々の要素に依存することが知られており、Hardin と Richart は多くの条件の下で、共振法により土中の弾性波の速度を求めている²⁾。今回の実験では、特に圧力の大きさ、固けき比による波速の変化に注目して結果が整理された。

Fig. 4 は横軸に各固けき比において得られる応力と、縦軸にその点における波速をとって固けき比をパラメータとしてプロットしたものである。それより、応力波の波速は、応力の増加とともに大きくなり、かつ、土の固けき比が減少するにつれて大きくなることがわかった。しかし、固けき比が 0.66~0.67 の結果については、応力の増加による波速の変化は見られず、200 m/sec 前後のほぼ一定の波速であった。前述の Hardin らは多くの研究者が実験より得た結果を、拘束圧力と波速に関する両対数紙上にプロットしてまとめた。Fig. 5 にその結果が示されている。図中の O, P, Q は Fig. 4 の結果を再プロットしたものである。

O は固けき比 0.66~0.67, P は 0.56~0.58, Q は 0.47~0.49 である。その際、軸応力が拘束圧力としてプロットされている。これより、一次元拘束状態における土中の応力波の波速は、これま



で共振法やパルス法で求められてきた波速と同じ傾向にあることがわかった。次に Fig. 6, 7, 8 は繰り返し载荷による波速の変化を示すものであり、間げき比が 0.66~0.67 の場合は、繰り返し载荷によっても波速の変化はないが、0.56~0.58, 0.47~0.49 の間げき比のものについては、繰り返し载荷によって波速がわずかに増加する。これらの結果は波速が土の動的時の応力-変形特性と密接な関係にあることを示唆するものであり、今後の課題に残されている。

(b) 応力の減衰 前述のように供試体表面での圧力レベルの大きさによる影響を観察するためにいくつかの表面圧力が用いられた。しかし、ピーク応力 σ_p の距離による減衰の様子は、無次元化応力 $\Sigma' (= \sigma/\sigma_p)$ で整理すればそれほど表面応力 σ_p の大きさには依存しないことがわかった。そこですべての実験結果の平均をとってプロットしたのが Fig. 9 である。

この図から明らかなように、供試体の間げき比が小さいほど、応力の減衰は小さい。また Fig. 10 は Fig. 9 を半対数紙上にプロットしなおしたものであるが、これより、距離によるピーク応力の減衰はほぼ指数関数的であると認められる。すなわち、無次元化応力 Σ' は

$$\Sigma' = \exp(-\beta x) \quad (2)$$

で近似することが許されよう。ここに β は減衰係数であり、各間げき比に応じて Fig. 10 に記入した値を持つ。これらの値と間げき比を両対数紙上にとってプロットすると Fig. 11 が得られ、この実験の範囲内では直線的である。

4. あとがき 本報告では、土中を伝播する応力波の波動特性と土の物性との関連性を見出すべく初めて実施した Shock-tube 実験について述べた。土のような多相混合体内の波動伝播挙動はいまだ不明な点が残されている。ここに述べた実験もごく限られた条件下のものであるが、この種の問題の解決に Shock-tube 実験が大きな役割を果たす可能性を持っていることが見出された。

Shock-tube の設計と製作にあたっては本学部航空工学科・神元五郎教授の有益な指導と助言をいただいた。ここに感謝の意を表すものである。(参考文献) 1) 堀, 安藤; 土木学会関西支部年次学術講演会 (S46.5) 2) Hardin & Richart; ASCE, Vol 89, No. SM1, 1963, pp. 33-65

