

III-48 低速度ホプキンソン棒法の問題点

東海大学工学部 正員 森田 定市
 " " 宇都 一馬
 " " 赤石 勝

1. よえがき

材料の圧縮試験において材料の力学的性質は、ヒズミ速度によって影響を受け、土についても静的荷重を受ける場合にくらべ変形抵抗が大きくなることは、一般によく知られた事実である。

このような土の動的挙動を明らかにするために数多くの高速圧縮試験が試みられているが、計測器が高速現象をとらえうる特性を備えていること、また高速圧縮試験に付随する固有の難点⁽¹⁾であると言われる材料の弾性限度付近に含まれる誤差を、いかに縮小するかという問題⁽²⁾について、なお検討すべき点が残されていると思われる。

このような見地から、著者は、金属材料や高分子材料の高速圧縮試験に数多く用いられ、高速現象の応答特性良好な実験手法であると言われているHopkinson split-bar technique (以下ホプキンソン棒法と呼ぶ。)による土の高速圧縮試験について研究してきたが、この報告は、高速圧縮変形(ヒズミ速度約 $10 \sim 80 \text{ sec}^{-1}$)を受ける粘性土の弾性限度付近の応力-ヒズミ曲線をより正確に求めることを主眼とする低打撃速度の実験を行ない、その実験解析上の問題点を検討したものである。

2. 実験方法および試料土

図-1.に実験装置の概要を示す。細い糸で吊り下げられている打撃棒を一定の高さから落下させ入力棒の一端に衝突させると、打撃棒と入力棒内に弾性圧縮波が発生し棒内を伝播する。入出力棒にはられたヒズミゲージで、試料と入出力棒間に生ずる弾性圧縮波の入射、反射による変化を継続的に記録することにより試料両端における応力と変位の時間的変化が決定できる。粘性土の実験であるのでホプキンソン棒としてナイロン棒(弾性係数 31600 Kg/cm^2 , 単位体積重量 $1.10 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$)を用いた。

実験に使用した試料土は、東京湾岸道路予定地で採取した粘土である。(採取深さ $25 \sim 35 \text{ m}$) この試料の物理的性質は、表-1に示す。

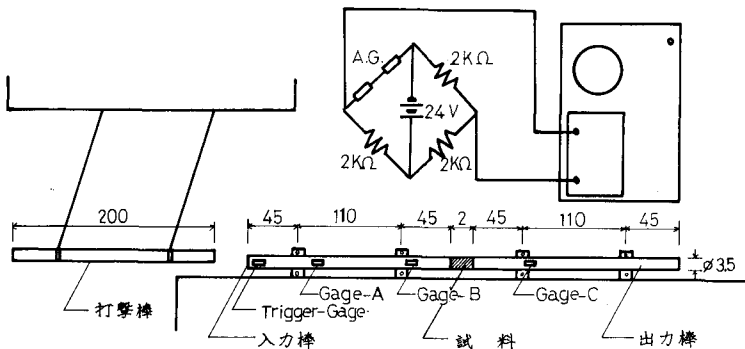


図 - 1

粘土	
Gs	2.62
W	65~85%
WL	111.5%
Wp	49.3%

表 - 1

3. 実験上の問題点の検討

3.1. 低打撃速度の影響 ホプキンソン棒法では、棒の材質と打撃速度によって試料のヒズミ速度と入射応カステップが決定されるので、弾性限度付近の挙動を明らかにするためには、低い打撃速度で実験する必要がある。打撃棒と入力棒が全断面同時接触という理想的な衝突をして、また打撃面の凹凸の影響が無視しうる程度であれば、入力棒内に発生する弾性圧縮波は完全な矩形波となり入力棒内を伝播する。ホプキンソン棒法による従来の解析法では、入力棒内にこのような理想的な矩形波が発生することを前提としている。ここでもし矩形波が発生しなければ、入力棒と試料との境界面の応力は、Bゲージのみでは求められない。(矩形波ならば、B,Cの2枚のゲージでよい。)

ホプキンソン棒法による土の高速圧縮試験法を研究したのは、著者の知るかぎりではH.B. Poorooshaab⁽³⁾ だけのものであるが、この実験の観測波形は変形されているため試料の明確な応カ-ヒズミ曲線は求められていないと思われる。

このように粘性土を対象とした低打撃速度(30 cm/sec)の実験では矩形波を得ることは実験技術上かなり困難であるので、むしろ矩形波は発生しないものとして実験法を検討すべきであろう。

3.2. 測定波形の解析法 まずホプキンソン棒法による弾性圧縮波の観測波形について述べる。入出力棒間に試料をおかずに直接入出力棒を接触させてゲージA、ゲージBによって圧縮波全体(ほぼ完全な矩形波と言える。)を測定したのが写真-1である。入出力棒が接触していなければ出力棒に圧縮波は伝わらず、波形は写真-2のようになる。写真-3が入出力棒間に粘土試料をサンドウィッチした場合の実験波形の一例である。矩形波であれば写真-3のようにゲージB、ゲージCの波形で十分なのであるが、低打撃速度の実験では、写真-4に示すように全断面同時接触をしていないための影響が大きくあらわれ矩形波でなく、変形された波形と生じ従来の方法では解析できない。そこでさらにゲージAによって圧縮波全体を測定し、以下述べる解析法により試料両端の応力と変位を決める必要がある。写真-4Cにおいて σ_1 はゲージA、 σ_3 はゲージB、 σ_4 はゲージCで測定した波形である。この観測波形から図-2を拓く。すなわち σ_1 を σ_3 の立ち上り部に移動させ、さらにゲージBと試料間の圧縮波の往復時間($t = 2d/c$ d はゲージと試料間距離、 c は棒内弾性波速度)だけずらし σ_2 とすれば、試料と入出力棒の境界面での応力と変位速度は、次式から求められる。

入力棒と試料の境界面の応力 σ_{SI} 、変位速度 V_{SI} は、

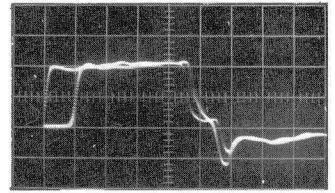


写真-1. 落下高 15 cm
縦軸 AB-6.24 kg/cm²/div, 横軸 0.5 msec/div.

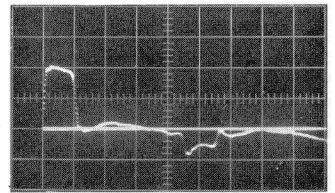


写真-2. 落下高 15 cm
縦軸 A-B-6.24 kg/cm²/div, 横軸 0.5 msec/div.

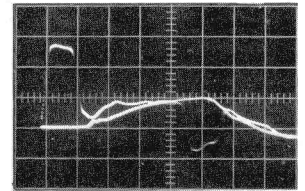


写真-3 落下高 10 cm
縦軸 B-3.08 kg/cm²/div, 横軸 0.5 msec/div
C-2.91

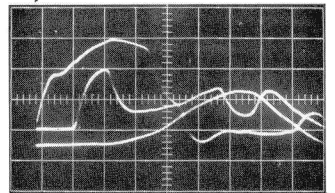


写真-4 落下高 0.5 cm
縦軸 A-0.620 kg/cm²/div, B-0.60 kg/cm²/div
C-0.610 " , 横軸 0.5 msec/div.

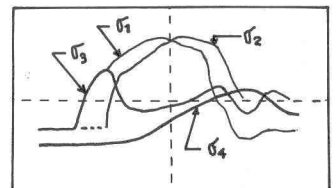


図-2

$$\sigma_{SI} = \sigma_3 + \sigma_2 - \sigma_1$$

$$V_{SI} = (\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_3) \cdot \delta / \delta \cdot C$$

出力棒と試料の境界面の応力 σ_{SI} , 変位速度 V_{SI} は,

$$\sigma_{SI} = \sigma_4$$

$$V_{SI} = \sigma_4 \cdot \delta / \delta \cdot C$$

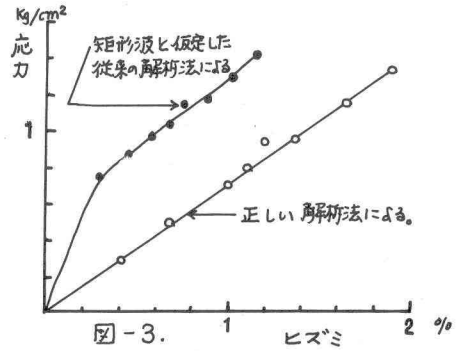
となる。 δ は重力加速度, σ は棒の単位体積重量である。

試料両端の応力の平均値を近似的に試料の応力 σ と考え
ヒズミ速度 $\dot{\epsilon}$ は, 試料両端の変位速度の差を試料長さで割
ることによって求められる。

$$\sigma = (\sigma_{SI} + \sigma_{SI}) / 2 = (\sigma_4 + \sigma_3 + \sigma_2 - \sigma_1) / 2$$

$$\dot{\epsilon} = (V_{SI} - V_{SI}) / l = (\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4) / l$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{\sigma \cdot C \cdot l} \int_0^t (\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4) dt$$



4. 実験結果と考察

4.1. 解析法の差異 Aゲージによる圧縮波形状全体の測定がなければ, 写真-4に示すような変形され
た波が生じているのがわからないことになる。もしこれを矩形波として従来の解析法によれば, 図
-3に示すようになり正しい応力-ヒズミ曲線は得られない。

4.2. 応力-ヒズミ曲線と落下高さ

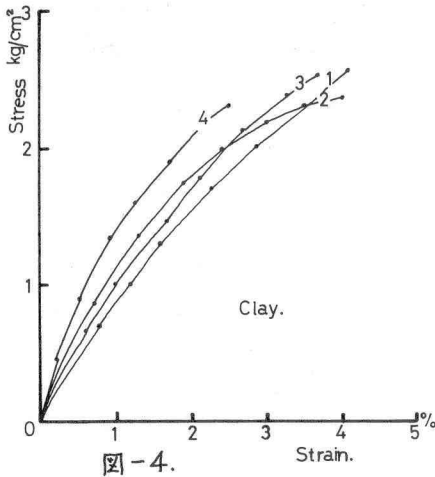


図-4.

写真-5.
No. 1
H=10 cm

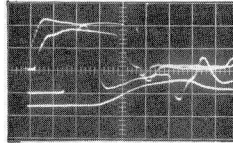


写真-6.
No. 2
H=8 cm

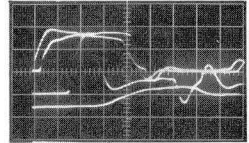


写真-7.
No. 3
H=6 cm

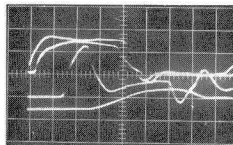


写真-8.
No. 4
H=4 cm

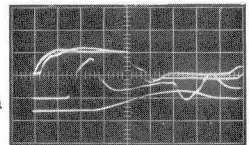


写真-9.
No. 5
H=2 cm

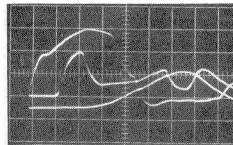


写真-10.
No. 6
H=1 cm

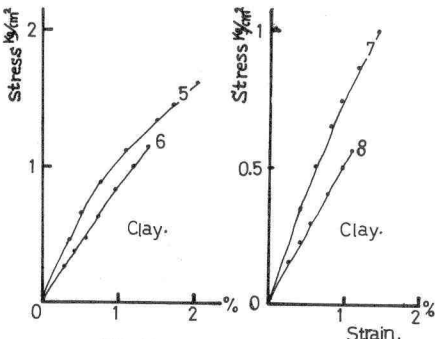
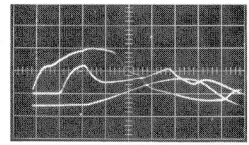


図-5.

写真-11
No. 7
H=1 cm

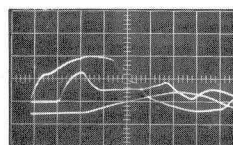
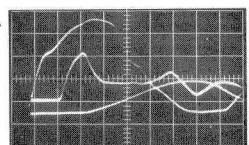


写真-12.
No. 8
H=0.5 cm



No. 1, No. 2, No. 3, No. 4 ... 縦軸 ... A ... 3.03 kg/cm²/div, B ... 3.04 kg/cm²/div.
C ... 3.04 kg/cm²/div. 横軸 0.5 msec/div.

No. 5, No. 6, No. 7 ... 縦軸 ... A ... 1.55 kg/cm²/div, B ... 1.51 kg/cm²/div.
C ... 1.52 kg/cm²/div.

No. 8 ... 縦軸 ... A ... 0.62 kg/cm²/div, B ... 0.60 kg/cm²/div, C ... 0.61 kg/cm²/div.

注. No. 1~No. 4には, トリガー用ゲージの現象が1本糸物に入っているが, 解析には無関係である。

落下高さ10 cm 以上では、入力棒内に発生する圧縮波は矩形波に近い状態であるが、8 cm以下では徐々に打撃面の影響が大きく作用して、変形された波形となってゆく過程が写真-5から写真-12の実験記録によくあらわれている。矩形波が生じなくても図-4、図-5の応力-ヒズミ曲線を観察すると粘土の弾性限度付近までの挙動を、低速度ホプキンソン棒法によってかなり正確に測定できているように思われる。実験には2 mのナイロン棒を用いているので、約2.47 msec後に反射波が到着し試料の圧縮は終了する。このため本実験では最大圧縮強度は求められなかった。小応力から最大圧縮強度にいたる応力-ヒズミ曲線を測定するには、打撃棒、入出力棒の長さを増す必要がある。

表-2.

	静的圧縮試験	高速圧縮試験
標本の大きさ	3	41
標本平均 $E_{0.5}$ kg/cm^2	20.7	99.5
残差平方和	32.3	1820
標準偏差値 σ	2.83	
有意水準5% t	3.23	

静的一軸圧縮試験と高速圧縮試験結果のヒズミ0.5%の割線弾性係数をとって分散比の検定をしたのが表-2である。高速圧縮試験は落下高さによって約80~10 secのヒズミ速度の変化があるが、その影響はほとんどなかったので一括して整理してある。この結果両試験のバラツキ(不偏分散推定量)に有意な差が認められなかった。

5. むすび

従来のホプキンソン棒法の実験装置の一部と解析法を改良した低速度ホプキンソン棒法によって、高速圧縮変形を受ける粘性土の弾性限度付近の応力とヒズミをかなり正確に測定することができた。

ホプキンソン棒法による高速圧縮試験の変位速度は、たとえばクイ先端地盤がクイ打込みのとき受ける変位速度に相当する。今後著者らは、ホプキンソン棒法による実験結果を利用して標準貫入試験などを対象としたロッドの地盤への貫入機構について検討したいと考えている。

おわりに本実験に協力してくれた本学学生高木通雅君に深く謝意を表します。

参考文献

- (1) 山田・沢田 ; “材料の高速圧縮試験に関する研究” 塑性と加工 Vol.9. 1968
- (2) 森田・宇都・冬木・赤石 ; “土の動的挙動に関する実験的研究” 第3回日本地震工学シンポジウム
- (3) H.B. Poorooshab et.; “Response of a clay sample to low magnitude loads applied at a high rate.” International Symposium on wave propagation. 1967.