

## 火薬類を利用した特殊震源の地動特性(第1報)

## —単震源から発生する地動—

川上 純\*, 中尾健児\*, 小川輝繁\*\*, 福山郁生\*\*\*

現位置における耐震実験のための人工地震波の発生方法として、火薬類を利用して特殊震源による方法について実験を行った。この方法は、特殊震源装置を数本列状に地中に設置し、その中で火薬類を爆発させて、有効に地動を発生させるものである。

今回は、基礎実験として、小型の特殊震源装置を1本地中に設置し、窒素ガスによる静的加力及び火薬類による動的加力実験を行った結果、以下の点が明らかになった。

- 1) 震源周囲の土圧及び変位は、静的・動的加力とも同じ挙動を示し、静的弾塑性解析で説明できる。
- 2) 地盤加速度の振動数は100Hz前後であり、この振動数は震源域の大きさに依存する。
- 3) 地盤加速度は弾塑性解析でシュミレートできる。

## 1. 緒 言

橋梁・ダム・原子力構造物等の重要構造物の耐震安全性を確認するためには、その立地点の特異性のため、現位置における耐震実験が有効であり、重要な位置を占めている。

現位置耐震実験としては、主に起振機が用いられているが、加振力は起振機的能力から限定され、また上部からの加振となるため、地中構造物には適用しにくい等の欠点がある。また通常の発破を用い、発生する地動を利用して耐震実験を行う方法もあるが、発生する地動は、近距離では数10～数100Hzの高振動数となり、耐震実験用に低振動数で大振幅の地動を発生させるには、大量の発破が必要となるため、現在のところあまり使用されていない。

発破を利用する別な方法として、発破を制御して地盤を加振する方法がある。これはFig.1のように、震源装置を数本列状に地中に埋設し、その中で火薬類を爆発させて、有効に地動を発生させようとするもので

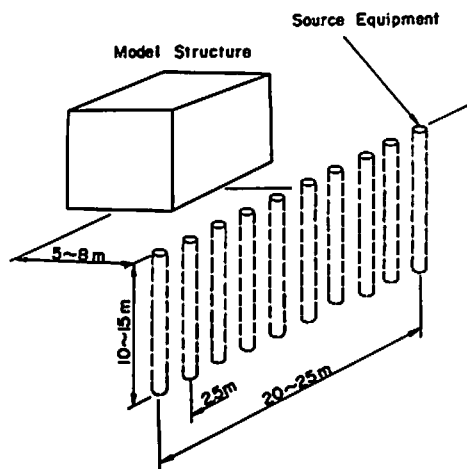


Fig. 1 The outline of "in-situ" earthquake-resistance tests using controlled explosions

ある。この方法では、主に火薬類の発生ガス圧を利用するため、

- 発生振動数の制御
- 近距離で低振動数・大振幅地動の発生
- 多段発破により継続時間の長い地動の発生

等が可能となり、より有効な地動の発生方法である。

この方法は、アメリカのスタンフォード研究所で考案されたもので、S波速度80m/s程度の地盤において実験した例が報告されている<sup>1)</sup>。しかし、この方法による国内での実施例はなく、またより硬い地盤への適

昭和62年10月2日受理

\*大成建設(株)技術研究所  
〒245 横浜市戸塚区名瀬町 344-1  
TEL 045-812-1211

\*\*横浜国立大学工学部  
〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156  
TEL 045-335-1451

\*\*\*(株)総合安全工学研究所  
〒104 東京都中央区銀座 8-5-6 中島商事ビル  
TEL 03-574-7826

Table 1 Characteristics of the test site soil

	0.5 m depth	2 m depth
P-wave velocity (m/s)	500	380
S-wave velocity (m/s)	210	160
Unit weight (g/cm <sup>3</sup> )	1.95	1.95
Modulus of elasticity in shear (MPa)	68	51
Poisson's ratio	0.39	0.39

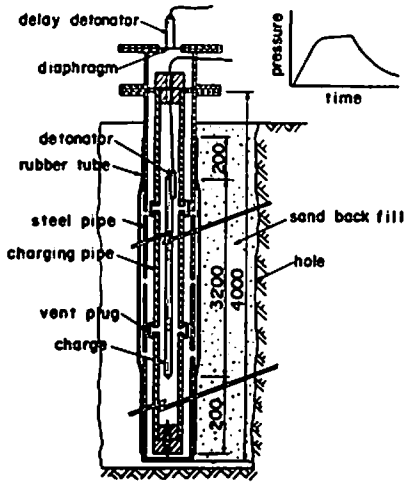


Fig. 2 Schematic representation of the source equipment in soil

用性も不明なため、小型装置を用いた実験を行った。以下にその結果について報告する。

## 2. 原理

Fig. 2は、今回使用した小型震源装置の概要を示したものである。震源装置は、直径9cm長さ4mの穴あき鋼管にゴムチューブをかぶせたものであり、地盤に圧力を加えるゴムの有効膨脹長は3.2mである。

内側の装薬管内で火薬類を爆発させると、爆発ガスは装薬管に取付けてある排気プラグを通して、震源管内に排出され、さらに震源管の穴からゴムチューブ内に広がり、地盤に圧力が作用する。ある一定時間後に、震源装置上部のダイヤフラムを遅延雷管により破壊して、ガスを外部に放出させると、Fig. 2の右側のような圧力を地盤に作用させることができる。このように、地盤に作用する圧力を制御することにより、低振動数の地動を発生させようとするものである。

## 3. 実験

### 3.1. 実験所の地盤

実験を行った場所は、以前谷であったところを埋戻

した場所で、上部は締め固められているが下部は比較的軟らかくなっている。Table 1は弾性波探査から求めた実験所の地盤定数である。なお地盤の強度定数は不攪乱試料が採取できず不明である。

### 3.2 実験方法

実験は、小型震源装置1本を用いて行い、本震源装置から発生する地動について、実験的に検討を行った。震源装置は、地盤にあけた掘削孔内に設置し、周囲を砂で埋戻したが、掘削孔の大きさの影響を調べるために、掘削孔径  $D = 150\text{mm}$ 、 $300\text{mm}$ 、 $450\text{mm}$ の3種類の孔を用いた。

爆源としては、爆速の速いものとして導爆線を、爆速の遅いものとして黒色小粒火薬を用いた。使用した薬量は、一回当たり導爆線では芯薬のペンスリット薬量で20~60g、黒色小粒火薬では、20~160gである。なお黒色小粒火薬を用いた場合は、爆発生成ガスの二次燃焼によるゴムチューブの破損を防ぐために、震源装置内に窒素ガスを封入して点火を行った。

震源装置内の圧力の上昇速度及び最高圧は、薬量の他に装薬管からのガスの流出速度にも関係する。この流出速度は、装薬管に取付けた排気プラグの数によって変化させることができる。今回は、排気プラグの数を5ヶと12ヶの場合について行った。

上部のダイヤフラムの破壊は、MS雷管を用い、約40msec後に行った。また、エネルギー源として火薬を用いる方法の他に、震源装置内に窒素ガスを入れて地盤を静的に加力する“静的加力”も行い、周辺地盤の動的及び静的挙動について比較した。なお、火薬を用いた実験は、以下“動的加力”と呼ぶ。

### 3.3 計測方法

計測は、震源装置内の圧力、周辺地盤の土圧及び加速度の3項目について行った。Fig. 3にそれぞれの計測位置を示す。土圧は深さ  $H = 2\text{m}$  で距離  $r = 1\text{m}$ 、 $2\text{m}$ の位置で計測した。土圧計は直径15cmの計測用孔内に設置したが、設置方法によっては計測値にかなりの誤差を生じるため、土圧計の周囲は、地盤と同じ弾性定数となるように調整したシルトモルタルで埋戻し、正確に計測できるように注意を払った。

加速度は、距離  $r = 1\text{m}$ 、 $2\text{m}$ 、 $3\text{m}$ で深さ  $H = 2\text{m}$ 及び0.5mの計6ヶ所で計測を行った。加速度計は土圧計と同じ計測用孔内に砂で埋戻して設置した。加速度計は、震源から遠ざかる水平方向を正方向として設置した。

## 4. 実験結果及び考察

### 4.1 動的加力での記録波形

Fig. 4は、動的加力での各測点での記録波形の例である。なお図中の地盤変位は加速度波形を計算機によ

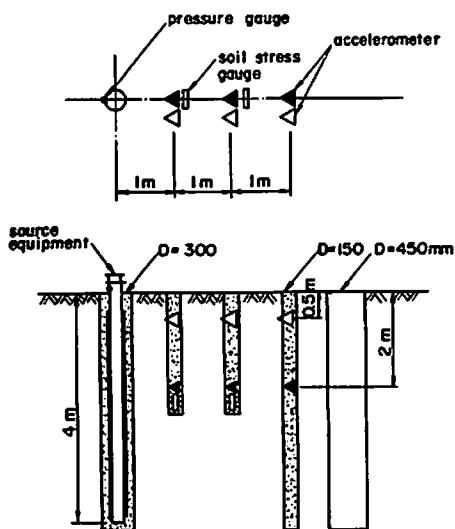


Fig. 3 Layout of measurement points

り2回数値積分して求めたものである。

震源内圧 $P_s$ 、土圧 $\sigma_r$ 及び地盤変位 $U_r$ は、ほぼ相似形をしていることが見てとれる。ただし土圧及び地盤変位の立上り部分は、震源内圧より緩やかになっている。震源内圧波形で、ダイヤフラム破壊時にスパイク状のピークが見られるが、これは圧力計が震源装置の上部に取り付けてあるため大きく記録されているが、実際に地盤に作用している圧力としては、もっと小さいと考えられる。

加速度波形には、火薬類の爆発時とダイヤフラム破壊時に、100Hz前後の振動が見られる。深さ0.5mの波形はより高振動数となっている。

震源内圧波形の立上り速度は、導爆線より黒色小粒

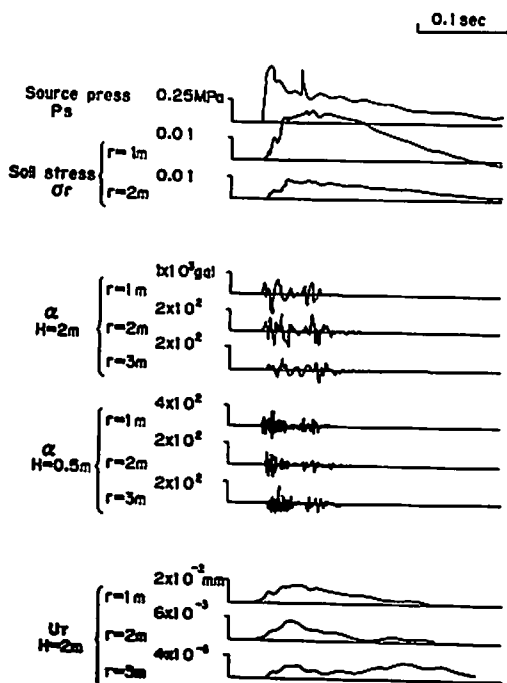


Fig. 4 Example of test result (detonating fuse 60g)

火薬の方が遅く、また排気プラグが小さい方が遅くなっているが、土圧及び加速度波形はほとんど同じ波形となっていた。

#### 4.2 土圧及び地盤変位

Fig. 5は、静的加力での震源内圧 $P_s$ と土圧 $\sigma_r$ との関係、及び動的加力での震源内圧最高値 $P_{smax}$ と最大土圧 $\sigma_{rmax}$ との関係を同時に示したものである。なお

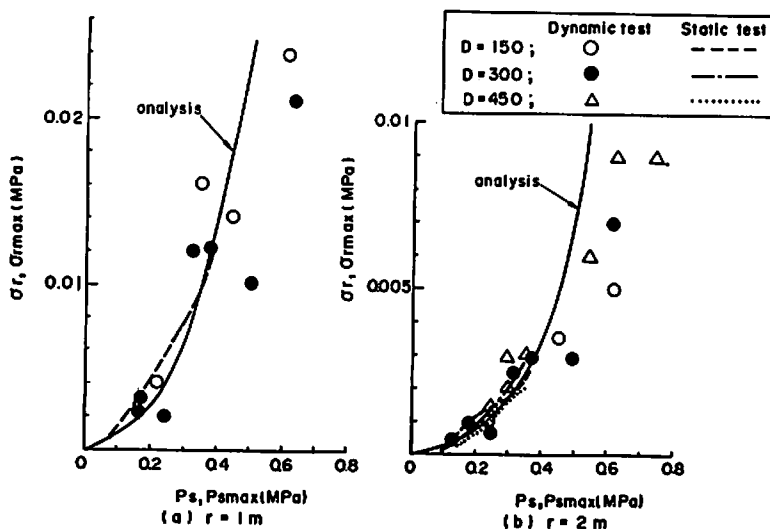


Fig. 5 Source pressure  $P_s$ ,  $P_{smax}$  vs soil stress  $\sigma_r$ ,  $\sigma_{rmax}$  at 2m depth

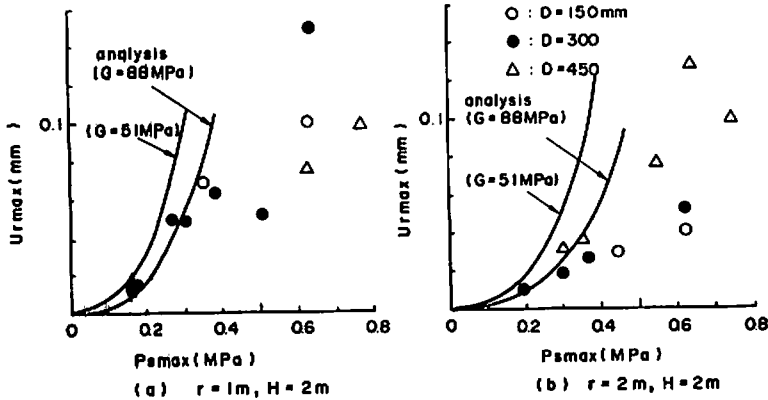


Fig. 6 Maximum source pressure  $P_{s,max}$  vs maximum soil displacement  $U_{r,max}$

D=300の静的加力は、計器不良のためデータはとれていない。

Fig. 6は、動的加力での地盤加速度を数値積分して求めた地盤の最大変位  $U_{r,max}$  と震源内圧最高値  $P_{s,max}$  との関係を示したものである。なお図中の曲線は、後述する解析結果を示したものである。

$P_{s,max}$  と  $\sigma_{r,max}$  及び  $P_{s,max}$  と  $U_{r,max}$  の関係は、直線関係とはなっておらず、非線形性を示しており、震源周囲の地盤は塑性的な領域になっていると考えられる。また静的加力での  $\sigma_r$  と動的加力での  $\sigma_{r,max}$  はほぼ同じ値となっており、火薬類による場合でも土圧は静的な解析で説明できると推察される。

また、 $\sigma_{r,max}$  と  $U_{r,max}$  とも、掘削孔径  $D$  によらず同じ値となっており、今回の実験条件では  $D$  の影響はほとんどないと言える。

#### 4.3 静的解析

実験結果によると動的加力でも土圧は静的加力と同じ傾向を示し、また震源内圧、土圧及び地盤変位の波形は相似形であるため、本実験の土圧及び地盤変位は準静的な挙動をしていると考えられる。そこで、実験結果を説明するために静的解析を行った。

##### 4.3.1 弾塑性理論解

本実験を、無限媒体中の円筒空洞内に内圧が加わるものと理想化する。Fig. 7のように、半径  $a$  の円孔に内圧  $P_i$  が作用した場合の弾塑性理論解は以下のようになる<sup>2)</sup>。なお、ここでは媒体中には地圧として  $\sigma_0$  が一様に作用しているとする。地盤の一軸圧縮強度を  $q_u$ 、内部摩擦角を  $\phi$ 、粘着力と  $C$  とすると、円孔周囲に発生する塑性領域の半径  $R$  は、以下の式で表わされる。

$$R = a \left[ \frac{1}{q_u + (N-1)\sigma_0} \frac{N+1}{2N} \{q_u + (N-1)P_i\} \right]^{\frac{N}{N-1}}$$

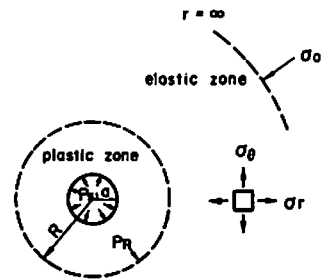


Fig. 7 Erastic-plastic model for analysis

ここで

$$N = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}$$

また、塑性境界における応力  $P_R$  は以下となる。

$$P_R = \frac{1}{1+N} (2N\sigma_0 + q_u)$$

そして、塑性境界以遠の距離  $r$  における半径方向応力  $\sigma_r$  と変位  $U_r$  は以下となる。

$$\sigma_r = (\sigma_0 - P_R) \frac{R^2}{r^2} - \sigma_0$$

$$U_r = \frac{1}{2G} P_R \frac{R^2}{r}$$

Fig. 8は、種々の地盤定数  $C$ 、 $\phi$  における、 $P_i$  と距離  $r=1m$  での  $\sigma_r$  の関係を示したものである。

$P_i$  と  $\sigma_r$  の関係は、実験結果と同様非線形性を示し、地盤の強度によって  $\sigma_r$  の値は大きく異なるのが分かる。

##### 4.3.2 FEMによる解析

実際の実験では、震源装置の周囲には埋戻し砂がある。その砂の影響も考慮に入れるために、Fig. 9のようなモデルによる2次元FEM解析を行った。Fig. 10には砂として  $G=56MPa$ 、 $C=0$ 、 $\phi=29^\circ$  と仮定して、 $D=150, 300, 450mm$  の場合については解析した。

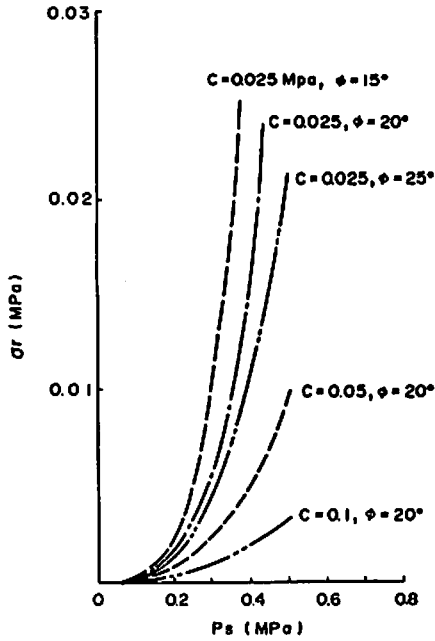


Fig. 8 Relationship between source pressure  $P_s$  and soil stress  $\sigma_r$  at  $r=1m$

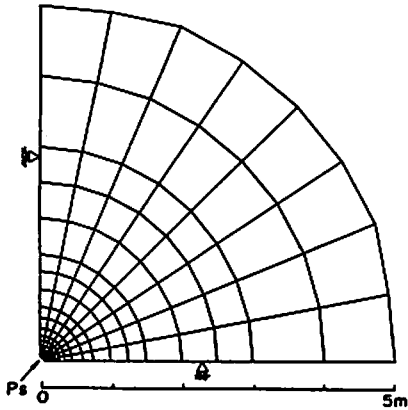


Fig. 9 Finite element grid for static and dynamic calculation

$P_s$  と  $\sigma_r$  の関係を示した。なお地盤は  $C=0.025MP_a$ ,  $\phi=20^\circ$  とした。実験結果と同じく、 $D$  はあまり影響していない。ただし、これは今回の場合、地盤と砂の強度がほぼ同じような値であったためであり、両者の強度が大きく異なる場合は、 $D$  の影響が大きくなると考えられる。

Fig. 5 及び Fig. 6 中の曲線は、実験値に最も良く一致する解析結果として、 $C=0.025MP_a$ ,  $\phi=20^\circ$  のものを示した。 $P_s$  が小さい領域では実験値と良く一致するが、 $P_s$  が大きくなると解析結果の方が大きくなっている。これは震源は有限長であるため、 $P_s$  が

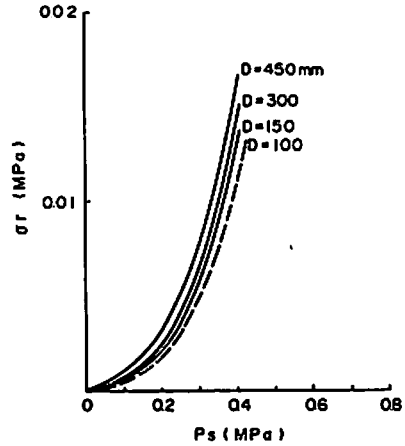


Fig. 10 The effect of source hole diameter by FEM calculation ( $c=0.025MP_a$ ,  $\phi=20^\circ$ ,  $r=1m$ )

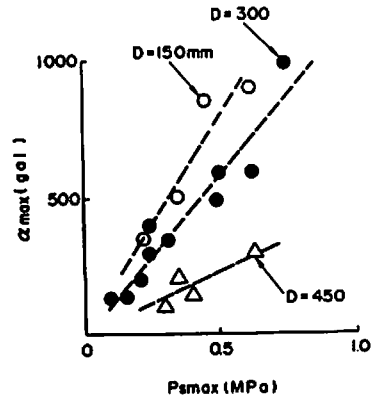


Fig. 11 Maximum source pressure  $P_{smax}$  vs maximum ground acceleration  $\alpha_{max}$  ( $r=1m$ ,  $H=2m$ )

大きくなると塑性域が円筒からずれて球状に近づくためと考えられる。

#### 4.4 地盤加速度

Fig. 11 は、震源内圧最高値  $P_{smax}$  と地盤の最大加速度  $\alpha_{max}$  (距離  $r=1m$ , 深さ  $H=2m$ ) の関係を示したものである。 $\alpha_{max}$  は  $P_{smax}$  にほぼ比例している。また土圧や地盤変位は掘削孔径  $D$  にかかわらず一定であるのに対して、 $\alpha_{max}$  は掘削孔径  $D$  が大きいほど小さくなっているのが分かる。

Fig. 12 は、距離  $r=1m$ , 深さ  $H=2m$  での地盤加速度のスペクトルである。薬量が多いほど振動数が低く、また掘削孔径  $D$  が大きいほど振動数が低くなる傾向が見られる。

円孔に動的な内圧が作用する場合、円孔は共振現象を示し、その共振振動数  $f_r$  は地盤の弾性波速度  $V_p$

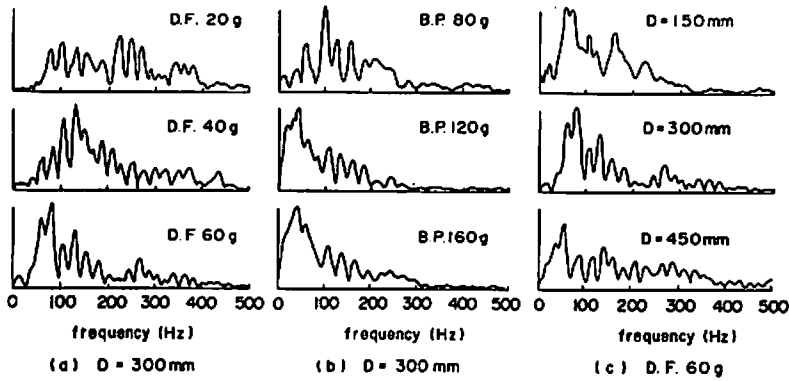


Fig. 12 Variation of ground acceleration spectrum for charge weight and hole diameter  
(D. F. : detonating fuse)  
(B. P. : black powder)

と円孔の半径  $a$  によって決まり<sup>3),4)</sup>, 弾性理論ではポアソン比  $\nu = 0.39$  の場合

$$\text{球状震源} \quad f_0 = 0.77 \frac{V_p}{2\pi a}$$

$$\text{円筒震源} \quad f_0 = 0.5 \frac{V_p}{2\pi a}$$

となり,  $f_0$  は半径  $a$  に反比例する。

実験所の  $V_p = 380 \text{ m/s}$  とし, 円筒震源の式に震源装置の半径  $a = 5 \text{ cm}$  を代入すると,  $f_0 = 600 \text{ Hz}$  となる。また掘削孔の半径としての  $a = 15 \text{ cm}$  とすると  $f_0 = 300 \text{ Hz}$ , さらに塑性半径までとって  $a = 25 \text{ cm}$  とすると  $f_0 = 120 \text{ Hz}$  となり, Fig. 12 のスペクトルにはほぼ近い値となる。

以上より, 薬量が大きく掘削孔径が大きいほど, 見かけの震源半径が大きくなり, 地盤加速度の振動数が低くなったと考えられる。

#### 4.5 動的シュミレーション

地盤の動的挙動をシュミレートするために, 静的解析に用いたと同じ FEM モデル Fig. 9 により, 動的弾塑性解析を行った。地盤の強度定数は静的解析から推定した値  $C = 0.025 \text{ MPa}$ ,  $\phi = 20^\circ$  とし, 剛性率は  $G = 51 \text{ MPa}$  とした。そして実験で得られた震源内圧波形を模擬した圧力波形を FEM モデルの円孔に作用させ, 周辺地盤の加速度, 変位, 土圧をシュミレートした。

Fig. 13 は掘削孔径  $D = 300 \text{ mm}$  の場合で, 図の右上の圧力波形を入力して行ったシュミレーション結果と実験結果を比較したものである。地盤加速度は, 震源内圧の急変部で大きな加速度値となっており, 振動数も  $100 \text{ Hz}$  前後で, 実験結果をうまくシュミレートできていることが分かる。

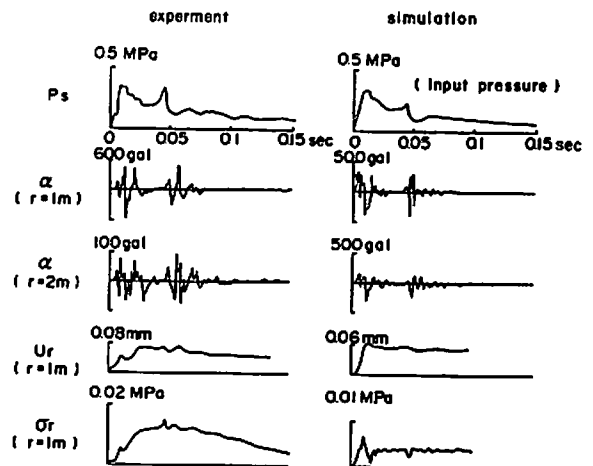


Fig. 13 Comparison of experimental result and result of numerical simulation

地盤変位及び土圧波形は, 初動部分に動的効果であるピークを持ち, その後はほぼ一定となり静的応答の様子を示している。実験波形にはこの初動部分のピークはあまり明瞭に現われていない。これは土圧計の応答振動数が低いこと, また土圧計及び加速度計の設置状態が完全でないため高振動数に対する応答が悪くなっている等の理由が考えられる。

地盤加速度, 変位及び土圧の距離減衰は, Fig. 14 のようにシュミレーションより実験の方が大きくなっている。これは, 実験では震源装置が有限であるのに対して, シュミレーションモデルでは 2 次元平面ひずみのため, 震源装置が無限長になっているためと考えられる。

#### 5. 結 言

小型震源装置を用いて, 静的及び火薬類による動的実験を行い, 震源装置により発生する周辺地盤の挙動

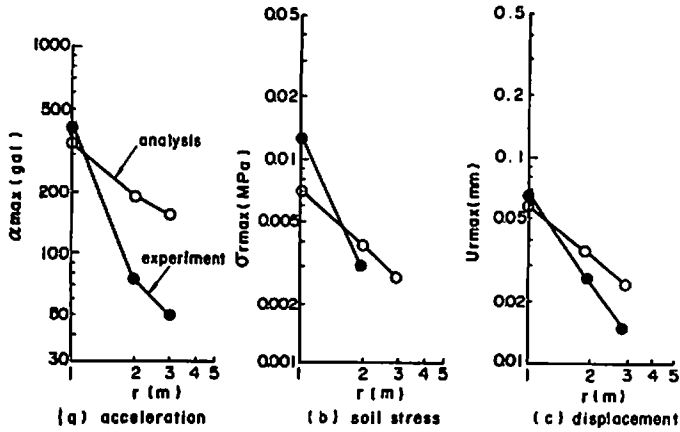


Fig. 14 Attenuations of acceleration, soil stress and displacement

について検討した。その結果

- (1) 土圧及び地盤変位は非線形的挙動をしており、震源装置の周囲の地盤は塑性化している。
- (2) 土圧及び地盤変位は、静的及び動的実験ともほぼ同じ値となっており、これらはほぼ静的弾塑性解析で説明できる。
- (3) 地盤加速度の振動数は $100H_z$ 前後であり、この振動数は震源域の大きさに依存する。
- (4) 地盤加速度は、弾塑性解析でシュミレートできる。

等が明らかとなった。

今回の実験では、震源装置1本を使用したが発生する地動は $100H_z$ 前後と耐震実験用としては、高い振動数となっていた。本装置は、数本列状にして用いるものであるが、その場合は震源域が大きくなり、より

低い振動数の地動が発生すると考えられる。列状配置での実験については次報に報告する。

最後に、実験に当り火薬類のお世話をいただいた日本カーリット(株)保土ヶ谷工場の安部副工場長に謝意を表します。

#### 文 献

- 1) J. R. Bruce, et. al., Simulation of Strong Earthquake Motion with Contained-Explosion Line Source Arrays, SRI Final Report, 1979
- 2) D. E. R. Godfrey, Theoretical Elasticity and Plasticity for Engineers, Thames and Hudson, 1959
- 3) 西村源六郎, 振動工学, 誠文堂新光社, 1969
- 4) J. E. White, Seismic waves, McGraw-Hill, 1965

Ground Motions Generated by a Specially Designed  
Seismic Source with Explosives( 1 )

—Ground Motions from Single Source—

by Jun KAWAKAMI\*, Kenji NAKAO\*, Terushige OGAWA\*\*  
and Ikuo FUKUYAMA\*\*\*

This report describes on characteristics of ground motions generated by using a specially designed seismic source. Ground motions were generated by firing explosives in a source which placed vertically in a soil.

Using a small size seismic source, static and dynamic experiments were performed to investigate characteristics of ground motions. From the experimental results, the following properties were summarized.

- 1) The behavior of soil stress and ground displacement produced by dynamic tests were similar to static tests.
- 2) The frequency of ground acceleration were about 100 Hz and depended on the size of source.
- 3) The elastic-plastic analysis could simulate this ground motions.

(\*Technology Research Center, taisei Corp. Nasemachi 344-1  
Totsuka-ku Yokohama

\*\*Yokohama National University, Tokiwadai 156 Hodogaya-ku  
Yokohama

\*\*\*The Research Institute for Safety Engineering, Nakajima-Shoji bldg.  
Ginza 8-5-6 Chyuo-ku Tokyo)

---