

(62) 発破を用いた人工地震波の発生

大成建設(株) 川上 純
今村 聡
中尾 健児

1. はじめに

最近、第4紀層のように比較的軟かい地盤に、原子力構造物等の重要構造物を建設する要求がふえつつあるが、その場合、耐震性の評価には地盤の非線形性も考慮する必要がある。現位置において、構造物の耐震実験を行う場合、通常模型基礎又は模型建家を起震機によって加振する方法が行なわれるが、この方法では、

- (1) 上部模型からの加振となり、地盤からの入力である地震の場合と異なる。
- (2) 通常は、起振機能力の制約があるため、地盤が非線形領域に達するまでは困難。

等の制約がある。

地盤から加振し、大振幅を発生させるには、発破による方法があり、実際アメリカにおいて原子力発電所構造物の耐震実験で、40トンの発破を用いた例はあるが¹⁾、広大な敷地が必要なため日本においてはとても現実性がない。

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。この方法は図-1に示すように、特殊容器(以下震源管と呼ぶ)を地盤内に数本列状に設置し、その容器内で火薬を爆発させ、その発生ガスを利用して人工地震波を発生させるようにするものである。この方法はスタンフォード研究所で研究が進められており²⁾、その実験例(実機の1/3サイズ)では、S波速度80m/s程度の地盤において、数kgの火薬を用いて振動数10Hzで1cm程度の変位が得られている。この方法では、火薬のガス圧を利用するため、震源の近くに模型を置くことができる。

しかし、この方法による国内の実験例はなく、また洪積層のような $V_s=250\sim400\text{m/s}$ のより硬い地盤への適用性も不明なため、小型の実験を行った。

以下にその実験結果とその適用性について述べる。

2. 震源装置の概要と原理

図-2は今回使用した震源装置の概要を示したもので、内側の火薬を爆発させるための装薬管と外径のゴムを自立させるための外管の2重構造となっている。各管には穴を開けてあり、特に装薬管には火薬の発生ガスを排出させるための直径6mmの穴があけてある排気プラグを取り付けてある。

火薬の爆発により発生したガスは排気プラグを通り外管に排出され、さらにゴムチューブ内に排出され、地盤に圧力が加えられる。そしてある一定時間後に、

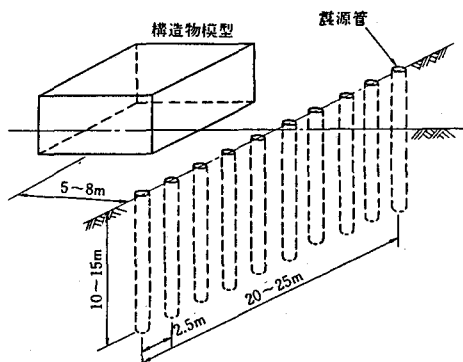


図-1 制御発破による地盤加力方法

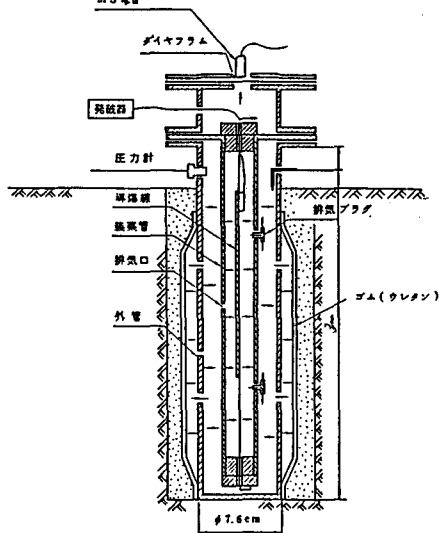


図-2 震源装置の概要

上部のダイヤフラムを遅延電管により破り管内のガスを放出させる。上部の操作により地盤に矩形波状の圧力を加えることができる。圧力値は火薬の量及び排気プラグの排出口面積を変えることにより制御でき、また作用時間はダイヤフラムの破壊時間遅れにより制御できる。また同じ管内で数回爆発を行うことにより継続時間の長い地動を発生させることも可能である。

3. 使用火薬の性能実験

この方法では、火薬の発生ガスの静的圧力を利用するので、使用する火薬類としてはガス量の多いものが有利である。一方震源波を破壊させないためには、爆速が遅いものが良い。したがって、爆薬より火薬の方が適している。

表－1 に代表的な火薬類の諸性質を示す。

爆薬より火薬の方が良いことになるが、小型実験用としては取扱い易い導爆線（ヘンスリット10g/m）を用いることとし、実機サイズでは火薬を用いることを想定し、各火薬類を密封容器内で爆発させ、薬量と圧力の関係を求めた。

(1) 導爆線

小型実験用の震源管と同じ直径で長さ1mの密封容器（内体積 $2.8\times10^3\text{ cm}^3$ ）内で導爆線を爆発させ、発生圧力を測定した。なおこのとき装薬管の排気口面積を変化させている。図－4はその結果であり、薬量と管内圧力はほぼ比例し、また排気口面積が大きくなるほど圧力値も大きくなり、断熱状態での計算値に近くなっていた。

(2) 黒色火薬

黒色火薬の燃焼実験は装薬管径9cm、

外管径30cm長さ1m

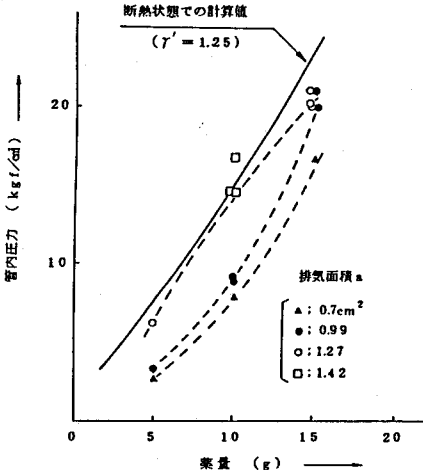
の密封容器（内体積 7.0×10^3 ）で行った。黒色火薬は酸素バランスがマイナスのため周囲に酸素があるとCOが2次燃焼する。

図－5は密封容器内が空気の場合と1度黒色火薬を燃焼させたガス中（酸素ナシ）の場合の圧力波形であり、圧力値は約2倍の差がみられる。

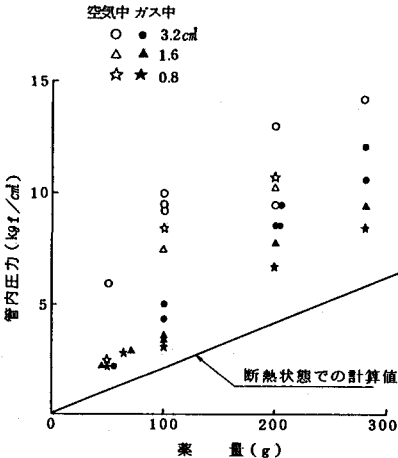
図－6は薬量と管内圧力の関係であるが、測定値は計算値の約2倍となっている。この計算値は表－1の比エネルギーから計算したものであるが、実際はより大きいものと推定される。

表－1 火薬類の諸性質

爆 類 \ 性 質	爆発熱 (Kcal)	ガス比容 (ℓ)	爆発温度 ($^{\circ}\text{K}$)	比エネルギー ($\text{atm}\cdot\ell$)
ヘンスリット	1340	780	5160	14800
テトリル	1390	635	4750	11500
無煙火薬 (例)		880	3118	10340
黒色火薬 (例)		250	2650	2810
コンクリート破砕器例	800~1000	100~120		



図－4 導爆線の薬量と管内圧力の関係



図－6 黒色火薬の薬量と管内圧力の関係

4. 単震源の地中実験

震源管の性能を確認するために、直径7.6 cm 長さ3 mの震源管1本を地中に設置し、内部で導爆線10~60gを爆発させ、管内圧力、土圧及び発生する地動を測定した。

実験所の地盤は、表-2に示すように $V_s=250\text{ m/s}$ 前後の土丹による埋立て土である。

1) 測定波形

図-8に各測定波形例を示す。土のダイヤフラムは50msec後に破壊した。地動の速度及び変位波形は、加速度記録を積分して求めたものである。

地動加速度は、爆破時とダイヤフラム破壊時の2つに分かれているが、変位波形は管内圧力波形と相似形であり、ダイヤフラム破壊時の50cmsec後に下がり初め、変位ピーク値の約半分の残留変位がみられた。

図-9は距離1 mでの加速度と変位のフーリエスペクトルであり、加速度では200Hz前後が卓越しており、変位では10Hzにピークが見られる。加速度の卓越振動数は震源管周囲の地盤の固有振動と考えられるが、この高振動数の振動は耐震実験には不必要であるため、今後圧力の立上り速度をゆるやかにするような改良が必要と考えられる。

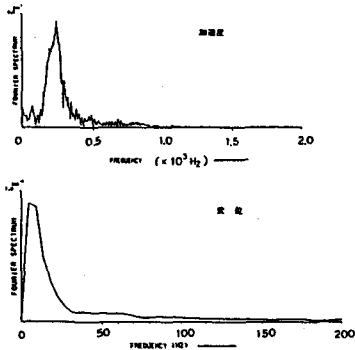


図-9 地動のフーリエスペクトル

2) 管内圧力及び地動変位の関係

図-10及び図-11は管内圧力と土圧及び地動変位の関係を示したものである。測定波形では、管内圧力、土圧及び地動変位はそれぞれ相似形であるので、この実験の現象は、ほぼ静的なものとして取り扱うことができると考えられる。図中の破線及び実線は、空孔の

表-2 実験所の地盤定数

諸元	物性値
弾性波速度	$V_p=530\text{ m/s}$ $V_s=250\text{ m/s}$
ヤング率	$E=3330\text{ kgf/cm}^2$
剛性率	$G=1220\text{ kgf/cm}^2$
ポアソン比	$\nu=0.36$
一軸圧縮強度	$\sigma_n=3\sim5\text{ kgf/cm}^2$
内部摩擦角	($\phi=20^\circ$ 仮定)

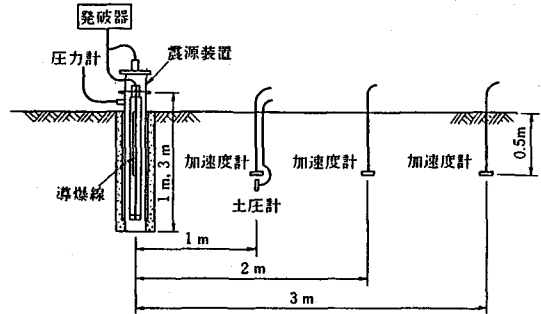


図-7 測定器の位置

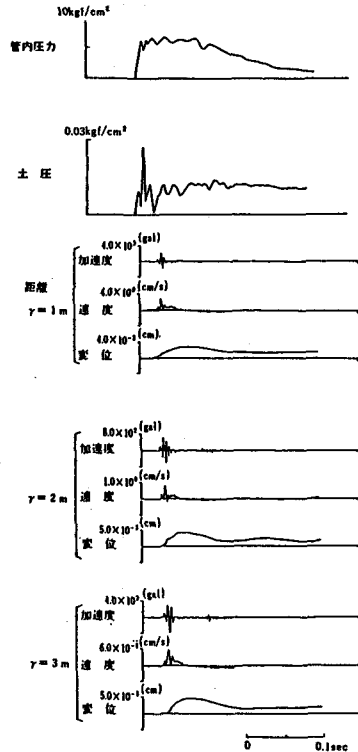


図-8 測定波形例 (ペンシリット40g)

内部に一樣な内圧が作用した場合の弾性及び弾塑性の静的理論解である。

測定値は弾性解より大きくなっており、震源管の周囲は塑性領域に達していることがわかる。また弾塑性解とはほぼ一致しており、この図からも、静的取り扱いが可能であることが分かる。

5. 列震源の予測

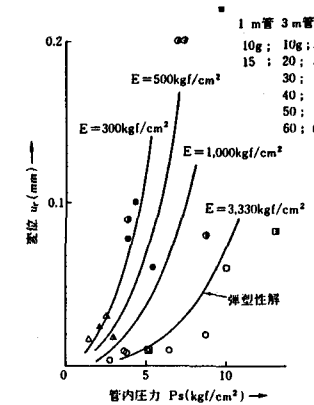


図-10 管内圧力と変位の関係

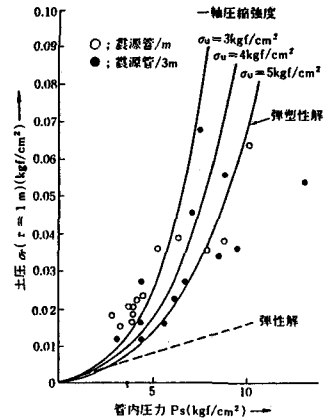


図-11 管内圧力と土圧の関係

実際の耐震実験では、震源を列状に配置し、同時に発破を行い平面波状の地動を発生させる方式となる。この場合の予測を以下に行う。

今、各震源による塑性域がお互いに接するような状態を考えると(図-12)、列震源の塑性域は楕円で近似できる。楕円孔に内圧 P_e が加わった場合の変位分布は、解析的に求めることができる。 P_e の大きさは各震源管の相互作用を考慮する必要があるため、FEMにより計算した。なおこのとき地盤は完全弾塑性体として、降伏条件はモルクーロンの破壊基準とした。

図-13は、上記の方法により計算した列震源(震源管9ヶ)の場合の変位である。これらの結果から、列震源にすると変位は単孔の場合の約10倍程度大きくなることが推測できる。

6. おわりに

実機サイズを震源管半径2.3 cmとすると、相似側から、距離8 mで約1 cmの地動変位が得られることになる。この場合震源管1本当たりの薬量は約4 kgとなり、通常の発破に比べかなり少ない薬量で大きな地動変位を与えることができ、有効な加震方法であると考えられる。

なお、本実験は横浜国立大学の福山教授の指導のもとに行い、また実験に際しては日本カーリットの方々にも多大な協力をいただいた。ここに謝意を表する次第である。

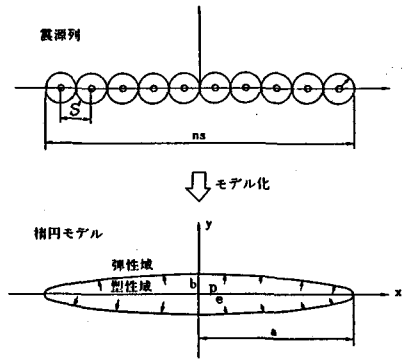


図-12 列震源と楕円モデル

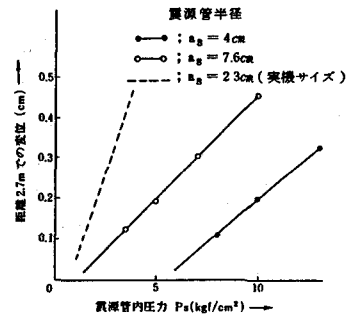


図-13 列震源の予測変位

(ヤング率 $E=1000 \text{ kgf/cm}^2$)

参考文献

- 1) C. J. Higgins et.al., SIMQUAKEII: A Multiple-Detonation Explosive Test. EPRI Report NO.NP-2916, October 1983
- 2) J. R. Bruce et.al., Simulation of Strong Earthquake Motion with Contained-Explosion Line Source Array. SRI Final Report, December 1979

(62) Experimental Study on Earthquake-Like Ground

Motion with Controlled Explosion

By Jun Kawakami,
Satoshi Imamura and
Kenji Nakao

This report describes the controlled explosion technique which produces earthquake-like ground motion for in-situ earthquake-resistant tests.

The high-level motion is produced by firing explosives in the special pipes placed vertical in the soil near the test structure. Several source pipes placed in array produce high-level and uniform plane wave near the source. The long duration of ground motion can be controlled by delayed multiple firing within each source.

Small size experiment using 7.6 cm diameter and 3 m long pipe was performed. From the experimental results and analysis, the following properties were clarified.

- 1) Gun-powder and detnation-cord are applicable for source charge.
- 2) The analysis predicts that the ground displacement near the source is uniform and ten times grater than the displacement from a single source.
- 3) At the full scale in the yang's modulus 1000 kgf/cm^2 the 46 diameter array source will produce 1 cm ground displacement at 8 m from the source.
It is usefull for structure testing.