

大成建設 株式会社

○川上 純

中尾 健児

横浜国立大学 工学部 福山 郁生

小川 輝繁

1. はじめに

現位置において、地盤および構造物の動的実験を行う場合、その加振力として起振機を使用する場合が多い。しかし起振機を用いると、地表からの加振となり、また加振力も起振機の性能で限定される。また加振力として発破を用いる方法もあるが、通常の発破では近距離では高振動数の地動となり、また耐震実験用に大振幅の地動を発生させるためには、大薬量の発破が必要となる等の欠点があるため、現在のところあまり使用されていない。

これらの方法の欠点を補うような、発破を制御して地盤を有効に加振する制御発破方式があり¹⁾筆者等はこの方法について開発研究を進めている。前報²⁾では、地盤加力用の震源装置を1本用いた実験結果について報告したが、今回はより大きな地動を発生させるために、震源装置を5本列状に配置して同時に発破する“列震源実験”を行った。以下にその結果を報告する。

2. 震源装置

図-1は制御発破加力の原理を示したものである。今回使用した震源装置は、穴あき鋼管にゴムチューブをかぶせたものである。内側の管内で火薬類を爆発させると、発生ガスは排気プラグを通してゴムチューブ内に排出され、地盤に圧力が作用する。その後、管上部のダイヤフラムを遅延雷管により破壊し、ガスを外部に放出させると図-1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、通常の発破に比べて、震源近傍で低振動数の地動を発生させることができる。

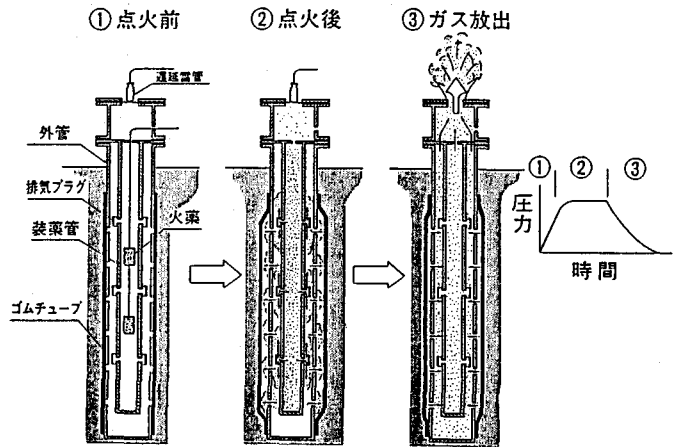


図-1 制御発破加力の原理

今回の実験では、ゴムチューブ外径10cm、長さ4mの震源装置を使用した。なお地盤に圧力を加えるゴムの有効膨張長は3.2mである。

3. 実験方法

実験は、震源装置1本のみを用いた“単震源実験”と5本の震源装置を1m間隔に5本設置して同時に発破する“列震源実験”を行い、列の効果について検討した。また、震源装置の周辺地盤の挙動をより詳細に検討するために、火薬を用いずに震源装置内に窒素ガスを入れて、静的に加力する“静的実験”も行った。

震源装置は掘削孔内に設置し、周囲を砂で埋め戻したが、その掘削孔径の影響を調べるために、掘削孔径 $D = 150, 300, 450$ mmの3種を用いて実験を行った。ただし、列震源は $D = 300$ mmのみである。

爆源としては、爆速の速い導爆線（芯薬はペンスリット）と爆速の遅い黒色火薬の2種類を使用した。使

用薬量は、20 g～120 gである。

計測は、震源装置内の圧力・周辺地盤の加速度・土圧及び地表の変位について行った。測定位置は図-2に示すように、震源装置の中心深さである深さ2 mと、地表付近の深さ0.5 mで、距離1 m、2 m、3 mの計6ヶ所である。

4. 実験結果

4.1 記録波形の特徴

図-3は単震源と列震源での記録波形例である。土圧及び地表変位の波形は、震源内圧とほぼ相似形になっている。地盤加速度は、火薬の爆発時とダイヤフラム破壊時に100Hz前後の比較的高振動数の波動が卓越しており、地表付近ではより高振動数となっている。しかし、列震源では、この高振動数の他に20Hz前後の比較的低振動数の波動が見られる。

この高振動数の波動は、掘削孔の自由振動に起因するもので、低振動数の波動は、震源内圧による強制振動によるものと考えられる。

4.2 単震源からの地動

図-4は、単震源での静的実験及び火薬類による動の実験での震源内圧 P_s と土圧 σ_r の関係を示したものである。静的実験と動の実験ではほとんど同じ傾向を示している。掘削孔径もほとんど影響しておらず、また火薬の種類によってもほとんど差は見られなかった。

今回の実験所では、不攪乱試料が得られず、地盤の強度定数が不明である。そこで円孔に内圧が作用した

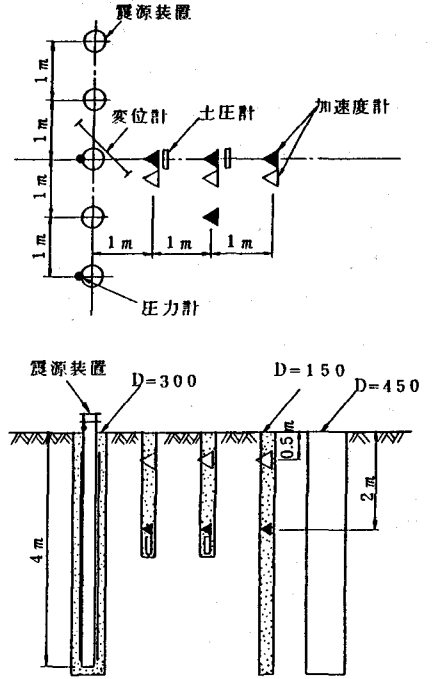


図-2 震源装置及び計測位置

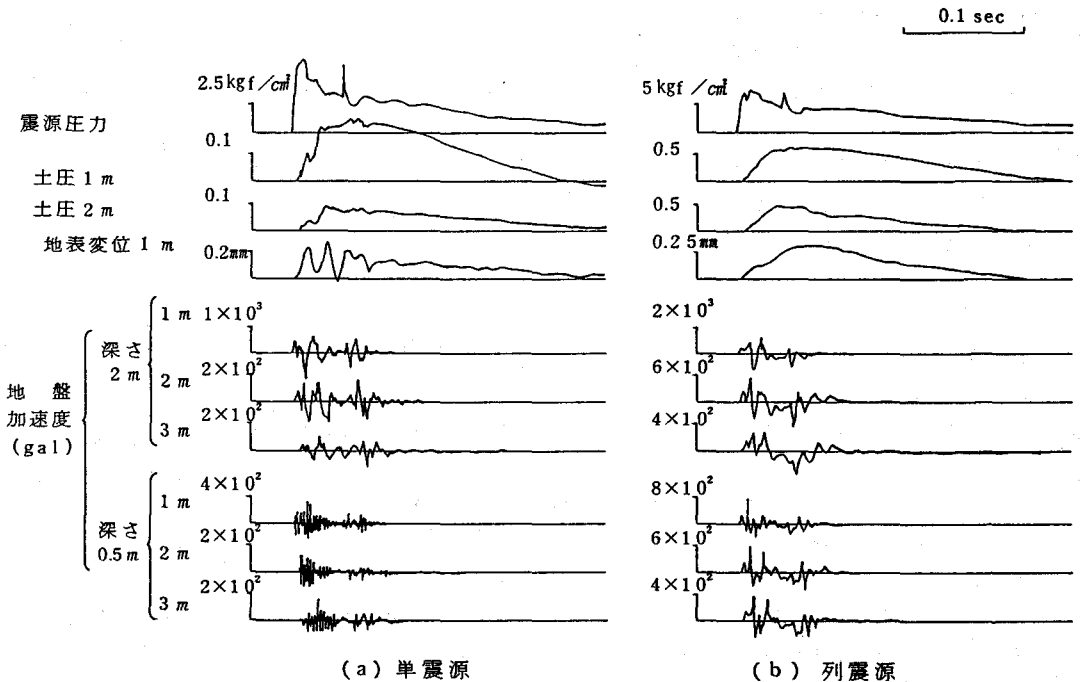


図-3 記録波形例

場合の解析を行い、図-4の静的実験結果に合うように C 、 ϕ を推定し、 $C=0.25\text{kgf/cm}$ 、 $\phi=20^\circ$ を得た。図中の実線はその曲線である。

4.3 列震源からの地動

図-5は、列震源での震源内圧 P_s と土圧 σ_r 及び地盤変位 u_r (深度2m)の関係を示したものである。単震源と同様静的実験と動期的実験は、ほぼ同じ結果となっている。

列震源は、各震源装置周囲の地盤の塑性域がお互いにつながり、一体となった震源と考えられる。そこで列震源を図-6に示すような楕円モデルで近似し、

- (1) 弾塑性FEMによる、楕円境界に加わる等価圧力 P_e の算定
- (2) 楕円境界に一樣内圧 P_e を作用させ、周囲の応力・変位の算定(弾性理論解)

の2ステップの静的解析を行った。

図-7は、(1)の弾塑性解析において各震源内圧 P_s 時の塑性域の範囲を示したものであり、図-8は震源内圧 P_s と楕円境界での等価圧力 P_e の関係を示したものである。これより、各震源からの塑性域は、最初は同心円状に広がるが、徐々に列方向に向い、 $P_s \approx 2\text{kgf/cm}$ で隣接し、その後徐々に列直角方向に広がることから、図-8を見ると、塑性域がつながった後に、 P_e が急増していることが分かる。

次に(2)の解析により、等価圧力 P_e

が加わった時の周辺地盤の応力、変位の分布を求めた。そして、列震源の中心軸上での震源内圧 P_s と土圧 σ_r ・地盤変位 u_r の関係を図-5の実験結果とともに示した。土圧の解析結果は実験結果と良い一致を示しており、上記の解析方法が妥当であることが分かる。地盤変位の解析結果は実験結果より大きくなっている。地盤の剛性は、現位置での弾性波速度測定結果の $V_p=380\text{m/s}$ 、 $V_s=160\text{m/s}$ 、単位体積重量 $\rho=1.9\text{t/m}^3$ から算出した値を用いたが、地表付近はより硬い地盤であること、また震源装置の長さが有限であること等の原因により両者に差が出ていると考えられる。

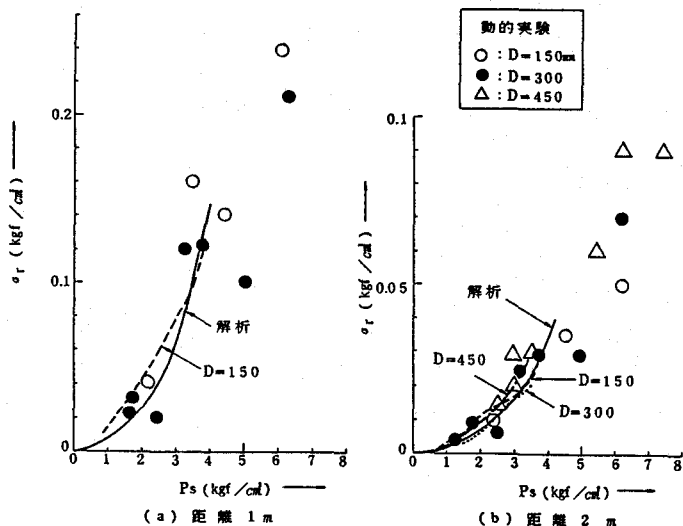


図-4 単震源での震源内圧 P_s と土圧 σ_r の関係

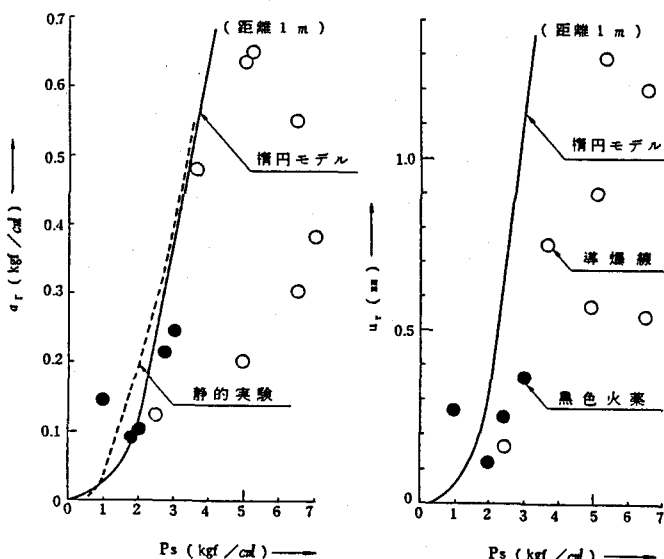


図-5 列震源での震源内圧 P_s と土圧 σ_r 、地盤変位 u_r の関係

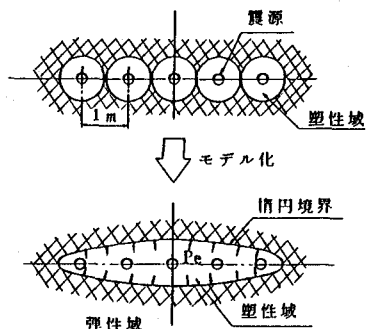
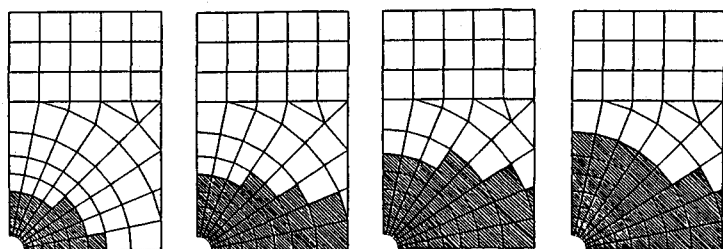


図-6 列震源のモデル化



$P_s = 1.5 \text{ kgf/cm}^2$

$P_s = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$

$P_s = 3.0 \text{ kgf/cm}^2$

$P_s = 7.0 \text{ kgf/cm}^2$

図-7 震源からの塑性域

4.4 地動加速度の分布

列震源での地動加速度は、単震源に比べて高振動数成分が少なくなっているが、まだかなりの量発生している。動の実験のための地動としては、この高振動数の波動は不要であり、低振動数のもののみが有用である。そこで列震源での地動加速度記録に、ローパスフィルター処理を行い、低振動数成分の最大値の距離減衰を求めたのが図-9である。

深さ2mでは、加速度は距離の-1乗に比例して減衰している。一方深さ0.5mではほとんど減衰しておらず、ほぼ一様な分布となっている。

動の実験では、一様な地動が望ましく、そのためにはより長い震源装置がより多く必要となろう。また、今回は震源内圧 $P_s = 6 \text{ kgf/cm}^2$ で、約300galの地動加速度であった。本震源装置は、内圧 10 kgf/cm^2 まで耐えられるので、600gal前後の地動の発生は可能であろう。

5. まとめ

震源装置を用いて、静的・動の実験を行った結果

- (1) 列震源により、大きな地動を発生させることが可能で、また動の実験には不要な高振動数の波動を低減させることができる。
- (2) 静的・動の実験での土圧・変位はほぼ同じであり、また静的解析とも一致しており、本手法により発生する土圧・変位は、静的解析で説明できる。

ことが明らかとなった。

今後は、より継続時間の長い地動を得るために、1つの震源装置内で、数回の発破を行えるような装置の開発や、動的解析等を行う予定である。

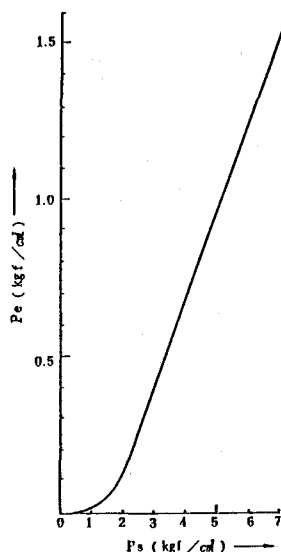


図-8 P_s と P_e の関係

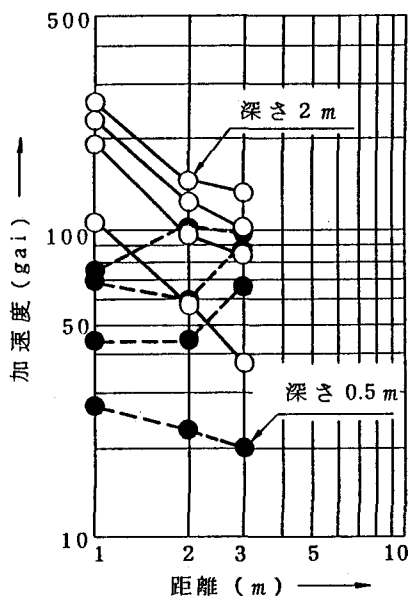


図-9 加速度の距離減衰

参考文献

- 1) J. RE. Bruce et. al., Simulation of Strong Earthquake Motion with Contained Explosion Line Source Array. SRI Final Report, December 1979
- 2) 川上 純 他, 発破を用いた人工地震波の発生, 第18回岩盤力学シンポジウム講演論文集, 1986

(93) The Characteristics of Artificial Earthquake generated by Controlled Explosions

----- Results of Array Source Tests -----

by Jun Kawakami
kenji Nakao
Ikuo Fukuyama
Terushige Ogawa

This report describes a controlled explosion technique, which produces earthquake-like ground motions for "in-situ" earthquake-resistant tests. Ground motions were generated by making use of gas pressure, which was produced by controlled explosions in a specially-made piping network.

Two types of experiments were performed, one was static experiments using nitrogen gas pressure, the other was dynamic experiments using explosions. From the experimental results and static analysis, the following results were summarized.

- 1) Ground motions produced by array source were bigger than that by single source, and contained low frequency.
- 2) The soil stress and displacement of ground motion produced by dynamic tests were almost same amplitude as that by static tests. Moreover the ground motions produced by this technique can be explained by static phenomena.