



発破による盛土地盤の締固めについて

谷口敬一郎*, 楠見晴重*

空げきに富む盛土や軟弱地盤に人工的な振動を与えることにより、土の骨格構造を変化させて締固め度を高める方法は、非常に有効な地盤改良法であるとされている。従来の方法はすべて振動エネルギーを地表から与える方式で、これらの方法では地下深所に対する効果が余り期待できないという問題が残されている。

本研究は振動源として上層中の発破エネルギーを利用しようというもので、その内容は土中発破の機構、土の強度等に関する基礎的な考察を述べ、実際の規模で実施した現場実験の結果と理論との比較検討を行っている。また、現場実験による実用的な効果としては、75kgのAN-FOによる4回の発破によって、造成盛土の自然沈下量の数年分に匹敵する即時沈下が生じたことから、この方法の有効性が明らかにされた。

1. 緒言

近年大規模な埋め立て工事や造成工事が随所で行われており、盛り高が3.40mにおよぶものも珍らしくない。このような高盛土地盤において避けることのできない現象は地盤の沈下で、不等沈下による災害の実例は枚挙にいとまがない。沈下現象は層厚、盛土材料、施工方法によって差異があるものの、このような高盛土地盤の安定には数年を要するのが普通である。

十分に締固まっていない盛土地盤や自然の軟弱地盤の上に構造物や建築物を建設するためには、人為的な地盤改良工事が必要とされ、通常は地盤の締固め、すなわち沈下の促進工法が採用されることが多い。盛土のような空げきに富む地盤に人工的な振動を与えて、沈下を促進させるという方法は極めて有効な工法で、最近重錘落下方式や加振機方式による地盤改良工法が実用に供されてきている。しかし、これらの方法ではいずれも地表から振動エネルギーを与える方式であるために、10m以下の地盤に十分な締固め効果を与えるのは困難であるとされている。

本研究は厚い土層の中で発破を行い、そのエネルギーを利用して地盤の締固め、もしくは沈下の促進を計ることを目的としたもので、発破振動による地盤の締固め機構について考察し、実際規模の現場実験の結果と比較検討を行っている。

2. 土中発破の機構

昭和59年10月26日受理

*関西大学工学部土木工学教室

〒564 吹田市千里山東3丁目10-1

TEL 06-388-1121

土層中の十分に深い位置において発破を行った場合、爆発による圧力によって爆源周囲の土は外部に押しやられ、爆源を中心として空洞が生成される。空洞の形態は土質条件によって大いに異なり、模型地盤による観察によれば、次の3つの形に分けることができる。

(1) 高含水および飽和した粘土質地盤

発破により空洞が生ずるが、それにほぼ相当する容積の地表盛り上がりが生ずる。

(2) 高含水および飽和した砂質地盤

地表の盛り上がりは(1)に比べて少ないが、砂層中の間引き水が空洞に流入するにつれて、空洞壁が崩壊し、その周囲はきわめて粗となる。

(3) 低含水・高空げき地盤

土質にかかわらず地表の盛り上がりはほとんど認められず、生成した空洞の周囲は爆発熱によって固化され、容易には崩壊しない状態となる。

盛土地盤の改良工法という観点からは、上述の(3)に属する地盤に適用することが望ましく、ここではこの問題に限定して考察を進めることとする*。

厚い土層の中における発破は一般に無自由面発破として取り扱われ、また空げきに富む土中では衝撃波の減衰が著しいために、土層に作用する応力は主としてガス圧によるものと考えることができる。

Fig. 1は土層中に球状装薬を行い、これを爆発させたとき、爆源周辺に生ずる変形状態を模式的に表わしたものである。図において、 r_c は爆薬の半径、 r_0 は薬室の半径であり、 $D_0=r_0/r_c$ はデカップリング指

*高含水地盤については文献¹⁾参照

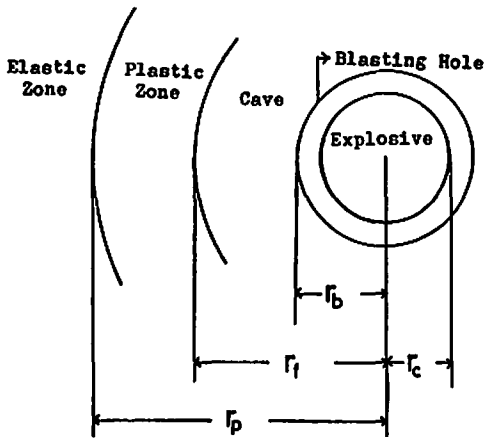


Fig. 1 Schematic diagram of soil deformation by blasting.

数とよばれる。 r_f は爆発によって形成された空洞の半径で、空洞内に存在していた土粒子はガス圧によって破碎され、空洞外壁部に押しやられるので、 $r_f \sim r_b$ の部分を破碎圏とよぶことにする。空洞の外側には塑性変形を受けた部分が生じ、空洞部の土粒子を吸収して密度が高くなっている。この部分を塑性圏とよぶ。塑性圏の外側は爆発によって一時的な応力を受けるが、土粒子の骨格構造の破壊にはいたらず、近似似的に弾性的な応力-ひずみ関係が保たれており、この部分を弾性圏とよぶことにする。

このような問題については、爆破孔周辺の圧力に関する Atchison 等²⁾や伊藤・佐々³⁾の研究が著名である。それらによれば、発破孔壁面上の空洞側に生ずる圧力 P_b は次のように与えられている。

$$P_b = P_D (r_b/r_c)^{-2} r = P_D D e^{-2r} \quad (1)$$

ここに、 P_D は爆ごう圧、 r は爆発生成ガスの定圧比熱と定容比熱との比である。いま、爆破孔に接する土層面に生ずる最大応力値を σ_b とすれば、

$$\sigma_b = k P_b = k P_D D e^{-2r} \quad (2)$$

と書かれる。

ガス圧によって爆破孔周辺の土は半径方向に押し広げられ、その結果半径 r_f の空洞が生じたものとする。この空洞の内壁における最大応力値を σ_f とすれば、

$$\sigma_f = k P_D D e^{-2r} (r_f/r_b)^{-m} \quad (3)$$

で与えられる。ただし、 m は破碎圏内における応力波の減衰指数である。

空洞の外側には圧縮されて密度の高くなった塑性圏が形成される。その外側は爆発による変形を受けない弾性圏であるとし、両者の境界を爆源中心から r_p の距離とする。この境界面における最大応力値を σ_p とすれば、

$$\sigma_p = \sigma_f (r_p/r_f)^{-n} \quad (4)$$

となる。ただし、 n は塑性圏内における応力波の減衰指数である。

3. 土のせん断強度

土のせん断強度は同一土質であっても、含水状態によって大巾に変化する。飽和土のせん断強度 S はよく知られているように、次式によって表わされる。

$$S = (\sigma_n - u) \tan \phi + C \quad (5)$$

ここに、 σ_n は垂直応力、 u は間げき水圧、 ϕ は内部まさつ角、 C は粘着力である。

乾燥土においては、 $u = 0$ 、であるが、両者の中間的な状態の不飽和土においては、土粒子の近傍において水の毛管力および表面張力による粒子間応力が作用し、その分だけせん断強度が高くなる傾向がある。この現象の理論的な説明はいまのところ諸説があつて、明確な結論に達していないが、粒子間応力によるせん断強度増加分を近似的に内部まさつ角 ϕ の増加として扱う考え方が成立するものと思われる。

本研究で扱う土は前述のように低含水、高空げきの砂質地盤であることから、 $u = 0$ 、 $C = 0$ 、と考えてよく、式(5)は次のように簡単になる。

$$S = \sigma_n \tan \phi \quad (6)$$

土中の爆発によって土が破碎されるのは、爆発によって生じた応力が土のせん断強度を上まわるためと考えられるので、空洞周壁部では、 $S = \sigma_f$ 、とすることができる。また、土の動的弾性限度領域の最大応力値を σ_e とすれば、 $\sigma_e = \sigma_p$ 、である。したがつて、式(2)、(3)および(4)と土のそれぞれの領域における許容最大応力値とを比較することによって、各領域内の応力波の減衰指数を求めることができる。また逆に、減衰指数が推定できれば、空洞の容積、圧縮の範囲を知ることが可能である。

4. 現場実験(1) (球状製薬)

4.1 地形・地質

実験現場は兵庫県宝塚市における宅地造成地内に位置し、実験は荒造成が完了した直後に行われた。Fig. 2 は現場における地質断面を示すもので、最高40mの高盛土によって造成された谷地形の上にあたる。地山は流紋岩質凝灰岩よりなり、盛土材料は付近の同質の地山から運搬されたもので、風化表土から発破岩塊にわたり、部分的には1~2tの大塊に富む地点もある。50mm以上のレキを除いた粒度試験結果の1例はFig. 3に示される通りで、統一土質分類法によれば、細粒分を含む砂(SM~SC)に相当する。

施工は主としてモーター・スクレーパーによる運土、展圧によるもので、地表からG.L.-7mのN値は10前後、それ以下はしだいに大きくなり、G.L.-

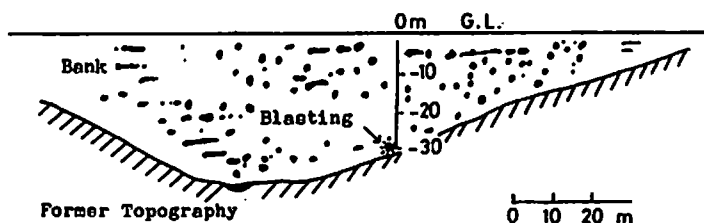


Fig. 2 Geological profile of experimental field (1)

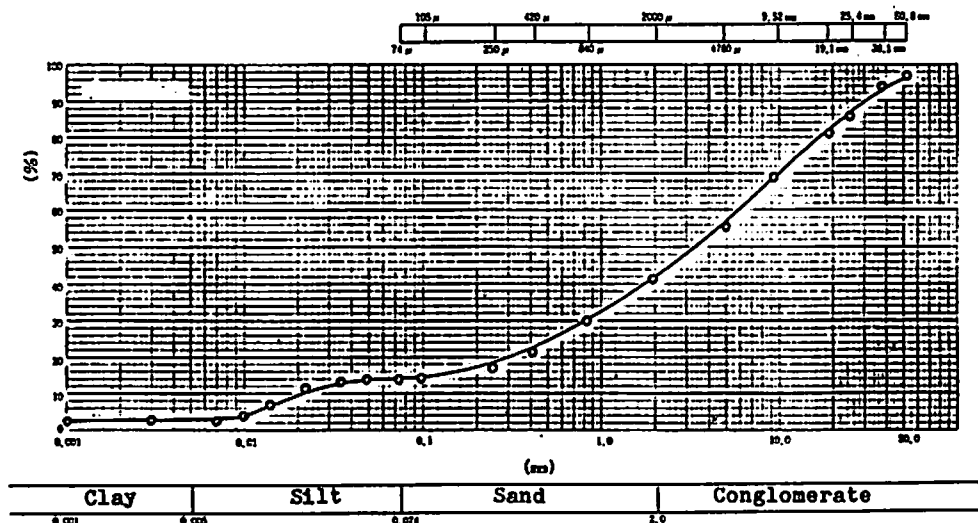


Fig. 3 Particle-size accumulation curve.

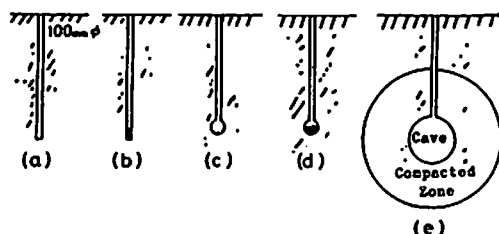


Fig. 4 Procedure of experiment.

15m以下では30~40の値となっている。爆破点は谷筋の地下構造物を避けて、Fig. 2のように盛土厚30mの位置とした。

4.2 実験方法

Fig. 4は実験の手順を示す概略図で、次のように実施した。

- 実験地点において、地山に達する深さ(30m)のボーリングを行い、内径100mmの植化ビニール管で保孔する。ただし、保孔管尻は孔底より2.5m上にとどめた。
- 製薬室を作るために拡底爆破の準備を行う。孔底の装薬は3号桐200gとし、約30lの乾燥した

砂で充填する。

- 拡底爆破を行う。この小爆破によって孔底には約200lの空洞が生じ、充填砂は発破後エスロンパイプで軽くつつくことにより、容易に孔底に落下した。
- 本爆破のために孔底に作られた装薬室に3号桐67.5kgを装薬し、乾燥した砂で孔口まで充填する。(充填砂の量と砂面上昇とから装薬室容積は約200lと推定された。)
- 本爆破の実施。

発破による地表の変化はほとんど見られなかったが、エスロンパイプを用いて充填砂を孔底に突き落とすさいに、後ガスが少々上昇してきた。

発破にさいしては、発破振動の計測を実施し、また数地点に沈下板を設置して、発破前後の地表の変位ならびに数ヶ月にわたる沈下を観測した。

4.3 実験結果

(1) 空洞

空洞の大きさおよびその周囲の圧縮された部分の範囲について、直接測定することはできなかったが、爆破孔よりモルタルを流しこんで、その量を計ったとこ

Table 1

Station No.	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Travel Time (ms)	92.8	73.5	59.8	52.0	42.0	19.5	40.0	50.5	61.5
Distance (m)	58.00	49.64	42.01	35.56	31.06	29.40	31.06	35.56	42.01
Propagation Velocity (m/sec)	625	675	702	684	739	1508	776	704	683

Table 2

Station No.	Displacement (μ)	Velocity (cm/sec)	Acceleration (cm/sec ²)
2	2	0.041	12.6
3	2	0.059	12.6
4	4	0.088	25.2
5	4	0.091	25.2
6	5	0.134	31.6
7	10	0.247	63.1
8	5	0.125	31.6
9	3	0.063	18.9
10	3	0.063	18.9

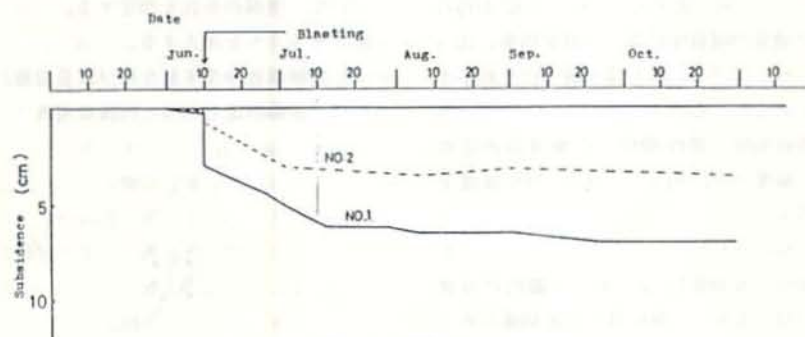


Fig. 5 Subsidence curve.

ろ約13m²であった。このことから、生成した空洞の大きさは半径約1.5mの球状をなすものと推定される。また、圧縮された範囲は後述のように空洞半径の3~4倍程度と考えられる。

(2) 振動測定

爆心真上の地表点を中心として、水平距離10mで9点の測点を設け、動電型受振器により振動波形を観測した。Table 1は爆心から各測点までの走時、距離、P波の伝播速度を示すものである。測点No.7は爆心真上に位置するため、ケーシングパイプを伝わってきた波が初動として現われるので、伝播速度が1,508m/s

と異常な値を示しているが、No.6, 7, 8を除外した平均値は679m/sで、この値が盛土の平均的P波伝播速度を表わすものとみなされる。

観測された波の振動数は約40Hzで、測定系の感度較正によって各測点における変位速度を求め、波形が正弦波に近いことから、 $2\pi f$ を乗除することにより変位ならびに変位加速度を計算した。それらの結果はTable 2に示されている。

(3) 沈下

発破による即時沈下を含めて、沈下量の長期観測を実施した。Fig. 5はその1例を示すもので、No.1は爆心

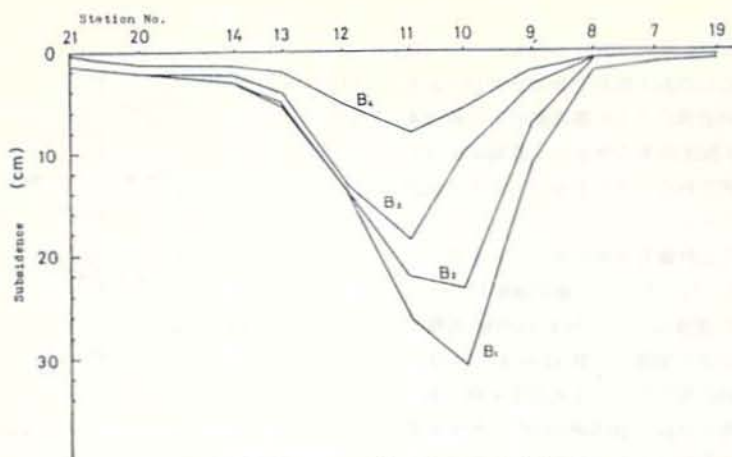


Fig. 8 Subsidence profile after each blasting.

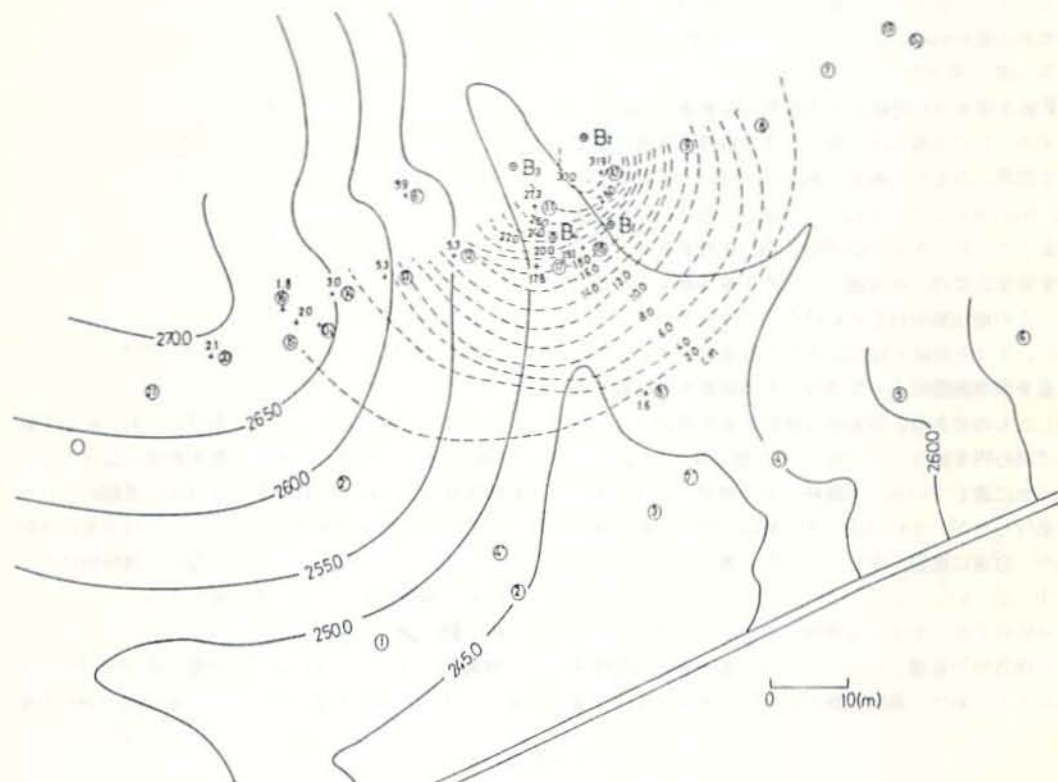


Fig. 9 Distribution of subsidence.

--- Contour of subsidence.
 — Contour of former topography.

けるという欠点があるものの、重錘落下工法やグラウト工法に比べると、経費も少く、また効果的な工法であることが、実験的に確かめられた。

土中発破に関する機構の考察はこれまでにほとんどなされていなかったようであるが、主としてガス圧に

よる応力について考えることにより、現場実験の結果とかなりよく一致することが明らかになった。また、土中発破によって生ずる振動は、土の減衰指数がかなり大きいため、爆源を離れると急速に衰え、きわめて小範囲に限られるので、局所的な地盤改良にも好適で

あり、地中構造物に及ぼす影響も少ない。

本報告においては、土中発破のエネルギーを盛土地盤の沈下促進に利用することを主たる目的としたが、爆源を中心とした空洞の生成、その周囲の圧縮帯の出現という現象は、他の目的にも利用できるように思われる。ここでは空洞にモルタルを注入して、建築物の基礎くいとして利用することを吟味したが、十分にその目的に適うことが確かめられた。

文 献

- 1) 楠見晴重, 谷口敬一郎: 土質工学会論文報告集, Vol. 24, No. 2, p. 161 (1984)
- 2) T. C. Atchison, W. I. Duvall, J. M. Pugliese: U. S. Bureau of Mines, R. I. 6333 (1964)
- 3) 伊藤一郎, 佐々宏一: 日本鉱業会誌, 80-907 (昭39)
- 4) P. L. Ivanov: "Compaction of noncohesive soil by explosions." (1972), Indian National Scientific Docum.

On Quickning Subsidence of Soil Bank by Blasting

by Keiichiro TANIGUCHI* and Harushige KUSUMI*

When the artificial vibration is added to the soil layer, the skeleton of the soil structure is destroyed and rearranged for the state of higher density. This is the principle of the dynamic compaction methods which have been used for the improvement of foundation.

The authors propose that the blasting in the soil layer as the source of energy may be more effective than the mechanical vibration from the surface. In this paper, the mechanism of soil blasting and the strength of soil are described and the results of two field experiments are discussed comparing with the theoretical considerations.

As the results, it is recognized that the instant subsidence caused by the soil blasting corresponds to the several years amount of the natural subsidence.

(*Department of Civil Engineering, Kansai University,
3-10-1, Senriyama-Higashi, Suita, Osaka.)