発破による砂質地盤の締固めに関する理論的研究

(Theoretical Study on Compaction of Sand) Deposits by Blasting

楠 見 晴 重* (Harushige Kusumi)

谷 口 敬 一 郎** (Keiichiro Taniguchi)

キーワード：応力／砂質土／締固め／動的／爆破／
引張り／飽和／有限要素法 (IGC : D7/D9/K5)

1. 緒 言

一般に爆破現象に関する理論的研究は、岩石のような弾性体媒質中に爆源が存在するときの破壊機構に関するものがほとんどであり^{1)~5)}、砂のような粒状体媒質中での爆破現象に関する研究はほとんど見当たらない。これはもともと発破の主な使用目的が岩石のような固結物質の破壊にあり、土砂のような未固結物を対象としていない面もあるが、一面では砂質土内での爆破現象は著しい非可逆性を呈し、その挙動を定量的に取り扱うことに非常に困難を伴うためであろう。砂質地盤での発破による締固め機構は、静的には平衡状態を保っている砂粒子の集合による構造骨格が爆破作用によって破壊され、粒子が移動することに起因していると考えられる。

佐々⁵⁾は一自由面発破の場合における岩石の破壊機構について詳細な研究を行っている。それによると爆破による破壊は、

(1) 高次塑性流動波および正規衝撃波を含む高压波動による爆源至近部の破壊。

(2) 爆源より投射された応力波の接線方向の引張り応力による爆源近傍および周辺部の破壊。

(3) 自由面での応力波の反射に伴い、反射応力波と入射応力波との重量による複雑な応力状態に起因する自由面近傍の破壊。

(4) 爆発生成ガスによる準静的な破壊。
の4つの破壊形式に分けて考えることができるとしている。また破壊効果には爆薬の静的性質と動的性質^{注1)}との両者が密接に関係し、その破壊の形式にも応力波によ

る動的破壊とガス圧による準静的な破壊とがあることを指摘している。このような岩盤内の爆破による破壊機構を、砂質地盤にそのまま適用する場合には次のような事実に注意する必要がある。すなわち、砂質地盤はこれまでの考察から明らかなように、固体・液体・気体の3相混合物であり、その力学的強度は岩石に比べて極めて低く、容易に変形されうる媒質である。また含水状態によってその機械的特性が大幅に変化するものであり、特に乾燥もしくはそれに近い砂地盤では、その中を伝播する応力波の減衰は極めて著しい。高含水地盤においては液体のそれに対応する性質を示すが、(3)の破壊現象は砂層地盤のごく表面近傍にのみ発生する現象であり、当面する問題においては余り大きな要因とはならない。

以上のことから、発破によって惹起される応力波およびガス圧が地盤の構造骨格を破壊し、体積変化をもたらすという現象の主因は爆源近傍および周辺部においては(2)、(4)と考えることができる。また一般に砂の体積変形はせん断応力や繰返しせん断応力によるとされているが⁶⁾、球状装薬が爆轟した場合、周囲の媒質へ投射される波動は、主に縦波(圧縮波)であり、横波(せん断波)はほとんど発生しない。更に、砂の引張り強度は圧縮強度に比べて極めて小さい。これらのことより、発破による砂の体積変化は、主に引張り応力によって砂粒子の骨格構造が破壊されて、生ずるものと考えられる。

したがって本研究では砂地盤の発破による締固め機構を解明するために、締固めを引き起こす主要因として爆破作用によって地盤内に発生する引張り応力にあると仮定し、上述した(2)および(4)の爆破作用に主として、それぞれの爆破作用による地盤内の応力状態について解析し、この2作用による砂地盤の締固め機構について考察した。更に模型地盤を用いて実施した実験により求めた締固め領域と同じ模型地盤を対象として、上述した解析結果を適用して求めた締固め領域との比較検討を行った。なお、著しい非可逆性を示す爆源至近部の応力状態については、理論的考察を行うのは、事実上困難であることより、主として発破振動が弾性波的となる爆源周辺部を解析対象とする。また、締固め領域を求めるこ

* 関西大学工学部土木工学教室 助手 (吹田市山手町 3-3-35)

** 関西大学工学部土木工学教室 教授 (吹田市山手町 3-3-35)

(1984.10.22 原稿受付・討議期限 1986.4.1, 要請があれば1か月の期限延長可能)

注1) 爆薬の静的性質とは爆薬の爆発後、瞬間静止している生成ガスの温度、圧力、ガス組成などの特性で、動的性質とは、波動としての爆薬の爆轟に関する特性¹¹⁾

図-1 媒体と爆源の関係
 ρ_t : 媒質の湿潤密度
 λ, μ : 媒質のラーメの定数

とより、砂層の体積変化が生ずる部分と生じない部分の境界部付近では、近似的に微小ひずみ領域と考えられる。以上のことから、解析対象とする地盤は弾性体と仮定する。したがって解そのものは近似解となるが、締固めの機構および締固めの影響が及ぶ領域については、定性的に把握されるものと思われる。

2. 装薬孔内での爆薬の爆轟により周囲の地盤へ投射される応力波による締固め作用

2.1 応力解析方法

図-1 において爆源を原点とし、媒質内の任意の点Aの座標を球座標 (r, θ, ϕ) で表し、それぞれの方向の変位成分を u_r, u_θ, u_ϕ とすると、点Aのひずみ成分は、

$$\left. \begin{aligned} e_{rr} &= \frac{\partial u_r}{\partial r} \\ e_{\theta\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \\ e_{\phi\phi} &= \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} + \frac{u_\theta}{r} \cot \theta + \frac{u_r}{r} \\ e_{\theta\phi} &= \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial \theta} - u_\phi \cot \theta \right) + \frac{1}{r \sin \theta} \cdot \frac{\partial u_\theta}{\partial \phi} \\ e_{\phi r} &= \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial u_r}{\partial \phi} + \frac{\partial u_\phi}{\partial r} - \frac{u_\phi}{r} \\ e_{r\theta} &= \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

で示され、その点の応力は、

$$\left. \begin{aligned} \widehat{rr} &= (\lambda + 2\mu) e_{rr} + \lambda (e_{\theta\theta} + e_{\phi\phi}) \\ \widehat{\theta\theta} &= (\lambda + 2\mu) e_{\theta\theta} + \lambda (e_{\phi\phi} + e_{rr}) \\ \widehat{\phi\phi} &= (\lambda + 2\mu) e_{\phi\phi} + \lambda (e_{rr} + e_{\theta\theta}) \\ \widehat{\theta\phi} &= \mu e_{\theta\phi} \\ \widehat{\phi r} &= \mu e_{\phi r} \\ \widehat{r\theta} &= \mu e_{r\theta} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

λ, μ : ラーメの定数

で示される。次に図-1 に示した爆源において、装薬が爆轟した場合、周囲の媒質内へ投射される波動の主要部分は縦波である。したがってそのときの点Aの変位成分は、

$$u_r = u(r, T), \quad u_\theta = u_\phi = 0 \quad (3)$$

となり、点Aの応力は式(1), (2)を用いて次式で示

される。

$$\left. \begin{aligned} \widehat{rr} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_r}{\partial r} + 2\lambda \frac{u_r}{r} \\ \widehat{\theta\theta} = \widehat{\phi\phi} &= \lambda \cdot \frac{\partial u_r}{\partial r} + 2(\lambda + \mu) \frac{u_r}{r} \\ \widehat{\theta\phi} = \widehat{\phi r} = \widehat{r\theta} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで動的応力の場合には、任意の点の r 方向(半径方向)の変位 u_r は、 u_r の最高値を決定する爆源からの距離 r の関数 $u_p(r)$ と、その点の変位の時間に対する変化状態を示す T の関数 $u_w(T)$ との積として示される。すなわち、

$$u_r = u(r, T) = u_p(r) \cdot u_w(T) \quad (5)$$

ここに $T = t - r/C_L$

t : 時間

C_L : 縦波の伝播速度

したがって

$$\frac{\partial u(r, T)}{\partial r} = \frac{du_p(r)}{dr} u_w(T) + \frac{du_w(T)}{dT} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} u_p(r) \quad (6)$$

となる。一方その点の変位速度 $v(r, T)$ は、

$$v(r, T) = \frac{\partial u(r, T)}{\partial t} = \frac{du_w(T)}{dT} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} u_p(r) \quad (7)$$

で示され、また、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial r} &= -\frac{1}{C_L} \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

を考慮すると、

$$\frac{\partial u(r, T)}{\partial r} = \frac{du_p(r)}{dr} u_w(T) - \frac{v(r, T)}{C_L} \quad (9)$$

となり、したがって式(4)は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \widehat{rr} &= (\lambda + 2\mu) \left\{ \frac{du_p(r)}{dr} u_w(T) - \frac{v(r, T)}{C_L} \right\} \\ &\quad + 2\lambda \frac{u(r, T)}{r} \\ \widehat{\theta\theta} = \widehat{\phi\phi} &= \lambda \left\{ \frac{du_p(r)}{dr} u_w(T) - \frac{v(r, T)}{C_L} \right\} \\ &\quad + 2(\lambda + \mu) \frac{u(r, T)}{r} \\ \widehat{\theta\phi} = \widehat{\phi r} = \widehat{r\theta} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

更に爆源から投射される縦波が3次元的に広がる場合には、縦波による変位および変位速度の最高値、 $u_p(r)$ および $v_p(r)$ は一般に次式で示される⁷⁾。

$$u_p(r) = A \cdot r^{-m} \quad (11)$$

$$v_p(r) = B \cdot r^{-n} \quad (12)$$

ここに A, B は地盤条件、装薬条件によって決められる定数であって、 n および m はそれぞれ最大変位、最大変位速度の距離 r による減衰指数である。したがって式(11), (12)を式(10)に適用すると、

図-2 $u_w(T)$, $v_w(T)$ の時間的変化状態
(佐々⁹⁾による)

$$\left. \begin{aligned} \widehat{rr} &= (\lambda + 2\mu) \left\{ -\frac{mA}{r^{(m+1)}} u_w(T) - \frac{B}{C_L r^n} v_w(T) \right\} \\ &\quad + 2\lambda \frac{A}{r^{(m+1)}} u_w(T) \\ \widehat{\theta\theta} &= \widehat{\phi\phi} = \lambda \left\{ -\frac{mA}{r^{(m+1)}} u_w(T) - \frac{B}{C_L r^n} v_w(T) \right\} \\ &\quad + 2(\lambda + \mu) \frac{A}{r^{(m+1)}} u_w(T) \\ \widehat{\theta\phi} &= \widehat{\phi r} = \widehat{r\theta} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

となる。ここで λ , μ はラーメの定数で、これらの値は次式の関係式から求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} C_L &= \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho_t} \\ C_T &= \sqrt{\mu/\rho_t} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

C_T : 横波の伝播速度
 ρ_t : 媒質の湿潤密度

また式 (13) において、 $u_w(T)$, $v_w(T)$ は変位および変位速度の時間的変化状態を表す関数であるが、これらの変化状態は爆源至近部、爆源近傍部および爆源周辺部において多少異なるが、過去に計測された結果^{5),9)}より、爆源周辺部においては、図-2 に表したような変化を示す。この図から明らかなように、最初に変位が最高値に達するまでは、変位が 1/4 波長進む間に、変位速度は 1/2 波長進行する。それ以降については、位相が $\pi/2$ ずれて変位、変位速度はほぼ同じ波長で進行する。したがって $u_w(T)$, $v_w(T)$ は式 (15), (16) のように仮定することができる。

$0 \leq T < T_p$ (T_p : $u_w(T)$ の最初の最高値に達するまでの時間)

$$\left. \begin{aligned} u_w(T) &= \sin(2\pi fT) \\ v_w(T) &= \sin(4\pi fT) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$T_p \geq T$$

図-3 模型地盤の平面図

$$\left. \begin{aligned} u_w(T) &= \sin(2\pi fT) \\ v_w(T) &= \cos(2\pi fT) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ただし f : 周波数

以上より、爆発によって地盤内へ直接投射された応力波により、爆源周辺部の任意点に発生する応力は、変位の最高値と距離 r との関係、および変位速度の最高値と距離 r との関係、縦波、横波の伝播速度ならびに媒質の湿潤密度を測定すれば式 (13), (14), (15), (16) の関係を用いて地盤内の応力状態について解析することができる。

2.2 模型地盤を用いた実験

2.1 で示した解析方法によって、任意点の応力状態を求めるためには、上述した諸要因を実測する必要がある。ここでは、乾燥および飽和状態にある模型地盤において、実際に一自由面発破を行い、これら諸要因の計測を行い、乾燥および飽和地盤の応力状態を求めた。

(a) 模型地盤の作製および実験方法

実験は図-3 に示した模型地盤を用いて行った。模型地盤は初期層厚が 60cm となるように乾燥した川砂をゆるく詰めたものである。飽和地盤を作製する場合には、その後砂層下部より徐々に水を注入した。なお実験対象とした模型地盤は、乾燥、飽和地盤とも初期乾燥密度 ρ_{d0} は約 1.48 t/m^3 ($D_r=21.2\%$) となるように調整した。また超音波測定装置によって各地盤の縦波および横波の伝播速度を測定した結果、ならびに初期湿潤密度 ρ_{t0} を表-1 に示した。この測定結果より、各地盤の λ , μ は式 (14) を用いて求められ、その求めた結果を表-2 に示す。実験に用いた砂は最大粒径 4.76mm, 均等係数 4.58, 比重 2.65 の川砂である。

爆源としては 6 号瞬発電気雷管を用いた。電気雷管の装薬位置は乾燥、飽和地盤とも地表面から 40cm とし

表-1 各地盤の初期定数

	$\rho_{d0}(\text{t/m}^3)$	$\rho_{t0}(\text{tf/m}^3)$	$C_L(\text{m/sec})$	$C_T(\text{m/sec})$
乾燥地盤	1.48	1.48	530	220
飽和地盤	1.48	1.92	1550	510

表-2 各地盤の λ, μ

	$\lambda(\text{MPa})$	$\mu(\text{MPa})$
乾燥地盤	273	72
飽和地盤	3609	500

図-4 N-S 測線の沈下状況

た。発破時の地盤振動を計測するために、動電型速度受振器を図-3に示すように最小抵抗線から水平方向に10, 20, 40, 60, 80, 100, 120 cmの8地点に、地表面から10 cmの深さに設置し、ベクトルケーブルを介して電磁オシログラフに出力を直記させた。また地表面の沈下測定点は図-3に示すように最小抵抗線およびそれを中心としてE, W, N, S方向にそれぞれ5, 10, 15, 20, 40, 60, 80 cmの合計29点とした。沈下の測定は、各沈下測定点上に交点がくるように、地表面から10 cmの高さに直交した糸を張り、これらの交点を各測定点の基準点として、その基準点から発破前と発破後に地表面までの距離を測定し、その差から沈下量を求めた。

(b) 実験結果

図-4は乾燥および飽和地盤の測線N-S方向の表面沈下の状態を示したものである。この図より乾燥地盤と飽和地盤とでは、かなり異なった沈下形状を示しており、特に沈下が生ずる領域は飽和地盤のほうが広範囲に及んでいる。また最小抵抗線付近の沈下は、飽和地盤よりも乾燥地盤において著しく大きい沈下を示しているが、この点に関しては文献10)において具体的に考察を行っている。すなわち、飽和地盤では、発破後に水中気泡の発生が観察された。この水中気泡は、水中もしくは飽和層内で生じた爆薬の爆発後の生成ガスであり、こ

図-5 各地盤の v_p と r との関係

の生成ガスは装薬室内壁に一樣な圧力として作用した後、慣性力により膨張、圧縮を繰り返しながら上層部へと発散する⁸⁾。このために発破によって締め固められた爆源至近部ならびに近傍部の砂層は、この生成ガスの発散作用によって一度安定した土構造が攪乱されることより、締め固め程度は乾燥地盤に比べて低くなるものと考えられる。

図-5は各地盤の変位速度の最高値 v_p と距離 r との関係を示したものである。この図より両地盤とも両対数グラフ上において直線的な減衰傾向を示すが、その減衰の程度はかなり異なる。この v_p と r との関係は一般に式(12)のように表されることがから、これらの測定結果を回帰分析して求めたのが式(17), (18)である。

$$\text{乾燥地盤: } v_p = 8.40 \times 10^5 r^{-3.4} \quad (17)$$

$$\text{飽和地盤: } v_p = 7.65 \times 10^3 r^{-1.8} \quad (18)$$

また、任意点の変位の最高値は、変位速度の観測波形より、周波数 f を読み取り、変位速度の最高値を $2\pi f$ で除することによって求めることができる。このようにして求めた各点の変位の最高値 u_p と距離 r との関係は次式のように示される。

$$\text{乾燥地盤: } u_p = 2520 r^{-3.4} \quad (19)$$

$$\text{飽和地盤: } u_p = 13 r^{-1.8} \quad (20)$$

2.3 解析結果および考察

以上の実験で得られた結果と表-2に示した λ, μ の値とを式(13), (15), (16)に適用して各地盤の爆源周辺部の応力状態について解析を行った。

図-6, 7は各地盤の爆源から40 cm離れた地点における、爆源を中心とした半径方向の応力 $\hat{r}\hat{r}$, および接線方向の応力 $\hat{\theta}\hat{\theta}$ の時間的変化状態を示したものである。この図から明らかなように、図に示した範囲内では、

図-6 乾燥地盤における $\widehat{rr}$, $\widehat{\theta\theta}$ の時間的変化状態 図-7 飽和地盤における $\widehat{rr}$, $\widehat{\theta\theta}$ の時間的変化状態

乾燥地盤は $\widehat{rr}$, $\widehat{\theta\theta}$ とともに圧縮応力（マイナスが圧縮側）として作用するのが認められる。これに対して飽和地盤では $\widehat{\theta\theta}$ は引張り応力として作用し、 $\widehat{rr}$ は最初圧縮応力として作用するが、後に引張り応力として作用する。しかしこの引張り応力の最高値は圧縮側の最高値、または $\widehat{\theta\theta}$ の最高値と比べて非常に小さい値となっている。以上の結果より、この地点において乾燥地盤では $\widehat{rr}$, $\widehat{\theta\theta}$ の最高値はともに圧縮側で現れるのに対して、飽和地盤では $\widehat{rr}$ の最高値は圧縮側、 $\widehat{\theta\theta}$ の最高値は引張り側に現れるのが認められた。佐々⁹⁾によると、発破の対象となる媒質の縦波の伝播速度が早いほど、また波動の伝播に伴う振幅の減衰が小さいほど、引張り応力が生じやすいことを指摘している。このことより、乾燥砂と飽和砂とを比べた場合、飽和砂のほうが上述した媒質に近いことから、飽和砂のみに引張り応力が生ずるものと考えられる。

表-3 は各地盤の r に対する $\widehat{rr}$, $\widehat{\theta\theta}$ の最高値を示したものである。この表より乾燥地盤においては $\widehat{rr}$, $\widehat{\theta\theta}$ の最高値は距離 r が変わっても、ともに圧縮側に現れる。飽和地盤では $\widehat{rr}$ の最高値は圧縮側、 $\widehat{\theta\theta}$ の最高値は引張り側に現れる。したがって r が変化しても、各地盤の

表-3 各地盤の $\widehat{rr}_{\max}$, $\widehat{\theta\theta}_{\max}$

r (cm)	乾燥地盤		飽和地盤	
	$\widehat{rr}_{\max}$ (kPa)	$\widehat{\theta\theta}_{\max}$ (kPa)	$\widehat{rr}_{\max}$ (kPa)	$\widehat{\theta\theta}_{\max}$ (kPa)
30	-704.12	-204.96	-1319.98	1789.71
40	-241.24	-60.51	-656.06	841.41
50	-76.20	-23.73	-387.36	474.64
60	-34.72	-11.18	-254.97	301.06
70	-17.95	-5.95	-180.44	205.94
80	-10.10	-3.47	-134.35	149.06
90	-6.15	-2.17	-103.95	112.78
100	-3.94	-1.42	-83.26	88.06
110	-2.65	-0.98	-68.06	70.71
120	-1.84	-0.33	-56.68	57.96

(—が圧縮)

$\widehat{rr}$, $\widehat{\theta\theta}$ の最高値の現れる側は常に同じであることが認められた。しかし $\widehat{rr}$, $\widehat{\theta\theta}$ の時間的変化状態は r が変わると、図-6, 7 と比べて若干異なる傾向がみられた。

以上の解析結果より、爆薬の爆轟により周囲の地盤へ直接投射される応力波による締固め作用は、ほとんどの地点において接線方向に引張り応力が発生する飽和地盤に対して大きな影響力を与えるものと考えられ、爆源を中心として非常な広範囲に地表面沈下が生ずるものと推察される。これは図-4 の実験結果とほぼ一致することからも、上述した考察が正しいことが認められる。乾燥地盤では、すべての地点において引張り応力は発生していないことから爆源周辺部では応力波による締固め作用はほとんどなされないものと思われる。

3. 爆発生成ガス圧による締固め作用

3.1 装薬室内壁に作用する爆発生成ガス圧

爆薬の爆発現象は、一般に瞬間的な化学反応であるため、その反応作用によって最初に爆薬の爆轟による応力波が直接地盤内へ投射される。その後、反応生成物として高温ガスが発生し、それは装薬室内壁にほぼ一様な応力として作用する。したがって前節で述べた応力波の作用とともに、このガス圧の作用によっても地盤の締固めが遂行されるものと考えられる。この節では前節と同様 2.2 で述べた模型地盤で行った実験を解析対象とすることから、爆源は 6 号瞬発電気雷管である。

6 号瞬発電気雷管（旭化成製、耐静電気雷管）はジアゾニトフェノール (DDNP) を成分とする起爆薬 0.42g とペントライトを成分とする添装薬 0.45g とから成る。ここでペントライトはペンスリット (PETN) とトリニトロトルエン (TNT) を 1:1 の重量比で混合されている。これらの成分から成る 6 号瞬発電気雷管の爆発反応は次のようである。

ここで $[\text{C}_6\text{H}_2\text{CH}_3(\text{NO}_2)_3]$: TNT

$[\text{C}(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4]$: PETN

$[\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_2\text{ON}_2]$: DDNP

x_1, x_2, x_3 : 雷管1個の中に含まれる TNT, PETN, DDNP のモル数

x_4, x_5, x_6, x_7 : 生成物質のモル数

Q : 反応系の反応熱

式 (21) の x_1, x_2, x_3 は次式のようにして求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{(\text{雷管1個に含まれる TNT の質量})}{(\text{TNT の分子量})} \\ &= \frac{0.225}{227} = 9.91 \times 10^{-4} \text{ (mol)} \\ x_2 &= \frac{(\text{雷管1個に含まれる PETN の質量})}{(\text{PETN の分子量})} \\ &= \frac{0.225}{316} = 7.12 \times 10^{-4} \text{ (mol)} \\ x_3 &= \frac{(\text{雷管1個に含まれる DDNP の質量})}{(\text{DDNP の分子量})} \\ &= \frac{0.420}{210} = 2.00 \times 10^{-3} \text{ (mol)} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

次に x_4, x_5, x_6, x_7 は式 (21), (22) より質量保存の法則から, 式 (23) に示すように求められる。

$$\left. \begin{aligned} x_4 &= 7x_1 + 5x_2 + 6x_3 = 2.25 \times 10^{-2} \text{ (mol)} \\ x_5 &= \frac{1}{2}(5x_1 + 8x_2 + 2x_3) = 7.33 \times 10^{-3} \text{ (mol)} \\ x_6 &= \frac{1}{2}(3x_1 + 4x_2 + 4x_3) = 6.91 \times 10^{-3} \text{ (mol)} \\ x_7 &= \frac{1}{2}(6x_1 + 12x_2 + 5x_3 - 2x_4 - x_5) \\ &= -1.39 \times 10^{-2} \text{ (mol)} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

以上より爆発生成ガスの標準状態における体積 V_b は

次式のようになる。

$$V_b = 22.4 \times (x_4 + x_5 + x_6 + x_7) = 5.12 \times 10^{-1} \text{ (l)} \quad (24)$$

次に 6 号瞬発電気雷管の火薬力 f_b は気温 15°C のもとでは式 (25) のように表される¹¹⁾。

$$f_b = \frac{P_0 \cdot V_b \cdot T_e}{273 + 15} \quad (25)$$

ただし P_0 : 大気圧

T_e : 爆発温度 (6 号瞬発電気雷管の場合は約 2000°K)

よって式 (25) に $P_0 = 101.3 \text{ kPa}$ (1 気圧), $V_b = 5.12 \times 10^{-1} \text{ l}$, $T_e = 2000^\circ\text{K}$ を代入すると

$$f_b = 353.8 \text{ (l} \cdot \text{kPa)} \quad (26)$$

となる。更に 6 号瞬発電気雷管を砂層に装薬した場合, その装薬室の体積は約 $5 \times 10^{-3} \text{ l}$ となる。これより装薬室内壁に作用するガス圧 p_b は,

$$p_b = f_b / 5 \times 10^{-3} = 353.8 / 5 \times 10^{-3} \approx 1769 \text{ (MPa)} \quad (27)$$

となる。これより, 6 号瞬発電気雷管が地盤内において爆轟した場合の装薬室内壁に作用するガス圧の大きさが判明した。

3.2 解析方法

一般に地盤内で爆薬が爆轟した場合, それによって地盤内へ直接投射される応力波による作用と, 後に起こる爆発生成ガス圧による作用とが存在するが, 爆発生成ガス圧の現象は応力波の現象に比べて非常にゆっくりしたものである。したがってここでは爆発生成ガス圧による作用は, 準静的な現象としてとらえ, 装薬室内壁に爆発生成ガスによる圧力がある時間一定の大きさに保持されていると仮定し, そのときの地盤の応力状態を求めるために, 有限要素法による静的な応力解析を行った。なお

図-8 要素分割モデル

表-4 各地盤の力学定数

	弾性定数 $E(\text{MPa})$	ポアソン比 ν	湿潤密度 $\rho_t(\text{tf/m}^3)$
乾燥地盤	9.81	0.40	1.48
飽和地盤	8.83	0.44	1.97

解析対象とした地盤は弾性体として仮定した。したがって応力解析の結果は近似解となるが、この結果より爆発生成ガス圧による締固めが遂行される領域について定性的に把握されるものと考えられる。

応力解析は、前節で行った実験に用いた模型地盤を図-8に示すような要素分割をしたモデルについて行った。なお装薬室はこの図に示すように球状とした。また装薬位置は前節の実験条件と同様、地盤表面から40cmの深さとした。球状装薬による一自由面発破の解析では、最小抵抗線およびその延長線を軸とする軸対称問題として取り扱うことができるものと考えられ、その軸を

通る断面の片側だけについて応力解析を行えば十分である。なお解析に用いた乾燥および飽和地盤の力学定数は表-4に示すとおりである。ここで弾性定数 E は一次元圧縮試験によって求めたものである。一次元圧縮試験の方法は、直径15cm、高さ10cm、厚さ1.5cmの亚克力製円筒容器内に、模型地盤で使った乾燥砂を詰め、鉛直方向に荷重を段階的に载荷させ、応力と変位との関係を求めた。飽和砂の場合には、供試体下部より徐々に水を注入して飽和状態となるように砂層を作製した。各供試体の初期乾燥密度は、模型地盤と同様、 1.48 t/m^3 に調整した。なお、垂直変位がほぼ一定となった後、次の荷重段階に移行させた。また飽和砂の試験は排水状態で行った。以上の方法によって応力とひずみとの関係を求め、その初期の接線係数を弾性定数 E とした。ポアソン比 ν は式(28)の關係を用いて求めた。

図-9 (a) 乾燥地盤における主応力分布

図-9 (b) 乾燥地盤における引張り応力領域

図-10 (a) 飽和地盤における主応力分布

図-10 (b) 飽和地盤における引張り応力領域

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (28)$$

装薬室内壁には 3.1 で得られた爆発生成ガス圧, $p_b = 1769$ (MPa) を乾燥および飽和地盤ともに一様に作用させた。なお解析を実行するに当たっては、構造解析用プログラム「NASTRAN」を使用して行った。

3.3 解析結果および考察

図-9 (a) は乾燥地盤における主応力 σ_1, σ_3 の分布および作用方向を表したものである。この図より主応力 σ_1 はすべての地点において圧縮応力として作用しているが、主応力 σ_3 は爆源から約 60~80 cm の領域までは引張り応力として作用し、それより離れた領域では圧縮応力として作用している。ここで前節と同様、引張り応力が発生する領域を締固め領域とすると、乾燥地盤における爆発生成ガス圧力による締固め作用が遂行される領

域は図-9 (b) に示す部分と考えられる。前節で述べた模型地盤による実験では、乾燥地盤における地表面沈下が発生している領域は、最小抵抗線を中心として半径約 40 ないし 45 cm 以内となっている (図-4)。この実験結果と本節で得られた解析結果とを比較すると、締固めが遂行される領域は、解析結果のほうが広がっているが、図-9 (b) に示した斜線部の境界部分もしくはその周辺部分においては、図-9 (a) から明らかなように、発生している引張り応力は、非常に小さい値となっている。このことを考慮すると、解析結果と実験結果とは比較的良好に一致しているものと考えられる。このことから乾燥地盤における発破による締固め機構は、爆源至近部においては爆発の爆轟によって地盤内へ投射された応力波の作用も含まれると思われるが、その部分は非常にせまいものと考えられ、爆源近傍部および周辺部では、爆

発生成ガス圧の作用のみによって締固めが遂行されるものと考えられる。

図-10 (a) は飽和地盤における主応力 σ_1 , σ_3 の分布および作用方向を表している。この図より主応力 σ_1 , σ_3 の分布は乾燥地盤とほぼ同様の傾向を示しており、爆発生成ガス圧によって締固めが遂行される領域は、乾燥地盤とほぼ同じ領域と考えられる (図-10 (b))。飽和地盤において雷管による一自由面発破を実施した場合、地盤表面の沈下は図-4 から明らかなように、乾燥地盤に比べてかなり広い領域に及んでいる。これは前節において、応力波による地盤内の応力状態が乾燥地盤と飽和地盤とでは異なることに起因しており、特に飽和地盤の爆源周辺部の締固めは、この応力波の作用によってなされることはすでに述べた。更に飽和地盤では、爆源を中心として半径約 40~60 cm 以内の周辺部では、応力波による締固め作用と爆発生成ガス圧による締固め作用の 2 つの爆破作用によって締め固められることが明らかとなった。

一般に飽和砂の場合、せん断応力や繰返しせん断応力によって砂粒子は移動しようとするが、間隙水の存在のために、すぐには移動できず、間隙水圧が発生する。この間隙水圧がピーク値に達した後、徐々に減少し、それに伴って間隙水が排水され、その排水された間隙水の体積分だけ、砂層の体積変化が生ずるとされている⁹⁾。発破による締固め機構においても、基本的には間隙水の排水によって体積変化が生ずるものと思われる。しかし、間隙水圧の発生原因ならびに砂粒子を移動させる外力としては上述したせん断応力や繰返しせん断応力とは異なり、主として引張り応力によると考えられる。

以上の解析結果より、飽和地盤において、発破による締固め工法を適用する場合、爆源からあまり離れていない周辺部の地盤では、爆発によって地盤内へ投射される応力波による作用と爆発生成ガス圧による作用の 2 つの締固め効果について考慮する必要がある、それより離れた地盤では、応力波による作用のみについて考慮すればよく、乾燥地盤の場合、爆発生成ガス圧による作用のみについて検討することより、合理的な締固め設計が実施されるものと思われる。

4. 結 言

本論文は、砂質地盤を対象として、球状装薬を爆発させたときの締固め機構および締固め領域を明らかにするために、主として爆薬の爆轟により地盤に投射される応力波による動的作用と、爆発反応後に生成されるガス圧

による準静的作用の 2 つの爆破作用に着目し、乾燥および飽和地盤を対象として、理論的考察を行ったものである。その結果、爆薬の爆轟により地盤に投射された応力波による任意点の応力状態に関して、爆源を中心とする半径方向の最大応力は乾燥、飽和地盤ともに圧縮応力として働き、接線方向の最大応力は乾燥地盤では圧縮応力となり、飽和地盤では広い領域にわたって引張り応力として働くことが判明し、これより、応力波による締固め作用を受けるのは飽和地盤のみであることが認められた。

爆発反応後に生成されるガス圧が装薬室内壁に一樣に作用したときに、地盤内の任意点の応力状態を求めた結果、乾燥および飽和地盤ともに爆源を中心として、比較的せまい領域において引張り応力が発生することが認められた。したがって乾燥地盤においては、主として爆発生成ガス圧による作用のみによって締め固められ、飽和地盤では比較的爆源に近い周辺部においては、応力波による作用と爆発生成ガス圧による作用によって締め固められ、爆源より離れた周辺部においては、応力波による作用のみによって締め固められることが判明した。

これらの解析結果と模型地盤による実験結果と比較すると、比較的よく一致することが認められ、本研究で得られた解析結果の有効性が確かめられた。

最後に本研究を行うに当たり、数々の有益な御助言をいただいた京都大学資源工学教室、佐々宏一教授、花崎鉦一講師に対し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 村田 勉・田中一三(1954)：岩石発破に関する研究, 第 1 報, 「工業火薬協会誌」, Vol.15, No.4, pp.294~303.
- 2) 村田 勉・田中一三(1955)：岩石発破に関する力学的研究, 第 2 報, 「工業火薬協会誌」, Vol.16, No.1, pp.32~41.
- 3) 橋本 清・本間久朗(1972)：爆破による岩石破壊のメカニズムについて, 「日本鉱業会誌」, Vol.88, No.1, pp.11~16.
- 4) 勝山邦久・佐々宏一・伊藤一郎(1972)：一自由面爆破におけるき裂およびクレータの生成機構についての一考察, 「日本鉱業会誌」, Vol.88, No.8, pp.11~16.
- 5) 佐々宏一(1962)：爆破による破壊機構に関する研究, 京都大学博士学位論文.
- 6) 石原研而(1976)：「土質動力学の基礎」, 鹿島出版会.
- 7) 正田強監修(1976)：「発破ハンドブック」, 山海堂.
- 8) R. H. Cole(1948)：Under Water Explosions, Princeton University Press.
- 9) 佐々宏一(1984)：爆源近傍の破壊と波動, 「工業火薬協会誌」, Vol.45, No.3, pp.118~128.
- 10) 楠見晴重・谷口敬一郎(1984)：発破による砂質地盤の締固めに関する室内実験, 「土質工学会論文報告集」, Vol.24, No.2, pp.161~170.
- 11) 工業火薬協会編(1966)：「工業火薬ハンドブック」, 共立出版.