

小孔の衝撃押し広げによる地下空間構築技術 の実現可能性

建山和由¹・平井伸吾²・矢野隆夫³・片見俊宏⁴

¹正会員 工博 立命館大学教授 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 草津市野路東 1-1-1)
E-mail: tateyama@se.ritsumei.ac.jp

²正会員 工修 東海旅客鉄道株式会社 (〒100-0005 東京都千代田区丸の内 1-6-5)

³正会員 京都大学技官 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

土中に掘削した直径 10cm 程度の小孔の内部に発破等により衝撃荷重を載荷する場合を想定する。このとき小孔の孔壁周辺の土は急激に圧縮され、地盤内には、高密度の土の孔壁で囲まれた空洞が出現する。この考えを実際のトンネル施工や基礎工事に応用すると、最小限の排土で、かつ最小の覆工で地下空間を構築することができる。本論文では、衝撃的な載荷による地下空間構築技術の実現可能性について数値計算と室内実験により考察を行った。

Key Words: shock wave, explosive loading, soil compaction, underground space, experiment, numerical simulation

1. はじめに

トンネルに代表される地下空間の構築や杭をはじめとする構造物の基礎工事では、地盤を掘削して地盤内に空間を構築しなければならない。工事に伴い発生する建設発生土は、その処理が年々困難となり、これが制約となり掘削工事に支障を来す場合も多くなってきた。

本研究では、図-1 に示すように地盤中に直径 10cm 程度の小孔を掘削し、これを発破等を使って衝撃的に押し広げることを想定する。この手法では小孔を押し広げて空間を作り出すため、排土を最小限に押さえることができ、かつ、衝撃的に押し広げると孔壁周辺の土を集中的に圧縮することになるため、孔壁の安定を保つことができ、トンネル等の地下空間では覆工の軽減をはかり得る可能性がある。本論文では、この技術の実現可能性について、数値計算と室内実験により考察を行う。

2. 小孔の衝撃押し広げの原理

(1) 衝撃載荷による土の圧縮について

いま、図-2 に示すように、長さ l の棒の一端を長さ δ だけ押し縮める場合を考える。

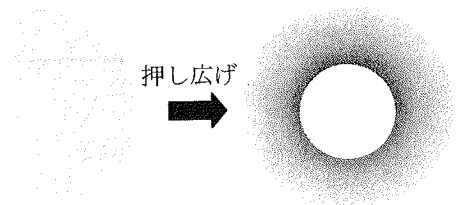


図-1 小孔の衝撃押し広げによる地下空間の構築

このとき、棒をゆっくりと押し縮めると、棒は全体が圧縮され、棒に発生するひずみ ε_s は式(1)で表される。

$$\varepsilon_s = \frac{\delta}{l} \quad (1)$$

これに対し、棒の一端を Δt という微小な時間に急激に長さ δ だけ押し縮めると、その情報は棒の中を速度 c で伝播する。このとき、 Δt が非常に小さいと、棒の一端が押されたという情報は他端まで伝わっていない ($c \cdot \Delta t < l$) ため、 $c \cdot \Delta t$ の部分のみが長さ δ の圧縮を受け持つことになり、このとき発生するひずみ ε_s は式(2)で表されることになる。

$$\varepsilon_d = \frac{\delta}{c \cdot \Delta t} \quad (2)$$

式(1)を式(2)と比べると、 $c \cdot \Delta t < l$ であれば式(2)で表されるひずみの方が大きいことになり、さらに Δt が小さいほど、すなわち衝撃的な荷重であるほど、ひずみが大きくなるのが分かる。このことは、衝撃的に棒を圧縮すると、圧縮量は同じであっても棒の一部分に圧縮の影響を集中させ得ることを意味している。

この原理を今回の地下空間構築技術に適用することを考える。図-3はそのイメージを図に表したものである。

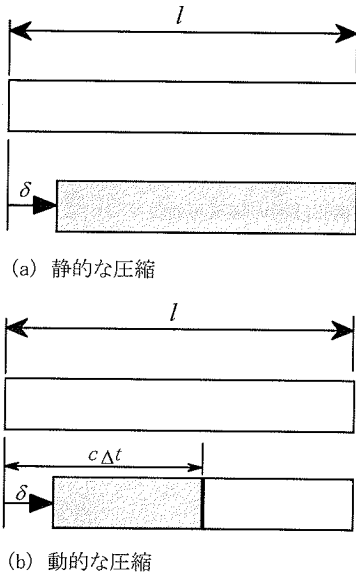


図-2 静的圧縮と動的圧縮

小孔を急激に押し広げると、図-2(b)の場合と同様に主に孔壁近傍の土のみを圧縮させることになり、小孔を地下空間にまで広げた影響は、静的に押し広げる場合に比べ、孔壁周辺に集中させることができる。このように衝撃荷重を負荷すると、載荷点付近にひずみを集中して発生させることになるが、土は圧縮されて密になると、通常、強度が増加し強固になる。このため、この部分の土の安定性が増加し、覆工の軽減を図り得ることになる。

(2) 衝撃波の伝播と減衰

地中に設けた小孔内壁に衝撃的な荷重を行う場合、それによる周辺地盤への影響は、この技術の実現可能性を議論する上で不可避の検討事項といえる。ここでは、地盤内における波頭の伝播と減衰について、本研究で採用した考え方を説明する。

今回想定している地下空間の構築では、小孔を急激に押し広げ、小孔周辺の土を孔壁周辺で集中して圧縮することを想定している。この場合、孔壁周辺の土の密度は増加するが、一般に土は密なほど強度や剛性は高くなり、また、後述の数値計算の節で説明するように地盤内の波頭は、硬い地盤ほど早く伝わることになる。この前提のもとに土中における衝撃波頭の伝播を考える。

いま、図-4(a)に示すような、パルス状の荷重を小孔内壁に衝撃的に加えることを想定する。図-4(a)のパルス荷重は、図-4(b)に示すような正のステップ荷重とそれに少し遅れて発生する負のステップ荷重(図-4(c))との重ね合わせの結果生じたと考えることができる。

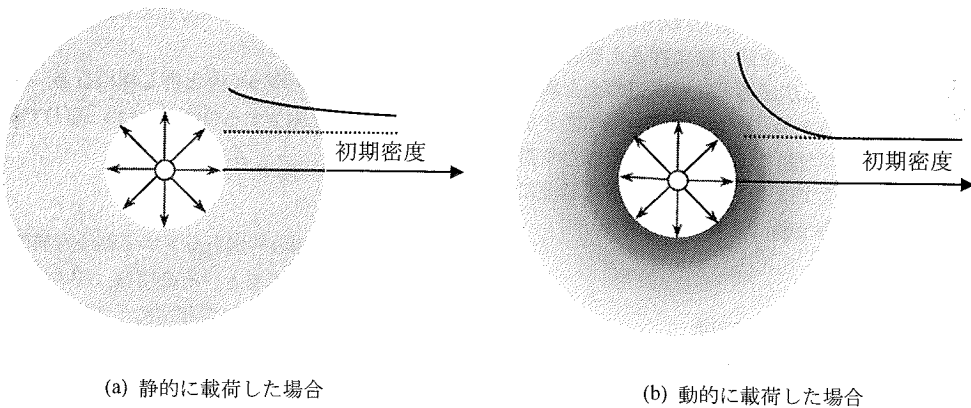


図-3 小孔の押し広げによる地下空間の構築イメージ

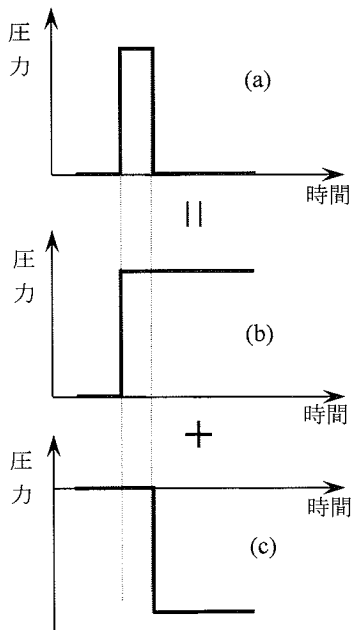


図-4 衝撃波の伝播の考え方

この考え方では、地盤内には、図-4(b)で示される先発の正のステップ荷重が最初に伝播し、少し遅れて図-4(c)の負のステップ荷重が伝播していくことになる。しかしながら、正のステップ荷重が伝播すると地盤は圧縮されて剛性が大きくなるため、この部分における波動の伝播速度は元の地盤より大きくなる。後発の負のステップ荷重は先発波動により圧縮されたところを伝播するため、その伝播速度は、先発の波動より大きくなる。このため、波動の伝播が進んでいくと、後発の波動は先発の波動に追いつくことになる。先発の波動と後発の波動は正負の符号が反対で大きさは同じであるため、結果として地盤内を伝播している波動は消滅することになる。この考え方に従うと、地盤内を伝播する衝撃波の影響は、ある範囲に押さえ得ることになる。

本研究では、本節(1)で説明した衝撃圧縮による土の局所的な圧縮と(2)で述べた衝撃波頭の伝播特性に関する考えを基本とし、小孔の衝撃押し広げによる地下空間構築技術の可能性について、数値計算と室内実験により検討を行う。

3. 数値計算

小孔を急速に押し広げたときの周辺地盤の密度分布の変化と衝撃押し広げによる影響領域を定量的に評価するために数値計算を行った。この計算では、土の一次元衝撃縮固め現象をシミュレートするために開発した計算手法を円筒小孔の衝撃押し広げ問題に拡張して用い

た。この計算手法は、圧縮性の土が衝撃を受けたときに土の中を塑性波頭が伝播し、それに伴い土が圧縮される現象を微小時間ステップで計算する方法であり、土の圧縮変形を含む衝撃問題を表現することができる¹⁾。ここでは、この計算手法を用い、半無限の均質な地盤内の小孔に内側から衝撃力を加えることにより小孔を急速に押し広げた際の小孔の拡大量、地盤内の密度分布の変化、影響範囲等を計算した。以下、計算手法の概要と計算結果について説明する。

(1) 数値計算における条件の設定と計算方法

圧縮性の土が衝撃荷重を受けると、塑性波頭が土の中を伝播し、それに伴い土の圧縮が生じる。今回の衝撃押し広げのシミュレーションにおいてもこの考え方に基づき以下の仮定のもとに議論を進める。

- a) 塑性波頭は平面内を2次元的に伝播する。
- b) 土は、一様な初期密度をもち、連続的に分布しているものとする。すなわち反射波等は考えず、初期の波頭の伝播による密度変化のみを考える。
- c) 均質な不飽和土を対象とし、土中には衝撃に伴う過剰間隙水圧が発生しないことを想定する。
- d) 土中の塑性波の伝播を考える上で、土の応力 \sim ひずみ関係を導入する必要がある。ここでは土を一次元圧縮した際に得られる土の間隙比 \sim 圧力関係 ($e \sim \log P$ 関係)を用いることにする。一般に土の圧縮特性は載荷速度の影響を受けると言われているが、ここでは、その影響を動的載荷の考え方で表現することとし、物性値に及ぼす載荷速度の影響は考慮しない。
- e) 塑性波頭の伝播速度は、d) の $e \sim \log P$ 関係から導かれる応力 \sim ひずみ関係を用いて求める。
 - d) に関しては、後述の実験で用いる試料土(砂質ローム、比重 2.65, 含水比 13.5%)を一次元圧縮して得られた $e \sim \log P$ 関係を用いる。実験では、標準圧密試験用リングに試料土を詰め、8段階の上載圧 (9.8, 19.6, 39.2, 78.5, 157, 314, 628, 1256 kN/m²) で圧密試験を行い、 $P = 628$ kN/m² および 1256 kN/m² の2点においては除荷・再載荷の挙動も測定した。

図-5はこの試験の結果を示したものである。この図より、載荷領域において $e \sim \log P$ 関係は直線で近似できること(以下、この領域のことを正規領域と呼ぶ)、除荷・再載荷領域での間隙比変化は、載荷領域に比べるとかなり小さいものであることが分かる。よって、以下の議論においては、土中の小孔が衝撃力により押し広げられる際、この部分の土が $e \sim \log P$ 面上で正規領域にあるときには、間隙比の減少が生じ、除荷・再載荷領域にあるときには間隙比の変化は生じず、その部分の土は剛体のようにふるまい、その密度は変化しないと考える。

e) に関して、試料土の応力～ひずみ関係 ($\sigma \sim \varepsilon$ 関係) が与えられた場合、その試料土中の塑性波頭の伝播速度 C_p (m/sec) は次式によって与えられる²⁾。

$$C_p = \sqrt{\frac{d\sigma/d\varepsilon}{\rho}} \quad (3)$$

ここで、 ρ は媒質となる試料土の密度 (kg/m^3)、また $d\sigma/d\varepsilon$ は試料土の応力～ひずみ関係の接線勾配を表す。媒体が弾性挙動を示す場合は、 $d\sigma/d\varepsilon = E = \text{一定}$ より、 $C_p = \sqrt{E/\rho}$ という形となる。しかしながら、 $d\sigma/d\varepsilon$ は応力～ひずみ関係が直線でない限り、ひずみに依存して変化するため、塑性波頭の伝播速度もひずみの大きさにより変化する。

そこで、実験で用いる試料土に対して塑性波頭の伝播速度を求めるため、図-5 の $e \sim \log P$ 関係を応力～ひずみ関係に描き直したものが、図-6 である。

ここでは、圧密リングに土をゆるく詰めて得られる状態を $\varepsilon = 0$ の状態としている。この図から、正規領域では圧縮の進行とともに、 $d\sigma/d\varepsilon$ すなわち塑性波頭の伝播速度が増加すること、除荷・再載荷領域では大きな速度で塑性波頭が伝播し、載荷領域のそれと比べ実質上無限大と見なし得ることがわかる。

本計算では、この設定に基づき、小孔内で衝撃荷重が作用したときに地盤内における塑性波頭の伝播とそれに伴う小孔の半径方向への押し広げを時間ステップを追って計算していく。計算では、図-7 に示すように小孔の壁面にこれを押し広げる方向に時間とともに減衰する変位速度 $V(t)$ を与え、時間ステップ Δt 毎に地盤内を伝播する塑性波頭とそれによる土の圧縮を計算していく。この際、前述の考え方に従い、小孔周辺の土が変位速度 $V(t)$ に対して、過去にこの速度より大きな速度で圧縮されていない場合には、土は正規領域にある (圧縮される) と判定し、土の圧縮量と密度の増加量を計算する。一方、過去にこの速度より大きな速度で圧縮された履歴がある場合には、除荷・再載荷領域にある (圧縮されず剛体として挙動する) と判定して、波頭は無限大の速度でこの要素内を伝播して、その外側の要素に圧縮を生じさせると考える¹⁾。この計算を時間ステップ Δt で小孔の孔壁から周辺外側に向かって順次計算して、小孔の押し広げ現象をシミュレートする。計算の詳細については APPENDIX として、本論文の最後に記しておく。

(2) 計算結果と考察

前節と APPENDIX で説明した計算手法を用いて、小孔の衝撃押し広げの数値計算を行った。計算では、半無限地盤内に直径 5 cm の小孔を開け、この中に衝撃荷重

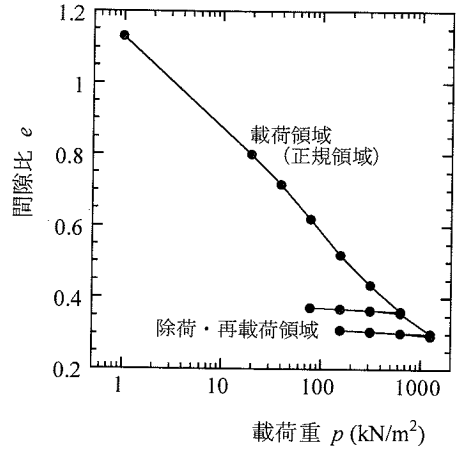


図-5 試料土の一次元圧縮試験結果

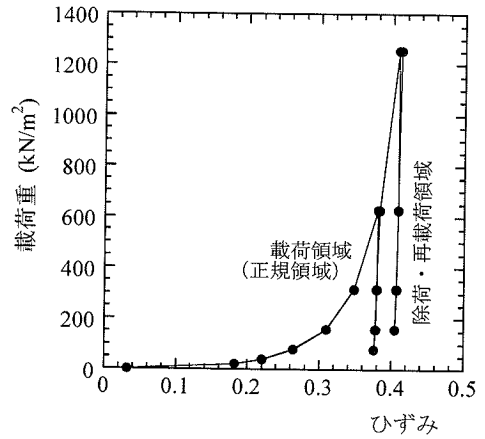
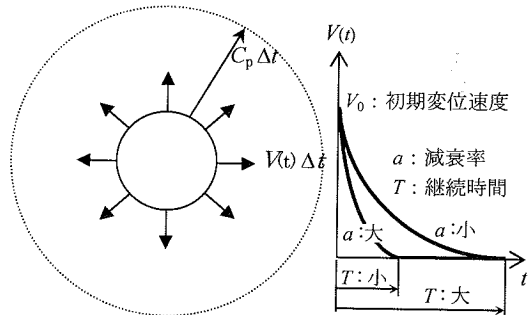


図-6 試料土の応力～ひずみ関係



(a) 小孔の衝撃押し広げ (b) 孔壁に与える変位速度

図-7 小孔の衝撃押し広げの数値シミュレーション

を載荷する場合を想定する。

地盤特性としては、土粒子密度 2.65 g/cm^3 、含水比 13.5% の砂質ロームを想定し、 $e \sim \log P$ 関係と応力・ひずみ関係には図-5, 6を用いることとする。地盤の初期密度 ρ_0 としては、 $1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0 \text{ g/cm}^3$ の6種類に設定した。小孔の内壁に与える変位速度 $V(t)$ は、図-7(b)で表されるように、時間 t とともに減衰する指数関数で表わすこととし、下式を用いた。

$$V(t) = V_0 \exp(-at) \quad (4)$$

ここで、 V_0 は初期変位速度、 a は速度関数の減衰率を表す。 a は、図-7(b)に示すように、この値が大きいほど変位速度の時間に対する減衰が大きいことを意味し、波形の継続時間 T を与えることにより設定することができる。本計算では、 $V_0 = 2, 5, 10, 15, 20 \text{ m/s}$ 、ならびに、 T を変位速度 $V(t)$ が 0.001 m/s にまで減衰するのに要する時間と定義し、 $T = 0.1, 0.2, 0.5 \text{ sec}$ と設定した。ただし、今回の数値計算では、急速載荷による動的なひずみを式(2)で定義する必要から小孔の内壁に作用させる最大変位速度を土中の塑性波頭の伝播速度より小さな値に設定している。

図-8, 9に計算結果の一例を示す。図-8は、初期密度 $\rho_0 = 1.8 \text{ g/cm}^3$ の場合について、押し広げによる周辺地盤の密度の増加状況を調べた結果である。この際、孔壁の初期変位速度の影響を調べるため、 $V_0 = 2, 5, 10 \text{ m/s}$ の3通りの場合について計算を行っている ($T = 0.5 \text{ sec}$ で一定)。この図より、初期変位速度が大きいほど小孔は大きく押し広げられ、初期変位速度 $V_0 = 10 \text{ m/sec}$ の場合には、載荷前の半径 (2.5cm) の約20倍以上に広がっていることがわかる。また、孔壁周辺の密度の増加も初期変位速度が大きい場合に顕著に現れており、載荷前には 1.8 g/cm^3 であった密度が、 2.35 g/cm^3 以上にまで増えているが、その影響は、小孔の中心より 2.5 m 程度離れたとほとんど観察できない程度にまで低下するという結果になっている。また、図-9は同様に小孔周辺の土の密度の変化を調べた結果であるが、ここでは、初期変位速度は $V_0 = 10 \text{ m/sec}$ で一定とし、継続時間を $T = 0.1, 0.2, 0.5 \text{ sec}$ と変化させている。この図より、継続時間が長いほど大きな空間を作ることができることがわかる。また、いずれのケースとも、孔壁周辺で土が集中的に圧縮され、外への影響は急激に低下していることが読みとれる。

図-8, 9 から、孔壁の密度の増加は、初期変位速度に依存し、押し広げられた空間の大きさと周辺地盤への影響は、初期変位速度 V_0 とともに載荷の継続時間 T が関係することがわかる。

図-10は、押し広げにより増加した孔壁の密度の初期密度に対する比 (密度比) を初期変位速度に対してプロットした結果である。密度比が大きいほど孔壁に集中し

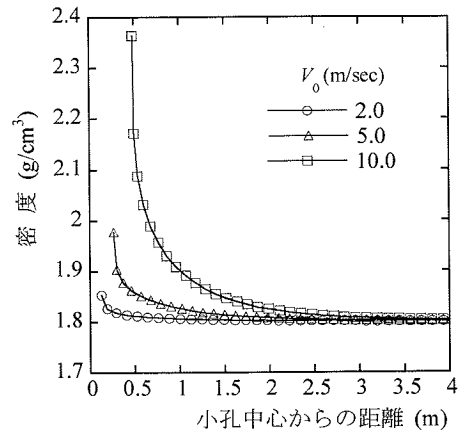


図-8 小孔の衝撃押し広げの計算結果 (初期変位速度の影響, $T = 0.5 \text{ sec}$)

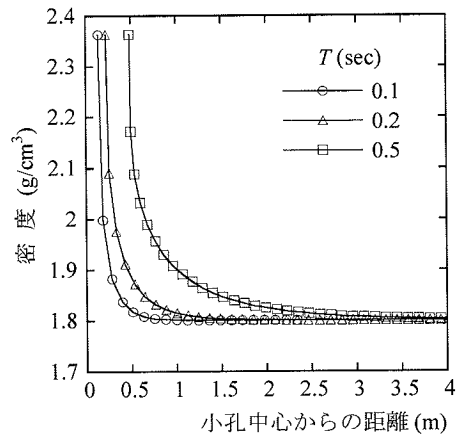


図-9 小孔の衝撃押し広げの計算結果 (継続時間の影響, $V_0 = 10 \text{ m/s}$)

て土が圧縮されていることを意味する。この図より、初期変位速度が大きいほど密度比は大きく、押し広げにより密度が大きく増加すること、ならびに初期密度が低いほどその傾向がより顕著に現れていることがわかる。

図-11は、影響半径と初期変位速度との関係をプロットした結果の一例である。ここで、小孔の押し広げにより周辺の土の密度は図-9に示すように増加するが、その影響が初期密度の 1% 以下になる距離を影響半径と定義した。この図より 初期変位速度 V_0 が大きいほど影響半径も大きくなり、また載荷の継続時間 T が長いほど、押し広げによる影響が遠くまで及ぶことが読みとれる。

図-12は、押し広げ後の小孔の半径と初期変位速度との関係を計算で求めた結果である。この図より、初期変位速度が大きいほど、小孔は大きく広げられること、ならびに載荷の継続時間が長いほど、同じく大きく押し広げられることがわかる。

以上の結果より、初期変位速度が大きく、また载荷の継続時間が長いほど小孔の周辺の土は高密度に圧縮されて、大きな空間に押し広げられるが、その影響は周辺地盤の速くまで及ぶことになる。そこで、全ての計算条件に対し、影響半径の押し広げられた孔の半径に対する比を影響比と定義し、これを密度比に対して整理した。図-13はその結果を表す。密度比が非常に小さい範囲、すなわち、押し広げが小さく、周辺地盤の密度増加も小さいところでは、影響比も小さく、押し広げによる影響はほとんど周辺に及んでいないが、初期密度の1.1倍以上の密度に周辺地盤が圧縮されると、その影響は遠方にまで及び、その距離は、押し広げられてきた空間の半径の3~5倍の範囲にプロットされるという結果になった。

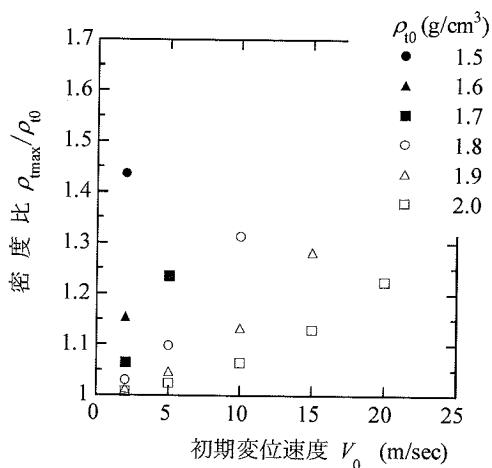


図-10 初期変位速度と密度比との関係

以上、小孔の急速押し広げによる空間の構築について簡単な数値計算により考察を行った。この結果、小孔の孔壁に作用させる急速载荷条件を制御することができれば、構築される空間の大きさやそれによる周辺地盤への影響をコントロールし得るということが確認できた。ただし、計算では変位速度を与えているが、実際の载荷は現段階では発破等に頼らざるを得ない。この場合、孔壁の変位は、急速载荷重と周辺地盤の圧縮性により大きく異なるため、計算で想定したような精密な変位速度の管理は困難となる。実用化においては载荷条件の正確な制御方法を確立しなければならない。

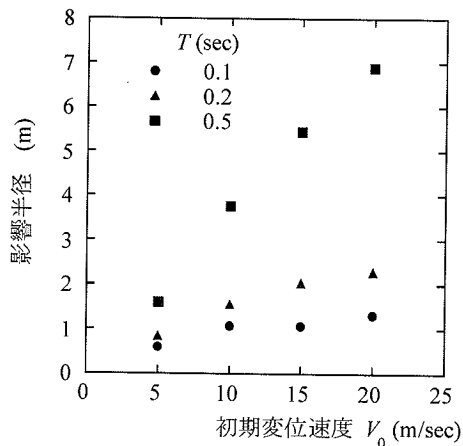


図-11 初期変位速度と影響半径の関係

4. 衝撃押し広げの模擬実験

前章では、小孔の急速押し広げによる地下空間構築の可能性を数値計算によって考察したが、計算で推定され

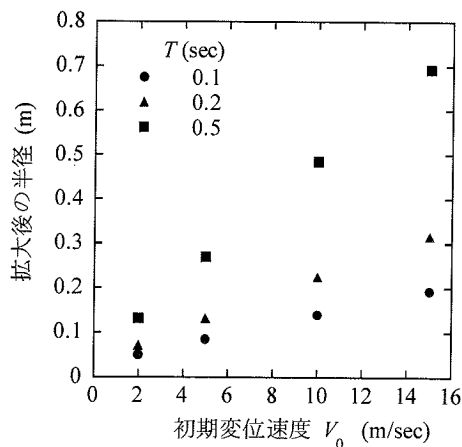


図-12 初期変位速度と拡大された孔の半径との関係 (初期密度 $\rho_0 = 1.8 \text{ g/cm}^3$)

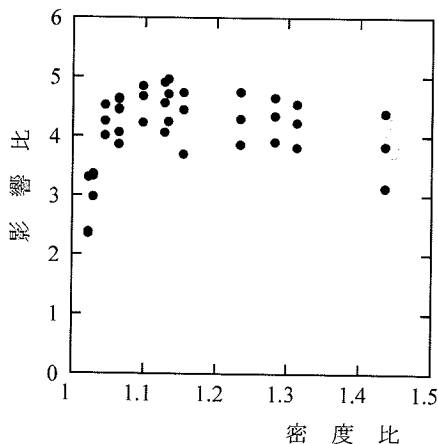


図-13 影響比と密度比との関係

た現象が実際に起こり得るか否かを調べるため、土槽実験を行った。ここでは、模型地盤内に設けた小孔を急激に押し広げ、それによる周辺地盤の密度分布変化を計測した。以下、実験の概要と結果を示す。

(1) 実験方法と試料土

実験装置の概要を図-14に示す。実験では、上下をキャップで拘束したメンブレンに水を満たし、これを土槽内の試料土の中心に設けた円筒形の孔にセットする。この上に質量10kgの円筒形の錘を落下させてメンブレンを周方向に膨張させ小孔を急激に押し広げた。

錘は、2.0mの高さから自由落下させた。錘の落下では、電磁石で錘の保持を切断する機構を用いて自由落下条件が確実に保たれるようにし、また、錘を落下させた際に落下の方向がぶれないように内径が錘の直径より少し大きな長さ2mの塩ビパイプをガイドとして用いた。

土槽は上部から見ると円形を呈しており、その内径は50cmで深さは15cm、土槽を形成する鉄板は厚さ10mm~30mmである。土槽中心には上下をステンレス製のキャップで栓をした内径5cm、長さ36cmのメンブレンを設置している。ただし下部キャップ、土槽底面には直径5mmの穴が開けてあり、そこからメンブレン内に水を注入できる仕組みになっている。また、上部キャップに

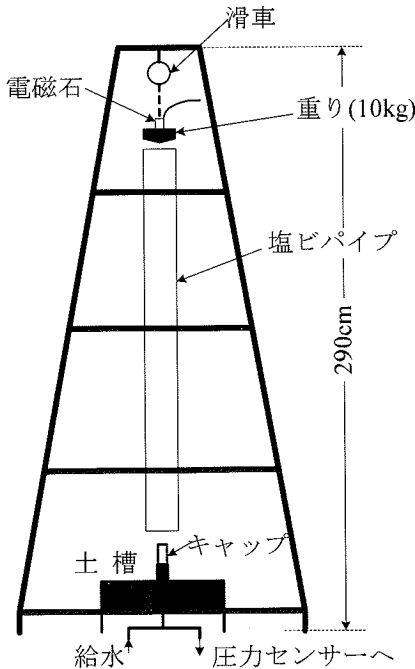
も水を注入した際にメンブレン内の空気を抜くために孔が開けてあり、載荷時にはその孔を止水栓で塞いで使用した。

衝撃を受けた際のメンブレン内の水圧は、図-14(b)に示す位置に圧力センサーを設置し計測した。なお、センサーのサンプリング時間間隔は0.005secである。実験では、試料の質量を測定した後に試料土を土槽に詰める。その際、試料を3~6層に分けて1層ごとに鉄板で締めながら密度が均一になるように詰める。詰め終わった試料の上面に、直径0.5mm、長さ7mmのマーカを小孔の孔壁から10mm間隔で半径方向に12個埋める。このマーカの間隔を実験前後で読みとることにより、小孔を中心とする模型地盤の密度変化を調べた。

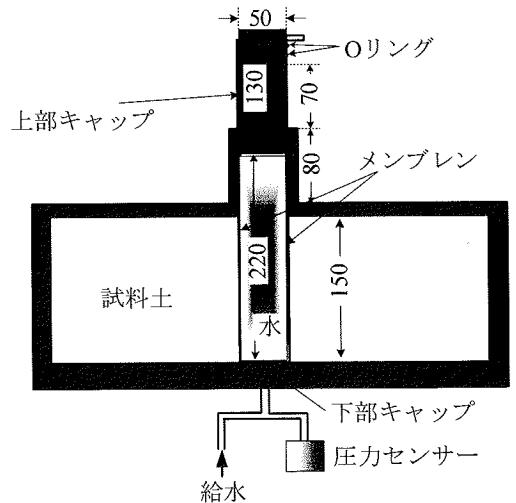
試料土は、数値計算のところでも述べた砂質ロームで、含水比13.5%、土粒子密度 $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$ であり、初期密度を1.15、1.35 g/cm^3 の2段階に変化させて実験を行った。また、実験では、錘の落下による急速押し広げと静的な押し広げの違いを調べるために、急速押し広げとともに、静的押し広げを行った。静的押し広げでは、急速押し広げとほぼ同じだけ上部キャップが貫入するように、これを2分間かけてゆっくりと押し込み、小孔周辺の供試地盤の押し広げ状況を急速押し広げと比較した。

(2) 実験結果と考察

図-15は、実験結果の一例である。この図は、初期密度 $\rho_0 = 1.15 \text{ g/cm}^3$ の試料土に対して行った急速押し広げと静的押し広げの結果を比較したもので、小孔の中心からの距離と試料土の密度変化をプロットしている。



(a) 重錘落下装置



(b) 実験用土槽

図-14 衝撃押し広げの実験装置

小孔の半径は載荷前が2.5cm、載荷後はこの図の場合には3.95cmで、拡大率は158%と小さかったが、孔周辺の密度の変化は、急速押し広げと静的押し広げで顕著な差が見られる。すなわち、静的押し広げでは、孔周辺の密度は半径方向に徐々に小さくなっているが、急速押し広げでは、孔壁近傍で密度が大きく、外へ行くと急激に密度が小さくなっている。衝撃による急速載荷では、孔壁近傍に集中的に土が圧縮されている様子がよく現れている。なお、実験結果のプロット点にバラツキが見られるが、これは、前述のように、供試体内に配置したマーカの移動量から密度変化を求めているため、その計測誤差が影響しているものと考えられる。

次に、実験結果を前章で説明した数値計算でシミュレートしてみた。実験は、初期密度 $\rho_0=1.35\text{g/cm}^3$ の試料土に対し、先と同様に急速押し広げを行い、試験後の密度分布を計測した。また、計算における変位速度の時系列変化は、実験の際に計測した載荷時の圧力変化から決定した。図-16は、この実験の際に得られた水圧の時系列変化である。メンブレン内の狭い領域で載荷による波動が伝播と反射を繰り返すため、前節の計算で仮定したような一様に減衰する波形にはならないが、ここでは、波形の継続時間を $T=0.05\text{sec}$ とした。また、初期速度 V_0 は、重錘を2mの高さから落下させて時に、重錘の貫入分だけ水の入ったメンブレンが円周方向に広がると考えて決定した。

図-17に、数値計算と実験結果の比較を示す。この図より明らかなように、計算結果と実験結果はよく一致しており、簡単な計算手法であるが、ある程度は現象を表現できていると考えている。

5. まとめ

以上、本研究では、地盤中に設けた小孔の内部に衝撃荷重を載荷して、これを急速に押し広げることによりトンネルや基礎工事のための空洞を構築する技術の実現可能性を数値計算と実験で検討した。数値計算では、小孔の急速押し広げを地盤内の塑性波頭の伝播とそれに伴う土の圧縮現象と考え、急速載荷条件と小孔の押し広げ程度、周辺地盤の密度増加とその影響範囲について考察した。その結果以下のことが明らかになった。

- 1) 初期変位速度が大きく、また載荷の継続時間が長いほど小孔の周辺の土は高密度に圧縮されて、大きな空間に押し広げられるが、その影響は周辺地盤の遠くまで及ぶことになる。
- 2) 押し広げの影響を受ける周辺地盤の領域は、今回設定した条件に関しては、押し広げられた空間の半径の3~5倍程度の範囲となる。
- 3) 小孔の孔壁に作用させる急速載荷条件を制御することができれば、構築される空間の大きさやそれによる周辺地盤への影響をコントロールすることも

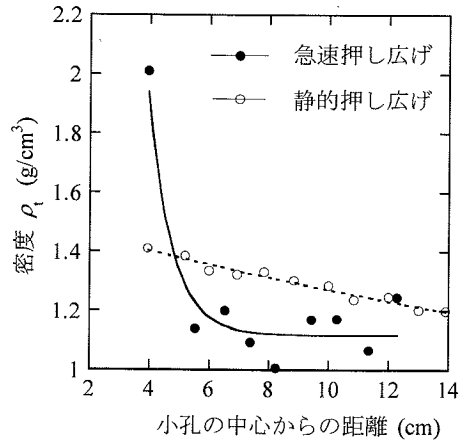


図-15 急速押し広げと静的押し広げの比較

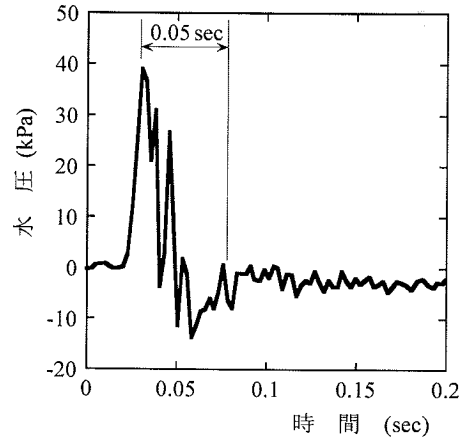


図-16 急速載荷時の水圧の変化

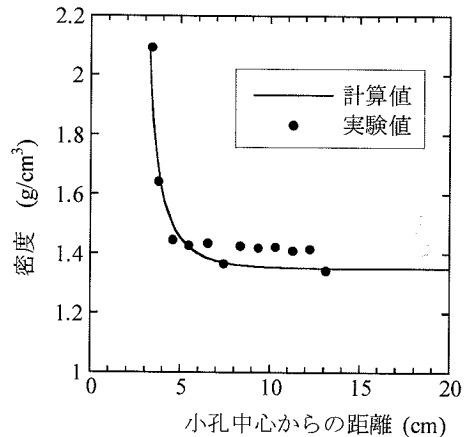


図-17 実験結果と数値計算の比較

可能であると考えられる。

実験では、比較的緩く詰めた砂質ロームの中に直径 5 cm の小孔をあけ、この中に水を満たしたメンブレンを挿入し、これを重錘の落下で周方向に広がらせて急速押し広げ実験を行った。この結果、以下のことが明らかになった。

- 4) 小孔を静的に押し広げると周辺地盤の密度は増加するが、その密度は周方向の距離とともに徐々に減衰している。これに対し、急速に押し広げると小孔の近傍の土が集中的に圧縮され、この部分の密度は大きく増加するが、周方向の距離とともに急激に減少する。
- 5) 数値計算で実験結果をシミュレートしたところ、両者は良い一致を示した。今回の設定条件の範囲では、この計算手法を用いて、小孔の押し広げ現象をうまく表現できると判断できる。

今回の研究では、上記の結果が得られたが、下記の点に関しては検討が不十分である。今後、継続して研究を続ける必要がある。

- 1) 今回の計算では境界条件として変位速度を与えている。しかしながら、実際の载荷は現段階では発破等を用いることを想定しているが、この場合、孔壁の変位は、発破による急速载荷作用と周辺地盤の圧縮性との相互関係に左右されるため、数値計算のところで示したような境界条件の精密なコントロールは困難といえる。
- 2) 数値計算を組み立てる上で急速载荷による動的なひずみの大きさを定義する必要から小孔の内壁に作用させる最大変位速度を土中の塑性波頭の伝播速度より小さな値に設定した。しかし、発破による载荷では、土中を伝播する塑性波頭の速度より小孔内壁の土の移動速度の方が遙かに早くなるため、この部分の取り扱いを純粋な衝撃波の伝播として取り扱わなければならない。
- 3) 土は半径方向に軸対称状態で移動するとしている。

このとき、円周方向には引っ張り応力が生じ、押し広げによる変位が大きくなると部分的に亀裂が生じることが想定される。この亀裂は、孔壁の安定性に影響をあたえると考えられるため、発生する亀裂の程度や処理について検討を行う必要がある。

この技術を実用化する際には、計算手法の改善とともに、発破を用いた実験を行う必要があり、現在、引き続き研究を行っている。

APPENDIX: 数値計算の流れ

本計算は、小孔の内壁に図-7(b)に示すような時間とともに減衰する変位境界条件を与えたとき、周辺地盤への

塑性波頭の伝播とそれによる土の圧縮を時間ステップを追って計算するものである。入力するデータは、内壁面の初速度 V_0 (m/s)、载荷の継続時間 T (sec)、塑性波の初期伝播速度 C_p (m/s)、微小時間 Δt (sec)、土の初期密度 ρ_0 (g/cm³)、土粒子密度 ρ_s (g/cm³)、含水比 w 、小孔の初期半径 r_0 (m) とする。この計算は、時間間隔 Δt 毎に現象を追っていくが継続時間が T であるから、計算のステップ数は $N = T/\Delta t$ 回ということになる。以下、計算の流れを順を追って説明する。

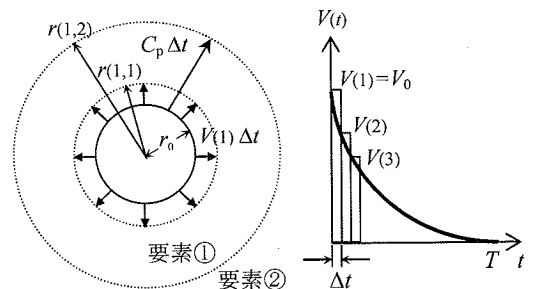
(1) 第1ステップ

最初に衝撃作用が小孔の内壁面に加わったとき（この瞬間を $t=0$ とする）、その内壁面は初速度 $V(1) = V_0$ をもって広がり始め、非常に短い時間 Δt が経過したとする。この微小時間 Δt の間、内壁は一定の速度 $V(1)$ で動くと考ええる。このとき、衝撃作用が内壁面に加わったことで土中に塑性波頭が伝播するが、 Δt 間での塑性波頭の伝播距離は $C_p \Delta t$ である。ここで、粒子の移動方向は半径外側方向のみであると仮定すると、内壁面の変位速度は $V(1)$ であるから、微小時間 Δt の間に小孔の孔壁は周方向外側に $V(1) \Delta t$ だけ変位することになる。この状態を図-A1(a)に示す。微小時間 Δt の間に塑性波頭が伝播した領域を一つの要素と考えると、この要素①は内壁面が変位したことで圧縮され、ひずみが生じる。このとき生じる体積ひずみを $\varepsilon(1)$ とし、圧縮される前の要素①の面積を $A(1,0)$ 、圧縮された後の面積を $A(1,1)$ 、圧縮前後での要素①の面積の差を $\Delta A(1)$ とおくと、体積ひずみ $\varepsilon(1)$ は以下のようにして求められる。

$$\Delta A(1) = A(1,0) - A(1,1) \quad (A1)$$

$$\varepsilon(1) = \frac{\Delta A(1)}{A(1,0)} \quad (A2)$$

$$\varepsilon(1) = \frac{\pi(r_0 + V(1) \cdot \Delta t)^2 - \pi \cdot r_0^2}{\pi(r_0 + C_p \cdot \Delta t)^2 - \pi \cdot r_0^2} \quad (A3)$$



(a) 波動伝播と変形

(b) 载荷重条件

図-A1 第1ステップの波動伝播と変形

このとき間隙比 $e(1)$ を求めると、

$$e(1) = e_0 - (1 + e_0) \cdot \varepsilon(1) \quad (A4)$$

となり、この間隙比から要素①の密度が決定される。

ここで密度 $\rho(1)$ は、

$$\rho(1) = \frac{\rho_s(1+w)}{1+e(1)} \quad (A5)$$

となる。これで第1ステップが終了したことになる。

ここで、第1ステップ終了後の要素①の中心側の位置を $r(1,1)$ と表し、要素①の密度をその点で代表させることにする。つまり第1ステップ終了後の要素①の位置は、

$$r(1,1) = r_0 + V(1) \cdot \Delta t \quad (A6)$$

となる。また、塑性波頭の到達した点が第1ステップにおける要素②の内側位置となり、これを $r(2,1)$ と表すならば、

$$r(2,1) = r_0 + C_p \cdot \Delta t \quad (A7)$$

となる。

(2) 第2ステップ

第2ステップ ($t = \Delta t \sim 2\Delta t$ の間) では、図-A2 に示すように内壁面は $V(2)$ なる速度 (図-A1 (b) 参照) で押されることになるから、微小時間 Δt の間にさらに $V(2) \cdot \Delta t$ だけ内壁面が変位することになる。このとき塑性波頭が要素①のさらに外側に $C_p \cdot \Delta t$ の距離だけ伝播し、その外周は第2ステップにおける要素③の内側位置と一致することになる。第2ステップにおける要素①と要素③の内側位置をそれぞれ $r(1,2)$ 、 $r(3,2)$ とすると、

$$r(1,2) = r_0 + \{V(1) + V(2)\} \cdot \Delta t \quad (A8)$$

$$r(3,2) = r_0 + 2C_p \cdot \Delta t \quad (A9)$$

となる。ここで、先の仮定に従い、一度圧縮された土はそれ以後それ以上の速度で圧縮されない限り、除荷・再載荷領域にあると判定し、体積変化を生じないとする。このとき、一度速度 $V(1)$ で圧縮された土 (要素①) は第2ステップ以後、 $V(1)$ より大きな速度で押されない限り密度変化が生じないことになる。第2ステップでは内壁面が $V(2)$ で押されるが、今回の計算では、小孔内壁の変位速度 $V(t)$ は、図-A1 (b) に示したように時間とともに減衰する関数を仮定しているため、 $V(2) \leq V(1)$ であるから要素①の密度変化は生じず、要素②のみ圧縮され密度変化が生じる。要素①の密度変化がないため、第2ステップ終了後の要素①の面積 $A(1,2)$ は第1ステップ後の面積 $A(1,1)$ に等しくなければならないから、

$$A(1,1) = \pi \{r(2,1)^2 - r(1,1)^2\} \quad (A10)$$

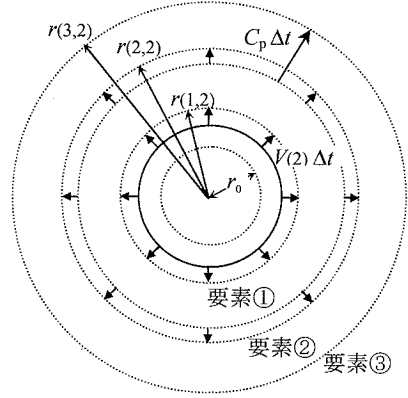


図-A2 第2ステップの波動伝播と変形

$$A(1,2) = \pi \{r(2,2)^2 - r(1,2)^2\} \quad (A11)$$

$$A(1,1) = A(1,2) \quad (A12)$$

$$r(2,2) = \sqrt{r(2,1)^2 - r(1,1)^2 - r(1,2)^2} \quad (A13)$$

となり $r(2,2)$ が求められる。また

$$A(2,2) = \pi \{r(3,2)^2 - r(2,2)^2\} \quad (A14)$$

$$A(2,1) = \pi \{r(3,2)^2 - r(2,1)^2\} \quad (A15)$$

となるから、要素②に生じる体積ひずみ $\varepsilon(1)$ 、ならびに変化後の間隙比 $e(2)$ は、

$$\varepsilon(2) = \frac{\Delta A(2)}{A(2,1)} = \frac{A(2,1) - A(2,2)}{A(2,1)} = \frac{r(2,2)^2 - r(2,1)^2}{r(3,2)^2 - r(2,1)^2} \quad (A16)$$

$$e(2) = e_0 - (1 + e_0) \cdot \varepsilon(2) \quad (A17)$$

となる。以上から要素②の密度 $\rho(2)$ が以下のように求められる。

$$\rho(2) = \frac{\rho_s(1+w)}{1+e(2)} \quad (A18)$$

これで第2ステップの計算が終了したことになる。

(3) 第 n ステップ

第3ステップ以降は基本的には第2ステップと同様な操作を繰り返すことになる。ここではより一般的に、第 n ステップ目における計算の進め方を簡単に説明することにする。第 n ステップ目では、内壁面が $V(n) \cdot \Delta t$ だけ変位するので、第 n ステップ終了後の要素①の位置 $r(1,n)$ は、

$$r(1, n) = r_0 + \sum_{k=1}^n V(k) \cdot \Delta t \quad (\text{A19})$$

となり、また要素 $n+1$ の位置 $r(n+1, n)$ は、

$$r(n+1, n) = r_0 + n \cdot C_p \cdot \Delta t \quad (\text{A20})$$

で表される。第 n ステップでは内壁面が速度 $V(n)$ で押されることになるが、前項でも述べたように以前に押された速度より大きな速度で押されない限り各要素は圧縮されず、また、 $V(n) \leq V(n-1) \leq V(n-2) \leq \dots \leq V(2) \leq V(1)$ であるから、要素①～ $n-1$ までは密度変化が生じずに、要素 n のみ圧縮され密度が増加する。第 n ステップでも前項と同様の考え方を採用すると、要素①～ $n-1$ は第 n ステップ終了後と第 $n-1$ ステップ終了後の間で各要素の面積が保存されることになる。要素①について計算すると、第 n ステップ終了後の面積は、

$$A(1, n) = \pi \{r(2, n)^2 - r(1, n)^2\} \quad (\text{A21})$$

となり、第 $n-1$ ステップ終了後の面積は今までのステップで面積を保存してきているから、結局第 1 ステップ終了後の面積に等しく

$$A(1, n-1) = A(1, n-2) = \dots = A(1, 2) = A(1, 1) \quad (\text{A22})$$

となり最終的に

$$\begin{aligned} A(1, n) &= A(1, 1) \\ \Leftrightarrow \pi \{r(2, n)^2 - r(1, n)^2\} &= \pi \{r(2, 1)^2 - r(1, 1)^2\} \end{aligned} \quad (\text{A23})$$

$$r(2, n) = \sqrt{r(2, 1)^2 - r(1, 1)^2 + r(1, n)^2} \quad (\text{A24})$$

となって $r(2, n)$ が求められる。

要素②についても同様に計算をすると、第 n ステップ終了後の面積は第 2 ステップ後の面積に等しくなるから、

$$A(2, n) = \pi \{r(3, n)^2 - r(2, n)^2\} \quad (\text{A25})$$

$$\begin{aligned} A(2, n-1) &= A(2, n-1) = \dots = A(2, 3) = A(2, 2) \\ & \quad (\text{A26}) \end{aligned}$$

$$A(2, n) = A(2, 2)$$

$$\Leftrightarrow \pi \{r(3, n)^2 - r(2, n)^2\} = \pi \{r(3, 2)^2 - r(2, 2)^2\} \quad (\text{A27})$$

$$r(3, n) = \sqrt{r(3, 2)^2 - r(2, 2)^2 + r(2, n)^2} \quad (\text{A28})$$

となって $r(3, n)$ が求められる。

以下同様の計算をして $r(4, n)$ から $r(n, n)$ まで求め、 $r(n, n)$ を代表して示すと

$$r(n, n) = \sqrt{r(n, n-1)^2 - r(n-1, n-1)^2 + r(n-1, n)^2} \quad (\text{A29})$$

となる。従って、第 2 ステップと同様にして第 n ステップ終了後の要素 n の体積ひずみ $\varepsilon(n)$ 、間隙比 $e(n)$ 、密度 $\rho(n)$ を求めると以下のようにになった。

$$\varepsilon(n) = \frac{\Delta A(n)}{A(n)} = \frac{A(n) - A(n, n)}{A(n)} = \frac{r(n, n)^2 - r(n, n-1)^2}{r(n+1, n)^2 - r(n, n-1)^2} \quad (\text{A30})$$

$$e(n) = e_0 - (1 + e_0) \cdot \varepsilon(n) \quad (\text{A31})$$

$$\rho(n) = \frac{\rho_s(1+w)}{1+e(n)} \quad (\text{A32})$$

以上が第 n ステップにおける計算である。第 $n+1$ ステップは内壁面の変位速度 $V(n+1)$ を入力して $r(1, n+1)$ と $r(n+2, n+1)$ を求め、そこから同じ計算を繰り返す。この計算を N 回 ($N = T/\Delta t$) 繰り返していく。

以上が数値計算の考え方である。このような計算によって得られる最終ステップ終了後の各要素の位置と密度を出力し、グラフ上にプロットする。

参考文献

- 1) 建山和由, 畠昭治郎, 森川勝: 塑性波頭の伝播からみた土の衝撃締固め機構, 土木学会論文集, No. 454/III-20, 37-46, 1992.
- 2) 林卓夫, 田中吉之助編著: 衝撃工学, 日刊工業新聞社, 1988.

(2003. 7. 14 受付)

POSSIBILITY OF UNDERGROUND SPACE CONSTRUCTION BY EXPLOSIVE LOADING IN A BOREHOLE

Kazuyoshi TATEYAMA, Shingo HIRAI, Takao YANO and Toshihiro HENMI

In the case that an explosive load is subjected in a borehole which has been excavated in the ground, the soil around the borehole wall will be abruptly compressed and then a cavity will be created in the ground, being surrounded by the compressed soil wall. When we apply this idea to the construction of tunnels or foundations, the underground space can be created with the minimum mucking and the reduced lining. We discuss the possibility of the underground space construction by the explosive loading through some numerical simulation and experiments.