

# 粒状体地山の沈下現象について

京都大学防災研究所 正員 村山朝郎  
 京都大学大学院 学生員 松岡 元  
 株式会社熊谷組 正員 富永克己

さきの報告に引き続き、粒状体地山の局所沈下機構を解明するため、アルミ棒積層体( $\phi 6\text{mm}$ ,  $\phi 3\text{mm}$ ; 混合重量比 60:40)および粗砂(粒径 $5\text{mm} \sim 0.3\text{mm}$ )、細砂(粒径 $1.0\text{mm} \sim 0.1\text{mm}$ )の2種類の乾燥砂と地山材料に用いた降下床(lowering panel)模型実験を行ない、沈下伝達パターンおよび地山の固き率の変化を考慮した沈下量計算式を導出した。

1. 流動領域の幅 $b$ と沈下伝達パターン 写真-1に示すように定常状態に達した流動領域の幅 $b$ は降下床幅 $B$ より広がったものとなり、土被り高さ $D$ や降下床幅 $B$ によって変化する。そこで流動領域の幅 $b$ と土被り高さ $D$ を( $b \sim D$ )の関係でプロットすると、

図-1に示すように密詰め(dense)・ゆる詰め(loose)と粗砂・細砂を1パラメーターとした直線関係になる。この直線関係を理論的に明らかにするために、以下に述べる沈下伝達パターンを考えた。写真-2はアルミ棒積層体の降下床模型実験で降下床と同じ降下をするカメラで撮影したものであり、静止して写っている部分が降下床と同じ挙動をする1次領域である。沈下伝達パターンとは、降下床の降下につれてこの1次領域がまず沈下し、それに追従してそのまわりの粒子が徐々に沈下を起し、流動領域が上に広がりながら伝達されるパターンのことである。ここでこの1次領域の形状は粒径および粒子配置に関係すると考えられるので、実験に用いた2種の径( $\phi 6\text{mm}$ ,  $\phi 3\text{mm}$ )のアルミ棒の粒子配置をシミュレートするため、その混合重量比(60:40)を本数比(84:16)に換算し、乱数表を用いて順次抽出する模擬サンプリング法(モンテカルロ法)を採用した。その粒子配置は最下段では横につめて並べるものとし、その上では左から右へ粒子が安定する位置に積みあげるようにした。このようにしてできた図-2の最下段の列の幅を降下床幅とすると、図の部分

は降下床の降下につれて鉛直降下の可能な部分であり、これを1次領域の力学的意味と考える。乾燥砂の場合も全く写真-2と同様の形状を示し、等大径のアルミ棒の最密構造の場合は完全な正三角形状を示すので、1次領域の形状として正三角形を内に含むようなアーチ形状を考える。この形状をもとにした沈下伝達パターンを図-3に示す。図のように上に広がっていくアーチ形状の先端が地表面に達すると流動領域の幅はそれ以上広がらないと考える。このとき流動領域の幅 $b$ は幾何学的関係から  $\frac{b}{B} = \frac{2}{\tan \theta + \sqrt{3}} \frac{D}{B} + \frac{\tan \theta}{\tan \theta + \sqrt{3}} \dots (1)$  となる。(1)式は、

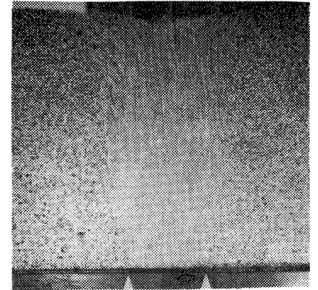


写真-1 地山の流動状況

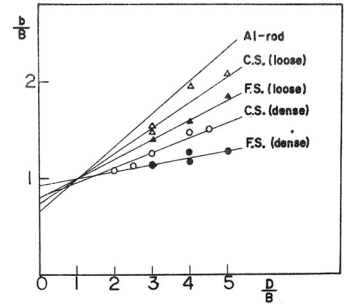


図-1  $b/B \sim D/B$  関係

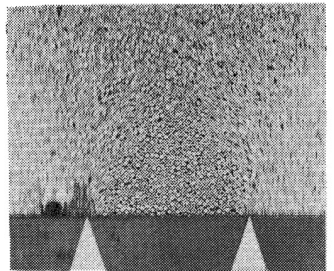


写真-2 1次領域

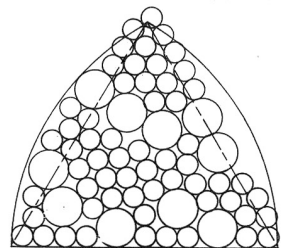


図-2 粒子配置と1次領域

ば点(1)を通る直線であり、図-1の実験結果とよく一致した。すべり面と最大主応力の方向は $(45^\circ - \frac{\phi}{2})$ をなして交わることから、実験から求めた $\theta$ とそれやれの状態での地山材料の $\phi$ より主応力方向を計算すると図-3に示すようにすべて鉛直より $16^\circ$ 外側に傾むくことになった。このことから逆に主応力の方向がきまれば $\phi$ の値から $\theta$ の値を求めることができる。

**2. 沈下量計算式** ①降下床の降下によりできる降下床上部の空けきは地表面沈下を起すだけでなく一部は地山の向げきの増加の形で存在する。②ある応力状態のもとでの向げき率の増加には限度がある。③向げき率の増加は外側すべり面の領域で顕著である。

以上のことから図-4のように現象を単純化し、地表面に達したアーチ形状とすべり領域に囲まれた1の系を考える。図のように降下床さらに $\Delta\delta$ だけ降下させ、すべり面が $\Delta\delta$ だけ上昇しアーチ部分が $\Delta\delta$ だけ沈下したとすると、 $B\Delta\delta = b\Delta\delta + (2s \sin \theta_{max}) \cdot \Delta\delta$  ( $s$ :すべり領域の幅)……(2)。(2)式より $\Delta\delta = \alpha \Delta\delta - \beta \Delta\delta$ ……(3) ( $\alpha = \frac{b}{B}$ ,  $\beta = \frac{2s \sin \theta_{max}}{B}$ )を得る。またダイヤルゲージで降下床中心線上の地表面沈下量を測定し $(\delta \sim \frac{\Delta\delta}{2})$ の関係でプロットしたのが図-5である。これは密詰の場合であり $\delta$ がある値 $(\delta = \delta_c)$ に達した後ほぼ一定値となる。これは系内のすべり領域における向げきの増加が終了したためと考えられ、この一定値は(3)式より求められ $\frac{\Delta\delta}{\delta} = \alpha - \beta$ ……(4)とよく一致した。またゆる詰

の場合は地山がほぼ限界向げき比(C.V.R.)の状態であったため最初から一定値を示し、その値は(4)式とよく一致した。図-5の7°プロットと $\frac{\Delta\delta}{\delta} = \frac{\alpha}{\delta_c} \delta$  ( $0 \leq \delta \leq \delta_c$ )……(5),  $\frac{\Delta\delta}{\delta} = \alpha$  ( $\delta \geq \delta_c$ )……(6)で表わすものとする。(5)式を $\delta = 0$ のとき $\beta = 0$ なる条件で積分すると $\beta = \frac{\alpha}{\delta_c} \delta$  ( $0 \leq \delta \leq \delta_c$ )……(7)。(6)式を $\delta = \delta_c$ のとき(7)式と連続するという条件で積分すると $\beta = \alpha \delta - \frac{\alpha \delta_c}{2}$  ( $\delta \geq \delta_c$ )……(8)。一方(3)式の積分形は、 $\beta = \alpha \delta - \rho$ ……(9)。

$\delta \geq \delta_c$ では系内のすべり面の長さは $l = l_c$ になっているから $\beta = \alpha \delta - \rho l_c$  ( $\delta \geq \delta_c$ )……(10)。(10)式は(8)式と一致しなければならぬ故 $\frac{\alpha \delta_c}{2} = \rho l_c$ 。 $\alpha, \rho, l_c$ の値および(1)式より $\delta_c = \frac{4 \cdot s \cdot \sin \theta_{max}}{2 \sin \theta + \cos \theta} (\frac{B}{b} - \frac{1}{2})$ ……(11)を得る。図-6は $(\delta_c \sim \frac{B}{b})$ の関係を示したものであり、全ての直線が横軸をほぼ $0.87 = \frac{1}{\sqrt{2}}$ の点で切るとみてよいようである。また(11)式中の $\Delta\theta_{max}$ および $s$ は応力状態をあわせてせん断試験をすることにより予測が可能である。以上より(7),(8)式により地表面沈下量 $\beta$ は計算できまた地山中の沈下と考える方を拡張すれば同様に計算できる。これらの計算値は実測値と良好な対応をなすことがみとめられた。

- (1) 村山・松岡・小川; トンネル外周地盤の応力と変形について 土木学会関西支部講演概要 (昭和43)
- (2) 村山・松岡; トンネル土圧と地山の変形について 第23回年次講演会講演概要 (昭和43)

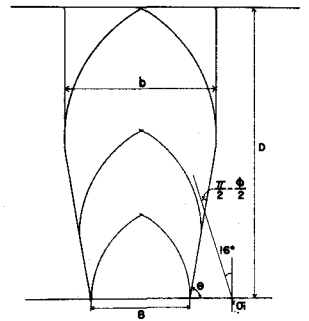


図-3 主応力方向

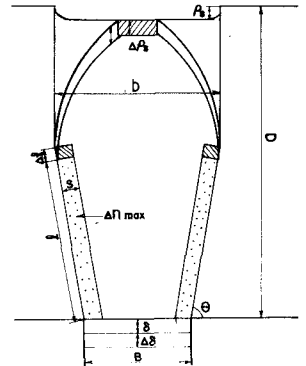


図-4 地山の沈下と向げきの増加

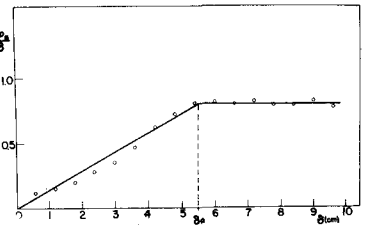


図-5  $\Delta\delta/\delta \sim \delta$  関係

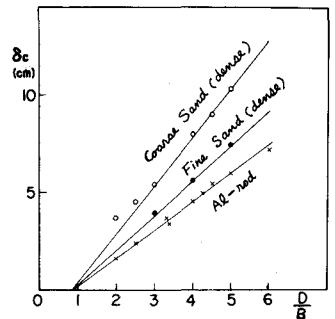


図-6  $\delta_c \sim \frac{B}{b}$  関係