

## 不連続変形法を用いた覆道背面への落石による動的土圧解析

Analysis of Dynamic Earth Pressure by Rock Fall on Rock shed Backfill with DDA

小池 明夫\*, 川北 稔\*\*, 三上 隆\*\*\*

Akio KOIKE, Minoru, KAWAKITA, Takashi MIKAMI

\* (株)ドーコン 構造部 (〒004-8585 北海道札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1)

\*\* 工博 (株)ドーコン 防災保全部 (〒004-8585 北海道札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1)

\*\*\* 工博 北海道大学大学院工学研究科教授 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

キーワード：不連続変形法，裏込土，土圧解析

## 1. はじめに

落石覆道は規模の大きい落石が発生しやすい急斜面に設置されることが多く、落石による衝撃力が他の荷重に比べて極めて大きくなるので、設計においては落石衝撃力を適切に算定することが非常に重要となる。覆道上に落石が直接飛来する場合の衝撃力伝播特性に関しては、実験を含めた研究<sup>1)</sup>が多くなされているが、覆道背面の裏込土上に飛来した落石による土圧の評価は、動的土圧の算出方法として現在確立されたものがないため、設計では静止土圧に置き換えた荷重から部材断面力を求めている。

本研究では、動的解析法のひとつである不連続変形法を用いて覆道背面の落石による衝撃解析を行い、その伝播特性を明らかにするとともに設計土圧との比較を行った。

## 2. 覆道背面の落石による設計土圧

北海道開発局の設計要領では、図-1にあるような覆道背面の落石による設計土圧は次式によって算出される<sup>2)</sup>。

$$P_{0c} = \frac{3P_{0v}x^2z}{\pi(r^2 + z^2)^{5/2}} \quad (1)$$

ここで、 $P_{0c}$ ：覆道の任意点に作用する単位面積あたりの土圧 (tf/m<sup>2</sup>)， $P_{0v}$ ：落石によって発生する衝撃力の鉛直成分 (tf)， $x$ ：落石衝撃力の作用点から覆道までの水平距離 (m)， $z$ ：落石衝撃力の作用点から土圧を求めようとする位置までの鉛直距離 (m)， $r$ ：落石衝撃力の作用点から土圧を求めようとする位置までの距離 (m) である。

また、落石によって発生する衝撃力  $P_0$  は次式で定義されている。

$$P_0 = 2.455\lambda^5 W^{\frac{2}{3}} H^{\frac{3}{5}} \quad (2)$$

ここで、 $\lambda$ ：土のラーメ定数 (tf/m<sup>2</sup>)， $W$ ：落石重量

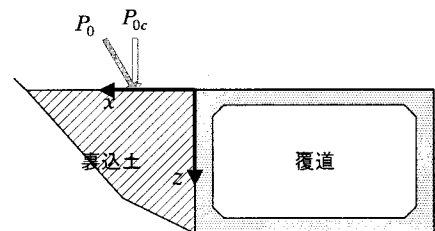


図-1 覆道背面の落石衝撃力

(tf)，

 $H$ ：落石の換算落下高さ (m) である。

つまり、実際の設計では落石衝撃力の鉛直成分のみを考慮し、ブシネスク理論により得られる覆道位置での水平土圧を設計土圧としている。

## 3. 不連続変形法による衝撃解析

不連続変形法は、不連続な弾性体要素の集合を解析対象とし、有限要素法と同様に全ポテンシャルエネルギーを最小化することによって連立平衡方程式が得られ、これを逐次的に解くことにより要素の変形と運動を求める手法である。要素の接触時には貫入量に応じたペナルティバネが挿入される。筆者らはこれまで、2次元問題において円形弾性体要素を扱えるように不連続変形法を拡張し、敷砂緩衝材の落石衝撃解析への適用性を検討している<sup>3)</sup>。

本研究では、覆道は剛で動かないものと仮定し、新たに固定境界要素を導入した。固定境界に接する要素の応力を求めることにより覆道背面の土圧を算定することとする。

図-2 のように固定境界要素に円要素が貫入しているとき、境界に垂直な貫入量  $\delta_n$  およびせん断ずれ量  $\delta_s$  (右ずれを正) はそれぞれ以下のように表せる。

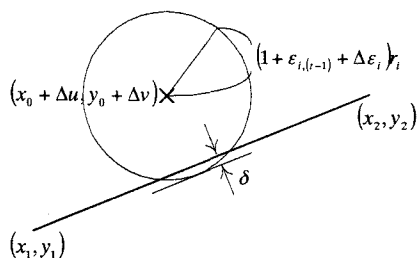


図-2 固定境界と円要素の貫入

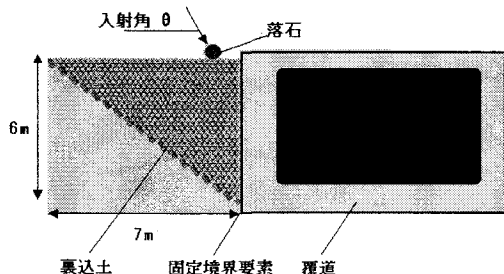


図-3 解析モデル

$$\begin{aligned} \delta_n &= (\Delta u_i, \Delta v_i) \cdot (\cos \alpha, \sin \alpha) + (1 + \varepsilon_{i(t-1)} + \Delta \varepsilon_i) r_i - |\bar{p}| \\ &= \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & \frac{r_i}{l} \end{pmatrix} [D_i] + (1 + \varepsilon_{i(t-1)}) r_i - |\bar{p}| \quad (3. a) \\ &= [H_i][D_i] + \delta_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_s &= (\Delta u_i, \Delta v_i) \cdot (-\sin \alpha, \cos \alpha) + (1 + \varepsilon_{i(t-1)} + \Delta \varepsilon_i) r_i \Delta \phi_i \\ &= \begin{pmatrix} -\sin \alpha & \cos \alpha & (1 + \varepsilon_{i(t-1)}) \frac{r_i}{l} & 0 \end{pmatrix} [D_i] \quad (3. b) \\ &= [I_i][D_i] \end{aligned}$$

ここで、 $\bar{p}$  は円要素中心から固定境界要素へ向かう垂直ベクトル、 $\alpha$  は x 軸とのなす角であり以下の式で求まる。

$$\begin{aligned} \bar{p} &= \frac{1}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \begin{pmatrix} -x_0(y_2 - y_1)^2 + x_1(y_2 - y_1)(y_0 - y_1) + x_2(y_1 - y_2)(y_0 - y_2) \\ -y_0(x_2 - x_1)^2 + y_1(x_2 - x_1)(x_0 - x_1) + y_2(x_1 - x_2)(x_0 - x_2) \end{pmatrix} \\ &\quad \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix} = \frac{\bar{p}}{|\bar{p}|} \quad (4. a) \quad (4. b) \end{aligned}$$

このとき、垂直方向にはバネが挿入され貫入量に応じた接触力が作用し、せん断方向には摩擦力が作用するものとしてポテンシャルエネルギーが得られる。

本研究では、以上の固定境界要素を導入した不連続変形法を行い、落石と覆道の水平距離、落石落下速度・落石入射角が覆道に作用する土圧に与える影響について調べた。図-3 に解析モデルを示す。斜度 40° の斜面に施工された高さ 6m の覆道背面の裏込土に直径 60cm の落石が衝突する場合について解析を行った。裏込土を直径 20cm の円要素でモデル化し最密に配列した。覆道との間に固定境界要素を挿入し、斜面に接する要素の中心を剛なばねで固定した。解析に用いたパラメータを表-1 に、解析ケースを表-2 にそれぞれ示す。

表-1 解析パラメータ一覧

|                            | 落石                   | 裏込土   |
|----------------------------|----------------------|-------|
| 単位体積重量(tf/m <sup>3</sup> ) | 2.0                  | 1.8   |
| ヤング率(tf/m <sup>2</sup> )   | 1000000              | 10000 |
| ポアソン比                      | 0.25                 | 0.35  |
| 摩擦係数                       | 0.5                  |       |
| 接触バネ定数(tf/m)               | 1.0×10 <sup>4</sup>  |       |
| ステップ間隔(sec)                | 1.0×10 <sup>-4</sup> |       |
| 固定バネ定数(tf/m)               | 1.0×10 <sup>6</sup>  |       |

表-2 解析ケース一覧

| 解析ケース | 水平距離(m) | x 方向速度(m/s) | z 方向速度(m/s) |
|-------|---------|-------------|-------------|
| 1     | 2       | 0           | -14         |
| 2-1   | 1       | 0           | -14         |
| 2-2   | 3       | 0           | -14         |
| 3-1   | 2       | 0           | -10         |
| 3-2   | 2       | 0           | -19.8       |
| 4-1   | 2       | 8.08        | -14         |
| 4-2   |         | 14          | -14         |
| 4-3   |         | 24.25       | -14         |

## 4. 解析結果

### 4.1 裏込土の衝撃伝播特性

図-4 は解析ケース 1 の落石衝撃後の裏込土のひずみ分布を示したものである。衝撃直後に落石直下で最大ひずみを生じた後、時間経過と共に下部へと応力波が球面状に伝わっていく様子が読み取れる。これらの図から、応力波は分散角約 30° で伝播し、30msec 前後で覆道に到達しているのがわかる。また、応力波が斜面できれいに反射され、深度の深い部分では落石からの直接波に加え斜面からの反射波の影響が強く現れている。落石衝撃力が覆道背面に設計土圧のように静的に作用するのではなく、動的な土圧として作用していることをこの解析結果はよく表現しているといえる。

### 4.2 解析解による最大土圧と設計土圧の比較

解析ケース 1 において覆道に発生する最大土圧を各深度で拾い上げ、設計土圧と比較を行った。図-5 に比較図を示す。設計土圧は落石衝撃荷重を静定な荷重に換算して得られる値であり、式(1)のとおりある深度でピークをとったあと深度が増すにつれ土圧は小さくなっていく。

解析解から読み取った最大土圧は、全ての深度で設計土圧の値を上回っている。設計土圧と同様に、ある深度でピークに達し深度とともに減少しているが、その程度は小さい。各深度において最大土圧になる時刻はずれているので、この最大土圧が同時に作用することはないが、安全性を重視した設計を行う必要がある場合には、この動的な最大土圧を用いるのもひとつの有効な方法であると考えられる。

図-6 に解析ケース 1 の覆道に作用する土圧分布

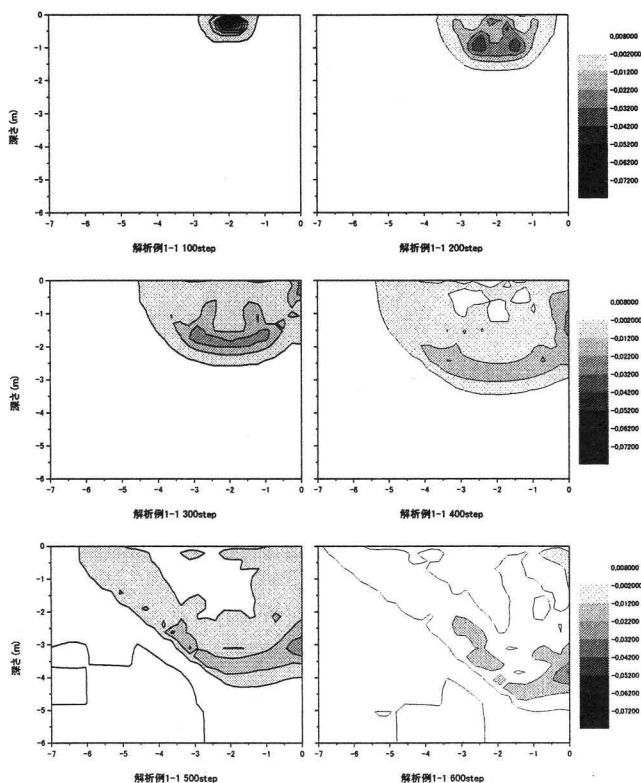


図-4 裏込土のひずみ分布図

の時間変化を示す。各曲線は10msec毎の土圧をプロットしたものである。土圧のピークが地表面から徐々に深部へと伝わっていく様子が伺える。30msecにおける解析の土圧分布は設計土圧の値より若干大きいものの、極めて類似した分布形状を呈している。土圧が深度4m付近においても比較的大きい値を示していることと、斜面での応力波の反射の影響が強く現れていることを合わせて勘案すれば、今後、この問題における動的解析手法の確立の必要性はますます高まるのではないと思われる。

## 5 解析条件の変化による影響

### 5.1 落下位置の影響

設計土圧の算定式(1)から明らかなように、落石の落下位置が覆道から離れるにつれ覆道に発生する土圧は小さくなる。落石の落下位置の影響を調べるため、覆道からの水平距離を1m, 2m および 3m と設定して解析を行った。解析結果および設計土圧との比較を示したものが図-7である。

この図では、設計土圧は覆道からの水平距離に大きく影響されているのがわかる。特に、水平距離が1mの場合には極めて大きな土圧が作用することになっている。

しかし、4.1節で触れたように、一般的には落石による衝撃力は $30^\circ \sim 45^\circ$ の分散角で伝播することに留意すれば、ごく浅い位置での極めて大きな土圧の発生は現実的ではないと判断される。

他方の不連続変形法による解析結果は、覆道に接する要素から得られる土圧の最大値を抽出したも

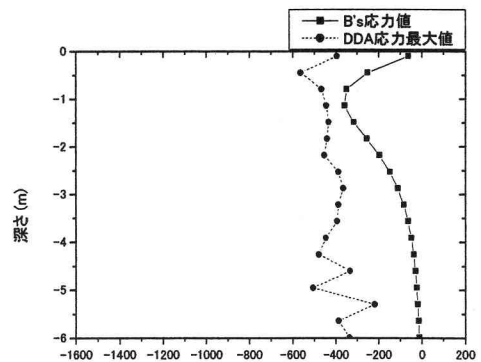


図-5 動的土圧と設計土圧の比較

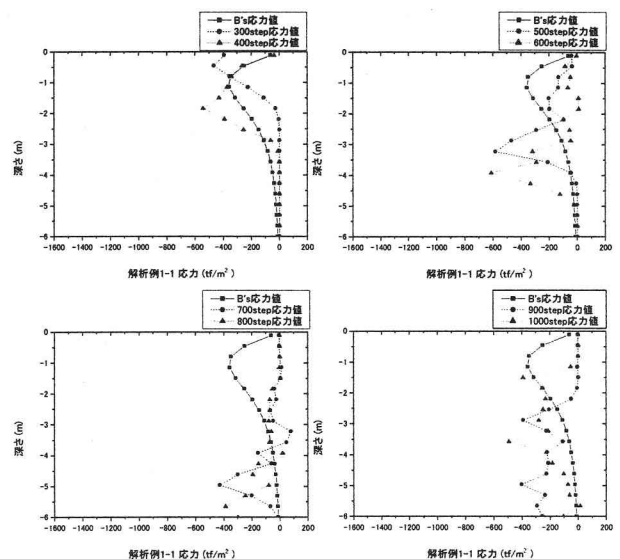


図-6 土圧分布の時刻変化

のであり、解析諸条件は同じである。結果を見ると、設計土圧と同様に水平距離が1mの場合には比較的大きな土圧が覆道に作用している。土圧のピークを示す深度は、分散角 $30^\circ$ で伝播する範囲内に収まっており、静的土圧に換算して得られる設計土圧より土圧分布の妥当性は高いと思われる。水平距離2m, 3mと大きくなるにつれ覆道の作用土圧は減少しているが、その減少の割合は少ない。これらのことから、現実の覆道設計において落石と覆道の水平距離が近い場合には、設計土圧の適用には注意を払う必要があるといえる。

### 5.2 落石落下速度による影響

落石鉛直方向速度を-10,-14 および-19.8(m/s)に設定し、落石落下速度が覆道の作用土圧に与える影響を調べた。その結果と設計土圧との比較を図-9に示す。

設計土圧は式(1)から明らかに、落石鉛直方向速度に比例する。不連続変形法による解析結果についてみると、深度が浅いところでは設計土圧同様ほぼ比例関係が認められる。深度3m以深では比例関係は乱れ、また、3m以浅の土圧よりピーク土圧が大きい値を示すところが見られる。これは、落石落下

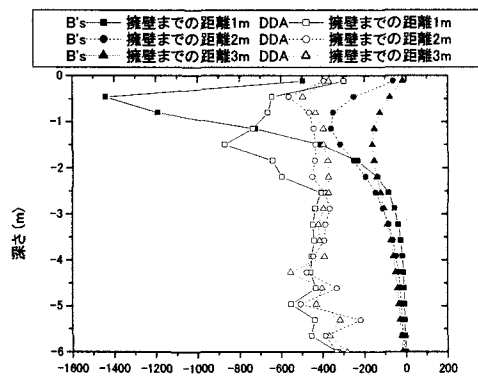


図-7 落石位置の影響

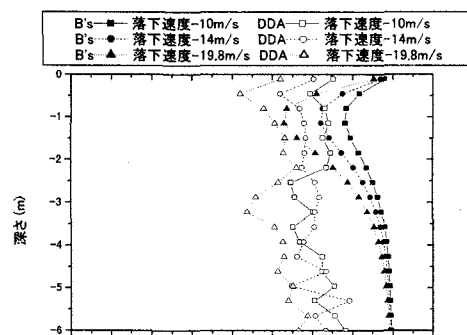


図-8 落下速度の影響

速度が大きい場合には応力波があまり減衰せず深部まで伝播し、斜面での応力波の反射が多重に起きていることが考えられる。

### 5.3 落石入射角による影響

落石入射角とは落石方向ベクトルと鉛直方向のなす角度を指す。落石が鉛直に落下する場合は希であり、ある角度を持って入射する場合はほとんどである。そこで、落石入射角を  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  および  $60^\circ$  に設定し解析を行った。ただし、設計土圧との比較を行うため鉛直方向速度を一定にし、水平方向速度を変化させた。解析結果を図-9 に示す。

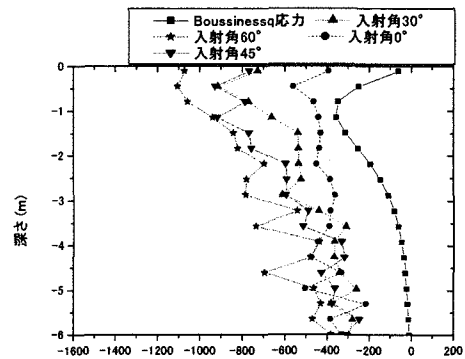


図-9 落石入射角による影響

設計土圧では鉛直速度のみを考慮し水平速度成分を無視しているが、不連続変形法による解析では、水平成分を考慮しているぶん設計土圧よりも値が大きくなり、水平速度の増加とともに土圧が大きくなっていることが分かる。分布曲線を大まかに捉えれば、地表から深度が深くなるにつれ土圧が減少している。これらの結果から、落石の水平方向速度成分を無視することはできないと考えられる。

### 6. まとめ

- 1) 不連続変形法による土圧解析は、応力波の伝播や反射、土圧分布の時間変化などを定量的に表すことができる。
- 2) 覆道背後斜面での反射応力の発生を今後考慮する必要があると思われる。
- 3) 設計土圧は鉛直方向速度のみで計算されているが、水平成分による土圧の発生も無視できないと考えられる。

### 【参考文献】

- 1) 岸徳光, 中野修, 松岡健一, 西弘明: 野外実験による敷砂の緩衝性能, 構造工学論文集, Vol.39A, pp. 1587-1597, 1993
- 2) 土木学会・構造工学シリーズ 8: ロックシェットの耐衝撃設計, 1998
- 3) 小池明夫, 三上隆: 円形弾性体の衝撃解析における不連続変形法の適用, 応用力学論文集, Vol.3, pp. 505-512, 2000