# Flat-jointモデルによる個別要素法解析の発破シミュレーションへの適用

安藤ハザマ 建設本部 土木技術統括部 正会員 〇寳谷 周

#### 1. 概要

トンネル発破掘削において、発破による岩盤の破壊を数値解析によりシミュレートできれば、余掘りの低減や 爆薬量の削減などの合理化を進めるための有力な手法の一つとなる.しかし、発破時に発生する応力が未解明な ことに加え、例えば個別要素法解析では、固結材料である岩石の力学特性を正確に再現しにくいこともシミュレ ーションを困難にする一因となってきた.具体的には、固結材料を模擬するための従来の標準的な結合粒子モデ ルである Parallel bond モデルでは、一軸圧縮強度/引張強度比や内部摩擦角  $\phi$  を一般的な岩石が持つ値に調整でき ないことが指摘されている.一方、近年 Potyondy により提案された Flat-joint モデル<sup>1)</sup>では、それらの問題が解消 され、岩石材料の物性の忠実な再現が可能になったとされる.

そこで,若月ほか<sup>2)</sup>による既往研究のコンクリート発破実験の再 現解析を参照し, Flat-joint モデルにより試験体の力学特性の再現 を試みるとともに,発破シミュレーションへの適用性を検証した.

#### 2. 解析モデルのキャリブレーション

解析モデルは、上述の Flat-joint モデルにより粒子間を結合して 作成し、図-1 に示す4種類の力学試験シミュレーションを繰り返 して文献<sup>2)</sup>のコンクリート製試験体の力学試験値に近づくよう結 合パラメータの値を設定した.キャリブレーション後の解析モデ ルの物性値を表-1 に示す.なお、ポアソン比や c、φの値は一般的 なコンクリートの値を目標値とした.

#### 3. 発破試験体モデル

発破シミュレーションに用いた試験体モデルを図-2に示す.発 破孔の内壁には、与圧のための12枚の壁(W1~12)を配置し、 半径 5cm 以内は圧力の変動を抑えるために1/5サイズの粒子を配 置した. 孔壁圧力 Pは、図-3に示す三角波形で与え、最大圧力時 (立上がり時間)t<sub>p</sub>は既往文献を参考に0.0001sとした.



キーワード:トンネル,発破,数値解析,個別要素法 連 絡 先:〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目1番20 TEL:03-6234-3670 FAX:03-6234-3704



図-1 解析モデルの力学試験シミュレーション

表-1 文献(試験値)と本解析モデルの物性値

物性值	若月ほか <b>(2015)</b> <sup>2)</sup>	本解析
ヤング率 (GPa)	32.5	31.4
ポアソン比	-	0.2
一軸圧縮強度(MPa)	39.6	38.3
引張強度(MPa)直接	-	3.70
割裂	3.75	3.67
粘着力c (MPa)	-	9.75
内部摩擦角φ (°)	-	47.6





## 4. 発破シミュレーション結果

最大圧力を P<sub>max</sub>=570MPa に固定し、加圧終了時 t<sub>e</sub>を変化させた場合の発破孔壁の圧力・変位履歴を図-4 に、0.01 秒後の代表的な試験体の状況を図-5 に示す.図-4 より、自由面側の右側壁(図-2、W3~4 方向)の孔壁変位が t<sub>e</sub> まで加速度的に増大するのに対し、左側壁(図-2、W9~10 方向)の方は最大圧力時 t<sub>p</sub>で変位が収束に向かうこと がわかる.その結果、試験体は、t<sub>e</sub>を長く取るほど発破孔から右側の自由面へ向かうハの字形の亀裂が進展し、t<sub>e</sub>

次に,最大圧力を $P_{max}=90\sim1,600$ MPaまでの6段階に変化させ,右側壁の 変位量が上述の $5\sim6$ mmになるよう $t_e$ を設定した場合の孔壁圧力・変位履歴 を図-6に,0.01秒後の試験体状況を図-7に示す.図-7では, $P_{max}$ が低い範囲 では発破孔から放射状に亀裂が生じるのに対し, $P_{max}\geq770$ MPaでは自由面 と平行な亀裂が卓越すること,また, $P_{max}\leq90$ MPaでは自由面へ向うハの字 形亀裂が不明瞭になることなど,既往知見と矛盾しない結果が再現された.

≥0.0025s(右側壁の変位量 5~6mm)で明瞭な亀裂が形成される(図-5).

### 5. まとめ

Flat-jointモデルを用いた個別要素法解析により,コンクリートの力学特性を忠実に再現した解析モデルを作成できることを確認した.またその解析モデルに対し,発破孔壁に適切な圧力と減圧時間を与えることで,現実的な破砕状況を再現できることが確認できた.







2) 若月和人,齋藤 優ほか:自由面発破の実験と個別要素法を用いた数値解析手法の検証,土木学会論文集F-1(トンネル工学), Vol.71, No.3, I 1-I 10, 2015