

慣性項を考慮した単一亀裂グラウト注入モデルに関する基礎的研究

小林 賢一郎^{1*}・岸田 潔¹・細田 尚¹・笹本 広²・小野 香理³

¹京都大学 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1)

²(独)日本原子力研究機構 地層処分研究開発部門 (〒319-1194 那珂郡東海村村松4-33)

³クインテッサ・ジャパン (〒220-6007 横浜市西区みなとみらい2-3-1クインズタワーA7階707区)

*E-mail: kenkoba@1821pokka.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

本研究では、慣性項を考慮した非ニュートン流体としてのグラウト注入のモデルの構築を行い、単一亀裂平行平板モデルならびに、単一亀裂平行円盤モデルという2つの簡略化したモデルに対し行われた実験の数値シミュレーションを行った。シミュレーションの結果より、慣性項の有無や、慣性項を考慮することで生じる注入孔における圧力変化による浸透挙動について、従来のモデルと提案するモデルとの比較検討を行い、さらに、実験との比較を行った。その結果、従来モデルと本研究で提案するモデルでは、浸透距離における明瞭な差異は確認できなかったが、圧力の変動や浸透速度に差異が生じることを確認した。

Key Words : grout, bingham flow, parallel plate model, parallel disk model, rock fracture, inertia term

1. はじめに

グラウチングは、ダム基礎地盤での止水性の改良を主体として開発された技術で、ダム基礎やトンネル掘削などの分野で数々の実績を残してきている。その一方で、グラウトの設計・施工は実績や経験に基づいて行われてきたことから、そのメカニズムや理論は十分に確立されておらず、注入仕様や改良効果の定量的評価が曖昧となっている。特に、亀裂性岩盤においてグラウト止水効果の性能指標は、注入圧力やグラウト材の性状をパラメータとして、フラクチャー内に注入されたグラウトの浸透範囲を把握することであるが、グラウト材の特性を十分に考慮した評価とはなっていない。

実際には、上記の課題を検討するのに、モデル実験を行うのが適切である。しかしながら、ラフネスを有するフラクチャーに対して様々な実験を行うことは、多大な時間と費用を要することになる。そこで本研究では、基礎的なモデル実験におけるグラウト現象を合理的かつ精度良く予測・評価するため、精緻なシミュレーションモデルの構築を行い、その中で、粘性の時間依存性、配合切替、注入圧、フラクチャーの開口幅等の条件を検討し、実験結果と比較することでビンガム流体を対象にしたフラクチャー浸透モデルの検討を行う。

2. 単一亀裂平行平板モデル

(1) 解析モデルの構築

グラウト流体は、ある時間を経て固化するため、非ニュートン流体として扱われることが一般的である。本研究では、グラウト流体は、ある降伏応力以上の力を受けない限り流動を示さない非ニュートン流体、すなわちビンガム流体として取り扱う。

図-1に、本研究で検討するグラウト浸透の注入モデルを示す。幅 H [m]の圧力装置から設定注入圧力 P_g [Pa]でグラウトを開口幅 b [m]の単一亀裂に注入する。本研究では、Gustafson & Stilleモデル¹⁾では考慮されていない初期に注入流速が無限大となる点を改良する。これは、図-1に示す入口管側の圧

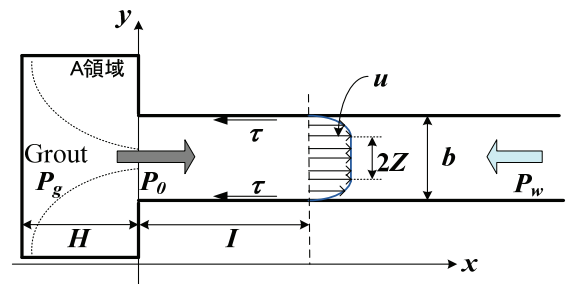


図-1 本研究で用いた単一亀裂平行平板注入モデル

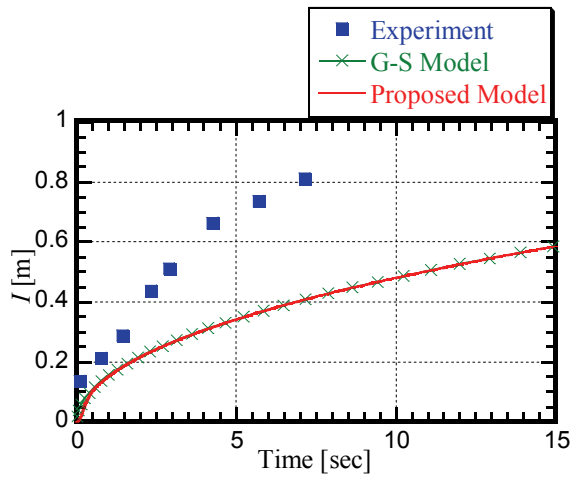


図-2 実験およびシミュレーションによる時間-浸透距離関係

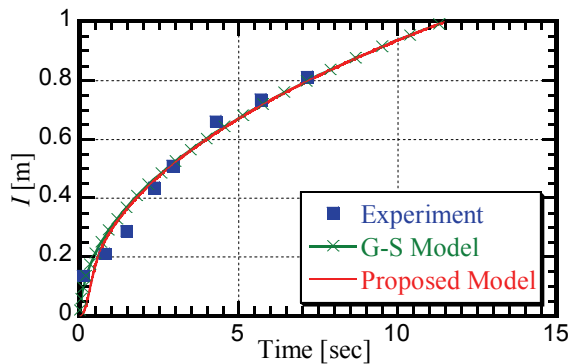


図-3 塑性粘度を 1/4 にした場合のシミュレーションによる時間-浸透距離関係

力 P_w [Pa]と注入圧力 P_g [Pa]が初期において不連続となるために生じる。そこで、図-1のA領域の管軸上の運動方程式を考慮し入口の圧力 P_0 [Pa]と注入圧力 P_g [Pa]の関係式(1)を導く。この際、間隙水圧 P_w [Pa]は注入圧力に比べかなり小さいため無視する。ビンガム流体では、流速分布中で浸透速度 u [m/s]が一定となる領域がある。その領域をフラクチャー内を浸透するグラウト先端部での幅として、図-1に示すように $2Z$ [m]とする。また、距離 I [m]進んだとき壁面せん断応力 τ [Pa]が作用するとし、さらに、管内の浸透についても運動方程式の慣性項を考慮することにより管内圧力のオーバーシュートを再現できるようにした。これらの条件を基に浸透式(2)を導いた。また、式(2)中の ρ [mPa*sec]は塑性粘度、 τ_0 [Pa]は降伏値を表す。また、Hässler²⁾により、開口幅 b [m]の平行フラクチャー内を浸透するグラウト先端部での速度は、式(3)で表現されている。これらの式により慣性項を考慮したモデルの構築を行った。

$$\left\{ \frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{1}{H} \left(\frac{dI}{dt} \right)^2 \right\} \cdot \frac{H}{2} = -\frac{P_0}{\rho} + \frac{P_g}{\rho} \quad (1)$$

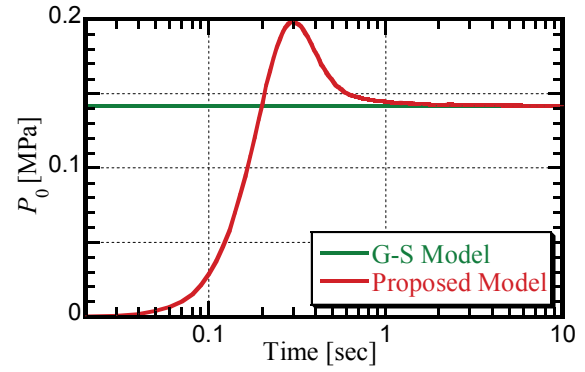


図-4 Gustafson & Stille モデルと慣性項を考慮したモデルの時間-注入孔圧力関係

$$(H + 2I) \cdot \frac{d^2 I}{dt^2} + \left(\frac{dI}{dt} \right)^2 + \frac{2 \cdot \tau_0}{\rho \cdot Z} \cdot I = \frac{2P_g}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{dp}{dx} \cdot \frac{b^2}{12\mu} \cdot \left\{ 1 - 3\frac{Z}{b} + 4\left(\frac{Z}{b}\right)^3 \right\} \quad (3)$$

このモデルとGustafson & Stilleモデルを用いて、単一亀裂平行平板注入試験のシミュレーションを行う。

(2) 実験及び解析結果

解析の対象とした実験は、開口幅 b [m]の平行平板による単一亀裂モデルを用いて行われたものである。図-1は、模型実験をモデル化したものである。実験では、注入圧力 P_g [Pa]は、A領域とフラクチャー入口部の間に取り付けられた圧力制御装置により、注入圧力の制御を自由におこなうことができ、実験開始から終了時まで規定圧力のままに設定されて行われた。また、注入されたグラウトの先端部を目視で読み取ることで、時間経過によるグラウトの浸透距離を計測した。なお、実験で用いたグラウト材料の要素試験の結果は、塑性粘度は 41.1 mPa*sec、降伏値は 1.5 Pa、密度は 1230 kg/m³である。また、注入圧力は 0.142 MPa、平均開口幅 0.206 mmのもとで実験は行われた。

実験に対して、上記で示すシミュレーションを行った。図-2は実験結果、Gustafson & Stilleモデル、慣性項を考慮したモデルでの浸透距離と時間の関係を示したものである。実験は、計測可能範囲が約 0.8mであるため、それ以降の計測は不可能であった。図-2より、同一時間において2つのモデルはほぼ同じ浸透挙動を示したのに対し、実験での浸透距離が2つのモデル解析結果よりも大きくなる結果となった。一方、それぞれのケースで塑性粘度を14倍したシミュレーション結果を図-3に示す。比較的、実験結果をよくあらわしている。塑性粘度は、時間依存性を含むパラメータであることが考えられることから、物性値の評価や時間依存性を考慮したモデルを今後検討する必要がある。

図-4 は、亀裂モデルの入口圧力の時間変化を示したものであり、図-5 は、速度の時間変化を、Gustafson & Stille モデルと慣性項を考慮したモデルについて比較したものである。

Gustafson & Stille モデルの場合、圧力 0 からただちに設定注入圧力に到達し、一定値に収束する。これでは、せん断応力が無限大から徐々に小さくなっていくことになり、ビンガム流体の性質である降伏値以上の力を受けなければ流体は動かない性質を微小時間において十分に説明できていないことになる。結果として、流体は注入直後に動き始め、規定圧力に落ち着くこととなる。

一方、慣性項を考慮したモデルでは、圧力は 0 から増加し、一端は設定注入圧力を超過するが、その後徐々に設定注入圧力に収束することが確認できる。これは、慣性項を考慮した場合、初速度 0 から徐々に速度が増加するため、それに伴いせん断応力も徐々に作用するようになり、圧力が瞬間的に規定値となる現象とはならない。その後、粘性の影響で速度は減少するが、それに伴い加速度は負の方向に増加し、圧力 P_0 は規定圧力を超え増加する。さらに、速度が 0 に収束するに従い、加速度も 0 に収束していくため、圧力は規定圧力に収束することになる。

Gustafson & Stille モデル、慣性項を考慮したモデルと実験値との差異について、塑性粘度を 1/4 とした場合の Gustafson & Stille モデル、慣性項を考慮したモデルでの浸透距離と時間の関係を図-3 に示すように求めたところ、実験値と 2 つのモデルにおける浸透挙動は、ほぼ一致する結果となった。このことについて、本研究で扱う材料にはシリカが含まれており、時間と粘度の関係について、シリカ含有率が大きいほど粘度も大きくなるが、粘度が時間により変化すると考えた場合に、粘度が大きくなるほど、粘度が定常状態に到達するまでの時間は大きくなるという結果が得られている³⁾。したがって、実験開始直後では物性値で求められている塑性粘度よりも値が小さくなり、理論値よりも浸透距離が長くなるという結果が得られたと考えられる。

3. 単一亀裂平行円盤モデルによる実験及び解析

(1) 解析モデルの構築

単一亀裂平行円盤モデルの説明に移る。このモデルでもグラウト流体はビンガム流体であると仮定した。前節で平行平板モデルでは、慣性項を考慮するか否かによらず、浸透距離の時間変化の差異はほとんど見られなかったため、平行円盤モデルでのシミュレーションは慣性項を考慮したモデルでのみおこなった。また、実験は一定の時間で注入圧力が規定値に到達しており、シミュレーションでは、規定圧力に到達するまで圧力を線形増加するように設定した。

単位時間当たりの流量 q [m^3/s] とすると、浸透距離 l [m] 及び開口幅 b [m] を用いると式(4)で表され、グラウト注入口径 d [m],

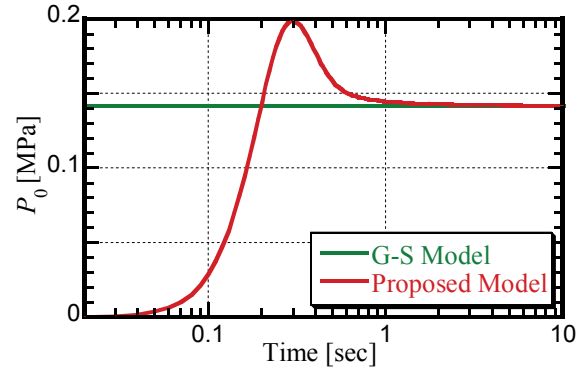


図-5 Gustafson & Stille モデルと慣性項を考慮したモデルの時間と速度の関係

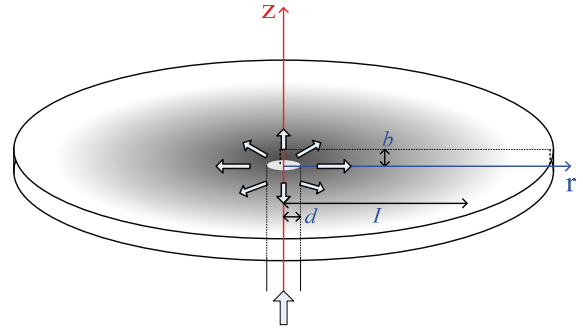


図-6 本研究で用いた単一亀裂平行円盤注入モデル

注入圧 P_g [Pa] と、半径方向の運動量式を注入口径 d [m] から浸透距離 l [m] まで半径方向について積分すると式(5)を導くことができる。このとき、式(5)の右辺の積分項はグラウト先端部にはたらくせん断応力 τ [Pa] とグラウト先端部での浸透速度一定の領域 Z [m] との関係式から Z のみで表現することができる。また、半径 r が変化するとともに ω も変化する。さらに、式(3)に示す開口幅 b [m] の平行フラクチャー内を浸透するグラウト先端部の速度は、式(6)の示す円筒座標系に置き換えた。以下に示す式を用いて、単一亀裂平行円盤注入試験のシミュレーションを行った。

$$q(t) = b l \frac{dl}{dt} \quad (4)$$

$$\left(\log \frac{l}{d} \right) l \frac{d^2 l}{dt^2} + \left\{ \left(\log \frac{l}{d} \right) + \frac{\beta l^2}{2} \left(\frac{1}{l^2} - \frac{1}{d^2} \right) \right\} \left(\frac{dl}{dt} \right)^2 - \frac{1}{\rho} P_g = - \frac{\tau_0}{\rho} \int_d^l \frac{dr}{Z} \quad (5)$$

$$u_r = \frac{\tau_0 b^2}{12 \mu Z} \cdot \left\{ 1 - 3 \frac{Z}{b} + 4 \left(\frac{Z}{b} \right)^3 \right\} \quad (6)$$

(2) 実験概要⁴⁾

図-6 に解析対象となる実験で使用した円盤状の平行円盤模型実験装置の概略図および平行円盤モデルへの注入過程を示す⁴⁾。円盤上面は、透明なアクリル板を用い

表-1 各ケースの物性値，設定圧力および平均開口幅

Case.	塑性粘度[mPa*sec]	降伏値 [Pa]	密度[kg/m ³]	設定圧力 [MPa]	平均開口幅 [mm]
Case-1	96.4	3.1	1456.4	2.0	0.05
Case-2	96.4	3.1	1456.4	2.0	0.1
Case-3	81.0	4.7	1384.8	2.0	0.1
Case-4	177.1	5.6	1325.3	2.0	0.1

表-2 感度分析に用いた塑性粘度および降伏値
(Case-3 の物性値に対する倍率で示す)

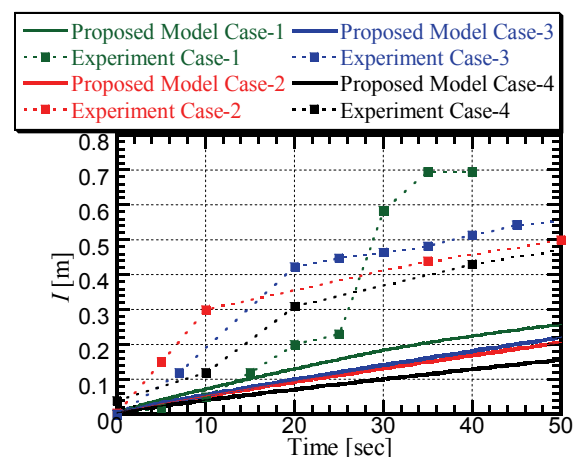
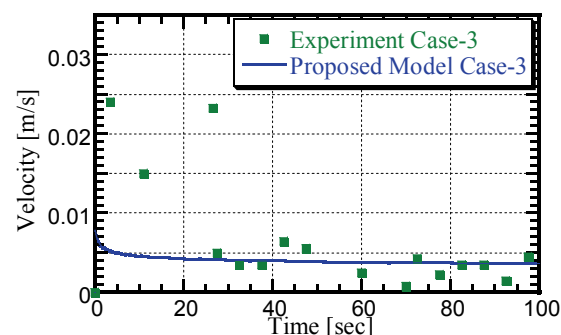
No.	塑性粘度の倍率	降伏値の倍率
Case-3, No.1	1/7	1
Case-3, No.2	1/7	50
Case-3, No.3	1	1

ており上部から可視化することができ，ビデオカメラで撮影されている．円盤下面は，SS 鋼板で作成されている．亀裂は，両面にスペーサーを数か所挿入することで開口幅を設定することが可能である．圧力は，円盤内に取り付けられた 12 個の圧力計で，時間ごとの圧力変化が計測することが可能である．実験は，円盤模型の中心に位置する注入口径 $d=4\text{ mm}$ から円の外側に向けグラウト試料が注入される．円の中心から試料先端部までの浸透距離 $l\text{ [m]}$ は，円盤を 4 方向に等分し，撮影したビデオデータを用いて，それぞれの方向における時間ごとの浸透距離を読み取った後，平均値をとったものである．グラウト試料は，様々な配分で混ぜられ，設定圧力，開口幅を変えることで数パターンの実験が行われた．

(3) 実験及び解析結果

図-7は，実験結果，慣性項を考慮したモデルでの浸透距離と時間の関係を示したものである．ここでは，4 ケースの実験結果を示すが，各ケースの物性値は，表-1に示す．Case-1では，浸透距離が，およそ0.7 mに到達ところ明瞭な浸透が確認されず，そこで計測が終了されている．また，Case-2, 3, 4では，グラウトが計測時間内に円盤枠を超えてしまったため， $l=10\text{ [m]}$ までの計測となっている．まず，実験結果と解析結果の比較であるが，すべてのケースで，実験結果が解析結果よりも浸透距離が長くなる結果となった．実験では，いずれのケースも開始から20秒までは浸透距離が明瞭に増加するが，それ以降グラウトの浸透率は低下する．一方，解析では，実験結果に見られる注入初期における浸透距離の顕著な増加は見られず，浸透距離は終始緩やかに上昇する結果となった．

図-8は，実験結果と解析でのCase-3における時間と速度の関係を示したものである．実験の速度は，図-7の結果より，距離の差を時間で除したものをその時間における速度として示した．これより，実験での速度は，30秒まではバラツ

図-7 実験と慣性項を考慮したモデルの
時間と距離の関係図-8 実験と慣性項を考慮したモデルの
時間と速度の関係

きがあり，解析結果とかけ離れたものであるが，30秒以降では浸透速度が徐々に減少し，解析結果と同じような値を示す．実験では，注入初期とそれ以降でグラウト浸透の挙動が大きく異なっていることが考えられる．注入初期では，パラメータの設定やあるモデルを検討・考慮し，解析を行わなければならないと考えられる．また，本研究では，1次元の平行平板モデルでのグラウト浸透において，圧力の設定が浸透距離を大きく左右することを示してきた．しかしながら，平行円盤実験の解析では，圧力制御の難しさから理論式構築のために圧力増加を簡略化した線形増加とみなしたことになり，結果として浸透距離に大きな違いが生じたと考えられる．今後，注入初期における物性値の設定や注入圧の設定を検討する必要がある．

解析でも用いた物性値の影響を検討するため，物性値の感度分析を行った．表-2は，感度分析に用いた塑性粘度および降伏値を示す．図-9は，感度分析の結果を示す．1次元

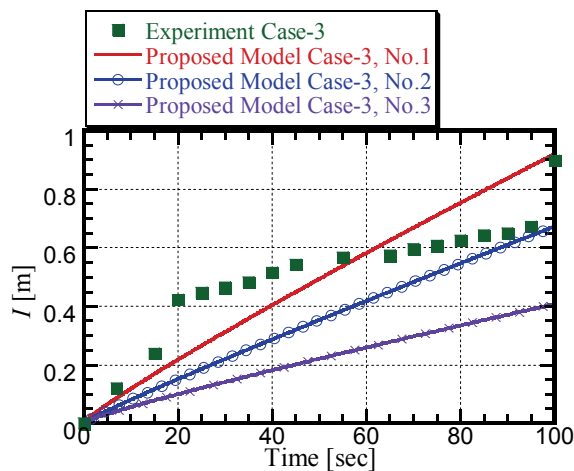


図-9 物性値を変えた場合の実験と慣性項を考慮したモデルの時間と距離の関係

の平行平板モデルのときと同様に、塑性粘度を小さくすることで、比較的实验と解析の浸透距離が一致することが確認できる。解析結果は、いずれも線形的に増加しており、一方、実験結果は、双曲線的な増加傾向を示してゐる。実験結果の傾向から、塑性粘度は時間依存性を有することが想定される。

4. まとめ

本研究では、2つのモデル実験に対して、慣性項を考慮したグラウト浸透解を示し、解析を行ったものである。単一亀裂平行平板モデル実験は、Gustafson & Stilleモデルと慣性項を考慮したモデルにより解析を行った。その結果、時間と浸透距離の関係は、慣性項の有無によらないことが確認された。一方、入り口部での形状の変化に伴う圧力の変化

は、慣性項を考慮したモデルによって評価することが可能となった。ここでは、平行平板モデルに対する解析を行ってきたが、亀裂の開口幅やラフネスが変化する、圧力の変化が考えられ、慣性項の有無が浸透挙動に影響を及ぼすものと考えられる。

また、単一亀裂平行円盤モデルでは、実験結果と解析結果に大きな差異が生じた。また、解析結果は、時間とともに線形的に浸透距離が増加するが、実験では、時間とともに浸透距離の変化率が異なることが確認できた。ここでは、注入圧力が線形的に増加し、規定に到達することで解析を行ったが、物性値の時間依存性や圧力の設定など、今後検討する必要がある。

謝辞：本研究は、経済産業省資源エネルギー庁地層処分技術調査等委託費(高レベル放射性廃棄物処分関連：地下坑道施工技術高度化開発)の一部として実施されたものである。関係各位に記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Gustafson, G. and Stille, H.: Prediction of groutability from grout properties and hydrogeological data, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(3), pp.325-332, 1996.
- 2) Lars Hässler: *Grouting of Rock -Simulation and Classification*, Ph.D Thesis, Royal Institute of Technology, 1991.
- 3) Funehag, J. and Axelsson, M. : Hydrogeological characterisation and sealing of narrow fractures in hard rock - A case study, *RMZ Materials and Geoenvironment*, Vol.50, No.1, pp.121-124, 2003.
- 4) 日本原子力研究開発機構：平成20年度高レベル放射性廃棄物処分関連地下坑道施工技術高度化開発報告書，2009

FUNDAMENTAL RESEARCH OF GROUT INJECTION MODEL ON A SINGLE FRACTURE IN CONSIDERING VARIOUS INJECTION PRESSURES AND INERTIA TERM

Kenichiro KOBAYASHI, Kiyoshi KISHIDA, Takashi HOSODA,
Hiroshi SASAMOTO and Kaori ONO

In this study, a grout injection model for Non-Newtonian fluid is proposed by considering the inertia term. The numerical simulation is carried out for the experiments performed on two simplified single crack models; a parallel plate model and a parallel disk model. A comparison with Gustafson & Stille model, and the proposed model is done in terms of the pressure change of the inlet. The proposed model clearly depicts the pressure built-up in the initial time stages due to the incorporation and stabilization of inertia term. The differences in velocity and pressure during initial stages are prominent when compared with the previous model. The comparison of the two model results for penetration distance shows some discrepancy with experimental observation.