

可視化技術を活用した岩盤不連続面のせん断－透水特性およびダルシー則の有効性に関する研究

蒋 宇静^{1*}・李 博¹・熊 祥斌¹

¹長崎大学工学部（〒852-8521 長崎市文教町一番十四号）

*E-mail: jiang@nagasaki-u.ac.jp

岩盤の力学、透水、熱特性などの諸特性は、岩盤中に存在する不連続面に支配されるため、不連続面の力学特性、透水特性およびこれらの相関関係を見出すことはきわめて重要である。本研究は新たに構築された可視化技術を活用してせん断－透水試験を行い、せん断過程における不連続面内の流体の流れおよびせん断時におけるその変化を観察し画像解析により評価した。これらの実験結果より、せん断に伴う不連続面内の空隙分布や接触状態の変化およびそれらが不連続面の透水特性に与える影響を評価することができた。また、変水頭差透水試験および数値解析より、ダルシー則の適用範囲やレイノルズ数の変化による流れの挙動の変化などを検討した。

Key Words :Rock fracture, shear-flow, visualization, aperture evolution, Darcy's law

1. はじめに

近年、大量生産、大量消費型の経済活動に伴う廃棄物処分、資源枯渇、地球温暖化などの地球環境問題が社会的関心と呼ぶ中で、岩盤工学においても、地下エネルギー貯蔵施設の建設や高レベル放射性廃棄物の地層処分、CO₂の地中貯留などのプロジェクトが注目を集めている。特に、高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、地下水シナリオを中心に処分施設の安全性評価を行うことが重要であると考えられており¹⁾、特に地下空洞掘削に伴う掘削影響領域（EDZ: Excavation Disturbed Zone）における透水・物質移行特性の把握が重要な研究テーマの一つとして挙げられている。岩盤の水理学的挙動は岩盤基質部よりも岩盤中に存在する潜在的な弱面である不連続面に大きく支配されるため、不連続面の力学特性、透水特性およびこれらの関連特性を見出すことは極めて重要である。

岩盤不連続面内のような狭い間隙中の流体の流れモデルとして現在は平行平板モデルが一般的に用いられ²⁾、数値シミュレーションする際に、流体の流れを層流と仮定して、レイノルズ方程式（local cubic law: 局所三乗則）が適用されてきた。しかし、自然界に存在する岩盤不連続面は、内部構造が非常に複雑であり、開口部は不均質に分布している特徴を有している。これらが不連続面内

の水理・物質移動特性に与える影響は大きいと考えられるため、平行平板モデルを適用するには限界があると考えられる。そこで、本研究では岩盤不連続面内の開口幅分布と透水特性を解明するために、新たに構築した可視化技術を活用して、せん断に伴う不連続面内の接触状態の変化を調べ、数値解析結果と比較・検討し、平行平板モデルの適用範囲を確認することを目的とする。

2. 試験方法

(1) 試験装置の概要

本研究で開発したせん断－透水同時特性試験装置の概要を図-1に示す³⁾。この装置はフィードバック機構を有する完全閉ループ方式の電気・油圧サーボシステムであり、载荷などがコンピュータにより自動制御される。バネを用いた垂直剛性一定方式に比べて、本装置はコンピュータに垂直剛性値を入力するだけでよく垂直剛性の設定、変更、さらにせん断途中の制御方式の切替えが容易である特徴がある⁴⁾。また、透水機構部はカセット式せん断箱に止水機構を組み込むことで改良を加え、供試体の端部に接合したパイプから圧力水を流入させ、供試体の逆端部から流出する水の重量をリアルタイムに計測することができる。流体を流入させる際に供試体の左右方

向の不連続面より漏水させることなく確実に集水するために側面にゲルシートと呼ばれる非常に軟らかく変形性に富んだポリマー材を用いた止水構造をとっている。

(2) 可視化技術の確立

本研究では、不連続面内の開口幅の分布をせん断一透水試験中で連続的に計測することを可能とするため、せん断一透水同時特性試験装置に基づき、不連続面を再現したアクリル供試体を通して、流れの可視化システムの開発を試みた。このシステムは、不連続面内に染色液を流し、CCDカメラにより撮影した画像の色の濃淡を輝度値に置き換え、定量的に開口幅の大小を求めるものである。ここで輝度値とは、色の濃淡を画像解析プログラムによって数値化したものである。可視化システムの詳細は文献⁵⁾に譲る。

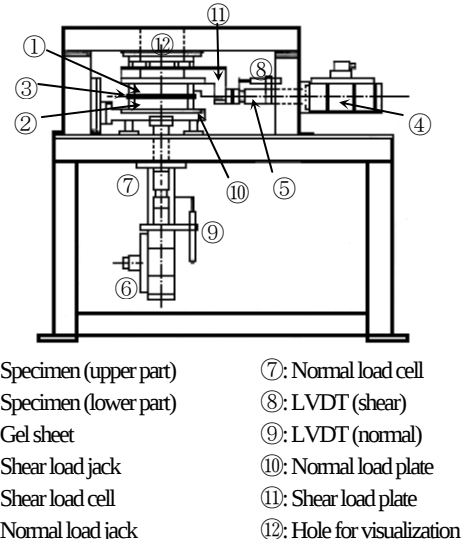


図-1 せん断一透水試験装置の概念図

(3) 供試体の作成と透水試験概要

せん断一透水試験は圧裂させた砂岩から模った不連続面の供試体を用いた。流れ画像を撮るため、せん断一透水同時試験は上部の透明供試体と下部の石膏供試体を組み合わせて行う。この供試体の表面は凹凸がたくさん存在し粗い表面形状を有しており、寸法は、幅100mm、長さ200mm、高さ100mmである。下部の石膏供試体の材料は重量比で石膏：水：遅延材＝1：0.2：0.005の混合材である。上部供試体の作成する際に真空圧よりアクリル材料が含む気泡を十分排除し、画像解析の条件に満たす透明度の高い透明供試体を作成した。また、岩盤不連続面の形状データを取得するために、非接触型三次元レーザー変位計システムを用いて、x、y軸方向にそれぞれ0.2mm間隔で供試体の表面の幾何学形状を計測した(図-2)。垂直応力一定条件(CNL)で、初期垂直応力を1.5MPa (Case1)、1.0MPa (Case2)に設定し、2ケースのせん断一透水試験を行った。すべてのケースにおいてせん断速度を0.5mm/minとした。そして、各せん断変位(1mm間隔)において変水頭透水試験を行い、開口幅が急激に変化する箇所の流速分布は放物線から乖離することにより水頭ロスが生じ透水量が減るという現象に着目し、ダルシー則の適用範囲を検証する。

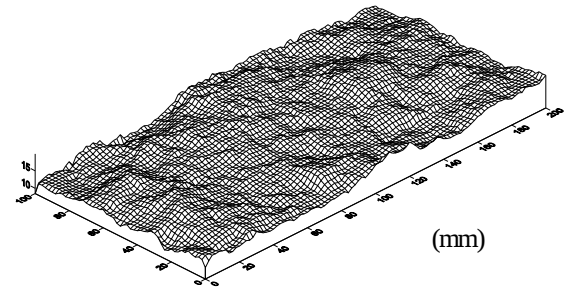


図-2 供試体の表面形状

$$E = E_0 - \Delta E_n + \Delta E_s \quad (1)$$

ここで、 E_0 は力学的初期開口幅、 ΔE_n は垂直応力による力学的開口幅の変化、 ΔE_s はせん断(ダイレーション)による力学的開口幅の変化である。CNL制御では、せん断変位 u における供試体表面の点 (i, j) での力学的開口幅 E は、 i をせん断方向、 j をせん断方向に垂直な方向とし、以下のように表せる³⁾。

$$\begin{aligned} E(i, j) &= E_0(i, j) + E_s(i, j) \\ &= E_0(i, j) + [V(u) + Z_L(i + u, j)] - Z_L(i, j) \\ &= Z_U(i + u, j) - Z_L(i, j) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $V(u)$ はせん断変位 u に対応する垂直変位(ダイレーション)、 $i+u$ は下部の表面での i と一致する上部の表面の点番号を示す。 Z_U と Z_L はそれぞれ基準点から供試体の上部と下部の表面までの高さを示す。

試験結果を評価する際に、力学的開口幅 E は、式(2)より評価し、水理学的開口幅 e はせん断一透水試験で得られる透水量に、式(3)に示す3乗則を適用することで逆算される。

(4) 開口幅の算定

不連続面内における流体の流れを正確に把握するためには、せん断過程における開口幅の分布の変化を精度よく測定することが重要である。せん断一透水同時試験における開口幅分布の変化は、供試体の表面幾何学形状、計測により得られた初期開口幅およびせん断変位－垂直変位関係(ダイレーション・カーブ)を用いて、以下のように計算できる⁹⁾。

$$Q = AV = We \cdot \frac{ge^2}{12\nu} \frac{\Delta h}{L} = T \cdot \frac{Wg}{\nu} \frac{\Delta h}{L} \quad (3)$$

ここで、 Q は流量、 g は重力加速度、 Δh は水頭差、 A は断面面積、 V は流速、 e は水理学的開口幅、 W は供試体の幅、 L は供試体の長さ、 ν は動粘性係数、 T は透水係数である。また、レイノルズ数は以下の式を用いて評価した。

$$Re = \frac{eV}{\nu} \quad (4)$$

(4) 数値解析の概要

単一岩盤不連続面内の流体の流れは一般的に三次元のナビエ・ストークス(NS)方程式を用いて評価することができる。ナビエ・ストークス方程式のベクトル形式は以下になる。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$ は流速ベクトル、 $\mathbf{f}$ は単位体積当りの流体に加わる外力のベクトル、 ρ は流体の密度である。本研究は汎用FEMプログラムであるANSYSを用いて、実験で得られた不連続面の開口幅分布を基つて三次元のナビエ・ストークスを解き、既往研究で用いられた局部三乗則などの手法が表現できない高 Re 数状態で渦の生成などの特徴を捉え、実験で得られた流量と水頭差の関係が Re 数の増加に伴い線形から非線形へ遷移するメカニズムを検討した。

ナビエ・ストークス方程式を三次元的に解くには計算性能の高いコンピュータが必要となるので、ここで、計算時間を短縮するため、実験で得られたせん断10mm目の開口幅分布(200mm×100mm)から一部を切り取って、定性的な評価を行った。図-3に示すように、解析モデルの寸法は45mm×25mmであり、中央部で一つの接触領域が存在している。その接触領域に流体が流入・流出しないようにするため、該当するメッシュを計算領域から削除した。また、亀裂の上下壁面、長い辺の境界面および接触領域に沿って、流速ゼロとする条件を与えた。モデルの左側の境界面に均一な水頭差を与え、右側にゼロ水頭差を与えた。与えた水頭差を1mmから27mmまで段階的に変化させて、それぞれの水頭差における流量を計測し、式(3)を用いて透水係数を評価した。

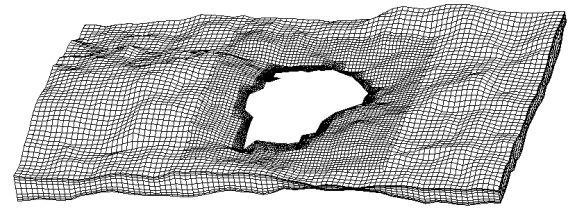


図-3 解析モデル(45mm×25mm)

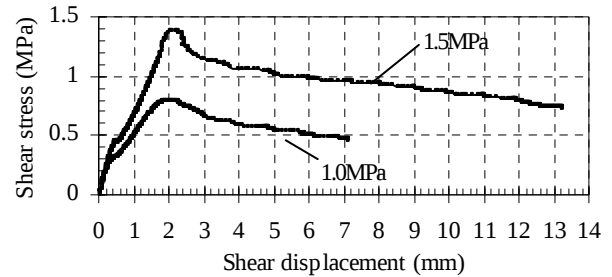


図-4 せん断応力とせん断変位の関係

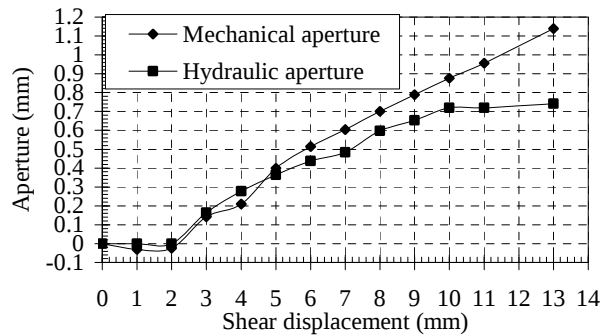


図-5 開口幅とせん断変位の関係

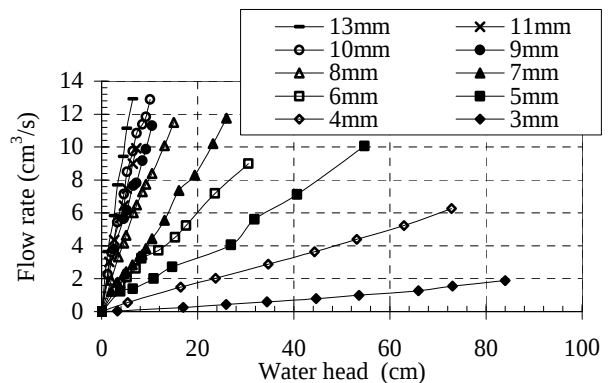


図-6 流量と水頭差の関係(せん断変位3mm~13mm)

3. 結果と考察

(1) せん断一透水試験結果

図-4にCase1, 2のせん断変位とせん断応力の関係を示す。これよりせん断応力は、せん断変位2mm付近でピークを示すことが分かる。また、初期垂直応力が大きいほど、ピークせん断応力および残留せん断応力も大きくな

ることが分かる。図-5では試験で測定した流量と垂直変位からそれぞれ水理学的開口幅と力学的開口幅を算出したものを比較している。ピーク応力以前においては不連続面供試体同士の噛み合わせ状態がよく、ほぼ透水しないことを確認している。測定開始後、まず負のダイレーションが発生する。ピーク後に正のダイレーションへと遷移し、力学的開口幅と水理学的開口幅が同様に増加し

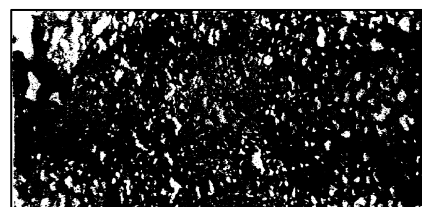
ていることからせん断応力がピークに達した後、不連続面の乗り上げによる開口幅の急激な増加が窺える。せん断変位10mm付近では水理学的開口幅の増加傾向が衰え、その後はほぼ一定の値となる。図-6にせん断-透水試験 Case1 (垂直応力1.5MPa) における水頭差と流量の関係を示す。ここでせん断の全過程を、ステージ1(せん断変位3~4mm)、ステージ2(せん断変位5~8mm)、ステージ3(せん断変位9~13mm)に分けて考察する。

ステージ1を初期段階と位置づける。この段階では分散した接触領域がたくさん分布しており、流路が限られ流速も遅く、流量と水頭差は線形関係を保つことができ、ダルシー則の有効性を示唆する。ステージ2は主な流路が形成し始める段階である。この段階では供試体のダイレーションが顕著に発生し、開口幅の増加に伴い流量が急増し、水頭差が大きい場合では流量と水頭差の関係が線形から離れていく。また、図-7において白で表示されているところは可視化技術により判明した接触領域を表している。ステージ2では接触領域が数多く分布していることにより流線が曲がりやすい状況であるため非ダルシー流の発生を促進させた。ステージ3では図-7 (c)に示すように、点在していた接触領域が集中し、以前まで複雑だった流路が次第に緩和することになり、流量と水頭差の関係は徐々に線形に戻るようになる。

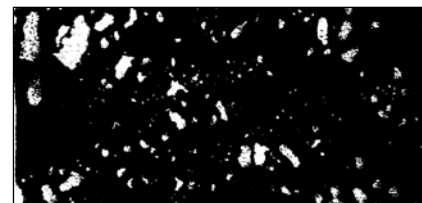
(2) 数値解析結果

解析による流速ベクトル分布を図-8に示す。流れは接触領域を避けるように屈曲し、上下に二つの流路に分かれて下流側の境界へ流出する。上半分は一つの大きな流路、下半分は二つの小さい流路が存在しており、開口幅の不均質的な分布より「チャネル現象」が現れている。図-9は接触領域の背面を拡大したベクトル分布図である。水頭差が小さい場合 (Re 数1)、ほとんどの流速ベクトルは上流側から下流側へ指す方向を示し、マイナスなベクトルがほとんど存在しない。それに比べて、大きな水頭差 (Re 数100) の場合は、マイナスな流速ベクトルが現れ、接触領域の背面で流れの渦が生じていることが確認できる。このような高水頭差で流れの速度や方向が急激に変わる箇所が生じる流れの乱れは、大きな水頭差を生じさせ、計測された流量はダルシー則の評価より小さくなる。

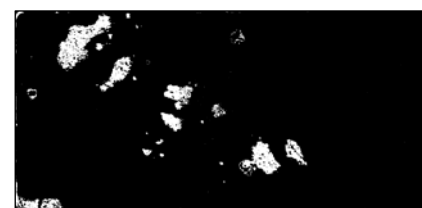
図-10はすべてのせん断変位における正規化した透水係数と Re 数の関係を示す。ここで、 T_0 は流量と水頭差の関係は線形段階における透水係数の平均値で、 T は式(3)を用いて、計測した流速 Q から逆算した透水係数である。式(3)で示すように、一定な開口幅を持つ亀裂において流量は水頭差と線形的な関係を持っているので、任意な水頭差若しくは Re 数において、正規化した透水係数 T/T_0 は1になるべきであるが、図4に示すように、 Re 数の増大



(a) せん断変位3mm, 接触率17.52%



(b) せん断変位6mm, 接触率9.92%



(c) せん断変位13mm, 接触率5.49%

図-7 せん断に伴う接触領域分布の変化

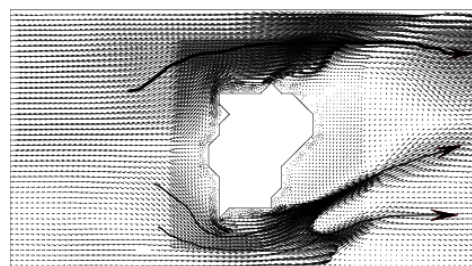


図-8 流速ベクトル分布

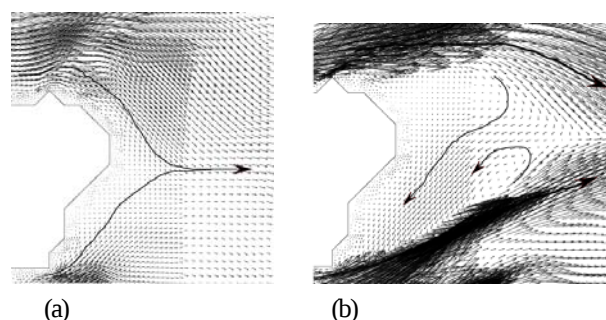


図-9 Re 数が小さい(a)と大きい(b)時に接触領域背面における流速ベクトル分布

に従って、 T/T_0 は1よりも小さい値へなっていく。Zimmermanらが岩盤不連続内における流体の流れは Re 数によって、三つの段階に分けられ、それぞれに違った支配式が存在すると提案した⁷⁾。第一段階は Re 数が十分に小さい場合に適用され、ダルシー則が適用できる、すなわち流れは完全なダルシー流である。 Re 数が大きくな

ると、流体は過渡領域に入り、正規化した透水係数は1から離れ始める。この段階は弱慣性領域(*weak inertia regime*)と呼ばれる。Re数が更に大きくなると、流体が強慣性領域(*strong inertia regime*)に入る。亀裂内の流れにダルシー則を適用する際に、限界Re数(*critical Reynolds number*)は10程度であり、それを超えると、乖離が次第に大きくなると指摘された。実験結果においては正規化した透水係数がRe数10~20を超えると減少し始め、Re数50になる時点でおおよそ80%まで落ちる。その後、減少の傾向を緩め、Re数50から200の間でおおよそ10%~20%を減少した。従って、Re数10~50は水頭差と流量の非線形関係が顕著に発展する区間であると考えられる。また、解析モデルは実験で行ったモデルの一部しかないので、定量的な比較ができないが、図の示すように、定性的に見ると解析結果が実験結果と同様な低下の傾向を示し、高Re数で流量と水頭差の関係が線形から非線形へ遷移する特徴を捉えることができた。将来、実験モデルを忠実に再現した解析モデルを構築していく必要があると考えられる。

4. 結論

本研究では、せん断一透水試験及び可視化技術を併用することで、岩盤不連続面内における流れを評価することができた。岩盤不連続面のような狭い間隙中における透水特性の変化は接触率に大きく起因し、特にせん断過程で主な流路の形成や流線の形態などの特徴が接触領域の分布状態と緊密に関連していることが判明した。Re数が大きくなった場合（例えば10よりも大きい）、流量と水頭差の関係は線形から離れていき、ダルシー則をそのまま用いると、おおよそ10~20%の誤差が生じることが実験及び解析結果から分かった。自然岩盤不連続面内における流体の流れではRe数が10を超える場合は十分あり得るので、その領域におけるダルシー則の補正方法の提示と検証を進めていくことが今後の課題である。

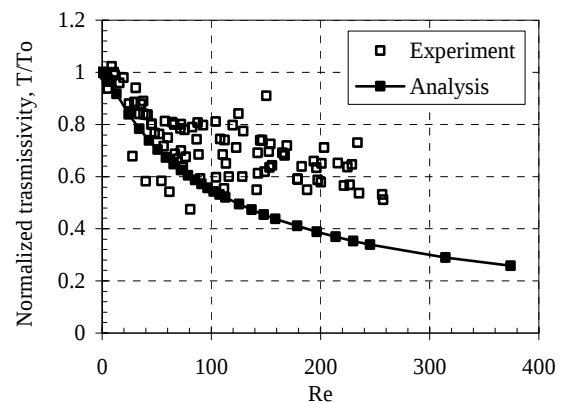


図-10 正規化した透水係数とRe数の関係

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発，2002.
- 2) 蔣宇静：岩盤不連続面のフラクタル特徴とせん断挙動および透水特性との関係，科学研究費補助金(奨励研究 A)成果報告書，1999.
- 3) Li, B., Jiang, Y., Koyama, T., Jing, L. and Tanabashi, Y. : Experimental study of the hydro-mechanical behavior of rock joints using a parallel-plate model containing contact areas and artificial fractures. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 45 (3), pp.362-375, 2008.
- 4) Jiang, Y., Xiao, J., Tanabashi, Y. and Mizokami, T.: Development of an automated servo-controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 41, pp.275-286, 2004.
- 5) 李博，吉田敬一，蔣宇静，棚橋由彦：せん断過程における岩盤不連続面内開口幅分布の測定と評価，第12回岩の力学国内シンポジウム，宇部，pp.821-827，2008.
- 6) Esaki, T., Du, S., Mitani, Y., Ikusada, K., Jing, L.: Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint. *Int J Rock Mech Min Sci*, 36, pp. 642-650, 1999.
- 7) Zimmerman, R., Al-Yaarubi, A., Pain, C., Grattoni, C.: Non-linear regimes of fluid flow in rock fractures. *Int J Rock Mech Min Sci*, 41, pp. 163-169, 2004.

EVALUATION OF VALIDITY OF DARCY'S LAW AND APERTURE EVOLUTION DURING COUPLED SHEAR-FLOW PROCESS OF SINGLE ROCK FRACTURE USING VISUALIZATION TECHNIQUE

Yujing JIANG, Bo LI and Xiangbin XIONG

A great number of experimental investigations have been performed in the past, regarding coupled shear-flow behavior of rock fractures. However, some of the key issues such as shear-induced fluid flow anisotropy during large shear displacements remain unresolved. In this study, a laboratory visualization system of shear-flow tests is developed. Using this system, a number of shear-flow tests under various boundary conditions were carried out. The evolution of mechanical aperture distribution and their characteristics during a shear process were evaluated. The validity of Darcy's law and the influence of Reynolds number on the flow behavior were investigated.