

簡易モデルを用いた地下水流動解析コードの比較検討 — Dtransu-3D・EL, FEFLOW, ConnectFlow の比較 —

平井 哲^{*1}

今後活用していく予定である3次元の地下水流動解析コード (Dtransu-3D・EL, FEFLOW, ConnectFlow) について、地下水流動解析コードの整合性を確認するために、簡易モデルを題材に地下水浸透流解析を実施し、計算結果の比較検討を行った。地下水が一方向に一樣な流速で流れている条件で計算を行い、それぞれの地下水流動解析コードで共通する出力結果である節点全水頭を比較した結果、全節点において有意な差がないことを確認した。本報告の結果は、これらの地下水流動解析コードを利用する際、他コードを用いた妥当性確認を行う際の参考になるものとする。

キーワード：地下水流動解析、有限要素法、飽和浸透流解析、定常解析、全水頭

1. はじめに

地下水流動解析技術の高度化を最終目標として、地下水流動解析コードの整備に取り組んだ。その成果として、今後活用していく3次元の地下水流動解析コードを選定した。選定した地下水流動解析コードは、Dtransu-3D・EL, FEFLOW, ConnectFlow の3つである。

これらを選定した経緯と理由としては、それぞれ以下のとおりである。

- Dtransu-3D・EL については、地形・地質、海水準・降水量等の時間的変遷を考慮した過去からの連続的な変化をみる地下水流動解析を実施するニーズに対応できるツールが開発されていること。
- FEFLOW については、地下水流動解析の入力パラメータ、特に透水係数設定の説明性の向上へのニーズへの対応として、地下水位や地下水年代等の実測値を根拠に逆解析でパラメータを同定できるツールを含むこと。
- ConnectFlow については、連続体と亀裂ネットワークが混在する複雑な地質環境サイトを1つのモデルに統合した状態で地下水流動解析を実施するニーズへの対応として、これらのモデル化が可能であったこと。

この3つの地下水流動解析コード自体の検証と妥当性確認は、それぞれ個別に行われており、Dtransu-3D・EL は地下水流動解析コード入手時のダウンロードファイル内、FEFLOW および ConnectFlow は、インストール後のソフトウェアの Help やインストールフォルダ内の文書からこれらの根拠ファイルを確認できる^{4), 5), 6)}。

一方、これらの地下水流動解析コードは、いずれも有限要素法であり、同種の計算機能も多く、機能が重複するところもあるものの、これら3つの地下水流動解析コードの同種の計算について、同じ計算モデルを対象に計算結果を比較した事例はみあたらない。そこで、本報告では、簡易モデルを題材に、これら3つの地下水流動解析コードの計算結果の整合性を確認するため、モデル解析を実施し、計算結果について比較検討する。

本報告は、以下の構成になっている。

2章では、3つの地下水流動解析コードの特徴や機能について説明する。

3章では、地下水流動解析コードの比較検討を行うための計算方法として、条件設定および計算手順について説明する。

4章では、3章で説明した計算方法を踏まえて地下水浸透流解析を実施し、その計算結果に基づいて比較検討する。

5章では、以上の検討結果をまとめるとともに、今後の課題についても提示する。

2. 解析コードの特徴と機能

表-1には、放射性廃棄物処分場に関連して利用する機能を中心に3つの地下水流動解析コード、Dtransu-3D・EL¹⁾、FEFLOW²⁾ および ConnectFlow³⁾ の特徴と機能について整理した。以下、表-1について説明する。

①ライセンス種別と公開状況：Dtransu-3D・EL はフリーコード、FEFLOW および ConnectFlow は商用コードとなっている。また、解析コードおよびデータ様式については、

*1 原子力部

Dtransu-3D・EL ではともに公開，FEFLOW および ConnectFlow では，解析コードが非公開，データ様式が公開されている．そのため，Dtransu-3D・EL は，コードの改造や追加機能などのツールの作成が最も容易であると考えられる．一方，FEFLOW および ConnectFlow は，解析コードが非公開であるものの，データ様式が公開されていることから，入出力ファイルを介した機能追加などの作成については容易であると考えられる．

②離散化の手法：いずれの地下水流動解析コードも有限要素法（FEM）である．

③亀裂のモデル化手法：Dtransu-3D・EL では立体要素の等価連続体，FEFLOW では立体または平面要素の等価連続体で表現している．また，ConnectFlow では多孔質媒

体モデル，亀裂ネットワークモデル（Discrete Fracture Network Model:DFN）およびこれらの混合モデルの3種類のモデルを選択でき，亀裂のモデル化は，多孔質媒体モデルでは立体要素の等価連続体，DFN モデルでは四角形要素で表現される．

④地下水流動解析の計算機能：大きく地下水浸透流解析（飽和・不飽和解析）および物質移動解析に区分され，いずれの地下水流動解析コードも両者に対応している．

⑤地下水浸透流解析（飽和・不飽和解析）：定常解析，非定常解析，密度勾配を考慮した解析，降雨（蒸発）を考慮した解析および境界の水位変動を考慮した解析については，いずれの地下水流動解析コードもこれらに対応している．一方，地表水との連携機能はFEFLOWのみが対応

表 - 1 地下水流動解析コードの特徴と機能

解析コード名(最新version ^{※1})		Dtransu-3D・EL (2.2b)	FEFLOW (8.0)	ConnectFlow (12.4)
開発元		岡山大,三菱マテリアル,ダイアコンサルタント	DHI	Jacobs
①	ライセンス種別	フリー	商用	商用
	解析コードの公開	公開	非公開	非公開
	データ様式の公開	公開	公開	一部公開 ^{※2}
②	離散化手法	有限要素法(FEM)	有限要素法(FEM)	有限要素法(FEM)
③	亀裂のモデル化手法	等価連続体(立体)	等価連続体(立体・平面)	等価連続体(立体)orDFN
⑤	地下水浸透流解析(飽和・不飽和)	○	○	○
	定常解析	○	○	○
	非定常解析	○	○	○
	密度勾配の考慮	○	○	○
	降雨(蒸発)の考慮	○	○	○
	境界の地下水水位変動	○	○	○
	地表水との連携	×	○	×
④	物質移動解析(単一溶質)	○	○	○
	移流・分散解析(定常・非定常)	○	○	○
	境界の濃度の時間変化	○	○	○
	境界の濃度フラックスの時間変化	○	○	○
	境界の濃度固定	○	○	○
	境界の濃度フラックス固定	○	○	○
	粒子追跡解析(位置)	○	○	○
	粒子追跡解析(位置+ランダムウォーク)	×	○	○
⑥	粒子追跡解析(位置+濃度)	○	×	×
	地下水年代(粒子追跡)	×	○	○
	地下水年代(輸送方程式)	×	○	×
⑦	逆解析によるパラメータ同定	×	○	×
⑧	プレ処理機能のGUI化	× ^{※3}	○	○
	ポスト処理機能のGUI化	× ^{※3}	○	○
⑨	他のデータ様式との連携(入力)	△ ^{※4}	○	○
	他のデータ様式との連携(出力)	△ ^{※4}	○	○

※1 最新Versionは，2023年9月22日に確認した番号．

※2 ConnectFlow 自体の入出力データ様式は公開されていないが，公開された他のデータ様式からの入力，ASCIIデータによる出力ができる．

※3 GUI化されていないが，ダウンロードファイル内にプレ・ポストツールが添付されている．

※4 コード自体には他のデータ様式との連携機能はないが，ジオメトリの他の様式からの入力機能やピックアップ出力などのツールがダウンロードファイル内に添付されている．

している。

⑥物質移動解析：単一溶質を対象として、定常場・非定常場の移流・分散解析，境界の濃度・濃度フラックスの時間変化を考慮した解析，境界の濃度・濃度フラックスを固定した解析，および粒子追跡解析（粒子の時間経過に伴う位置の予測）の機能は，いずれの地下水流動解析コードも対応している。一方，ランダムウォークを考慮した粒子追跡解析（粒子位置の予測）はFEFLOWおよびConnectFlow，粒子位置の濃度の出力に対応した粒子追跡解析はDtransu-3D・EL，粒子追跡解析の後方位置予測による地下水年代の予測はFEFLOWおよびConnectFlow，輸送方程式による地下水年代の予測はFEFLOWのみが対応している。

⑦その他、逆解析によるパラメータ同定：FEFLOWのみが対応している。

⑧プレ・ポスト処理機能のGUI (Graphical User Interface：マウスなどのポインティングデバイスを用いてコンピューターへの命令を、ユーザーが視覚的に捉えてできるようにするためのインタフェース)化：FEFLOWおよびConnectFlowが対応している。Dtransu-3D・ELについては、プレ・ポスト機能がGUI化された商用ソフトも市販されているが、ここではフリーで入手可能な範囲で記載した。フリーで入手できるDtransu-3D・ELの場合は、ダウンロードファイル内に用途に応じたプレ・ポストツールが添付されている。

⑨他のデータ様式との入出力の連携：FEFLOWおよびConnectFlowが対応している。Dtransu-3D・ELについては、コード自体には他のデータ様式との連携機能はないが、ジオメトリの他の様式からの入力やピックアップ出力などのツールがダウンロードファイル内に添付されている。

次章以降の簡易モデルによる地下水流動解析コードの比較検討では、3つの地下水流動解析コードにおける計算機能のうち、3つの解析コードに共通し、最も計算が安定する定常場の飽和状態の地下水浸透流解析を実施する。

3. 検討方法

地下水流動解析コードの比較検討するための方法として、地下水流動解析の条件および手順について説明する。

3.1 条件

地下水流動解析の条件について、計算条件、計算モデル、境界条件、材料パラメータおよび出力項目について、

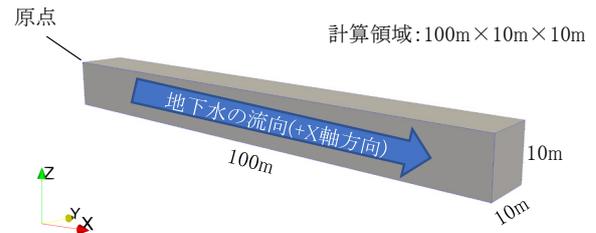


図-1 計算領域

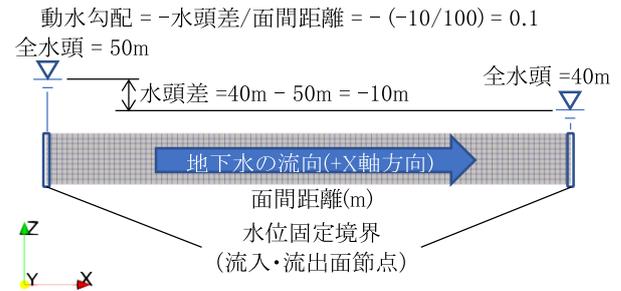


図-2 境界条件

以下に説明する。

(1) 計算条件

計算条件は、簡単に地下水流動解析コードの比較ができるように、定常場の飽和状態の地下水浸透流解析とする。

(2) 計算モデル

計算モデルは、簡単なモデルとして、図-1に示すような100 m × 10 m × 10 mの直方体とし、地下水は+ X軸方向に向かって動水勾配0.1で流れているものとする。

(3) 境界条件

境界条件は、図-2に示すように、+X軸方向に地下水が流れ、動水勾配の大きさが0.1となるように、X軸方向の-方向と+方向の側面に水位固定境界を設定する。

(4) 材料パラメータ

要素の材料パラメータは、透水係数を 1.0×10^{-8} m/s に設定する。また、透水係数の異方性は考慮しない。

(5) 出力項目

各地下水流動解析コードの計算結果の比較に用いる出力項目は、各解析コードで共通する出力項目である節点全水頭とする。

3.2 解析手順

地下水流動解析の手順は、図-3示すように、大きくは、有限要素メッシュモデルの作成、各地下水流動解析コードによる処理および出力結果の整理の3段階である。以下に、それぞれ説明する。

(1) 有限要素メッシュモデルの作成

解析モデルは、図-4に示すような1 m幅の立方体要

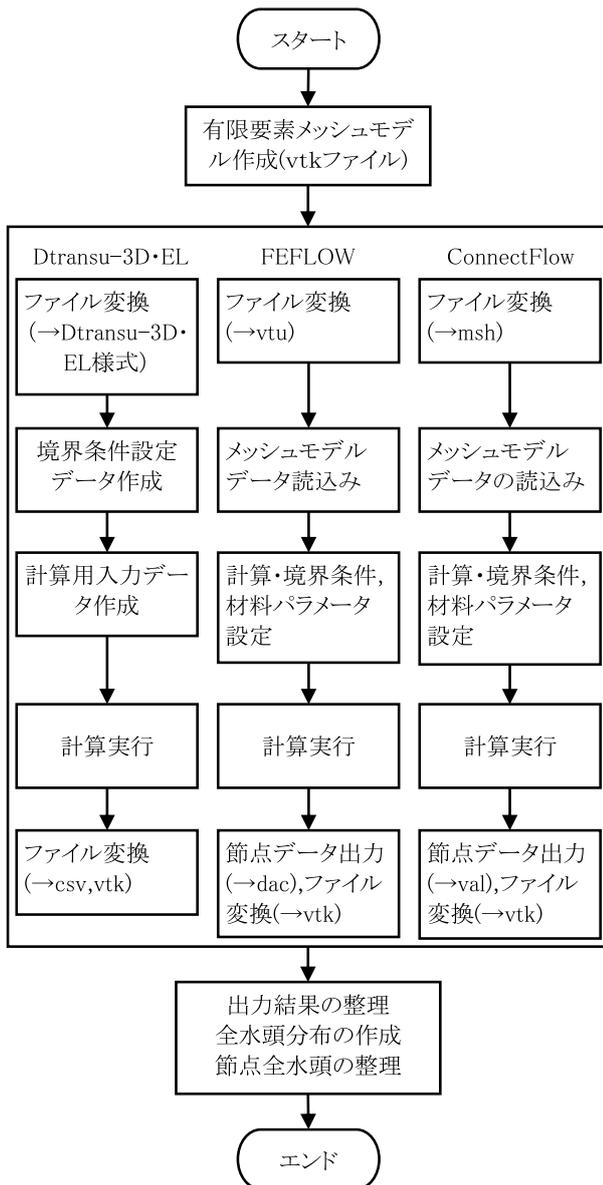


図-3 計算手順

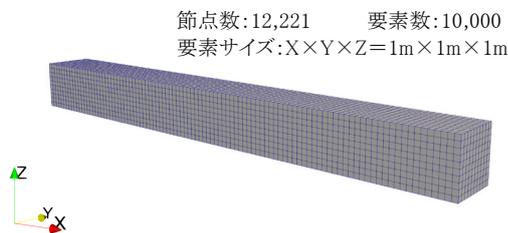


図-4 有限要素メッシュモデル

素で構成する有限要素メッシュモデルとする。

有限要素メッシュモデルは、入力時に各地下水流動解析コードで入力する節点番号、要素番号および要素の構成節点番号が同じになるように、最初に1つの有限要素メッシュモデルを作成し、地下水流動解析コードに取り込めるデータ様式に変換する。有限要素メッシュモデルは、データ可視化ソフトParaView (ver5.11.1)⁷⁾ の

SourceメニューのUnstructured Cell Type機能を利用して作成し、vtkファイルに出力する。

(2) 各解析コードによる処理

1) Dtransu-3D・EL

Dtransu-3D・ELでは、事前に作成した有限要素メッシュモデルの出力ファイル(vtk)を基にDtransu-3D・ELの入力データのうち入力様式¹⁾にしたがって節点情報および要素情報データに作成する。

計算領域における地下水の流入面と流出面の節点を抽出して、抽出した節点を水位固定境界に設定し、図-2の境界条件のような地下水流れの上流側および下流側にそれぞれ動水勾配0.1となるように全水頭を与えた境界条件設定情報を入力様式¹⁾にしたがって作成する。

次に、以上の節点情報、要素情報および境界条件設定情報に材料パラメータおよび計算条件情報を加えた計算用入力ファイルを入力様式¹⁾にしたがって作成する。

最後に、計算を実行して、計算結果データファイル⁸⁾を基に節点データをASCIIテキストデータおよび図化用としてvtkファイル⁹⁾に変換する。

2) FEFLOW

FEFLOWでは、事前に作成した有限要素メッシュモデルの出力ファイル(vtk)を基に、FEFLOWで読み取り可能なvtuファイルに変換し、変換した(vtuファイル⁹⁾:vtkファイルの一種)をFEFLOWで読み込む。

次に、FEFLOW上で計算条件、境界条件および材料パラメータを設定する。

最後に、計算を実行して、節点データを出力(dacファイル:ジオメトリ情報も含まれるASCIIテキストデータ)¹⁰⁾し、dacファイル¹⁰⁾を基に図化用のvtkファイル⁹⁾に変換する。

3) ConnectFlow

ConnectFlowでは、事前に作成した有限要素メッシュモデルの出力ファイル(vtk)を基に、ConnectFlowで読み取り可能なmshファイル¹¹⁾に変換し、変換したmshファイル¹¹⁾をConnectFlowで読み込む。

次に、ConnectFlow上で計算条件、境界条件および材料パラメータを設定する。

最後に、計算を実行して、節点データを出力(valファイル:ASCIIテキストデータ)するとともに、valファイルとジオメトリデータファイル(gid)¹²⁾を基にParaViewで図化するためにvtkファイル⁹⁾へ変換する。

(3) 出力結果の整理

各地下水流動解析コードによる出力結果から、全水頭分布の作成および節点全水頭の整理を行う。

全水頭分布は、可視化ソフト ParaView (version5.11.1) を利用し、地下水流動解析の出力結果の vtk ファイルを ParaView で読み込んで作成する。

節点全水頭の整理は、地下水流動解析の出力結果の ASCII テキストファイル内の節点番号、節点座標および節点全水頭を含むデータをコピーして Microsoft Excel 上に貼り付け、全節点について、節点座標が一致することを確認したうえで、各地下水流動解析コード間の節点全水頭の差の絶対値をもとめて頻度分布図に整理する。

以上の全水頭分布および節点全水頭の差の絶対値の頻度分布について、地下水流動解析コード間の違いを比較検討する。

4. 計算結果および比較検討

ここでは、3章の計算方法に基づいて、各地下水流動解析コードで計算した結果の節点全水頭について、全水頭分布および解析コード間の全水頭差に整理して、それぞれ比較検討を行う。以下、これらについて説明する。

(1) 全水頭分布の比較

図-5～図-7には、それぞれ、Dtransu-3D・EL, FEFLOW, ConnectFlow の計算結果の節点全水頭を基に算出した計算領域上面、地下水流れ方向沿いの側面、中心鉛直断面における全水頭分布を示す。全水頭は、図-5～

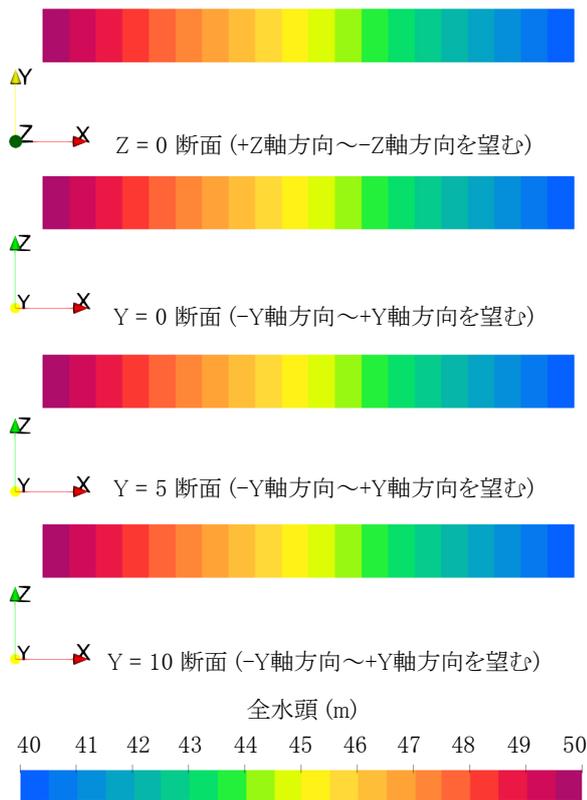


図-5 全水頭分布 (Dtransu-3D・EL)

図-7のいずれにおいても X 軸方向の - 方向側で 50 m と最も大きく、+ 方向側で 40 m と最も小さい。これは、境界条件の設定において X 軸方向の - 方向側側面に設定し

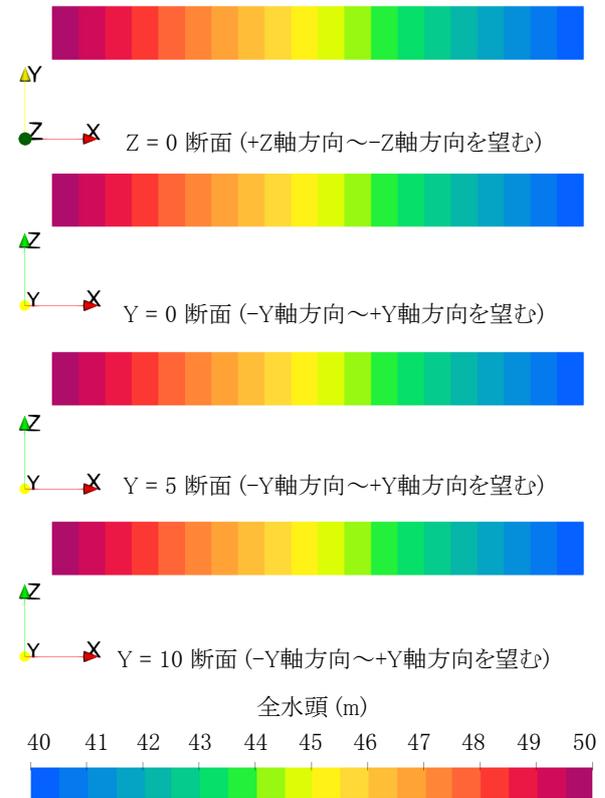


図-6 全水頭分布 (FEFLOW)

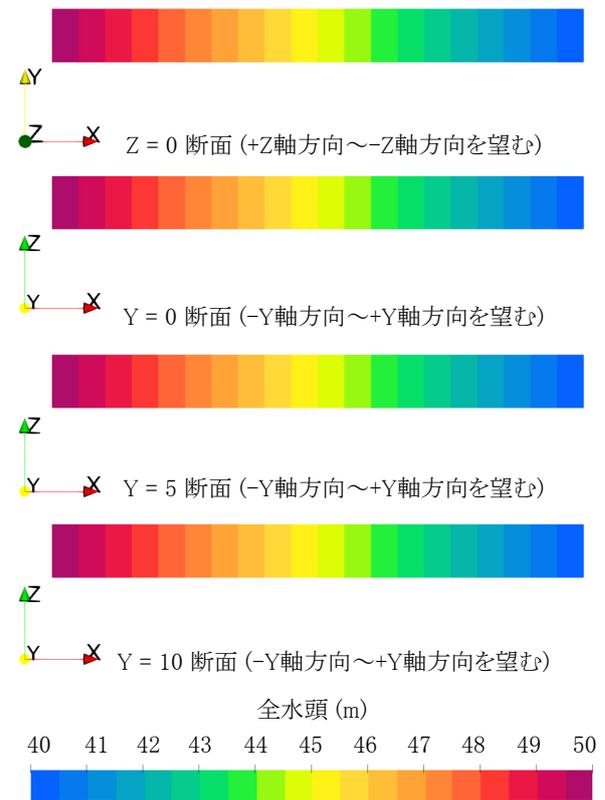


図-7 全水頭分布 (ConnectFlow)

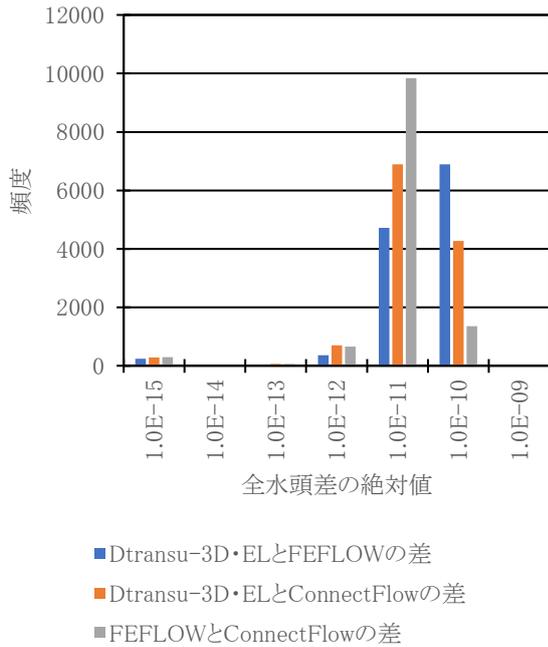


図-8 地下水解析コード間の全水頭差の絶対値の頻度分布

た水位固定境界の全水頭値 50 m, および + 方向側面に設定した全水頭値 40 m と整合する。また, 全水頭分布は, 3 つの解析コード間で有意な違いは認められない。したがって, 定常場の飽和条件で地下水浸透流解析を行った場合, 計算結果の節点全水頭について, Dtransu-3D・EL, FEFLOW および ConnectFlow のどれを利用しても同じ全水頭分布が得られることを確認できた。

(2) 全水頭差の比較

図-8 には, 全水頭差の絶対値に関する頻度分布を示す。全水頭差の絶対値は, 図-8 に示すように, Dtransu-3D・EL と FEFLOW, Dtransu-3D・EL と ConnectFlow, および FEFLOW と ConnectFlow の全ての関係において, 1×10^{-10} m 以下となり, 一般的な地盤を対象とした地下水流動解析における節点全水頭の要求精度は, 厳しく見込んでも 0.001 m 程度であり, それに比べて, 解析コード間の差は 7 桁も小さいことから, 実用上, 問題にならないレベルの差と考える。

5. おわりに

本報告では, 今後活用していく地下水流動解析コードについて, 簡単な直方体モデルを題材に, 定常場の飽和地下水浸透流解析を実施し, 計算結果の節点全水頭について, 解析コード間の比較検討を行った。その結果, 解析コード間で節点全水頭の差は実用上問題ないレベルであることを確認した。ただし, 本報告の解析条件は, 解析領域内を地下水が一方向に一様な速さで流れる状態を

想定した非常に単純な条件であったことから, 解析コード間で解析結果の全水頭に差がみられなかったと考える。解析領域内に地下水の流れを妨げるものを設置した場合などの解析領域内で地下水の流向が変化する条件では, 解析コード間における解析結果の全水頭の差が, 本報告の場合よりも大きくなることもあると考える。

今後は, 本報告で実施した定常場の飽和浸透流解析について, 解析領域内で地下水の流向が変化する条件での同様な検討を行い, 解析結果の全水頭差に有意な差がみられる場合は要素サイズの影響についても検討していきたい。また, 定常場の飽和浸透流解析だけでなく, 非定常場や飽和不飽和解析, 物質移行解析について, 本報告で題材にした直方体モデルによる検討や解析領域内で地下水の流向が変化する条件での検討もしていきたい。

参 考 文 献

- 1) Dtransu-3d・EL ver2.2b ダウンロードファイル ; 6. Dtransu3 次元版 マニュアル (Ver2.2b).pdf, http://www.diaconsult.co.jp/ei_hinmoku/ei_kaiseki/k_iryu/k_iryu03/, (2023.9.22 参照).
- 2) FEFLOW ホームページ ; <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow>, (2023.9.22 参照).
- 3) ConnectFlow ホームページ ; <https://www.connectflow.com/>, (2023.9.22 参照).
- 4) Dtransu-3d・EL ver2.2b ダウンロードファイル ; Dtransu-3D・EL 検証報告書.pdf, http://www.diaconsult.co.jp/ei_hinmoku/ei_kaiseki/k_iryu/k_iryu03/, (2023.9.22 参照).
- 5) Hans-Jörg Diersch; FEFLOW - Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media, Springer, 2014.
- 6) ConnectFlow ホームページ ; ConnectFlow Verification Document Version 12.4, 2022.7.29, https://www.connectflow.com/resources/docs/conflow_verification.pdf, (2023.9.22 参照).
- 7) ParaView ホームページ ; <https://www.paraview.org/>, (2023.9.22 参照).
- 8) Dtransu-3d・EL ver2.2b ダウンロードファイル ; Dtransu3 次元版 ポストファイル内容.pdf, http://www.diaconsult.co.jp/ei_hinmoku/ei_kaiseki/k_iryu/k_iryu03/, (2023.9.22 参照).
- 9) VTK ドキュメント ホームページ ; VTK フォーマット, https://docs.vtk.org/en/latest/design_documents/VTK-FileFormats.html, (2023.9.22 参照).
- 10) FEFLOW 8.0 インストール USB; file_formats.pdf.
- 11) ConnectFlow 12.4 ヘルプ ; User Guide.
- 12) ConnectFlow 12.4 ヘルプ ; Command Reference.

Comparative study of groundwater flow analysis codes using simple model
- Comparison of Dtransu3D, FEFLOW, and ConnectFlow -

Satoru HIRAI

Regarding the three-dimensional groundwater flow analysis codes (Dtransu-3D·EL, FEFLOW, ConnectFlow) that will be used in the future, in order to confirm the consistency of the groundwater flow analysis code, we conducted groundwater seepage flow analysis using a simple model and compared the calculation results. The calculations were performed under the condition that groundwater flows in one direction at a uniform velocity. As a result of comparing the nodal total hydraulic head, which is a common output result for each groundwater flow analysis code, it was confirmed that there was no significant difference at all nodes. The results of this report will serve as a reference when using these groundwater flow analysis codes and checking the validity using other codes.