

3次元浸透流解析による地下水排水影響の
予測手法の高度化に関する研究

2023年2月

群馬大学大学院理工学府（博士後期課程）

理工学専攻環境創生理工学領域（主指導教員 若井明彦）

細野 賢一

目次

1. 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	3
1.3 従来の研究	5
1.3.1 地すべり地の排水ボーリング	5
1.3.2 トンネルの湧水量予測	6
1.4 本論文の構成	8
2. 仮想ドレーンモデルの基礎理論	10
2.1 浸透流解析の支配方程式	10
2.2 浸透流解析の有限要素法による定式化	13
2.2.1 重み付き残差法	13
2.2.2 要素分割と内挿関数	15
2.2.3 ガラーキン法による定式化	16
2.2.4 非定常解析における時間項の取り扱いと収束計算	21
2.3 仮想ドレーンモデルの支配方程式	23
2.3.1 仮想ドレーンモデルの基礎理論式	23
2.3.2 有限要素解析への組み込み	25
2.4 仮想ドレーンモデルの特徴	29
3. 仮想ドレーンモデルの精度検証	32
3.1 地すべり地における排水ボーリングを対象とした場合	32
3.1.1 検証モデルおよび計算条件	32
3.1.2 検証結果	36
3.2 トンネル掘削を対象とした場合	42
3.2.1 ケース設定	42
3.2.2 均質地盤モデル	43
(1) 解析モデルと境界条件	43
(2) 湧水量の比較	46
(3) 水位分布の比較	49
(4) 計算時間の比較	50
3.2.3 不均質地盤	51
(1) 解析モデル	51
(2) 湧水量と計算時間の比較	54
4. 仮想ドレーンモデルの実用性に関する検討	58
4.1 譲原地すべり（国土交通省直轄地すべり）	58

4.1.1 譲原地すべりの概要.....	58
4.1.2 譲原地すべりの地質.....	59
4.1.3 検討の流れ.....	62
4.1.4 解析モデルの構築.....	64
(1) 解析範囲の選定および3次元地質構造モデルの構築.....	64
(2) 有限要素モデルと境界条件.....	67
4.1.5 水位再現結果.....	69
4.1.6 排水ボーリングからの排水量.....	76
4.1.7 抑制工効果の可視化.....	78
4.1.8 本節のまとめ.....	81
4.2 九州新幹線木場トンネル.....	83
4.2.1 木場トンネルの概要と解析対象範囲.....	83
4.2.2 木場トンネル周辺の地質情報.....	84
4.2.3 解析モデルの構築.....	88
(1) 解析領域の選定.....	88
(2) 解析メッシュの構築.....	89
4.2.4 掘削前の自然状態に対する地下水再現解析.....	90
4.2.5 坑内湧水量の予測.....	93
4.2.6 水位低下影響.....	96
4.2.7 本節のまとめ.....	102
5. 結論.....	104
(1) 簡易モデルを用いた検証.....	104
(2) 実現場を対象とした実用性評価.....	105
(3) 今後の技術展望.....	106

謝辞

参考文献

表 目 次

表 3.1	検証解析の条件.....	36
表 3.2	通常法と仮想ドレーンモデルの累積排水量の比較.....	41
表 3.3	仮想ドレーンモデルの検証解析の諸元.....	42
表 3.4	横坑モデルの掘削完了時の総湧水量 ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$)	48
表 3.5	横坑モデルの要素サイズ 5m モデルの総湧水量に対する比	48
表 3.6	立坑モデルの掘削完了時の総湧水量 ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$)	48
表 3.7	立坑モデルの要素サイズ 5m モデルの総湧水量に対する比	48
表 3.8	計算時間 (横坑モデル)	50
表 3.9	計算時間 (立坑モデル)	50
表 3.10	不均質モデルの掘削完了時の湧水総量 ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$)	54
表 3.11	不均質モデルの計算時間 (分) の比較.....	54
表 4.1	日本内地河川の流出係数.....	68
表 4.2	解析に適用した透水係数.....	69
表 4.3	広域地質図とトンネル縦断図の呼称対応.....	86
表 4.4	木場トンネル建設工事時に調査された原位置透水試験結果.....	91
表 4.5	最適値として同定した各地層の透水係数.....	92

図 目 次

図 1.1	全国の 1 時間降水量 80mm 以上の年間発生回数の経年変化 ¹⁾	1
図 1.2	土砂災害発生件数の推移 (昭和 57 年～令和 3 年) ²⁾	2
図 1.3	トンネル断面を忠実にモデル化した場合の一例.....	3
図 1.4	地すべり地における抑制工の配置例.....	4
図 1.5	従来の排水ボーリングのモデル化方法の例.....	5
図 1.6	トンネル交差要素に対する条件設定の例.....	7
図 1.7	本論文の構成.....	9
図 2.1	微小立方体における水収支.....	10
図 2.2	線状排水構造物近傍の地下水流れの近似.....	23
図 2.3	要素内の仮想的な線状排水構造物と節点との距離.....	25
図 2.4	通常法における掘削条件の設定方法.....	29
図 2.5	通常法における掘削ステップに対応した掘削条件の設定方法.....	29
図 2.6	仮想ドレーンモデルの掘削条件の設定方法.....	30

図 2.7	仮想ドレーンモデルの入力データ例.....	30
図 3.1	地すべり地検証モデル_全体図（通常法）	33
図 3.2	モデル内部から見た集水井工部のモデル化状況（通常法）	33
図 3.3	立坑壁面から見た 13 本の排水ポーリングのモデル化状況（通常法）	34
図 3.4	地すべり地検証モデル_全体図（仮想ドレーンモデル）	34
図 3.5	モデル内部から見た集水井工部のモデル化状況（仮想ドレーンモデル） ...	35
図 3.6	検証解析の境界条件概念図（地すべり地モデル）	35
図 3.7	検討に用いた不飽和浸透特性.....	36
図 3.8	365 日後における地下水標高分布.....	38
図 3.9	通常法と仮想ドレーンモデルのモデル中央断面における水位分布の比較...39	39
図 3.10	通常法と仮想ドレーンモデルの水位差分コンター（365 日後）	40
図 3.11	通常法と仮想ドレーンモデルの累積排水量変化の比較.....	40
図 3.12	通常法の検討に用いた掘進方向の辺長 5m の有限要素メッシュ（横坑）	43
図 3.13	通常法の検討に用いた掘進方向の辺長 5m の有限要素メッシュ（立坑）	43
図 3.14	仮想ドレーンモデルの検討に用いた有限要素メッシュ（横坑）	44
図 3.15	仮想ドレーンモデルの検討に用いた有限要素メッシュ（立坑）	45
図 3.16	累積湧水量の経時変化（横坑）	47
図 3.17	累積湧水量の経時変化（立坑）	47
図 3.18	掘削完了時の掘削開始面における圧力水頭分布.....	49
図 3.19	通常法と仮想ドレーンモデルの切羽面要素の地質反映の一例	51
図 3.20	不均質モデル（水平_互層構造）	52
図 3.21	不均質モデル（水平_3層構造）	52
図 3.22	不均質モデル（鉛直_互層構造）	53
図 3.23	不均質モデル（鉛直_3層構造）	53
図 3.24	不均質モデルと仮想ドレーンモデルの坑内湧水量変化の比較（水平互層）	55
図 3.25	不均質モデルと仮想ドレーンモデルの坑内湧水量変化の比較（水平 3 層）	55
図 3.26	不均質モデルと仮想ドレーンモデルの坑内湧水量変化の比較（水平互層）	56
図 3.27	不均質モデルと仮想ドレーンモデルの坑内湧水量変化の比較（水平 3 層）	56
図 4.1	譲原地すべりの平面図.....	58
図 4.2	譲原地すべりの位置.....	59
図 4.3	譲原地すべり周辺の広域地質図 ³⁸⁾	60
図 4.4	地質想定断面の平面位置図.....	60
図 4.5	地質想定断面.....	61

図 4.6	期間ごとの抑制工の増設.....	63
図 4.7	観測データの一部 (BV-1)	63
図 4.8	地形図と解析領域.....	64
図 4.9	推定された3次元地質構造モデル.....	65
図 4.10	地質測線断面における地質構造 (切断面表示)	66
図 4.11	3次元有限要素メッシュ.....	67
図 4.12	降雨量の現地観測データ.....	68
図 4.13	結晶片岩類の透水係数データ.....	69
図 4.14	平均化した観測水位と解析結果の比較.....	70
図 4.15	比較対象とした観測孔位置図.....	71
図 4.16	各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (4BV-3)	73
図 4.17	各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (BV-3)	73
図 4.18	各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (BV-8)	73
図 4.19	各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (BV-1)	74
図 4.20	各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (4BV-1)	74
図 4.21	各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (5BV-5)	74
図 4.22	各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (12BV-27)	75
図 4.23	各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (28H-3)	75
図 4.24	各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (26H-4)	75
図 4.25	各抑制工からの実測の平均排水量と解析結果の比較.....	76
図 4.26	排水量の集積範囲の指定.....	77
図 4.27	集積範囲ごとの実測の平均排水量と解析結果の比較.....	77
図 4.28	期間①に対する各期間の地下水位の低下量.....	79
図 4.29	前期間に対する各期間の地下水位の低下量.....	80
図 4.30	九州新幹線路線図 ⁴⁶⁾	83
図 4.31	木場トンネル建設位置図.....	84
図 4.32	解析領域周辺の広域地質図および地質縦断面図.....	85
図 4.33	トンネル地質縦断面図.....	85
図 4.34	地質構造の優先度による切り合いのイメージ.....	86
図 4.35	木場トンネル周辺を対象とした3次元地質構造モデル.....	87
図 4.36	地質断面図の表示測線.....	87
図 4.37	1-1'断面の地質断面図.....	88
図 4.38	2-2'断面の地質縦断面図.....	88
図 4.39	木場トンネル掘削影響解析の対象範囲.....	88
図 4.40	木場トンネル周辺の3次元地質構造モデルを反映した有限要素メッシュ.....	89
図 4.41	構築した有限要素メッシュのサイズ.....	89
図 4.42	木場トンネル掘削解析の境界条件位置図.....	90

図 4.4.3	凝灰角礫岩の透水係数入力値の影響.....	91
図 4.4.4	透水係数最適値による再現解析結果.....	92
図 4.4.5	解析に用いる雨量データ（大村雨量観測所）.....	93
図 4.4.6	トンネル坑内湧水量実測データ.....	93
図 4.4.7	トンネル計画ラインと海拔 0m ライン.....	94
図 4.4.8	木場トンネルの掘削形状.....	94
図 4.4.9	坑内湧水量の実測と解析結果の比較.....	95
図 4.5.0	掘進に伴う水位低下影響（1/5）.....	97
図 4.5.1	掘進に伴う水位低下影響（2/5）.....	98
図 4.5.2	掘進に伴う水位低下影響（3/5）.....	99
図 4.5.3	掘進に伴う水位低下影響（4/5）.....	100
図 4.5.4	掘進に伴う水位低下影響（5/5）.....	101

1. 序論

1.1 研究の背景

近年、大型台風の通過、線状降水帯の発生、突発的な集中豪雨等が頻出する傾向となっており、これまでの記録を大幅に上回る降水量が全国各地で観測されている。この影響により、地すべり等の斜面土砂災害の危険性が高まっている。

気象庁の統計データ¹⁾(図 1.1)によると、「猛烈な雨」と表現される1時間降水量80mm以上となる大雨の発生回数は、アメダスによる1,300地点の観測地において、1976年～2021年の間に10年間あたり2.6回増加したと示されている。また、1976～2021年の平均年間発生数の約20回であるのに対し、最近10年間(2012～2021年)の平均年間発生数は約24回であった。このような大雨の発生要因は、温室効果ガスの増加に伴う地球温暖化が関係していると考えられており、発生頻度は今後ますます増加すると推測される。

降水量の一部は地下に浸透し、地下水位の上昇を引き起こす。これは地盤の有効応力の減少などにより斜面の不安定化をもたらすと考えられる。斜面の不安定化には、盛土や自然斜面の崩壊、がけ崩れなどがあるが、周辺環境に大規模な影響を及ぼすものとして地すべりを挙げることができる。観測が実施されている地すべり地では、降雨に伴うすべり速度の増加が観測される例もあり、今後に予想される豪雨への対応のため合理的な対応を検討する必要がある。最も効果的な対策としては、地下水の上昇を抑制する地下水排除工があるが、建設費の増加も想定されることから、排除工の配置の最適化などが望まれる。

なお、国土交通省によると、1982年(昭和57年)～2021年(令和3年)に発生した各年の土砂災害の発生件数²⁾は、図 1.2に示すように、平均で1,100を上回る件数となる。

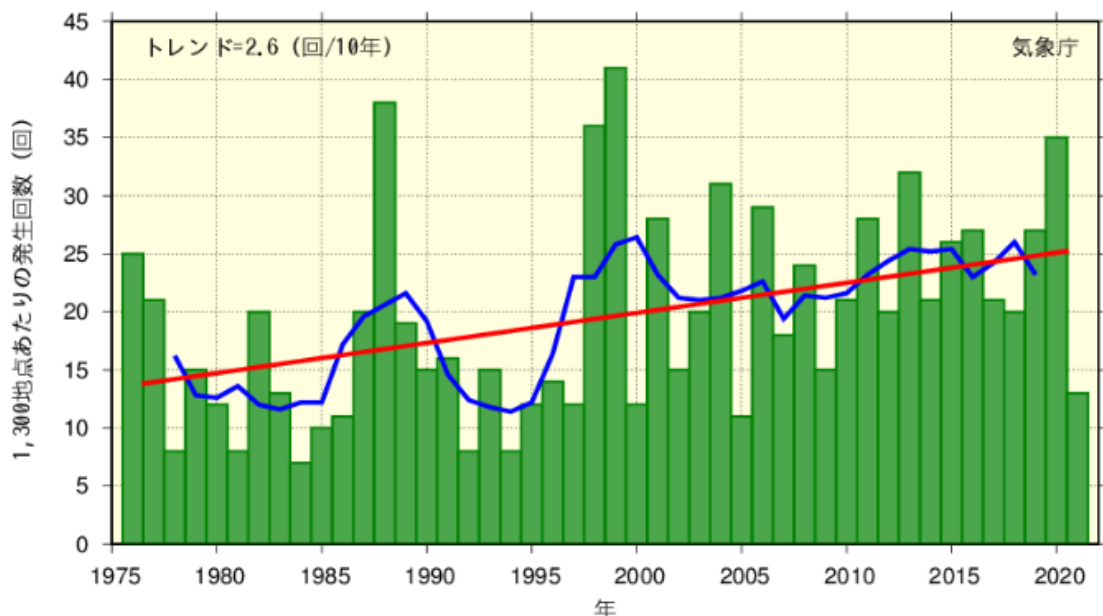


図 1.1 全国の1時間降水量80mm以上の年間発生回数の経年変化¹⁾

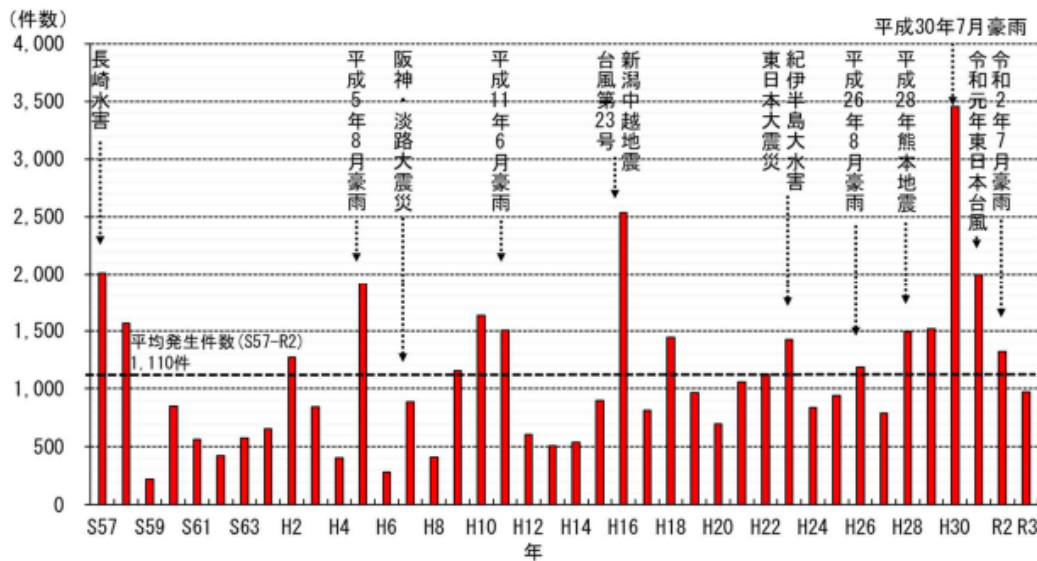


図 1.2 土砂災害発生件数の推移 (昭和57年～令和3年)²⁾

なお、2021年（令和3年）の土砂災害件数は平均を下回る972と報告されているが、この年の8月の発生件数は、直近10年（平成23年～令和2年）の平均発生件数177を大きく上回る448と報告されている。

地下水の存在が災害を引き起こすもう一つの場面として、トンネルなど地下構造物の建設を挙げることができる。大深度地下利用が積極的に検討されるようになり、様々な構造物が地下に建設されている。大深度とは地下40m以深を指すが、ライフラインや交通機関などの公共の利益となる施設の高寿命化が期待できることや、地上に比べて耐震性能が高いことなどがメリットである。これらのメリットを活かして、リニア中央新幹線の建設やニュートリノ観測の研究施設であるハイパーカミオカンデ、石油・天然ガスの地下備蓄基地など計画や建設が進められている。

地下空間を利用した建設工事においては、トンネルや立坑などの掘削作業が大きな水圧を持つ地下水面下で行われる。これが原因となって、切羽の崩落や多量の坑内湧水など、工事の安全性を脅かす事象が発生することがあり、細心の注意を払う必要がある。また、坑内湧水量の大きさによっては、地下水低下の影響が広範囲に及ぶ恐れもあり、影響範囲内となった井戸の枯渇、地盤沈下等、地下水保全に影響することが懸念される。したがって、施工中の計測データや観察記録などを注視した上で、発生湧水量や水位低下影響を速やかに予測し、対策工の必要性や規模などを判断する定を支援する技術が必要となる。

これまで述べた地すべりとトンネルに共通する課題は、対策を検討するために、降雨や掘削に伴う地下水位の変動をより正しく予測することである。これには、有限要素法による3次元浸透流解析が有効である。有限要素法では、構造物や地すべり面などの地質構造を反映したモデルを用いて地下水流れを予測することができる。また、地下水面の存在も飽和・不飽和浸透解析により表現することができる。最近では、コンピュータ技術の発展を背景に取り扱える節点数、要素数は拡大し、地質構造の3次元モデリング技術の進化と

相まって、より精密なモデルの作成が可能となっている。また、近年、様々な土木現場で導入が進められている BIM/CIM の観点からも、浸透流解析で用いられる 3 次元モデルが活用されることも期待される。

一方で、有限要素法による 3 次元浸透流解析は、解析メッシュの構築に係る労力や計算時間が影響し、迅速に予測結果が必要となる場面では採用が難しいのが現状である。このような課題を克服する方法として、解析領域に対し相対的に微小なサイズとなるトンネルやボーリングなどの線状排水構造物をメッシュ化せずに、メッシュ化した場合と同等の解析結果を得られる解析技術を構築することは前述の課題に対して有効であると考え、これが本研究に取り組む背景となった。

なお、本論文において線状排水構造物とは、地すべり地を対象とした場合は地すべり対策で建設される抑制工（横ボーリング工，集水井工，排水トンネル工）の本体および、地中に挿入される排水ボーリングを指し、地下構造物の場合では、横坑，立坑，斜坑といった地下水面下を掘削することによって、排水を誘発する構造物を指すものとする。

1.2 研究の目的

3 次元浸透流解析では、河川や稜線などの分水界（水理境界）に境界条件を定める必要性から、対象とする線状排水構造物を内包する数 km から数 10km 四方の広大な領域を解析対象範囲とすることも少なくない。これに加えて、解析対象範囲を包含する 3 次元地質構造モデルを作成し解析モデルに取り入れる場合には、メッシュ分割において高度な技術が求められる。さらに、このような地質構造を反映した解析メッシュに対し、線状排水構造物を組み入れた解析メッシュを構築することは多大な労力となることは容易に想像される。

例えば、トンネルの掘削断面は、直径が 10m 前後であるが、解析領域の規模に比べれば小さなものとなる。トンネルの削孔断面は、図 1.3 に示すように、三心円などで設計されることも多く、形状が単純ではない。このようなトンネル形状をその線形（計画路線）

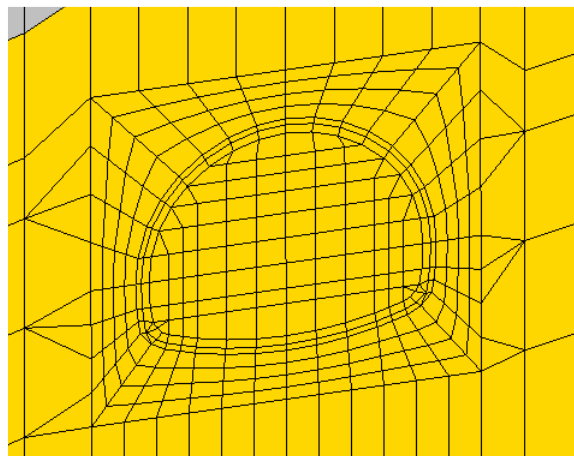


図 1.3 トンネル断面を忠実にモデル化した場合の一例

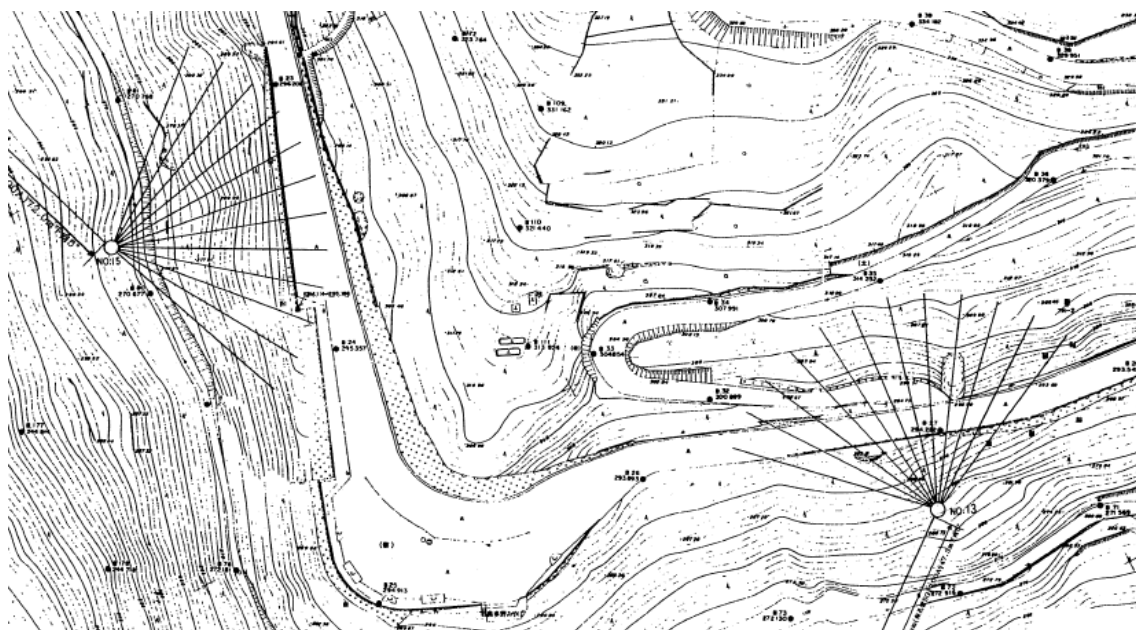


図 1.4 地すべり地における抑制工の配置例

にわたって解析メッシュで再現するためには、地質構造との交差を考慮することも含め、細かい要素分割が必要となる。

他方、排水ボーリングは、単純な円筒形であるが、直径が 10cm 程度であり、解析領域の規模に比べて極めて小さな構造となる。円筒形である排水ボーリングも、円形を損なわないようにメッシュ化する場合は、多角形となる必要があるため、節点数が増加する。

また、抑制工の排水ボーリングは、図 1.4 に示すような扇状でかつ、傾角をもって挿入される構造となることから、解析メッシュの構築難易度も高い。

このように、線状排水構造物を解析メッシュに反映する場合、線状排水構造物の近傍で細かな要素分割が必要となり、構築したモデルの節点総数が膨大となる。このような節点数の増加やモデル構築の労力増大は、一連の解析作業を長引かせ、速やかな技術的判断を阻害する要因となる。これが、3次元浸透流解析の持つ課題の 1 つである。

このような課題に対し、線状排水構造物をメッシュせずとも、その効果を表現できる新しい浸透流解析手法を考案した。この手法を「仮想ドレーンモデル^{3)~15)}」と呼ぶこととする。本研究では、この仮想ドレーンモデルの実現場への適用性を確認することを目的とする。

最初に、簡易モデルを用い、線状排水構造物を忠実にモデル化する従来の浸透流解析で求めた解析結果と、仮想ドレーンモデルを用いた解析結果を比較して本手法の妥当性を確認する。次に、地すべり地、トンネル工事それぞれの実現場を対象として、実際の地質構造をモデル化したうえで線状排水構造物をメッシュ化しない解析モデルを構築し、仮想ドレーンモデルによる解析を実施する。求めた解析結果と実測値を比較し、現場での実用性を考察する。

1.3 従来の研究

1.3.1 地すべり地の排水ボーリング

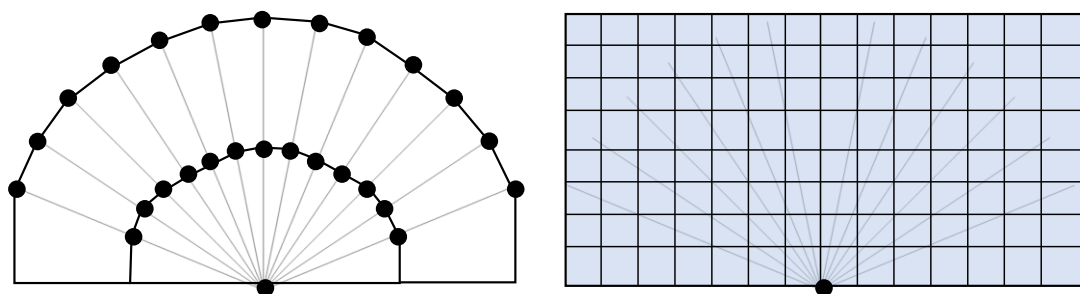
地すべり地の抑制工の効果確認を目的とした3次元浸透流解析では、従前より排水ボーリングの形状は忠実にはメッシュ化しない方法が検討されてきた。図 1.5 に示すように、排水ボーリングの位置に該当する節点に対して、大気開放状態となる圧力水頭 0m の固定条件もしくは、既知流量条件を設定する方法^{16)~18)}や、抑制工が配置される範囲一帯の要素の透水係数を大きな値に変更することで排水効果を再現する方法^{19)~21)}が報告されている。

これらの方法では、水抜き効果については表現が可能であるものの、実際の排水ボーリングの径や規模を適切にモデル化することは難しい。また、範囲一帯の透水係数の決定方法は確立されていない。

これに対し、Lin ら²²⁾は、抑制工を線形排水と称した大気開放条件となる1次元線形要素でモデル化し、地盤モデルのメッシュと結合させる方法で3次元浸透流解析を実施している。また、西田ら¹⁰⁾は、排水ボーリングをLEモデル(Linear Element Model)と呼ぶ、透水性を有する1次元有限要素で表現した3次元浸透流解析手法を提案している。これらの手法では、排水ボーリング1本ごとを配置計画に対応させて解析モデルに反映し、排水ボーリングの径も考慮した解析が可能であるが、線形部材要素に設定する透水係数の適切な決定方法や、密集した排水ボーリングのモデル化が課題となる。

従来の方法においては、解析モデルを構築する際に、排水ボーリングの近傍、もしくは配置位置に対して節点や要素を割り当て、その該当節点または要素に排水ボーリングの効果を表示する方法が採られている。すなわち、何らかの形で抑制工の配置を考慮したモデリングが必要である。したがって、抑制工の配置が確定している場合においては、モデルを構築して解析を実施できるが、配置の最適化のために試行錯誤を行う場合には、その都度モデルの再構築が必要になる。

一方、仮想ドレーンモデルは地下水排除工をモデル化する必要がないため、排水ボーリ



a) 該当節点に対する水頭指定する場合 b) 範囲一帯の透水係数を調整する場合

図 1.5 従来の排水ボーリングのモデル化方法の例

ングの配置にとらわれることなく、自在に排水ボーリングの位置を考慮した上で浸透流解析を実行できる点で新しい解析手法と位置づけられる。

1.3.2 トンネルの湧水量予測

坑内湧水量の予測は、従前より理論式などを用いる簡易的な手法が用いられてきた。例えば、地形やトンネルルートおよび湧水比流量から、恒常的な湧水量および影響範囲を推測する高橋の方法²³⁾や、水理公式を利用する方法²⁴⁾、実際のトンネル湧水量データに整合する透水係数を同定して予測を行う SWING 法²⁵⁾がその代表的な手法である。

高橋の方法は、トンネルが通過する山体の沢へ集水される水量がトンネルに引き込まれることを前提とするため、地形情報のみで湧水量が算出でき、恒常的な湧水量を速やかに把握する目的において有効な手法である。近年では、GIS を組み合わせ、より効率的に湧水量予測を行う手法も提案されている²⁶⁾。

水理公式を利用する方法は、立坑掘削の揚水量予測などに利用され、被圧帯水層や不圧帯水層に対応した式が導出されており、排水計画や水位管理等の設計業務に役立てられている。

SWING 法は Dupuit の準一様流仮定²⁷⁾を利用し、任意の区間長の湧水量を求める方法を用いており、トンネル軸方向をスライス分割してトンネル全体の評価を行うことができる。また、実現場に適用された実績²⁸⁾があり、簡易湧水予測手法としての有効性が示されている。

これらのような簡易的な手法は、表計算ソフトなどを用いて湧水予測値を速やかに算出できることから、設計や現場施工の場面で有益な情報をもたらすと考えられるが、地山の複雑な水理地層構造を一つの代表的な透水係数で表現するため、3次元的な地下水の動きを推測することや、湧水対策の効果予測を行うことは難しい。

これらに対し、有限要素法などによる3次元浸透流解析では、地形や水理地質構造、トンネルなどを解析モデルに組み込むことで、より現実に即した予測量などを得ることができる²⁹⁾。この反面、解析に多大な労力や時間を要する課題がある。これを克服するためにトンネルや井戸等の線状排水構造物をメッシュ化しない手法が検討されてきた。

Peaceman^{30)~32)}は、井戸を一連の節点でモデル化したうえで、井戸の揚水量に対して井戸節点を含む要素サイズをもとに、井戸係数と呼ばれる補正係数を乗ずることで、解析メッシュの粗さを打消す方法を提案している。登坂ら³³⁾はこの考えを利用した浸透流解析を報告している。また、山田ら³⁴⁾は井戸節点を含む要素の透水性に着目し、解析メッシュの大きさに応じて該当要素の透水性を周囲との比で調整し、解析精度を保った上で解析メッシュ数の低減を実現させる方法を検討している。つまり、これらの方法は、揚水井戸の近傍で起きる大きな水位変化に対して、メッシュを細分化することなく解析精度を保つ取組みである。

一方、Svenson and Follin³⁵⁾は、正方格子で構築した3次元有限要素モデルを用い、図 1.6 に示すように、水平坑道の掘削形状と交差する要素を削除し、形成された境界面（坑道

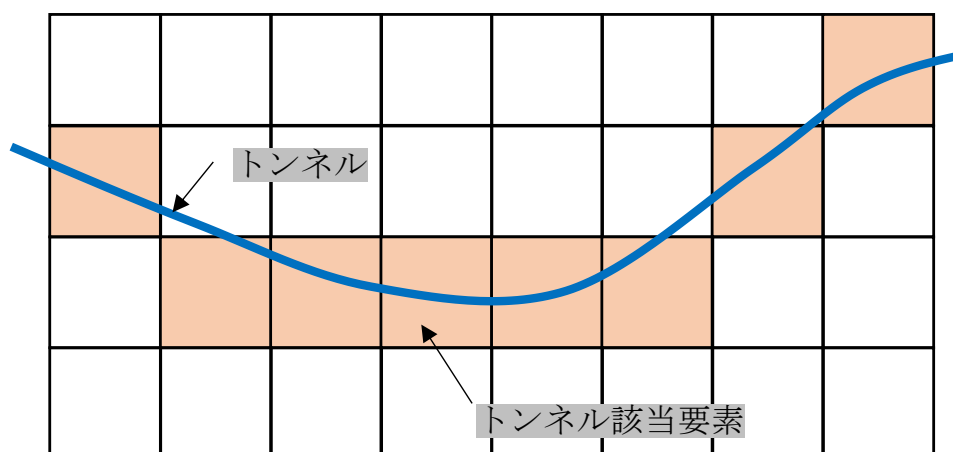


図 1.6 トンネル交差要素に対する条件設定の例

内空面)を大気開放条件(浸出面境界)として坑内湧水量を求めており、この解析結果と Theim の式²⁾より求まる湧水量の理論解との比較を行っている。この検討の結論として、格子サイズよりも掘削断面が小さい条件下では、正方格子で構築した解析モデルでも、結果は理論式より求まる湧水量を近似できるとしている。したがって、この方法は本来の掘削形状をモデル化せずに、掘削範囲の近傍節点を利用して境界条件に割り当てることで代用し、解析モデルを簡略化する取組みである。

本研究に用いる仮想ドレーンモデルは、トンネルなどの線状排水構造物をメッシュ化せずに、これを内包する要素の構成節点を利用して線状排水構造物が存在する場合と同様な地下水流れを発生させる点で、Svenson and Follin のアプローチに類似した考え方である。ただし、要素の物性や境界条件を一切変更しないことや、線状排水構造物近傍での地下水流れを理論式で表現するなど、線状排水構造物をメッシュ化した場合に近い解が得られるように工夫をしており、新しい手法として位置づけられる。

1.4 本論文の構成

本論文は前述した背景や目的に対し、以下のように構成する。

- 第1章 序論
本研究の背景や、地すべり地ならびにトンネルの施工をモデル化する際の3次元浸透流解析のもつ課題を挙げ、それに対する既往の研究成果を整理し、本研究の提案手法である「仮想ドレーンモデル」の新規性を論じる。
- 第2章 仮想ドレーンモデルの基礎理論
仮想ドレーンモデルの基礎理論として、浸透流解析の支配方程式および仮想ドレーンモデルの誘導、有限要素方程式としての定式化について論じる。
- 第3章 仮想ドレーンモデルの精度検証
仮想ドレーンモデルの妥当性を評価するため、簡易なモデルを用い、線状排水構造物をモデル化して実施した解析結果と、仮想ドレーンモデルの解析結果を比較する。
- 第4章 仮想ドレーンモデルの実用性に関する検討
実現場を対象とした3次元浸透流解析を実施し、仮想ドレーンモデルの対策効果や湧水量の予測手法としての適用性を評価する。地すべり地としては譲原地すべりを、トンネルとしては木場トンネルを対象とし、建設履歴などをもとに解析モデルを構築する。地すべり地における抑制工による対策や、トンネル掘削が開始される前の観測地下水位をターゲットとして、透水係数などの入力パラメータを精査する再現解析を実施する。パラメータの最適化を図った上で、仮想ドレーンモデルを用いて線状排水構造物を考慮した浸透流解析を実施する。得られた解析結果と観測データを比較して、その整合性から仮想ドレーンモデルの実用性について論じる。
- 第5章 結論
本研究の成果を総括する。

図 1.7 に本論文の構成フローを示す。

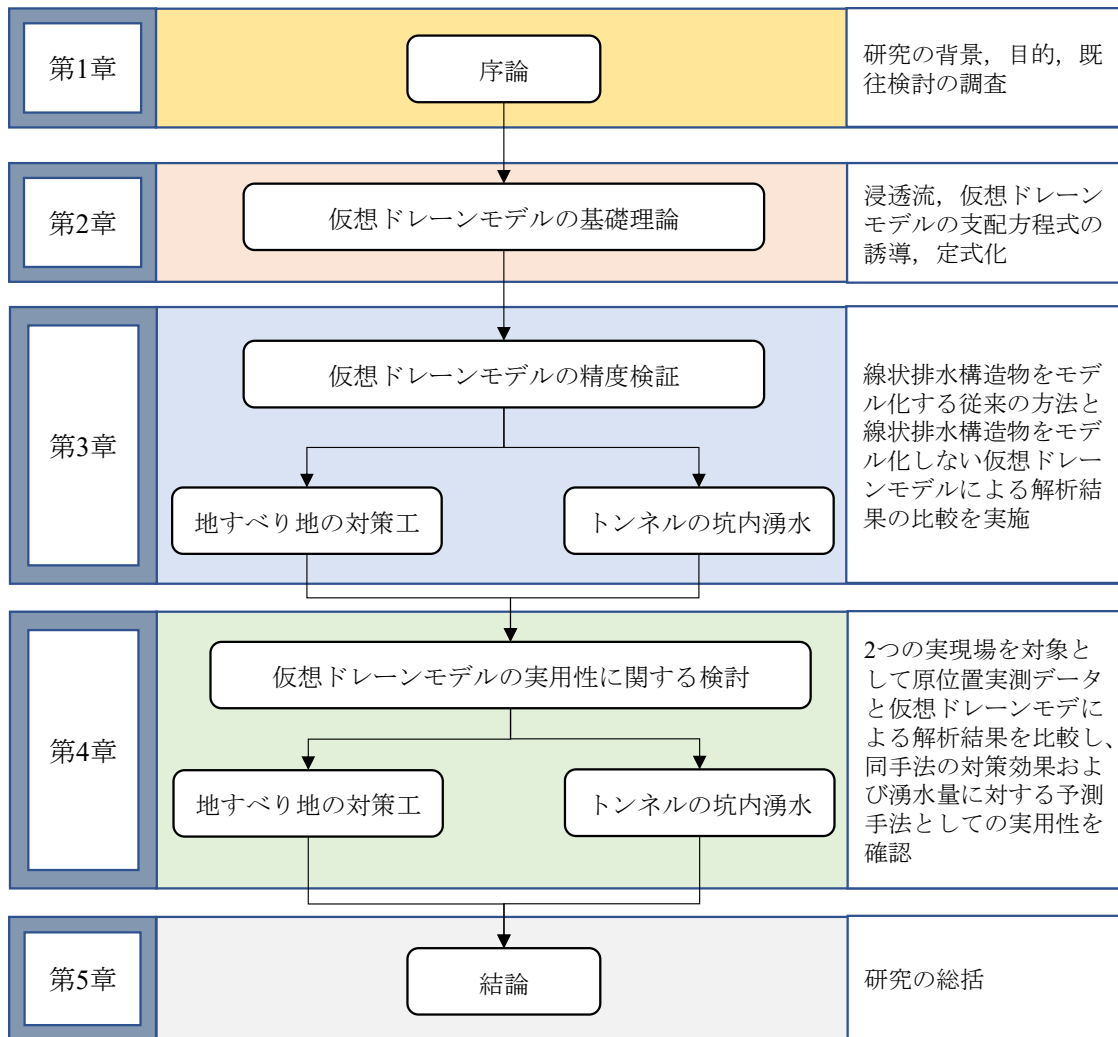


図 1.7 本論文の構成

2. 仮想ドレーンモデルの基礎理論

2.1 浸透流解析の支配方程式

ある微小立方体に対し，単位時間に立方体表面の地下水通過量の収支は，図 2.1 のように考えられ，地下水浸透における支配方程式は，次のとおりとなる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\theta) = -\left(\frac{\partial\rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial\rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial\rho v_z}{\partial z}\right) \quad (1)$$

ここに， ρ は水の密度， θ は体積含水率， v は流速をそれぞれ表す。

上式の右辺は，単位時間に単位体積中を出入りした水の質量の差（貯留量）を表し，左辺は，これが体積含水率の変化によって補われることを表している。この意味で，上式は連続の式と呼ばれる。

水の密度が時間や空間にかかわらず一定とすれば，次式が得られる。

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) \quad (2)$$

空隙率を n ，飽和度を S_w とすれば，左辺は，

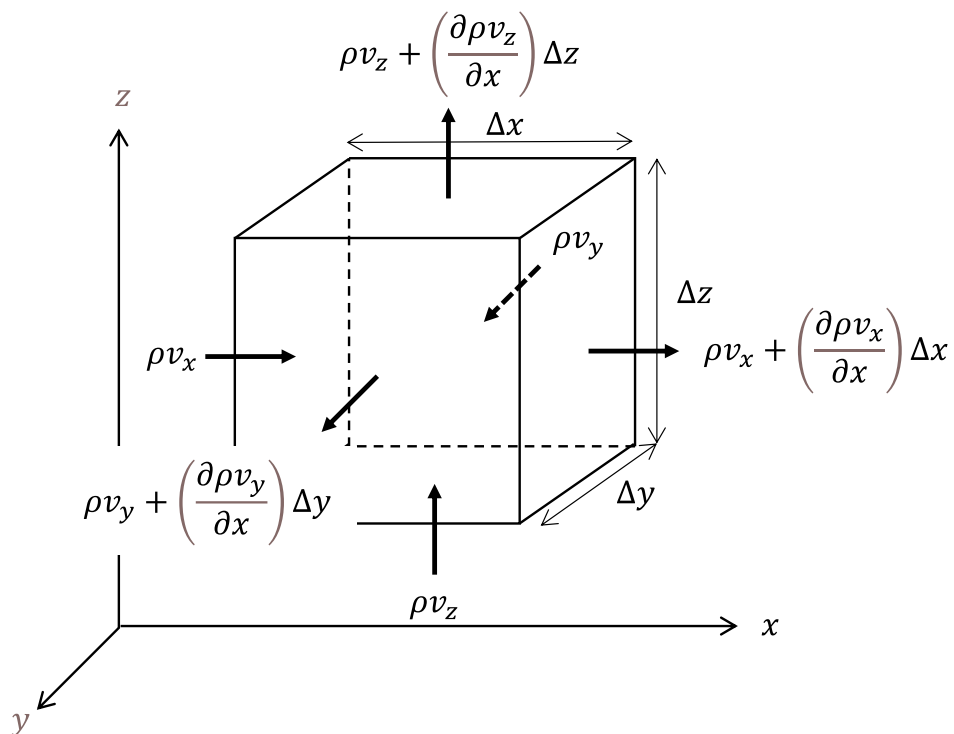


図 2.1 微小立方体における水収支

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (nS_w) \quad (3)$$

となるが，圧力水頭を ψ とし，これがただ一つの独立変数となるように変換する。

$$\frac{\partial}{\partial t} (nS_w) = \frac{d}{d\psi} (nS_w) \frac{\partial \psi}{\partial t} = n \frac{dS_w}{d\psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} + S_w \frac{dn}{d\psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (4)$$

これを次のように書き表す。

$$\frac{\partial}{\partial t} (nS_w) = (\beta S_s + C_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (5)$$

$$C_s = n \frac{dS_w}{d\psi} = \frac{d\theta}{d\psi} \quad (6)$$

$$S_s = \frac{dn}{d\psi} \quad (7)$$

C_s は比水分容量と呼ばれ，圧力水頭の増分に対する体積含水率の変化の割合を表す。また， S_s は比貯留係数と呼ばれる。不飽和領域では，圧力水頭が空隙率変化に影響を及ぼさず， S_s は 0 となる。このため，式(5)では S_s に β を乗じてこの特性を表現する。

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{： 不飽和領域} \\ 1 & \text{： 飽和領域} \end{cases}$$

一方，右辺の流速はダルシー則に従うものとする。

$$v_x = - \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} + K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (8)$$

$$v_y = - \left(K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} + K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (8)$$

$$v_z = - \left(K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} + K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (8)$$

ここに， K は透水係数テンソル， h は全水頭であり，以下のように示される。

$$h = \psi + z \quad (9)$$

また，流速は次式で表される。

$$v_x = - \left(K_{xx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_{xz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) \quad (11)$$

$$v_y = - \left(K_{yx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_{yz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) \quad (12)$$

$$v_z = - \left(K_{zx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_{zy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_{zz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) \quad (13)$$

さらに，透水係数テンソル K を，飽和透水係数テンソル K と比透水係数 k_r ($0 \leq k_r \leq 1$)の積で表すこととする。

$$v_x = - \left(K_r K_{xx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) \quad (14)$$

$$v_y = - \left(K_r K_{yx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_r K_{yy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_r K_{yz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) \quad (15)$$

$$v_z = - \left(K_r K_{zx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_r K_{zy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_r K_{zz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) \quad (16)$$

以上より，地下水浸透における連続の式は次式となる。

$$\begin{aligned} (\beta S_s + C_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_r K_{yx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_r K_{yy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_r K_{yz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_r K_{zx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_r K_{zy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_r K_{zz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

これに，単位時間・単位体積あたりの吸水（湧水）量 q を考慮して，飽和・不飽和領域における浸透方程式が得られる。

$$\begin{aligned} (\beta S_s + C_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_r K_{yx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_r K_{yy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_r K_{yz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_r K_{zx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_r K_{zy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_r K_{zz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] + q \end{aligned} \quad (18)$$

2.2 浸透流解析の有限要素法による定式化

2.2.1 重み付き残差法

飽和・不飽和浸透流の支配方程式を，ある解析領域 V において有限要素法で解くことを考える。支配方程式は次式のように表せる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_r K_{yx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_r K_{yy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_r K_{yz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_r K_{zx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_r K_{zy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_r K_{zz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] + q - (\beta S_s + C_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} = 0 \quad (19)$$

$$h(x, y, z, t) = \psi(x, y, z, t) + z \quad (20)$$

この式を，解析領域 V で以下に示す条件下で解くことを考える。

(1) 初期条件

非定常問題を解くにあたり，計算開始段階での水頭分布を設定する必要がある。

$$h(x, y, z, 0) = H_0(x, y, z) \quad (21)$$

ここで， H_0 は既知水頭の位置に対する関数である。圧力水頭についても同様の条件が設定できる。

$$\psi(x, y, z, 0) = \Psi_0(x, y, z) \quad (22)$$

ここで， Ψ_0 は既知圧力水頭の位置に対する関数である。

(2) 既知水頭境界

浸透流解析において水頭値は変量として扱われるが，河川など水面と接している個所においては変量としては扱わず，指定された経過時間と対応した既知量を強制的に水頭値として指定する。

$$h(x, y, z, t) = H_b(x, y, z, t) \quad (23)$$

ここで， H_b は既知水頭の位置と時間に対する関数であり，既知水頭を設定する地点は任意ではなく，その位置 (z) が明確であるから圧力水頭に対しても同様の条件が設定できる。

$$\psi(x, y, z, t) = \Psi_b(x, y, z, t) \quad (24)$$

ここで、 Ψ_b は既知圧力水頭の位置と時間に対する関数である。

(3) 既知流量境界

降雨や揚水井戸のように流量値を境界条件とするもので、境界面を通過する流量で規定される。

$$U(x, y, z, t) = V_x n_x + V_y n_y + V_z n_z \quad (25)$$

$$V_x = -K_r \left[K_{xx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_{xz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (26)$$

$$V_y = -K_r \left[K_{yx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_{yz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (27)$$

$$V_z = -K_r \left[K_{zx} \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_{zy} \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_{zz} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (28)$$

ここで、 U は境界面を通過する既知ダルシー流速、 n_i は境界面の法線ベクトル成分である。

解析領域 V 内においては、圧力水頭 $\psi(x, y, z, t)$ を n 個の既知の関数列 $a_m, m = 1, \dots, n$ を用いて次のように近似する。

$$\psi(x, y, z, t) \cong \hat{\psi}(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^n a_m(x, y, z) \psi_m(t) \quad (29)$$

$\hat{\psi}$ を試行関数(trial function)と呼び、 ψ_m は未知量となる圧力水頭である。なお、既知関数列 a_m は、前述した境界条件をあらかじめ満足するものとする。

試行関数を支配方程式に代入すると、残差 R は次のように書ける。

$$\begin{aligned} R(a_m, x, y, z, t) = & \frac{\partial}{\partial x} \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_r K_{yx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{yy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{yz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_r K_{zx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{zy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{zz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] + q - (\beta S_s + C_s) \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial t} \end{aligned} \quad (30)$$

このとき、もし試行関数が支配方程式の厳密解であれば、残差 R は 0 となるはずである。しかし、厳密解と異なるときには残差は 0 とはならない。そこで、重み付き残差法では空間的に平均的な意味で残差が 0 になるように未知変数を決定する。すなわち、残差 R に何らかの重み関数 $W_l, l = 1, \dots, n$ を乗じて領域に関して積分してそれを 0 とおく。これを式で表すと次のようになる。

$$\int_V W_l R dV = 0, \quad l = 1, \dots, n \quad (31)$$

重み関数 W_l として n 個の異なる関数を用いれば、上式は n 個の未知変数 ψ_m を含む n 個の連立方程式となる。

2.2.2 要素分割と内挿関数

原理的には、試行関数を適当に定義して、重み付き残差法を適用することに解くことができる。しかし、一般の問題においては、解析領域全体を良好に近似できる試行関数を適当な多項式で設定することは難しい。そこで解析領域を有限サイズの要素と呼ばれる小領域に分割して各領域内で適当な試行関数を定義することを考える。

要素は多面体（多角形）からなり、多面体を構成する頂点を節点と呼ぶ。未知変数である水頭値はこの節点でもつことになる。

任意座標 (x, y, z) における試行関数の内挿は次のように表せる。

$$\hat{\psi}(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^n N_m(x, y, z) \psi_m(t) \quad (32)$$

ここで、 ψ_m は頂点（節点）上の圧力水頭、 N_m は節点に対応した要素内の内挿関数、 $\hat{\psi}$ は内挿された近似圧力水頭（試行関数）である。

なお、内挿関数の性質として、任意点での総和は 1 である。

$$\sum_{m=1}^n N_m(x, y, z) = 1 \quad (33)$$

節点 i （座標 (x_i, y_i, z_i) ）上での内挿関数 N_i の値は 1 、それ以外の関数値は 0 である。

$$N_m(x_i, y_i, z_i) = \begin{cases} 1 & (m = i) \\ 0 & (m \neq i) \end{cases} \quad (34)$$

2.2.3 ガラーキン法による定式化

ここでは重み付き残差法として広く用いられるガラーキン法により定式化する。ガラーキン法では重み関数 W に内挿関数 N を適用する。なお、ここでは重み関数と内挿関数を区別するため W のまま式展開し、最後に N で整理する。

支配方程式の重み付き残差式は次のとおりである。

$$\int_V W \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_r K_{yx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{yy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{yz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_r K_{zx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{zy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{zz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \\ + q - (\beta S_s + C_s) \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial t} \end{array} \right\} dV = 0 \quad (35)$$

上昇では、近似された水頭値 $\hat{\psi}$ が代入されている。各項に重み関数 W を乗じ、それぞれ整理していく。

$$\int_V \left\{ \begin{array}{l} W \frac{\partial}{\partial x} \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \\ + W \frac{\partial}{\partial y} \left[K_r K_{yx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{yy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{yz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \\ + W \frac{\partial}{\partial x} \left[K_r K_{zx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{zy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{zz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \\ + Wq - W(\beta S_s + C_s) \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial t} \end{array} \right\} dV = 0 \quad (36)$$

高次微分項は、部分積分技法を用いて変形する。

$$\begin{aligned} & \int_V \left\{ W \frac{\partial}{\partial x} \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \right\} dV \\ &= \int_V \frac{\partial}{\partial x} \left\{ W \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \right\} dV \\ & - \int_V \left\{ \frac{\partial W}{\partial x} \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \right\} dV \end{aligned} \quad (37)$$

上式右辺第1項にガウスの積分定理を適用することで、次式が誘導できる。

$$\begin{aligned}
& \int_V \frac{\partial}{\partial x} \left\{ W \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \right\} dV \\
&= \int_R W \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] n_x dR \quad (38)
\end{aligned}$$

これより次式が得られる。

$$\begin{aligned}
& \int_V \left\{ W \frac{\partial}{\partial x} \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \right\} dV \\
&= \int_R W \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] n_x dR \\
&- \int_V \left\{ \frac{\partial W}{\partial x} \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \right\} dV \quad (39)
\end{aligned}$$

同様に、

$$\begin{aligned}
& \int_V \left\{ W \frac{\partial}{\partial y} \left[K_r K_{yx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{yy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{yz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \right\} dV \\
&= \int_R W \left[K_r K_{yx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{yy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{yz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] n_y dR \\
&- \int_V \left\{ \frac{\partial W}{\partial y} \left[K_r K_{yx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{yy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{yz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \right\} dV \quad (40)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \int_V \left\{ W \frac{\partial}{\partial x} \left[K_r K_{zx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{zy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{zz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \right\} dV \\
&= \int_R W \left[K_r K_{zx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{zy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{zz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] n_z dR \\
&- \int_V \left\{ \frac{\partial W}{\partial z} \left[K_r K_{zx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{zy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{zz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] \right\} dV \quad (41)
\end{aligned}$$

が得られる。ここで、 n_x, n_y, n_z は境界に垂直な法線の x, y, z 成分である。

これらをまとめると、次のようになる。

$$\begin{aligned}
& \int_V \left[\begin{aligned} & \frac{\partial W}{\partial x} \left(K_r K_{xx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} \right) + \frac{\partial W}{\partial x} \left(K_r K_{xy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} \right) + \frac{\partial W}{\partial x} \left(K_r K_{xz} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial W}{\partial y} \left(K_r K_{yx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} \right) + \frac{\partial W}{\partial y} \left(K_r K_{yy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} \right) + \frac{\partial W}{\partial y} \left(K_r K_{yz} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial W}{\partial z} \left(K_r K_{zx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} \right) + \frac{\partial W}{\partial z} \left(K_r K_{zy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} \right) + \frac{\partial W}{\partial z} \left(K_r K_{zz} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} \right) \end{aligned} \right] dV \\
& + \int_V \left[\frac{\partial W}{\partial x} (K_r K_{xz}) + \frac{\partial W}{\partial y} (K_r K_{yz}) + \frac{\partial W}{\partial z} (K_r K_{zz}) \right] dV \\
& - \int_R W \left\{ \begin{aligned} & \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] n_x \\ & + \left[K_r K_{yx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{yy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{yz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] n_y \\ & + \left[K_r K_{zx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{zy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{zz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] n_z \end{aligned} \right\} dR \\
& - \int_V W q dV + \int_V W (\beta S_s + C_s) \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial t} dV = 0 \tag{42}
\end{aligned}$$

左辺第三項の境界積分は、境界面を通過するダルシー流速の境界面上積分にほかならない。

$$\begin{aligned}
& - \int_R W \left\{ \begin{aligned} & \left[K_r K_{xx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{xy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{xz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] n_x \\ & + \left[K_r K_{yx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{yy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{yz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] n_y \\ & + \left[K_r K_{zx} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial x} + K_r K_{zy} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial y} + K_r K_{zz} \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} + 1 \right) \right] n_z \end{aligned} \right\} dR = \int_R W (V_x n_x + V_y n_y + V_z n_z) dR \tag{43}
\end{aligned}$$

次に、試行関数を内挿近似式で置換する。

$$\begin{aligned}
& \int_V \left[\begin{aligned} & \frac{\partial W}{\partial x} \left(K_r K_{xx} \frac{\partial N_m \psi_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial W}{\partial x} \left(K_r K_{xy} \frac{\partial N_m \psi_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial W}{\partial x} \left(K_r K_{xz} \frac{\partial N_m \psi_m}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial W}{\partial y} \left(K_r K_{yx} \frac{\partial N_m \psi_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial W}{\partial y} \left(K_r K_{yy} \frac{\partial N_m \psi_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial W}{\partial y} \left(K_r K_{yz} \frac{\partial N_m \psi_m}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial W}{\partial z} \left(K_r K_{zx} \frac{\partial N_m \psi_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial W}{\partial z} \left(K_r K_{zy} \frac{\partial N_m \psi_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial W}{\partial z} \left(K_r K_{zz} \frac{\partial N_m \psi_m}{\partial z} \right) \end{aligned} \right] dV \\
& + \int_V \left[\frac{\partial W}{\partial x} (K_r K_{xz}) + \frac{\partial W}{\partial y} (K_r K_{yz}) + \frac{\partial W}{\partial z} (K_r K_{zz}) \right] dV + \int_R W (V_x n_x + V_y n_y + V_z n_z) dR \\
& - \int_V W q dV + \int_V W (\beta S_s + C_s) \frac{\partial N_m \psi_m}{\partial t} dV = 0 \tag{44}
\end{aligned}$$

さて、解析領域全体 V を有限要素に分割すると、各要素領域 V^e でも上式が成立する。

$$\int_V W R dV = \sum_{e=1}^{Num.Elements} \int_{V^e} W R dV^e \tag{45}$$

$$\begin{aligned}
& \int_{V^e} W R dV^e \\
& = \int_{V^e} \left[\begin{aligned} & \frac{\partial W_l^e}{\partial x} \left(K_r K_{xx} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial W_l^e}{\partial x} \left(K_r K_{xy} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial W_l^e}{\partial x} \left(K_r K_{xz} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial W_l^e}{\partial y} \left(K_r K_{yx} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial W_l^e}{\partial y} \left(K_r K_{yy} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial W_l^e}{\partial y} \left(K_r K_{yz} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial W_l^e}{\partial z} \left(K_r K_{zx} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial W_l^e}{\partial z} \left(K_r K_{zy} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial W_l^e}{\partial z} \left(K_r K_{zz} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial z} \right) \end{aligned} \right] dV^e \\
& + \int_V \left[\frac{\partial W_l^e}{\partial x} (K_r K_{xz}) + \frac{\partial W_l^e}{\partial y} (K_r K_{yz}) + \frac{\partial W_l^e}{\partial z} (K_r K_{zz}) \right] dV^e + \int_R W_l^e (V_x n_x + V_y n_y + V_z n_z) dR^e \\
& - \int_V W_l^e q dV^e + \int_V W_l^e (\beta S_s + C_s) \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial t} dV^e \tag{46}
\end{aligned}$$

ここで、式(45)の Num.Elements (以降, NE) は総要素数である。これにより全体領域に対しては要素毎の式となる上式を全要素に渡って総和した方程式が得られる。

$$\sum_{e=1}^{NE} \left\{ \int_{V^e} \left[\begin{aligned} & \frac{\partial W_l^e}{\partial x} \left(K_r K_{xx} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial W_l^e}{\partial x} \left(K_r K_{xy} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial W_l^e}{\partial x} \left(K_r K_{xz} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial W_l^e}{\partial y} \left(K_r K_{yx} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial W_l^e}{\partial y} \left(K_r K_{yy} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial W_l^e}{\partial y} \left(K_r K_{yz} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial W_l^e}{\partial z} \left(K_r K_{zx} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial W_l^e}{\partial z} \left(K_r K_{zy} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial W_l^e}{\partial z} \left(K_r K_{zz} \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial z} \right) \end{aligned} \right] dV^e \right. \\ \left. + \int_V \left[\frac{\partial W_l^e}{\partial x} (K_r K_{xz}) + \frac{\partial W_l^e}{\partial y} (K_r K_{yz}) + \frac{\partial W_l^e}{\partial z} (K_r K_{zz}) \right] dV^e \right. \\ \left. + \int_R W_l^e (V_x n_x + V_y n_y + V_z n_z) dR^e \right. \\ \left. - \int_V W_l^e q dV^e + \int_V W_l^e (\beta S_s + C_s) \frac{\partial N_m^e \psi_m}{\partial t} dV^e \right\} = 0 \quad (47)$$

各節点の水頭値は先に示した通り，座標に依存しないため，積分の外に出すことができる。 $(\hat{\psi}(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^n N_m(x, y, z) \psi_m(t))$

最終的に，飽和・不飽和浸透流の有限要素方程式として次式が得られる。

$$[A_{lm}] \{ \psi_m \} + [F_{lm}] \left\{ \frac{d\psi_m}{dt} \right\} = \{ Q_l \} - \{ B_l \} + \{ D_l \} \quad (48)$$

ここで，

$$[A_{lm}] = \sum_{e=1}^{NE} \int_{V^e} \left[\begin{aligned} & \frac{\partial N_l^e}{\partial x} \left(K_r K_{xx} \frac{\partial N_m^e}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_l^e}{\partial x} \left(K_r K_{xy} \frac{\partial N_m^e}{\partial y} \right) + \frac{\partial N_l^e}{\partial x} \left(K_r K_{xz} \frac{\partial N_m^e}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial N_l^e}{\partial y} \left(K_r K_{yx} \frac{\partial N_m^e}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_l^e}{\partial y} \left(K_r K_{yy} \frac{\partial N_m^e}{\partial y} \right) + \frac{\partial N_l^e}{\partial y} \left(K_r K_{yz} \frac{\partial N_m^e}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial N_l^e}{\partial z} \left(K_r K_{zx} \frac{\partial N_m^e}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_l^e}{\partial z} \left(K_r K_{zy} \frac{\partial N_m^e}{\partial y} \right) + \frac{\partial N_l^e}{\partial z} \left(K_r K_{zz} \frac{\partial N_m^e}{\partial z} \right) \end{aligned} \right] dV^e \quad (49)$$

$$[F_{lm}] = \sum_{e=1}^{NE} \int_V N_l^e (\beta S_s + C_s) \frac{\partial N_m^e}{\partial t} dV^e \quad (50)$$

$$\{ Q_l \} = - \sum_{e=1}^{NE} \int_R N_l^e (V_x n_x + V_y n_y + V_z n_z) dR^e \quad (51)$$

$$\{ B_l \} = \sum_{e=1}^{NE} \int_V \left[\frac{\partial N_l^e}{\partial x} (K_r K_{xz}) + \frac{\partial N_l^e}{\partial y} (K_r K_{yz}) + \frac{\partial N_l^e}{\partial z} (K_r K_{zz}) \right] dV^e \quad (52)$$

$$\{D_l\} = \sum_{e=1}^{NE} \int_V N_l^e q dV^e \quad (53)$$

であり、 $[]$ はマトリクスを、 $\{ \}$ はベクトルをそれぞれ表す。

積分内は、内挿関数 N と重み関数 W （ガラーキン法では同じ）で表されており、これらはいずれも位置に対する関数で定義されている。

2.2.4 非定常解析における時間項の取り扱いと収束計算

先に示した方程式の時間項は、差分近似によって解くこととする。

$$[A_{lm}]\{\psi_m\} + [F_{lm}]\left\{\frac{d\psi_m}{dt}\right\} = \{Q_l\} - \{B_l\} + \{D_l\} \quad (54)$$

取り扱いを簡便にするため、右辺をひとまとめにする。

$$[A_{lm}]\{\psi_m\} + [F_{lm}]\left\{\frac{d\psi_m}{dt}\right\} = \{P_l\} \quad (55)$$

差分法における一般式は、差分重みパラメータ α を用いて次式で表される。

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{1}{\Delta t} [F_{lm}]^{k+1} + \alpha [A_{lm}]^{k+1} \right\} \{\psi_m\}^{k+1} \\ & = \left\{ \frac{1}{\Delta t} [F_{lm}]^k - (1 - \alpha) [A_{lm}]^k \right\} \{\psi_m\}^k + \alpha \{P_l\}^{k+1} + (1 - \alpha) \{P_l\}^k \end{aligned} \quad (56)$$

ここで、 α は $0 \leq \alpha \leq 1$ の範囲にある実数であり、一般的には次のどちらかが選択される。

$\alpha = 1$: 後退差分

$\alpha = 1/2$: 中央差分

この方程式を解くためには、係数マトリクス・定数ベクトルの $[A], [F], \{P\}$ が事前に定義されていなければならないが、これから求めるステップ $(k+1)$ の値が必要となる。そこで推定となる水頭値 ψ^{k+1} を用いて $[A], [F], \{P\}$ を算定し、収束計算によりステップ $(k+1)$ の値を求めることとする。

ところで、係数マトリクス・定数ベクトルはステップ (k) とステップ $(k+1)$ で準備する必要があるが、2倍の記憶容量が必要となり計算効率が悪い。そこでステップ $(k+1/2)$ の値を用いることで計算効率を高める。

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{1}{\Delta t} [F_{tm}]^{k+1/2} + \alpha [A_{tm}]^{k+1/2} \right\} \{\psi_m\}^{k+1} \\ & = \left\{ \frac{1}{\Delta t} [F_{tm}]^{k+1/2} - (1 - \alpha) [A_{tm}]^{k+1/2} \right\} \{\psi_m\}^k + \{P_t\}^{k+1/2} \end{aligned} \quad (57)$$

反復計算($i + 1$)回目のステップ($k + 1/2$)の水頭値は前回の結果を用いて求める。

$$\psi^{k+1/2} = \frac{1}{2} (\psi^k + \psi^{k+1,i}) \quad (58)$$

ここで、 $\psi^{k+1,i}$ はステップ($k + 1$)の*i*回目の反復計算の結果である。

反復計算の結果、前回との水頭値の差の最も大きいものが許容誤差 ε より小さくなったときに収束したと判断する。

$$\max |\psi_m^{k+1,i} - \psi_m^{k+1,i+1}| < \varepsilon \quad (59)$$

2.3 仮想ドレーンモデルの支配方程式

2.3.1 仮想ドレーンモデルの基礎理論式

仮想ドレーンモデルの基礎理論式は、以下のように導出した。まず、図 2.2 に示すように線状排水構造物の直径よりも大きな辺長を持つ要素中に、仮想的に線状排水構造物が掘削されるものとし、線状排水構造物は円筒形で近似する。線状排水構造物近傍では線状排水構造物壁面の法線方向（円筒形の径方向）にダルシー則にしたがって一様に地下水流れが生じているものとする。地盤の透水係数を k 、径方向の座標を r 、全水頭を h として、地下水の流速 u は式(60)のように表される。

$$u = -k \frac{dh}{dr} \quad (60)$$

要素を横断する線状排水構造物（円筒形）のうち、要素内部に存在する長さを L とし、この区間では長さ方向に均一に動水勾配 (dh/dr) が生じているものとするれば、この区間の線状排水構造物壁面からの単位時間あたりの湧水量 Q は、式(2)で与えられる。

$$Q = -2\pi r L u = 2\pi r L k \frac{dh}{dr} \quad (61)$$

線状排水構造物の壁面 ($r = r_0$) と壁面から離れた場所 ($r = r_1$) において、全水頭がそれぞれ h_0 と h_e に保たれた場合には、線状排水構造物壁面からの湧水量を Q_e として、これは次のように求められる。

$$\int_{h_0}^{h_e} dh = \frac{Q_e}{2\pi L k} \int_{r_0}^{r_1} \frac{dr}{r} \quad (62)$$

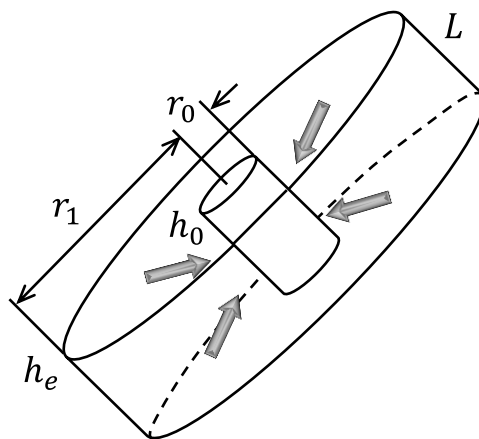


図 2.2 線状排水構造物近傍の地下水流れの近似

$$h_e - h_0 = \frac{Q_e}{2\pi Lk} (\ln r_1 - \ln r_0) \quad (63)$$

$$Q_e = 2\pi Lk \frac{h_e - h_0}{\ln (r_1/r_0)} \quad (64)$$

上式で表される要素内に存在する線状排水構造物区間における単位時間あたりの湧水量 Q_e を求めるためには、 h_0 、 h_e 、 r_0 、 r_1 を適切に定める必要があるが、ここでは次のように考えることとした。

線状排水構造物が存在する要素では、各要素構成節点で全水頭が求められるが、この節点値の平均的な値を線状排水構造物から離れた場所における全水頭 h_e とする。 h_e には各節点の全水頭 h_i の単純平均を用いることが考えられるが、ここでは線状排水構造物が要素内の偏った位置に存在する場合や、途中で止まっている場合も考慮し、 h_i に重み係数 w_i を乗じたうえで加算し、これを h_e とした (式(65))。

$$h_e = \sum_{i=1}^{N_e} w_i h_i \quad (65)$$

ここに、 N_e は要素構成節点数である。なお、本手法では 4 節点四面体、6 節点五面体、8 節点六面体の一次要素を想定している。

重み係数 w_i は、式(66)に示すとおり線状排水構造物の中心軸と各節点との距離 l_i に反比例する重みとなっており、 h_e は線状排水構造物に近い節点の全水頭値 h_i に対して、より大きな重みを付けて平均化して求めている。 l_i には要素内に存在する線状排水構造物中心軸の中点と各節の距離を用いた (図 2.3)。重み係数の合計は式(67)に示すとおり 1 となる。

$$w_i = \frac{1/l_i}{\sum_{j=1}^{N_e} (1/l_j)} \quad (66)$$

$$\sum_{i=1}^{N_e} w_i = 1 \quad (67)$$

線状排水構造物壁面から離れた場所を表す r_1 には、線状排水構造物を内包する要素の体積 V_e に等しい体積を持つ球の半径を用いた (式(68))。これは、要素構成節点数や要素の形状、線状排水構造物の位置にかかわらず、線状排水構造物と要素構成節点との距離の平

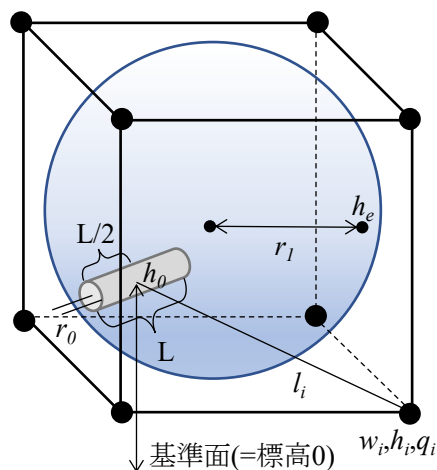


図 2.3 要素内の仮想的な線状排水構造物と節点との距離

均的な値として求めることができるために採用した。

$$r_1 = 0.5V_e^{1/3} \quad (68)$$

また、線状排水構造物壁面の全水頭 h_0 には、ここでの圧力水頭を 0m とするため、要素内に存在する線状排水構造物軸の midpoint の、基準面からの高さを用いた。 r_0 は線状排水構造物の半径であるが、線状排水構造物の断面と等しい断面積の円の半径とした。

2.3.2 有限要素解析への組み込み

仮想ドレーンモデルでは、式(64)より求まる単位時間あたりの湧水量 Q_e を掘削該当要素内で生じた吸込み量とし、これを3次元非定常有限要素解析に組み入れ、一定時間後の要素構成節点における新しい水頭値 h_i を求める。この値と線状排水構造物の長さの変化をもとに湧水量 Q_e の値を更新し、以下この作業を繰り返して水頭分布の変化を求めた。

仮想ドレーンモデルでの、要素内に存在する線状排水構造物区間における単位時間あたりの湧水量は以下のとおりである。

$$Q_e = 2\pi Lk \frac{h_e - h_0}{\ln(r_1/r_0)} \quad (64) \text{再掲}$$

$$h_e = \sum_{m=1}^{N_e} w_m h_m \quad (69)$$

なお、添え字の i は、後の式展開における混同を避けるため m とした。

計算には Q_e の節点値 q_i が必要であるが、 h_e を定めた場合と同様の関数を用い、要素内の線状排水構造物軸の中心からの距離で重みを付けて各節点に湧水量を配分した。

$$q_i = w_i Q_e \quad (70)$$

なお、添え字の i は後の混同を避けるため l とした。

これは、有限要素方程式において、単位時間・単位体積あたりの吸水（湧水）量を表すソース項に相当する。線状排水構造物による流量ソース項を $\{\bar{D}_l\}$ とすると、線状排水構造物を内包する要素に対しての総和は次のようになる。

$$\begin{aligned} \{\bar{D}_l\} &= - \sum_{e \in \text{drain in element}} \int_V N_l^e q_l dV^e \\ &= - \sum_{e \in \text{drain in element}} w_l Q_e \\ &= - \sum_{e \in \text{drain in element}} w_l C (h_e - h_0^e) \end{aligned} \quad (71)$$

ここに、

$$C = \frac{2\pi Lk}{\ln(r_1/r_0)} \quad (72)$$

である。

なお、負号がついているのは、仮想ドレーンモデルの理論式では湧水（流出）量を正としてきたが、有限要素方程式のソース項は、流入量を正、流出量を負として取り扱うためである。

h_0^e は要素内の線状排水構造物区間の中心における水頭値で、圧力水頭を0とするためその位置座標となる。

$$h_0^e = z_0^e \quad (73)$$

要素内平均水頭を圧力水頭と位置水頭に分離すると

$$h_e = \sum_{m=1}^{N_e} w_m h_m = \sum_{m=1}^{N_e} w_m (\psi_m + z_m)$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{m=1}^{N_e} w_m \psi_m + \sum_{m=1}^{N_e} w_m z_m \\
&= \left(\sum_{m=1}^{N_e} w_m \psi_m \right) + \bar{z}^e
\end{aligned} \tag{74}$$

となる。ここで、

$$\bar{z}^e = \sum_{m=1}^{N_e} w_m z_m \tag{75}$$

である。したがって、線状排水構造物による流量ソース項 $\{\bar{D}_l\}$ は次式となる。

$$\begin{aligned}
\{\bar{D}_l\} &= - \sum_{e \in \text{drain in element}} w_l C \left[\left(\sum_{m=1}^{N_e} w_m \psi_m \right) + \bar{z}^e - z_0^e \right] \\
&= - \sum_{e \in \text{drain in element}} \left[\left(\sum_{m=1}^{N_e} C w_l w_m \psi_m \right) + w_l C (\bar{z}^e - z_0^e) \right]
\end{aligned} \tag{76}$$

時間に関する離散化においては、

$$\begin{aligned}
\{\bar{D}_l\}^{k+1/2} &= \alpha \{\bar{D}_l\}^{k+1} + (1 - \alpha) \{\bar{D}_l\}^k \\
&= -\alpha \sum_{e \in \text{drain in element}} \left[\left(\sum_{m=1}^{N_e} C w_l w_m \psi_m^{k+1} \right) + w_l C (\bar{z}^e - z_0^e) \right] \\
&\quad - (1 - \alpha) \sum_{e \in \text{drain in element}} \left[\left(\sum_{m=1}^{N_e} C w_l w_m \psi_m^k \right) + w_l C (\bar{z}^e - z_0^e) \right] \\
&= -\alpha \sum_{e \in \text{drain in element}} \left(\sum_{m=1}^{N_e} C w_l w_m \psi_m^{k+1} \right) - (1 - \alpha) \sum_{e \in \text{drain in element}} \left(\sum_{m=1}^{N_e} C w_l w_m \psi_m^k \right) \\
&\quad - \sum_{e \in \text{drain in element}} w_l C (\bar{z}^e - z_0^e)
\end{aligned} \tag{77}$$

であり，整理すると次式となる。

$$\{\bar{D}_l\}^{k+1/2} = \alpha[E_{lm}]\{\psi_m\}^{k+1} + (1 - \alpha)[E_{lm}]\{\psi_m\}^k + \{Z_l\} \quad (78)$$

ここに，

$$[E_{lm}] = - \sum_{e \in \text{drain in element}} \left(\sum_{m=1}^{N_e} C w_l w_m \right) \quad (79)$$

$$\{Z_l\} = - \sum_{e \in \text{drain in element}} w_l C (\bar{z}^e - z_0^e) \quad (80)$$

である。

これを有限要素方程式に代入すると，最終的に次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{1}{\Delta t} [F_{lm}]^{k+1/2} + \alpha [A_{lm}]^{k+1/2} \right\} \{\psi_m\}^{k+1} \\ & = \left\{ \frac{1}{\Delta t} [F_{lm}]^{k+1/2} - (1 - \alpha) [A_{lm}]^{k+1/2} \right\} \{\psi_m\}^k + \{P_l\}^{k+1/2} + \{\bar{D}_l\}^{k+1/2} \end{aligned} \quad (81)$$

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{1}{\Delta t} [F_{lm}]^{k+1/2} + \alpha [A_{lm}]^{k+1/2} - \alpha [E_{lm}] \right\} \{\psi_m\}^{k+1} \\ & = \left\{ \frac{1}{\Delta t} [F_{lm}]^{k+1/2} - (1 - \alpha) [A_{lm}]^{k+1/2} + (1 - \alpha) [E_{lm}] \right\} \{\psi_m\}^k + \{P_l\}^{k+1/2} + \{Z_l\} \end{aligned} \quad (82)$$

上式が，仮想ドレーンモデルを考慮した，飽和・不飽和非定常浸透流解析の有限要素方程式である。

2.4 仮想ドレーンモデルの特徴

仮想ドレーンモデルの最大の利点は、線状排水構造物をメッシュ化せずに線状排水構造物の存在を考慮した解を得られることである。これは、3次元浸透流解析モデルを作成する際の労力を大幅に低減するとともに、解析時間の短縮に貢献する。

また、次のような利点も挙げることができる。ここでは、トンネル掘削を例にとつてについて説明する。

従来の3次元浸透流解析においてトンネル掘削を表現する場合は、トンネルをメッシュ化した上で、図2.4に示すように、掘削該当要素を計算から除外（または削除）し、切羽およびトンネル壁面に対して圧力水頭0m（または浸出面境界）の境界条件を設定する方法が採られていた。また、掘削の進行に対応させる場合は、図2.5に示すように、逐次この条件（要素削除と掘削面への条件設定）を追加していくことが必要となる。したがって、掘削ステップを日掘削量に対応させるような場合は、あらかじめ掘進方向のモデルの細分化することや、日進に合わせた要素分割が必要となり、条件設定も掘削ステップ数と同じ数だけ設定する必要がある。

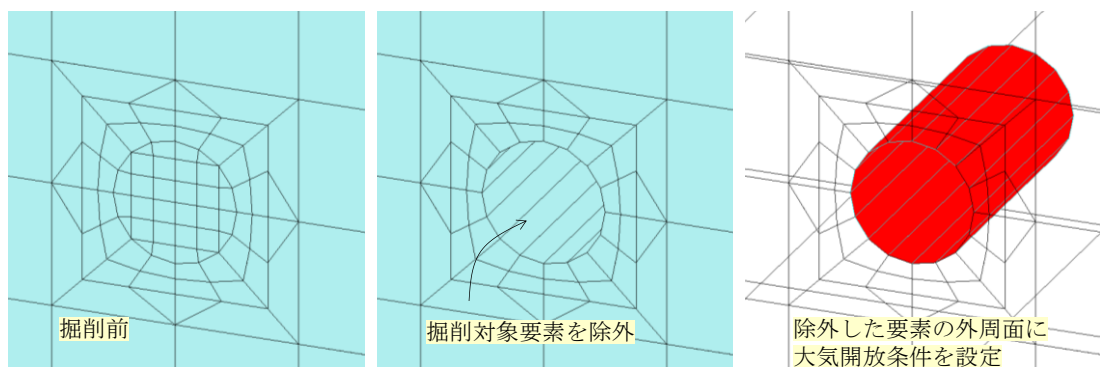


図 2.4 通常法における掘削条件の設定方法

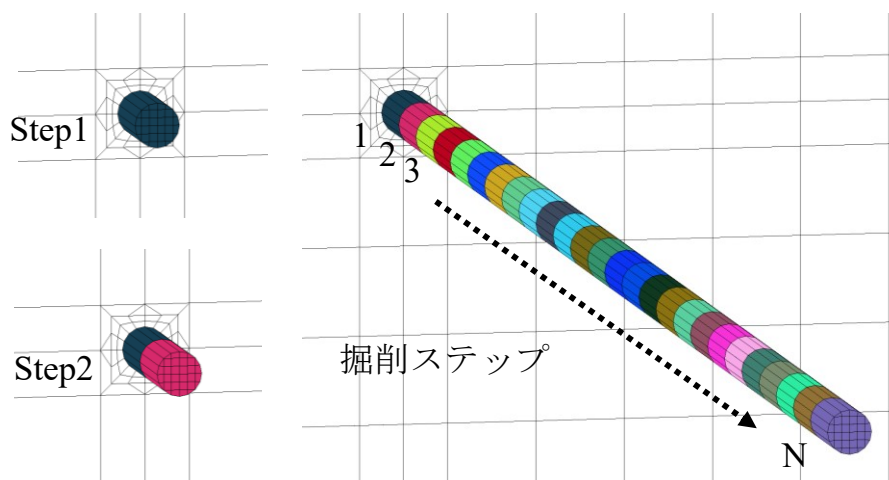


図 2.5 通常法における掘削ステップに対応した掘削条件の設定方法

さらに、解析の実行に際しては、次ステップの掘削解析を行う時に、前ステップの最終時間の水頭値を初期条件として計算をリスタートしなければならない。このような解析実行までの設定プロセスも、解析作業者の大きな負担となる。

一方、仮想ドレーンモデルでは、掘削該当要素に対する除外処理や境界条件の変更などの必要がない。仮想ドレーンモデルの掘削に関する入力条件は、図 2.6 に示す概念図のように、トンネル線形に対応した 3 次元座標、掘削速度に対応した切羽の移動時間および、トンネル断面に等価な円の径（半径）のみであり、図 2.7 の示すようなテキストフォーマットを作成すればよい。ここで、切羽停止時間とは、ウォータータイト工法のように止水対策が行われて、トンネル壁面が非排水状態となった際に、トンネル壁面での大気開放条件を無効化する時間である。

したがって、トンネルが線形である場合は、始点と終点の座標と、終点到達時間および削孔径を入力すればよく、曲率を持つトンネル線形やスパイラル構造などの複雑な掘削計

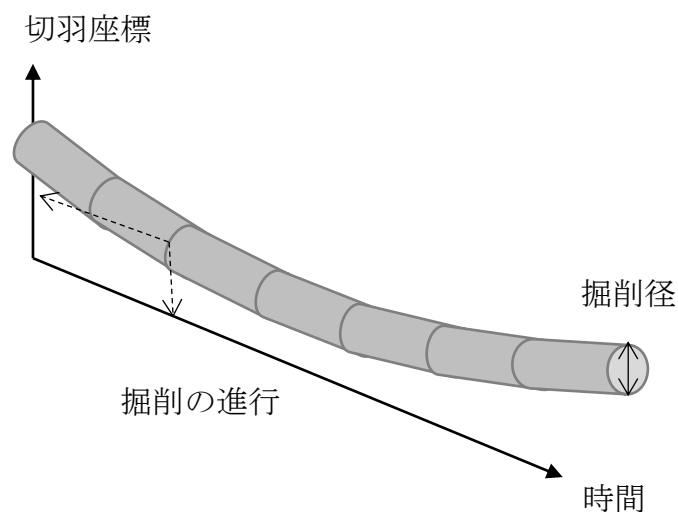


図 2.6 仮想ドレーンモデルの掘削条件の設定方法

X 座標	Y 座標	Z 座標	切羽 到達時間	切羽 停止時間	削孔径
-11824.98	-125928.67	164.54	0	0	6.800
-11827.84	-125929.59	164.51	1	0	6.800
-11828.79	-125929.90	164.50	15	0	6.800
-11829.74	-125930.21	164.49	21	0	6.800
-11830.69	-125930.52	164.48	22	0	6.800
-11831.65	-125930.82	164.47	23	0	6.800

*削孔径は掘削半径

図 2.7 仮想ドレーンモデルの入力データ例

画に関しても、計画路線の3次元座標を入力することで考慮することが可能である。また、本坑から水抜きボーリングを実施するような複合的な構造に対しても解析が可能である。

現場における水抜きボーリングの実施は、予め計画されているものではなく、状況に応じて実施されるため、その効果を予測する場合、従来の方法ではモデルの修正が必要となるが、仮想ドレーンモデルは、図 2.7 に示した座標情報や削孔径を入力すればよいため、現場での突発的な対策に対しても柔軟に解析が実行できる。

このように、仮想ドレーンモデルでは、要素分割数の削減による計算時間の低減に加え、解析ステップ構築の省力化や、事前になかった対策工への対応など、解析作業の迅速化によって解析の効率を大幅に向上させることが期待できる。

3. 仮想ドレーンモデルの精度検証

3.1 地すべり地における排水ボーリングを対象とした場合

3.1.1 検証モデルおよび計算条件

仮想ドレーンモデルの精度検証は、透水性の均質な地盤中に集水井工を一基配置させたモデルを用いて行うこととし、立坑および、排水ボーリングを忠実にモデル化して、ボーリング壁面に大気開放条件を設定する従来の浸透流解析の方法（以降、「通常法」と称する。）と、仮想ドレーンモデルに対応した2種類の有限要素モデルを用いた3次元飽和-不飽和浸透流解析により行った。この時、立坑はモデル化を行うが、ここでの主目的は、排水ボーリングをモデル化した場合（通常法）と、しない場合（仮想ドレーンモデル）の差異の有無を確認することにあるため、非排水条件として扱った。したがって、立坑から地盤方向に挿入される13本の排水ボーリングについて、通常法と仮想ドレーンモデルにおける解析結果としての排水量および、排水に伴う水位低下状況を比較して、その整合性により判断することとした。なお、立坑についても、仮想ドレーンモデルはモデル化せずとも考慮することは可能である。

まず、通常法ケースのモデルは、図3.1～図3.3に示すように構築を行った。図3.1はモデル全体の鳥瞰図、図3.2は解析領域の内部から見た集水井工および排水ボーリングのモデル化状況、図3.3は集水井工壁面から見た排水ボーリングのモデル化状況である。これに対し、仮想ドレーンモデルを適用したモデルは、図3.4および図3.5に示すように構築を行った。図3.4は全体鳥瞰図であり、図3.5は解析領域の内部から見た集水井工のモデル化状況である。仮想ドレーンモデルを適用したモデルは、排水ボーリングのモデル化が不要となるため、立坑近傍のメッシュは細分化されているが、通常法モデルに必要となる立坑を中心として扇状に挿入される排水ボーリングの形状に合わせたモデリング（図3.1）や、排水ボーリング部のモデル化および排水ボーリング近傍のメッシュの細分化（図3.3）は行っておらず、節点総数は、通常法の39,601に対して、およそ4割となる15,226に減っている。

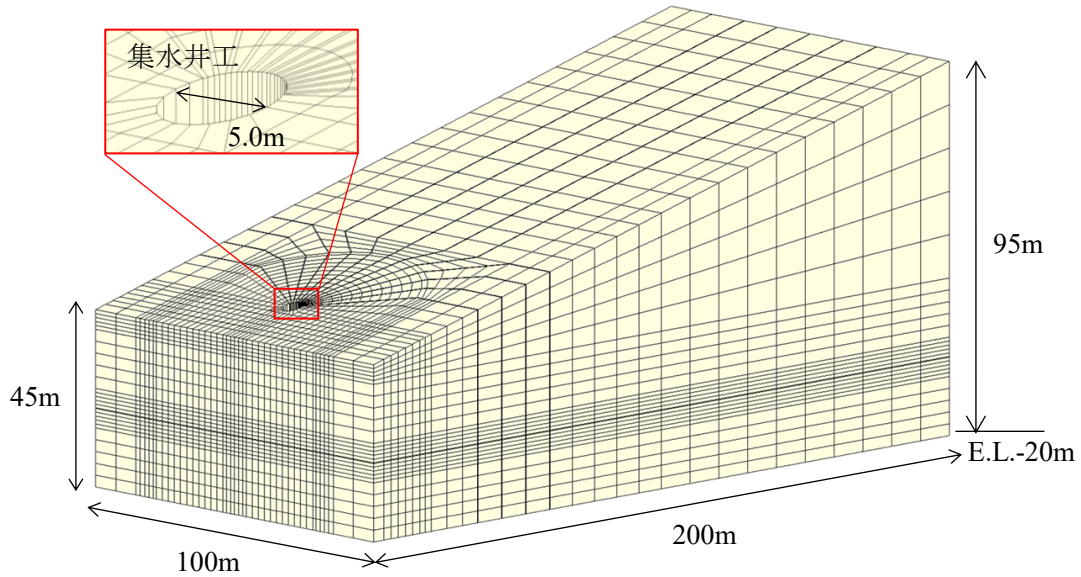
なお、通常法の解析は、3次元飽和-不飽和浸透流解析ソフトウェアである3D-Flow ver.1.3.2³⁶⁾を用いた。

検証解析の条件を表3.1に示す。境界条件はモデル側面を不透水境界、上下流面を全水頭固定境界とした。また、地表面は降雨境界とし、降雨涵養を1.0mm/日に設定した。この条件一覧に対応した境界条件の設定概念図を図3.6に示す。

集水井工本体（立坑）の内壁面については排水効果を見込む場合もあると考えられるが、先述のとおり、排水ボーリングのモデル化方法の適用と評価を主目的としている理由から非排水条件となる不透水境界とした。通常法における排水ボーリングに関しては、ボーリング孔内壁面を構成する節点に対して浸出面境界を設定し、大気開放条件とした。

また、検証解析では、地盤の透水性の影響を併せて確認するため、飽和透水係数を3種類設定した。不飽和浸透特性は、図3.7に示すとおり、飽和度～サクシヨンの関係およ

び、飽和度～比透水係数の関係を線形で表した。これらの条件のもとで、排水開始から365日間の非定常解析を実施した。365日後は、概ね圧力変化が収束した定常状態と見なせる時間である。



節点数 ; 39,601, 要素数 : 37,554

図 3.1 地すべり地検証モデル_全体図 (通常法)

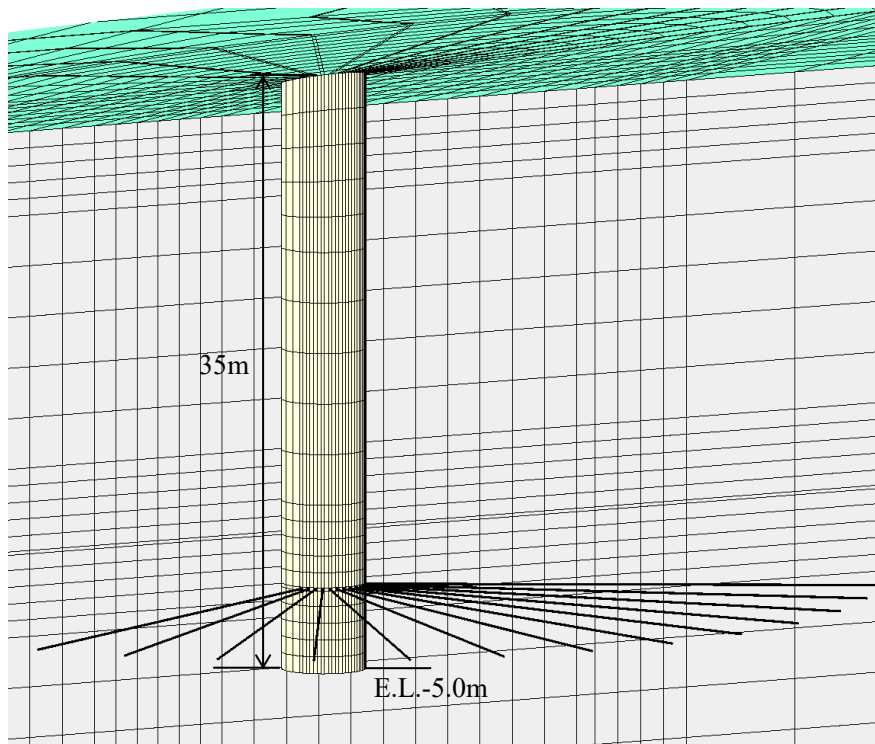


図 3.2 モデル内部から見た集水井工部のモデル化状況 (通常法)

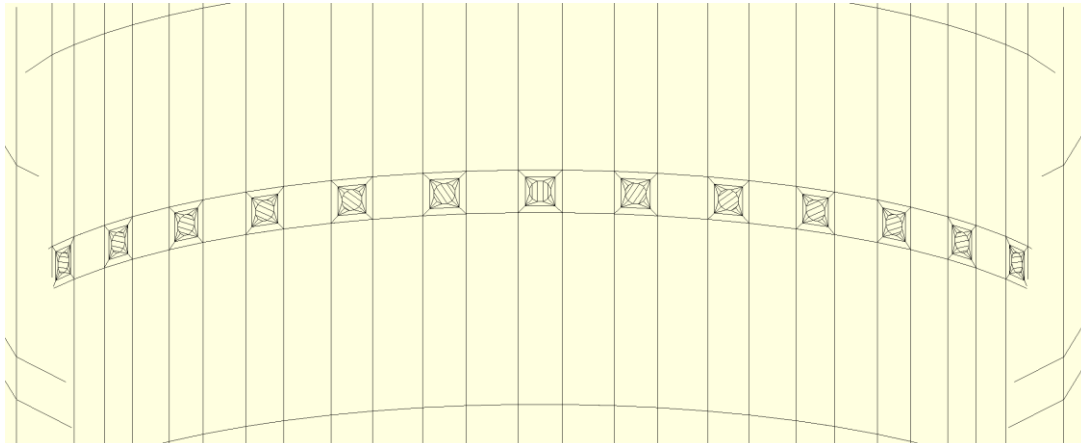
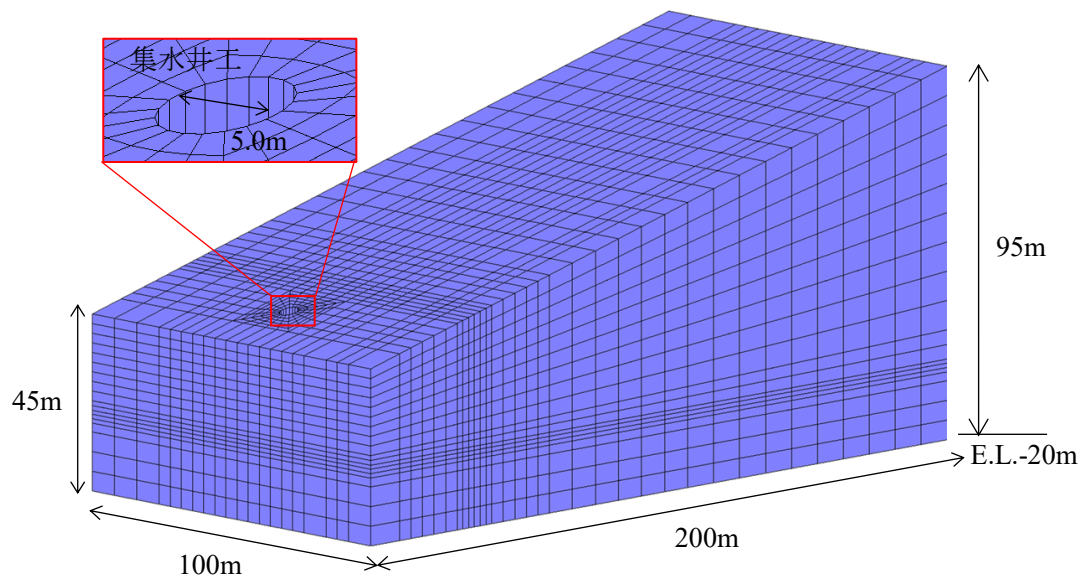


図 3.3 立坑壁面から見た 13 本の排水ボーリングのモデル化状況 (通常法)



節点数 ; 15,226, 要素数 : 13,305

図 3.4 地すべり地検証モデル_全体図 (仮想ドレーンモデル)

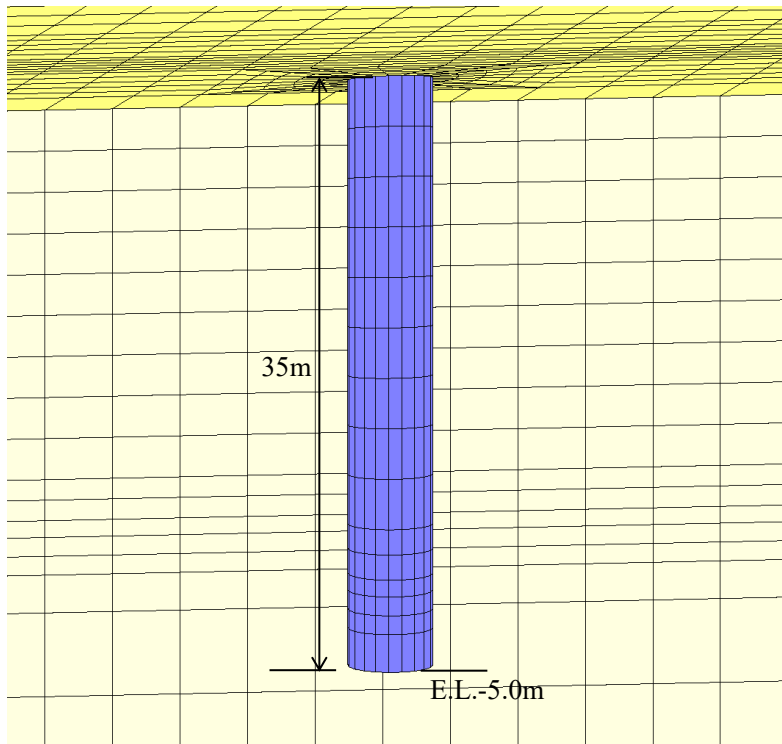


図 3.5 モデル内部から見た集水井工部のモデル化状況（仮想ドレーンモデル）

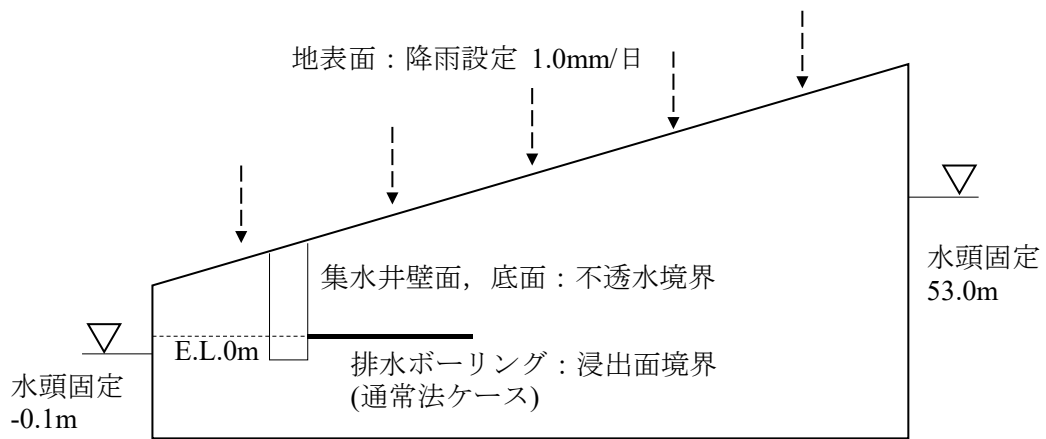


図 3.6 検証解析の境界条件概念図（地すべり地モデル）

表 3.1 検証解析の条件

項目	設定条件
地盤の飽和透水係数	1.0×10^{-5} , 1.0×10^{-6} , 1.0×10^{-7} m/s
降雨量	1mm/日
水位固定(全水頭)	下流側面：-0.1m, 上流側面：53m
排水ボーリング	本数:13 長さ：30m 径：100mm 方向角：10° 傾角：0°
解析期間	365 日
CPU	Intel®Core™ i7-6700K 4GHz
実装 RAM	32.0GB
不飽和浸透特性	図 3.7 参照

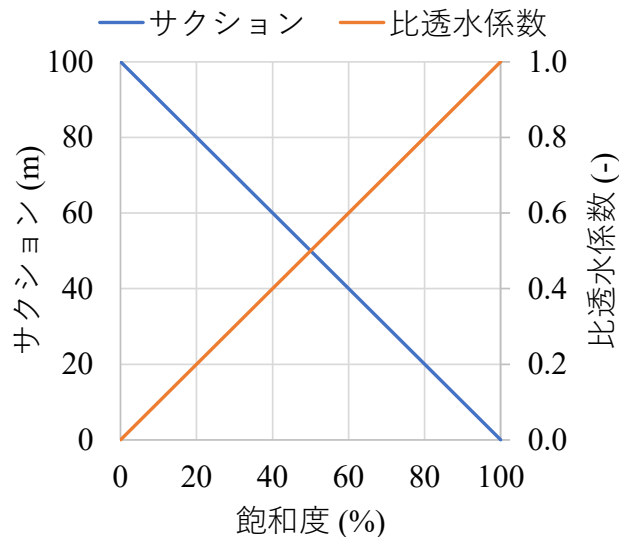


図 3.7 検討に用いた不飽和浸透特性

3.1.2 検証結果

図 3.8 に通常法と仮想ドレーンモデルの 365 日後における地下水位の標高分布の比較を示す。これは、解析結果から圧力水頭 0m の等値面を求めて、その高さをコンター化した図であり、図 3.8 に示した視線の方向（平面的）から見た図である。これによると、通常法と仮想ドレーンモデルは概ね一致した分布となった。ただし、いずれの透水係数のケースにおいても、排水ボーリングを設定した範囲を中心に、通常法の水位より仮想ドレーンモデルがやや高い傾向を示した。これは、次のような理由によるものと考えられる。

通常法では、排水ボーリング構成節点を浸出面境界として設定していることから、地下水面下では節点の圧力水頭が強制的に 0m として扱われ、排水ボーリングの形状に沿う水

面が形成される。一方、仮想ドレーンモデルでは、排水量を排水ボーリング内包要素の構成節点に分配し、浸透流解析を解くことによって圧力水頭が求まるため、排水ボーリング近傍では滑らかな圧力水頭分布となる。この結果、通常法に比べて地下水位が高めに評価されると考えられる。なお、地下水位の差異は排水ボーリング近傍では大きく現れているが、これから離れるにつれて両者の差異は小さくなっている。

図 3.9 に、365 日後のモデル中央の鉛直断面における通常法と仮想ドレーンモデルの水位分布を示す。同図より、前述したとおり、通常法において排水ボーリング位置においてボーリングに沿う水位線が発生していることと、仮想ドレーンモデルの水面は滑らかに分布している傾向が確認できる。

また、図 3.10 には、水位差を視覚的に表す目的で、365 日後における通常法と仮想ドレーンモデルの水位標高に対して差分をとり描いたコンター図を示した。排水ボーリング部における水位差は、透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ および、 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ のケースでは 5.0m 弱、 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ のケースでは 6m 弱となっている。また、排水ボーリングの挿入位置から離れるにつれて水位差が小さくなる傾向が確認できる。また、透水係数が小さくなるほど、通常法と仮想ドレーンモデルの水位差は大きく現れる傾向であった。

次に、累積排水量の経時変化を比較した。結果を図 3.11 に示す。累積排水量は、通常法、仮想ドレーンモデルともに、13 本全てのボーリング孔からの排水量の総和として求めた。仮想ドレーンモデルで得られた累積排水量は、地盤の透水係数の大きさに関わらず、通常法で得られたものと良い一致を示している。

また、表 3.2 には 365 日後の累積排水総量を、計算に要した時間も併せて示した。なお、365 日後の地下水流れは圧力変化が収まっており、定常状態に達していることを確認している。通常法に比べ仮想ドレーンモデルは累積排水総量が小さくなっているものの、両者では 95% 程度の高い一致を示した。解析に要した時間は、通常法に対しておよそ仮想ドレーンモデルが 1/4 程度となり、節点数の低減以上の時間短縮効果が見られている。

以上より、仮想ドレーンモデルは、排水ボーリングをメッシュ化せずとも、地盤の透水性に依らず、その効果を適切に表現できる手法であることが確認できた。また、節点数を低減できることから計算時間の短縮にも貢献することがわかった。

通常法での解析作業においては、ボーリング孔の要素分割やボーリング孔内壁への境界条件の設定などに多大な労力を要する。仮想ドレーンモデルでは、これらの作業を省くことができるため、仮想ドレーンモデルの採用は解析作業の効率化に大きく寄与すると考える。

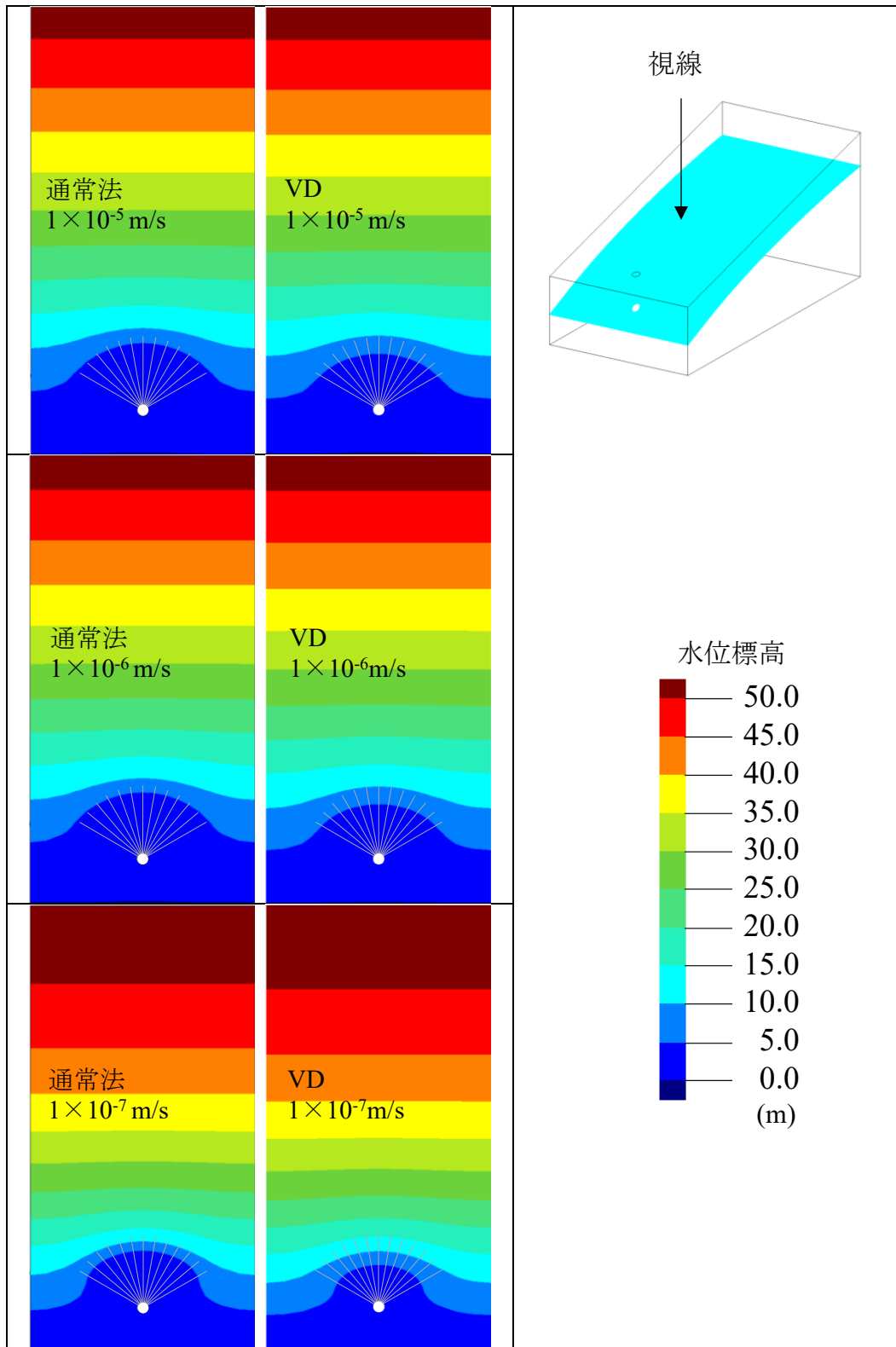
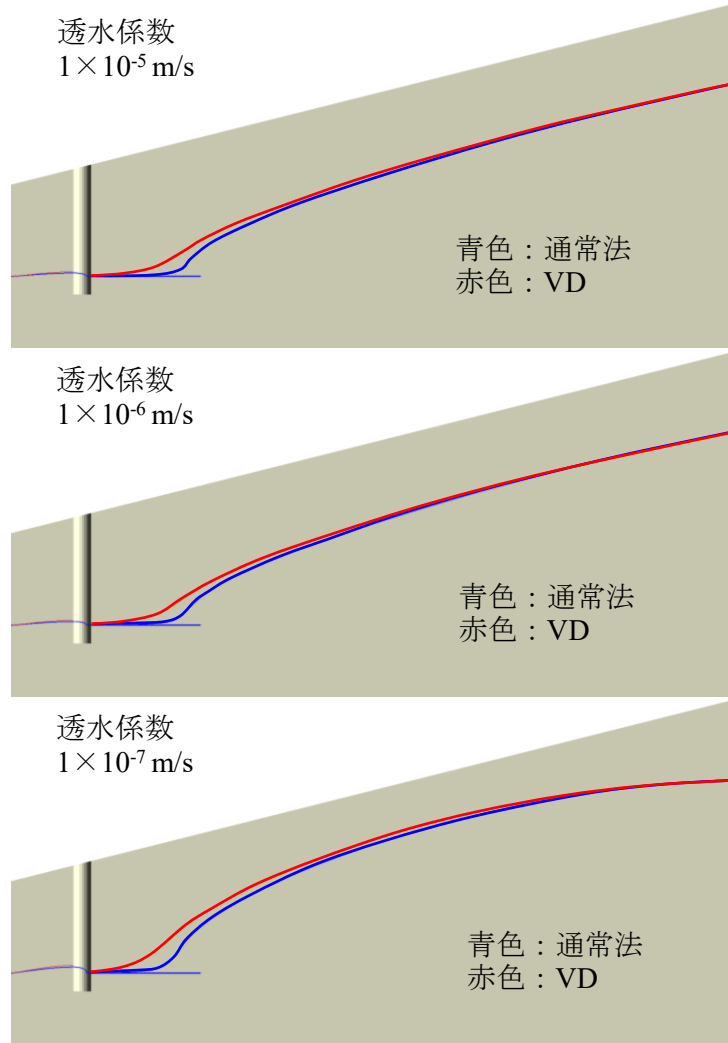
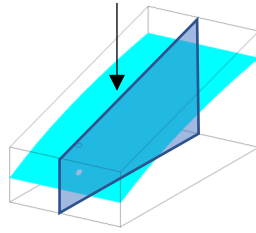


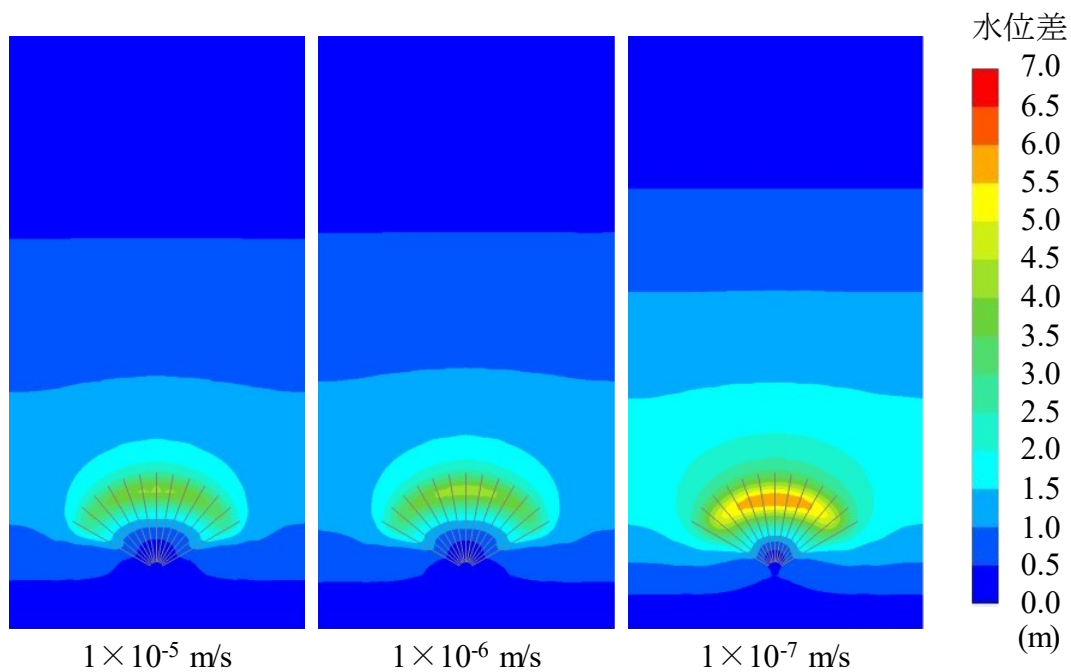
図 3.8 365 日後における地下水標高分布

地下水位
比較断面



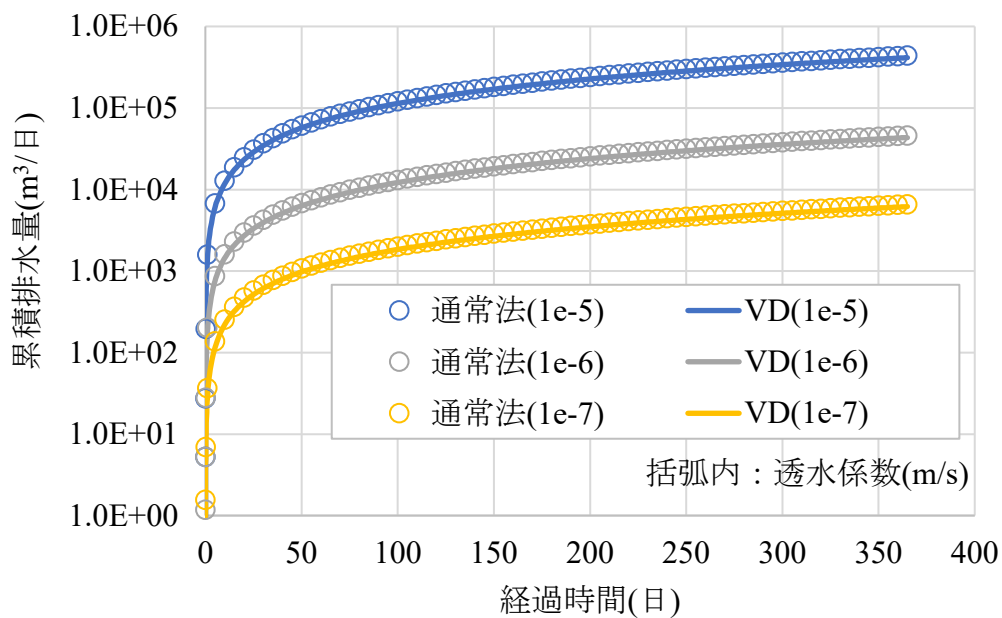
*VD：仮想ドレーンモデル

図 3.9 通常法と仮想ドレーンモデルのモデル中央断面における水位分布の比較
(365 日後)



「仮想ドレーンモデルの水位標高」 — 「通常法の水位標高」

図 3.10 通常法と仮想ドレーンモデルの水位差分コンター (365日後)



*VD：仮想ドレーンモデル

図 3.11 通常法と仮想ドレーンモデルの累積排水量変化の比較

3.2 トンネル掘削を対象とした場合

3.2.1 ケース設定

仮想ドレーンモデルの地下空間の利用における建設工事への適用に対し、妥当性を検証するため、地すべり地を対象とした検証時と同様に、トンネルをメッシュ分割してモデルを行う「通常法」と、これと同じ条件を用いた仮想ドレーンモデルによる解析を実施して解析結果を比較する。比較にあたっては、以下に示す掘進方向、地盤の透水性、仮想ドレーンモデルの要素サイズ、地質分布といった項目に着目したケース設定を行った。ここで、後述する通常法のメッシュサイズは掘進方向に5mおよび20mで構築したのに対し、仮想ドレーンモデルの要素分割を1辺20mよりもメッシュサイズが粗い1辺50mや100mのメッシュサイズを作成した。この理由は、概算的に早急に坑内湧水量を求めたい場合を想定して、節点数を減じたことによる計算速度の迅速さのみを考慮した粗いメッシュでも、通常法と比較してどの程度の坑内湧水量の差にとどまるか、または差異が大きいかなどを把握するためである。

- 掘進方向：水平（横坑）、鉛直（立坑）
- 地盤の透水係数： 1.0×10^{-6} 、 1.0×10^{-7} 、 1.0×10^{-8} m/s
- 仮想ドレーンモデルの要素サイズ：1辺20m、50m、100m
- 地盤の不均質性：水平構造、鉛直構造

ここで、検証解析モデルの諸元を表3.3に示す。掘進方向は、水平（横坑）および鉛直（立坑）の2方向とし、通常法においては、掘進方向5mおよび20mの解析メッシュを用いて、地盤の透水係数を3種類設定した解析を実施した。仮想ドレーンモデルでは、地盤の透水係数および要素サイズの粗密をそれぞれ3種類設定し、これらを組合わせた9ケースの解析を実施して、通常法と仮想ドレーンモデルそれぞれで求めた湧水量や水頭分布を比較した。

続いて、通常法、仮想ドレーンモデルともに要素サイズ20mのモデルを用いて、地盤の透水性の不均質な場を考慮した解析を実施して結果の比較を行った。不均質モデルの構築方法については後述する。なお、通常法の解析には、3次元飽和不飽和浸透流解析プログラムとして広く用いられている Dtransu-3D・EL³⁷⁾を用いた。

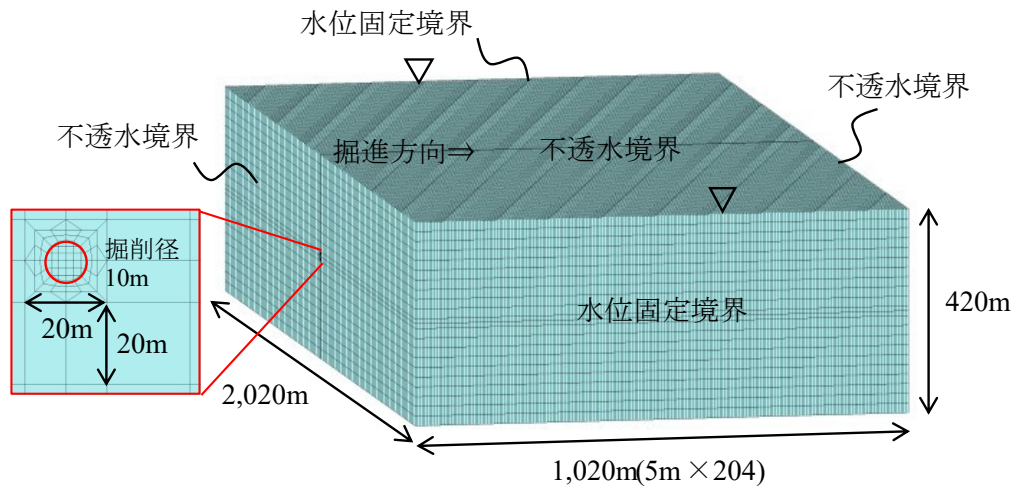
表 3.3 仮想ドレーンモデルの検証解析の諸元

項目	条件
比較ソルバー	Dtransu/3D・EL
地盤の透水係数	$1.0 \times 10^{-6} / 10^{-7} / 10^{-8}$ m/s
掘削距離	500m
削孔径（直径）	10m
掘進速度	5m/日
要素サイズ	20m / 50m / 100m

3.2.2 均質地盤モデル

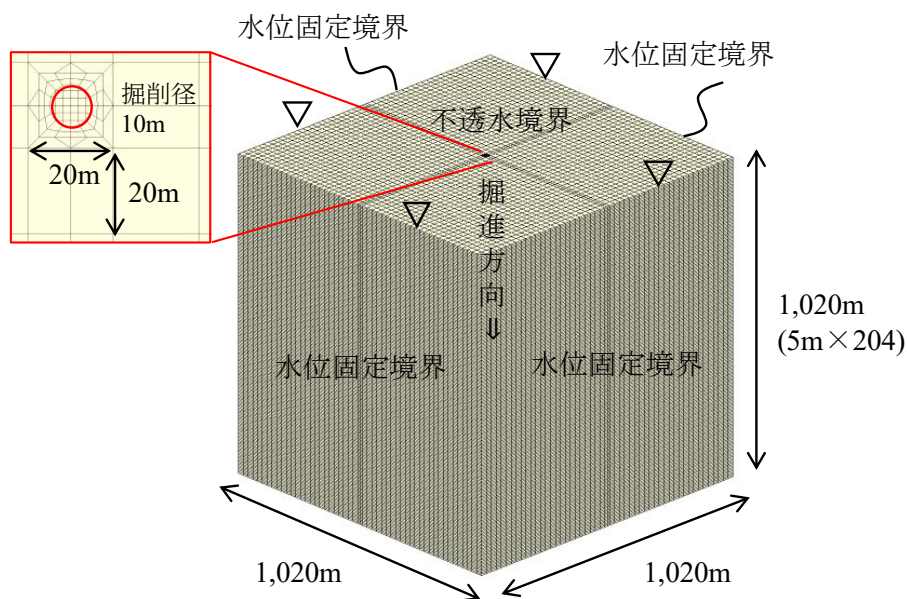
(1) 解析モデルと境界条件

通常法に用いた解析モデルを図 3.1 2, 図 3.1 3 に示す。横坑, 立坑ともに掘削断面方向はトンネル周辺を除いて要素辺長を 20m とし, 掘進方向は表 3.3 に示した掘進速度 5m/日に対応させた辺長 5m と, それよりも辺長が大きい 20m モデルの 2 種類を構築した。図 3.1 2, 図 3.1 3 には, それぞれ横坑, 立坑の辺長 5m のモデルを示した。一方, 仮



節点数 ; 499,585, 要素数 : 473,280

図 3.1 2 通常法の検討に用いた掘進方向の辺長 5m の有限要素メッシュ (横坑)



節点数 ; 589,785, 要素数 : 567,120

図 3.1 3 通常法の検討に用いた掘進方向の辺長 5m の有限要素メッシュ (立坑)

想ドレーンモデルは掘削断面方向（横断方向）と掘進方向（縦断方向）ともに、表 3.3 に示した 3 種類の要素サイズの正方格子状のメッシュを用いた。構築した解析モデルを図 3.1 4 および図 3.1 5 に示す。

解析に適用する境界条件は、モデルの側面においてモデル上面の高さに相当する水位を対象側面全体に固定することとし、横坑モデルはトンネル横断方向の左右側面に、立坑モデルは周囲 4 面に対して水位固定を行った。また、水頭固定を行わないモデル側面および上下面は非排水条件（不透水境界）とした。

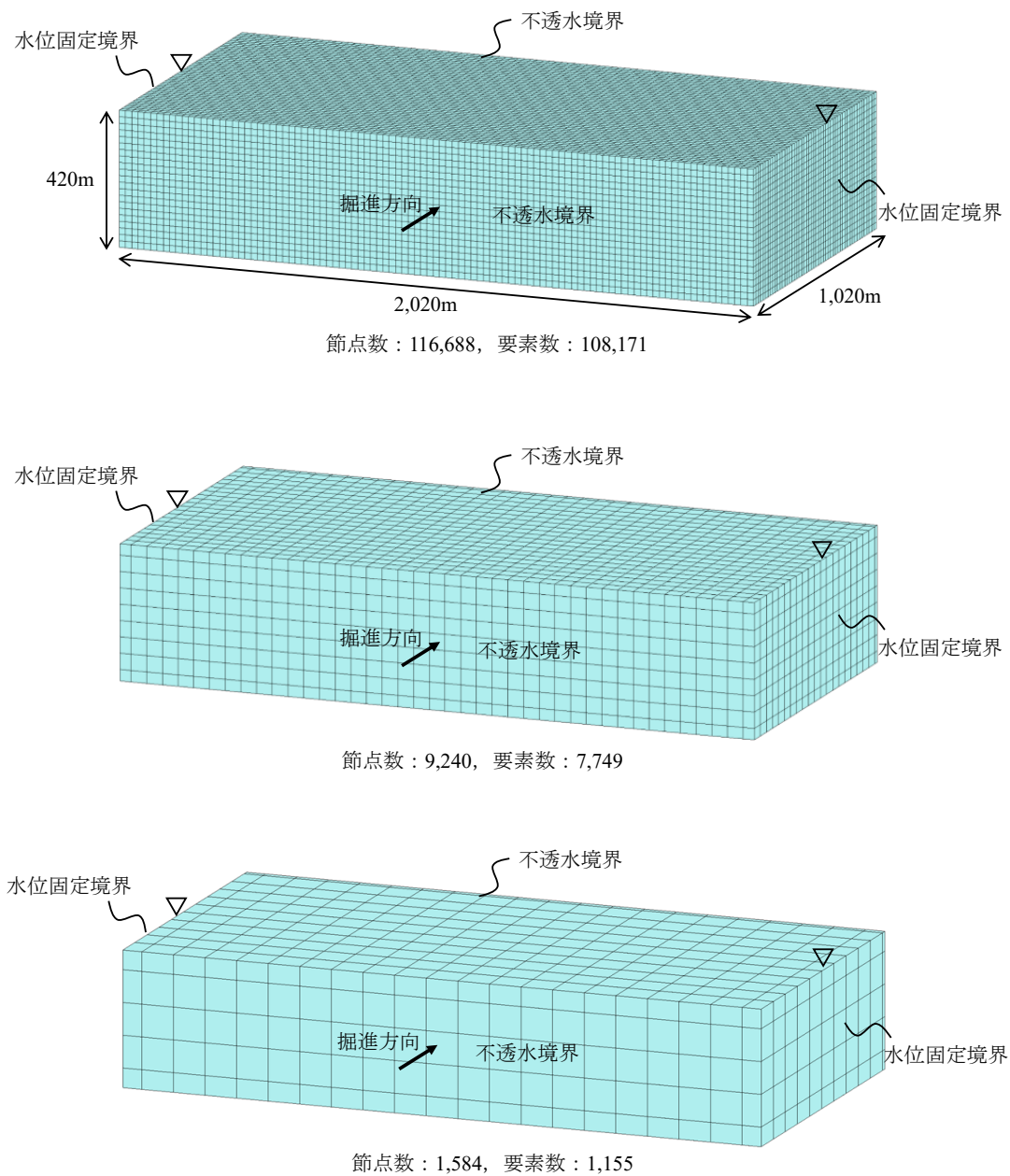
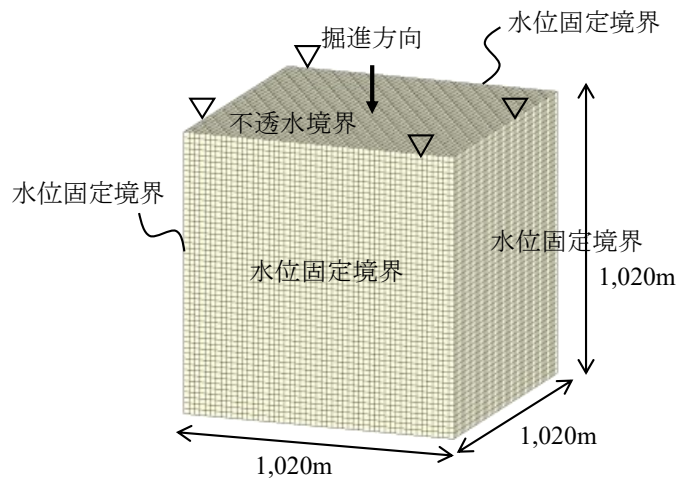
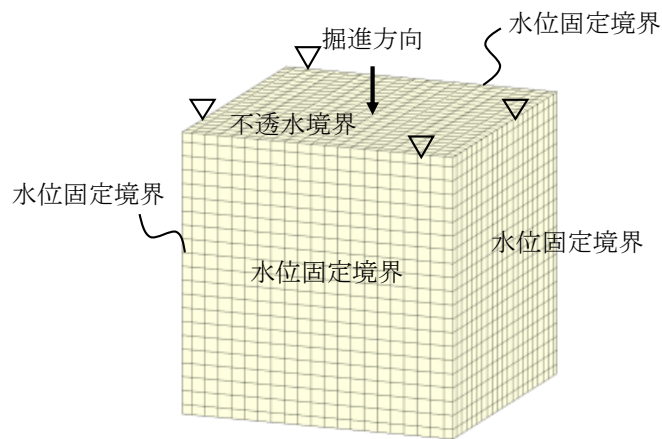


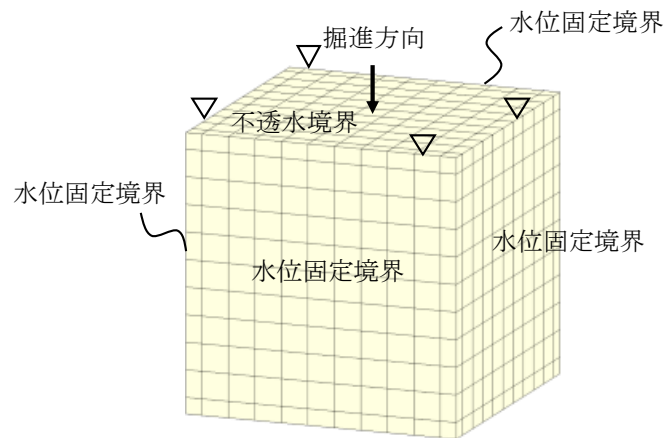
図 3.1 4 仮想ドレーンモデルの検討に用いた有限要素メッシュ（横坑）
（上：20mメッシュ，中：50mメッシュ，下100mメッシュ）



節点数 : 140,608, 要素数 : 132,651



節点数 : 10,648, 要素数 : 9,261



節点数 : 1,728, 要素数 : 1,331

図 3.15 仮想ドレーンモデルの検討に用いた有限要素メッシュ (立坑)
 (上 : 20m メッシュ, 中 : 50m メッシュ, 下 100m メッシュ)

(2) 湧水量の比較

横坑および立坑モデルそれぞれの累積湧水量の経時変化を図 3.16, 図 3.17 に示す。まず、通常法の 2 ケースの解析結果を比較すると、掘進方向のメッシュ分割の粗密が掘削開始直後の湧水量に影響していることがわかる。

通常法における掘削の表現は、1 ステップごとにトンネル掘進方向の掘削対象要素を削除し、その壁面および切羽面を構成する節点に圧力水頭 0m (または浸出面境界) を設定する方法 (大気開放条件) としている。つまり、掘進方向を 20m にメッシュ分割したモデルでは、1 ステップの掘削で実際の日掘進量 (5.0m/日) よりも長いトンネル体積の要素が削除され、その外周面が大気開放条件となる。掘削直後はトンネル周辺の動水勾配が高い状態であるため、1 ステップ当りの掘削距離が大きいほど湧水量が大きくなる。これが 2 ケースの解析結果に差が生ずる原因である。

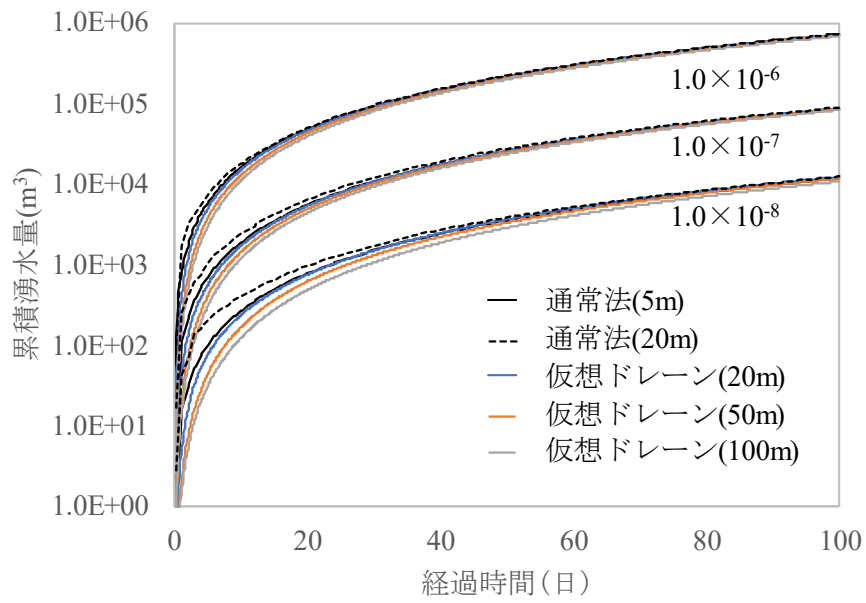
仮想ドレーンモデルの結果は、掘進方向 5m メッシュの結果に近い挙動を示している。この傾向は掘進方向、透水係数および要素サイズに依らず確認できる。これは次のような理由による。

仮想ドレーンモデルでは 1 ステップあたりの掘進長 (式(64), トンネル長 L) を浸透流解析の時間刻みから算出して設定する。本検討では時間刻みの最大値は 0.1 日にしていることから、1 ステップ掘削面積が通常法よりも大幅に小さくなる。この結果、1 ステップあたりの掘進長を 20m とした場合より、5m とした場合に近い状態となる。

掘削完了時 (100 日後) の横坑モデルの湧水総量の比較を表 3.4 に、要素サイズ 5m メッシュの湧水総量と各ケースの比を表 3.5 に示す。また、立坑モデルの湧水総量および、5m メッシュと各ケースの湧水総量費を表 3.6 および、表 3.7 にそれぞれ示す。

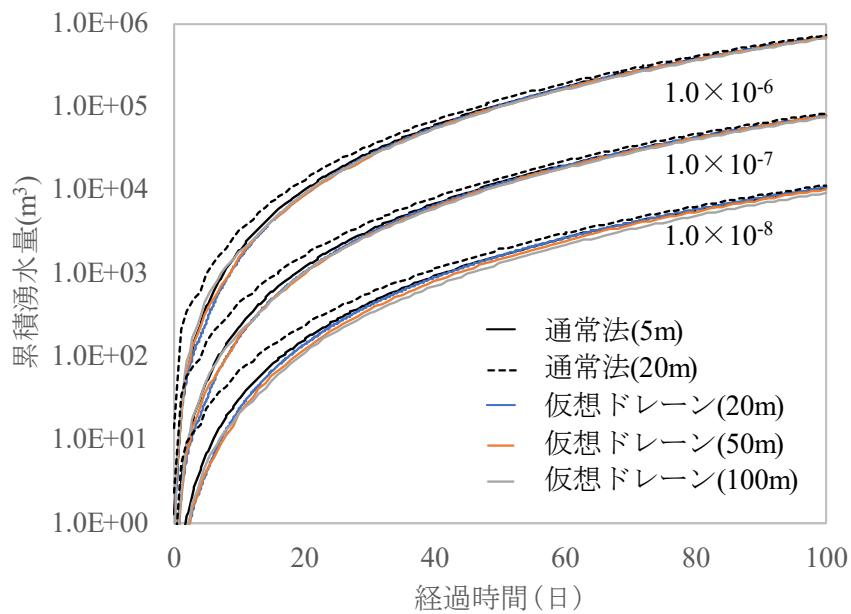
これらからは、要素サイズが大きくなるほど通常法に比べて仮想ドレーンモデルの湧水総量がやや小さくなる傾向が見てとれる。これは、要素サイズが大きいほど節点間距離が広くなり、動水勾配が平滑化されることに起因すると考えられる。図 3.16, 図 3.17 に示した経時変化でも要素サイズが大きいケースでは、掘削開始直後から累積湧水量は低い推移を示している。

しかし、仮想ドレーンモデル湧水総量の、通常法で掘進方向 5m メッシュの湧水総量に対する割合は、全体として 90%~110%に収まった。特に透水係数 1.0×10^{-6} m/s や 1.0×10^{-7} m/s では、横坑、立坑ともに 95%以上と高い近似を示している。このような結果から、仮想ドレーンモデルは掘削の方向に影響されにくいだけでなく、通常法で生じる掘進方向の要素サイズの影響も回避できる手法と判断できる。



括弧内の数字は要素サイズ

図 3.16 累積湧水量の経時変化（横坑）



括弧内の数字は要素サイズ

図 3.17 累積湧水量の経時変化（立坑）

表 3.4 横坑モデルの掘削完了時の総湧水量 ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$)

透水係数 (m/s)	通常法	仮想ドレーンモデル		
	要素サイズ	要素サイズ		
	5m/20m	20m	50m	100m
1.0×10^{-6}	73.1/73.6	72.2	70.9	69.4
1.0×10^{-7}	8.7/9.0	8.8	8.6	8.4
1.0×10^{-8}	1.2/1.2	1.2	1.2	1.1

表 3.5 横坑モデルの要素サイズ 5m モデルの総湧水量に対する比

透水係数 (m/s)	通常法	仮想ドレーンモデル		
	要素サイズ	要素サイズ		
	20m	20m	50m	100m
1.0×10^{-6}	1.01	0.99	0.97	0.95
1.0×10^{-7}	1.03	1.01	0.99	0.97
1.0×10^{-8}	1.00	1.00	1.00	0.92

表 3.6 立坑モデルの掘削完了時の総湧水量 ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$)

透水係数 (m/s)	通常法	仮想ドレーンモデル		
	要素サイズ	要素サイズ		
	5m/20m	20m	50m	100m
1.0×10^{-6}	68.6/72.8	69.0	68.0	66.4
1.0×10^{-7}	7.8/8.3	7.8	7.7	7.5
1.0×10^{-8}	1.0/1.1	1.1	1.0	0.9

表 3.7 立坑モデルの要素サイズ 5m モデルの総湧水量に対する比

透水係数 (m/s)	通常法	仮想ドレーンモデル		
	要素サイズ	要素サイズ		
	20m	20m	50m	100m
1.0×10^{-6}	1.06	1.01	0.99	0.97
1.0×10^{-7}	1.06	1.00	0.99	0.96
1.0×10^{-8}	1.10	1.10	1.00	0.90

(3) 水位分布の比較

図 3.1 8に、透水係数 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ のケースにおける掘削完了時（100 日後）の掘削開始面の圧力水頭分布を示す。通常法については掘進方向 5m メッシュの結果を示した。仮想ドレーンモデルによる圧力水頭分布のうち、要素サイズ 20m においては、トンネルおよび近傍の要素が存在しないため、トンネル周辺の圧力水頭分布に差異が見られるが、あたかもトンネルが存在するような圧力水頭分布となっており、水面形状も類似したものととなっていることがわかる。

一方、仮想ドレーンモデルの要素サイズ 50m、100m に関しては、トンネル位置では通常法に比べて高い圧力水頭分布となっている。したがって、切羽の背後にある水圧状況を推測するためにこれらの解析結果を利用することに関しては、精度の問題があると考えられる。しかし、水面形状は通常法と類似した分布になっていることや、先に示したとおり湧水量は近似度が高いことから、掘削に伴う水位低下の影響範囲を推測する用途では有効

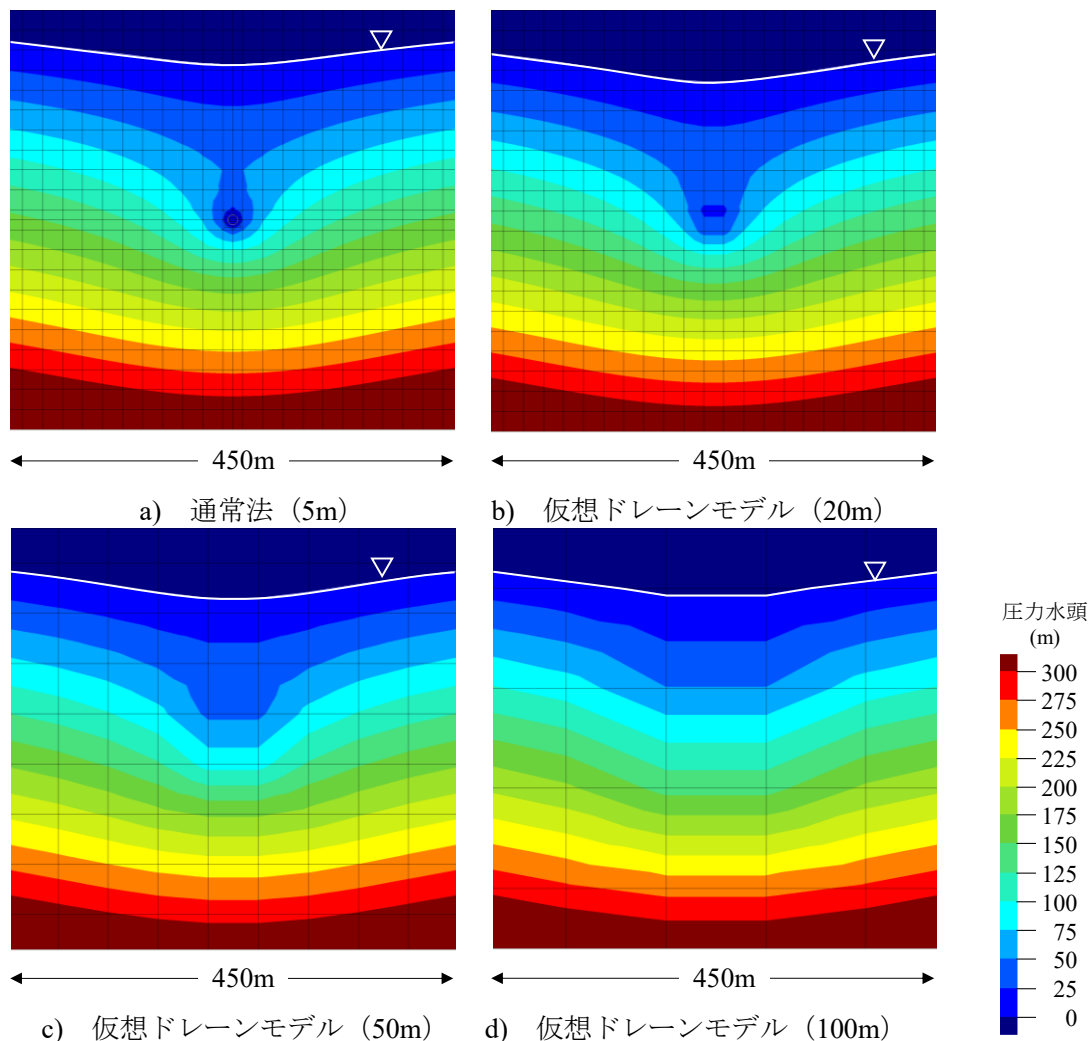


図 3.1 8 掘削完了時の掘削開始面における圧力水頭分布

であると考えられる。

(4) 計算時間の比較

表 3.8 および表 3.9 に、横坑モデル、立坑モデルそれぞれの節点数と計算に要した時間を示す。各表では、通常法の掘進方向 20m メッシュにおける透水係数 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ のケースに対しての比較を示した。

通常法 5m に関しては、日掘進量 5.0m に対応した要素分割であることから、逐次掘削を実態に合わせてモデリングしているため、高い精度を持つと考えられるが、節点数の増加により、解析時間は通常法 20m モデルの 5 倍を要した。

それに対し、仮想ドレーンモデルの要素サイズ 20m では、節点数は同程度であるが計算時間はおよそ半分の時間で解析が終了している。また、要素サイズ 50m、100m を用いた場合は、通常法とほぼ同等の坑内湧水量や水面形状が得られていながら、計算時間は通常法 20m メッシュに対して 1/30~1/100 に短縮された。掘進方向による計算時間への影響は大きな違いはなく、要素サイズ 20m の横坑モデルと立坑モデルは、それぞれ 34 分、35 分の計算時間となっており、節点数の多い立坑モデルがわずかに時間を要している。この傾向は要素サイズ、通常法においても同様であった。

有限要素法による 3 次元浸透流解析において、総節点数は解析時間に影響する。これらの結果を見る限りにおいては、仮想ドレーンモデルを適用することで、節点数の低減比以

表 3.8 計算時間 (横坑モデル)

要素サイズ	節点数	比	計算時間 (分)	比
通常法 5m	499,585	3.94	300	5.0
通常法 20m	126,724	-	60	-
VD20m	116,688	0.92	34	0.57
VD50m	9,240	0.07	2	0.03
VD100m	1,584	0.01	1	0.02
使用 PC : メモリ 32GB, Intel® Core™ i7-6700K				

表中の VD は仮想ドレーンモデル

表 3.9 計算時間 (立坑モデル)

要素サイズ	節点数	比	計算時間 (分)	比
通常法 5m	589,785	3.94	300	5.0
通常法 20m	149,604	-	60	-
VD20m	140,608	0.94	35	0.58
VD50m	10,648	0.07	1	0.02
VD100m	1,728	0.01	1(未満)	0.01
使用 PC : メモリ 32GB, Intel® Core™ i7-6700K				

表中の VD は仮想ドレーンモデル

上の解析時間の短縮が期待できるものと推察される。

さらに、仮想ドレーンモデルはトンネル近傍のメッシュ細分化や、2.4節に示した境界条件の設定などの作業が不要であるため、このような解析準備段階も考慮すれば、均質地盤に関して、解析効率の向上の観点からは高い実用性を有すると判断できる。

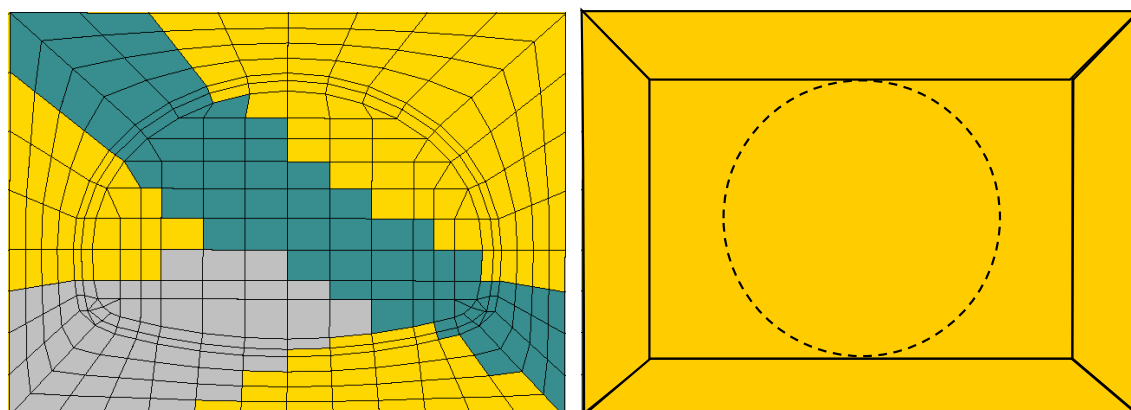
3.2.3 不均質地盤

(1) 解析モデル

仮想ドレーンモデルは、トンネルを含む要素内の物性が均一であるとの条件で定式化されており、例えば図 3.1 9 に示すように、切羽面に複数の地層構造が現れているような、掘削径よりも小さな不均質性は表現できない。これに対して通常法は、トンネル断面内でも要素を細分化できるため、このような不均質性もモデルに反映することができる。この点は仮想ドレーンモデルの短所である。しかし、通常法と同様に要素単位では不均質性を考慮することができる。すなわち、地質構造レベルのような大きな分布となる不均質性は考慮することができ、要素サイズを細かくすることで不均質性の表現のレベルを上げることができる。そこで、地質構造レベルの不均質性を反映したモデルを構築し、通常法と仮想ドレーンモデルの湧水量の比較を行った。

ここで、不均質性を考慮したモデルによる比較検証は、要素サイズ 20m の横坑モデル（参照：図 3.1 4 上段）を用い、地層区分を更新して行うこととした。地質構造は、水平層序となる堆積層を想定した水平構造と、付加体や断層破碎帯等に見られる鉛直構造を想定した。水平構造については、図 3.2 0 および図 3.2 1 に示すような高透水と低透水の地層が 1 メッシュごとに交互に分布する 2 岩相から成る水平互層構造と、深度方向 140m ごとに透水係数が小さくなる 3 層から成る構造とした。

鉛直構造については、図 3.2 2 に示すような 2 岩相から成る鉛直互層構造と、図 3.2 3 に示す 100m ごとに透水性の異なる層を有する 3 岩相から成る互層構造を想定した。



a) 通常法の切羽面の地質区分

b) 仮想ドレーンモデルの切羽面の地質区分

図 3.1 9 通常法と仮想ドレーンモデルの切羽面要素の地質反映の一例

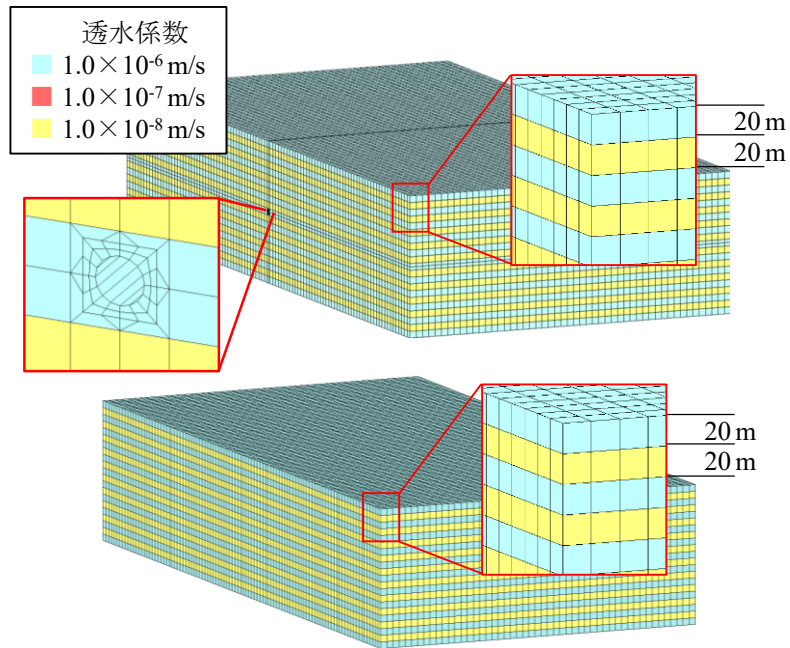


図 3.20 不均質モデル (水平_互層構造)
(上: 通常法, 下: 仮想ドレーンモデル)

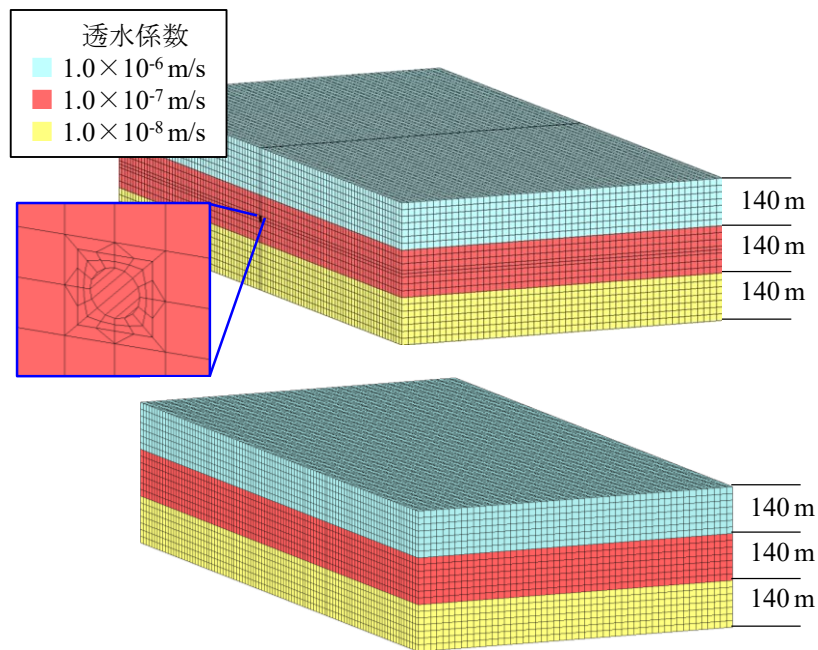


図 3.21 不均質モデル (水平_3層構造)
(上: 通常法, 下: 仮想ドレーンモデル)

地盤の透水係数は、2岩相のケースでは、透水性のコントラストが大きくなる $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ と $1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ を分布させた。3岩相については、 1.0×10^{-6} から1オーダーずつ透水係数が小さくなる設定を行った。

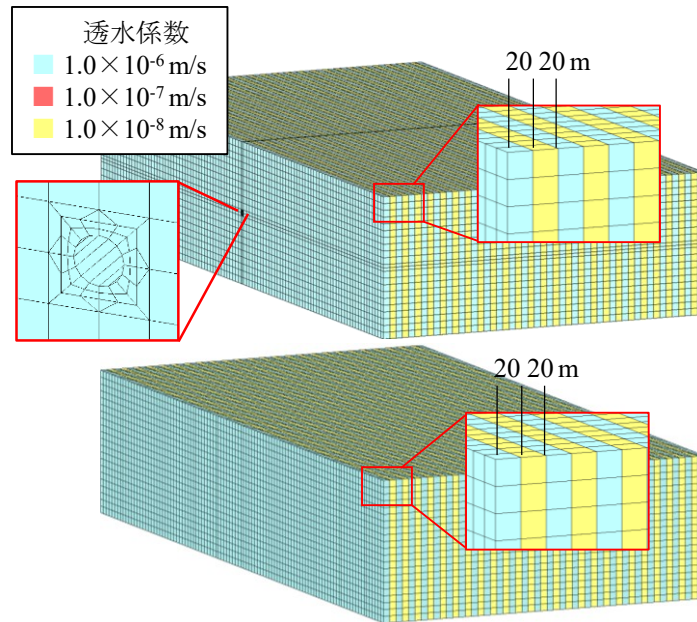


図 3.2.2 不均質モデル (鉛直_五層構造)
(上: 通常法, 下: 仮想ドレーンモデル)

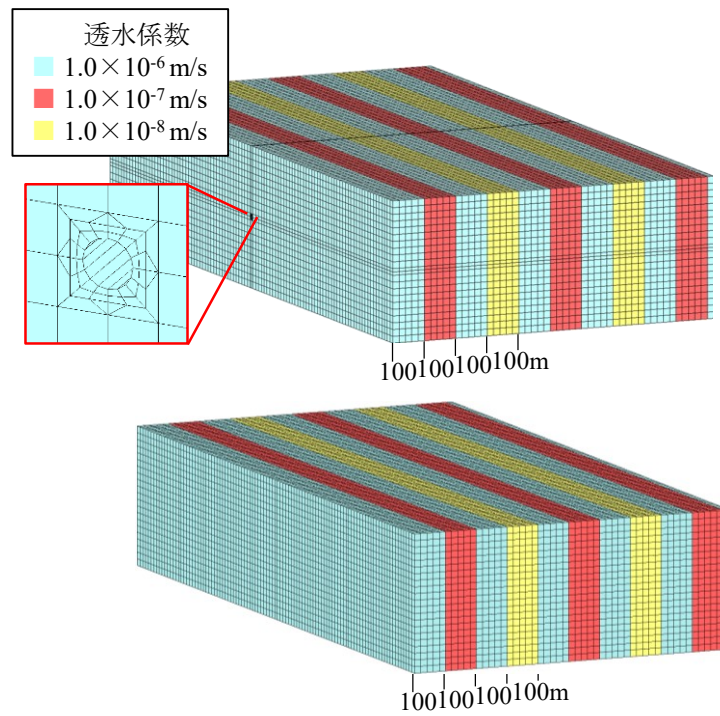


図 3.2.3 不均質モデル (鉛直_3層構造)
(上: 通常法, 下: 仮想ドレーンモデル)

(2) 湧水量と計算時間の比較

表 3.10 に各ケースの掘削完了時の湧水総量を示す。いずれのケースも通常法の結果が仮想ドレーンモデルよりもやや大きく求められた。これは、先に述べたとおり、通常法の掘削表現が影響したと考えられる。しかし、通常法に対する湧水総量の割合は 93% 以上であり、良い近似が得られている。また、計算時間は、表 3.11 に示すように仮想ドレーンモデルの方が早く終了しており、特に通常法で時間を要した鉛直構造の 3 岩相ケースでおよそ 40% と顕著な計算時間の短縮が見られた。水平構造は、掘削断面に対して上下の地層は異なる透水性の地盤であるが、掘削断面は同じ地盤内を進行するのに対し、鉛直構造は掘進方向に透水係数が変化する地層構造となる。これにより、通常法においては、大気開放条件となる掘削断面が透水性の異なる地層に差しかかると、掘進方向前方の水圧変化の速度が変わるため、これが影響して収束性に影響したと推察される。

図 3.24 ~ 図 3.27 に通常法と仮想ドレーンモデルの単位時間当たりの湧水量変化の比較を示す。グラフの上段にモデルの要素区分図を併記した。モデル図の掘削位置と経過時間是对応している。

通常法の解析結果は、進行方向に透水性の変化がない水平構造においても一定の間隔で湧水量が跳ね上がる挙動を示している。これは 2 つの要因が重ね合わさった現象であり、以下に示す①、②のような理由である。

① 要素の切替わり

- 掘削断面が到達した要素 (20m 分) を除外し、除外要素の壁面および切羽面に大気開放条件を設定して 20m の掘削が完了するまでの時間 (4 日間)、この条件を維持した計算しているため、掘削面が差しかかった直後は該当要素で動水勾配が大きくなり、湧水量が増加する。

表 3.10 不均質モデルの掘削完了時の湧水総量 ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$)

	地質構造	通常法	仮想ドレーン	流量比
水平	2 岩相の互層	14.9	14.2	0.95
	3 層構造	9.8	9.3	0.95
鉛直	2 岩相の互層	37.3	34.6	0.93
	3 岩相の互層	44.8	42.3	0.94

表 3.11 不均質モデルの計算時間 (分) の比較

	地質構造	通常法	仮想ドレーン	比
参考	均質モデル	60	34	0.57
水平	2 岩相の互層	35	32	0.91
	3 層構造	39	24	0.62
鉛直	2 岩相の互層	69	33	0.48
	3 岩相の互層	78	29	0.37

② 透水係数の切替わり

- 掘削該当要素周辺の透水係数の変化により湧水形態が変わる。

一方、仮想ドレーンモデルでは、通常法に見られるような要素間での跳ね上がりはなく、水平構造においては、同一地盤内の掘進であることから、掘進距離が増すにつれて湧水量が滑らかに増加する湧水量が求められている（図 3.2 4，図 3.2 5）。これは、前述したように（3.2.2 節）、仮想ドレーンモデルの掘進は、浸透流解析の時間刻みで進行する

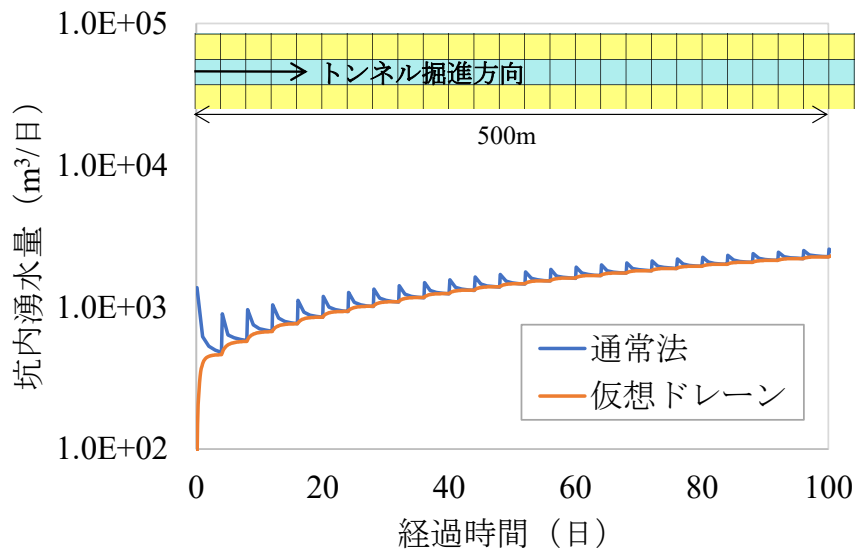


図 3.2 4 不均質モデルと仮想ドレーンモデルの坑内湧水量変化の比較（水平互層）

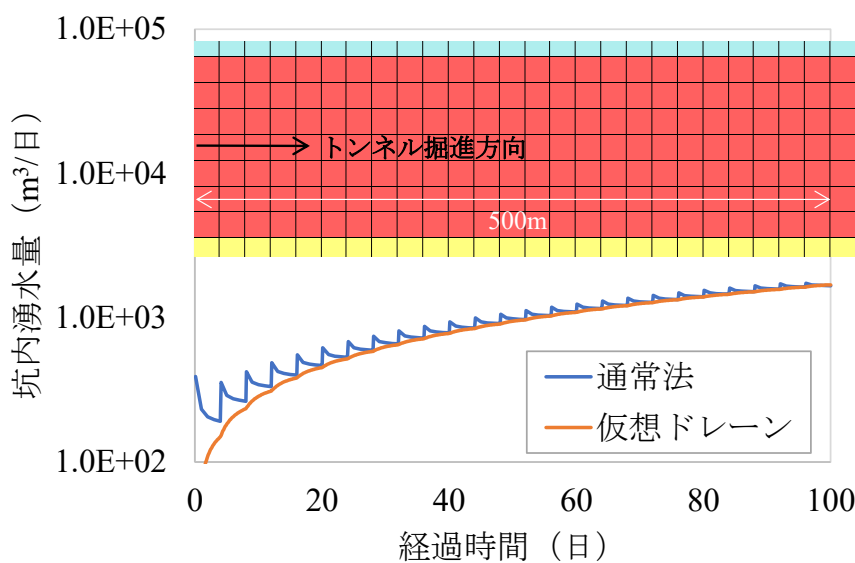


図 3.2 5 不均質モデルと仮想ドレーンモデルの坑内湧水量変化の比較（水平 3 層）

ため、1掘進長が通常法と比べて小さいことが理由である。しかし、いずれのケースにおいても、掘削開始直後を除けば、通常法と仮想ドレーンモデルの経時変化は良い一致を示している。

また、図 3.2 6 や図 3.2 7 に示す鉛直構造のように、トンネルが低透水層から高透水層に差しかけた際に、顕著な湧水量の増加が見られるのは、通常法よりも仮想ドレーンモデルの方がより明瞭とわかる。通常法において透水性の異なる地層にトンネルが入った際の湧水量の変化をとらえる場合、トンネル進行方向のメッシュを細分化する必要がある、

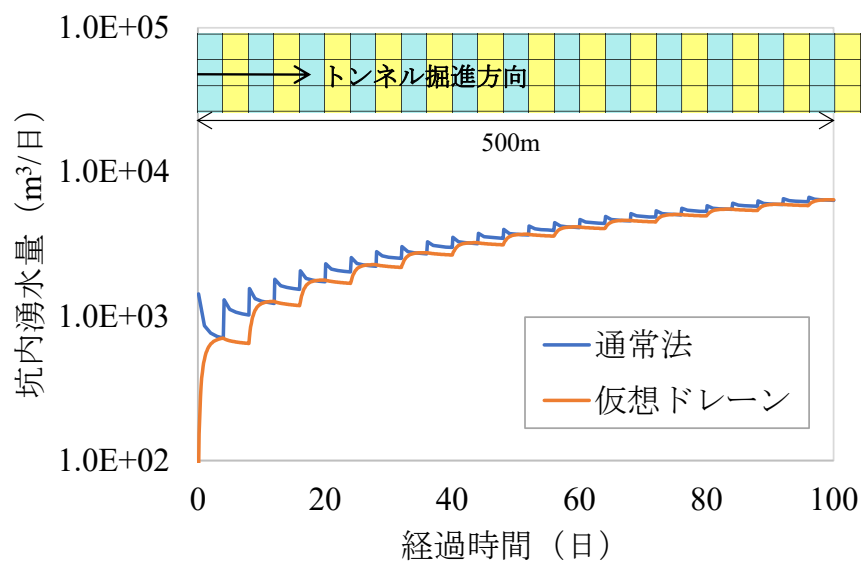


図 3.2 6 不均質モデルと仮想ドレーンモデルの坑内湧水量変化の比較（水平互層）

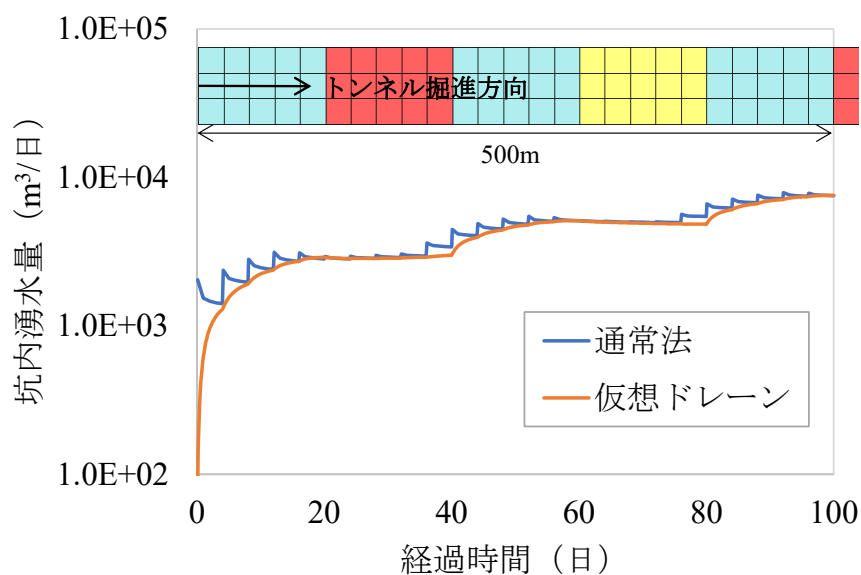


図 3.2 7 不均質モデルと仮想ドレーンモデルの坑内湧水量変化の比較（水平 3 層）

節点数はさらに増加すると考えられる。

このことから、仮想ドレーンモデルは地質構造レベルの不均質性を組み入れた場合でも、通常法で求まる坑内湧水量をよく近似し、トンネル進行方向のメッシュが粗い状態でも透水性の異なる地層に差しかかった際の湧水挙動について、傾向の変化を追従できる手法であることが確認できた。

4. 仮想ドレーンモデルの実用性に関する検討

4.1 譲原地すべり（国土交通省直轄地すべり）

4.1.1 譲原地すべりの概要

譲原地すべりは群馬県南西部の藤岡市に位置（図 4.2）し、標高 200～450m の南向き斜面に分布している。譲原地すべりの平面図を図 4.1 に示す。

指定地面積は約 100ha、東西方向（幅）は約 2,000m、南北方向（奥行き）は約 800m であり、土砂量は約 2,000 万 m³ と想定されている。下久保ダムとつながる神流川に面した地すべり地形であることから、河道閉塞による上流湛水および、河道閉塞決壊による下流への氾濫被害が懸念されている。また、地すべり区域内に複数の集落が存在し、区域内を横断する国道 462 号線は緊急輸送路にも指定されており、地すべり滑動による建設物の経年的な劣化被害も懸念されている。この被害想定に対する地すべり対策として、集水井工 54 基、横ボーリング工 8,250m、排水トンネル工 1,224m からなる抑制工と、シャフト工 29 本、鋼管杭工 573 本、アンカー工 1,114 本からなる抑止工が計画されている。

譲原地すべりは、図 4.1 の中央の破線で示した尾根を境に、下久保ダム側の下久保地区、この東側に栢ヶ舞地区の 2 つの大きな地すべり帯が分布している。本検討は栢ヶ舞地区を対象として検討を実施する。

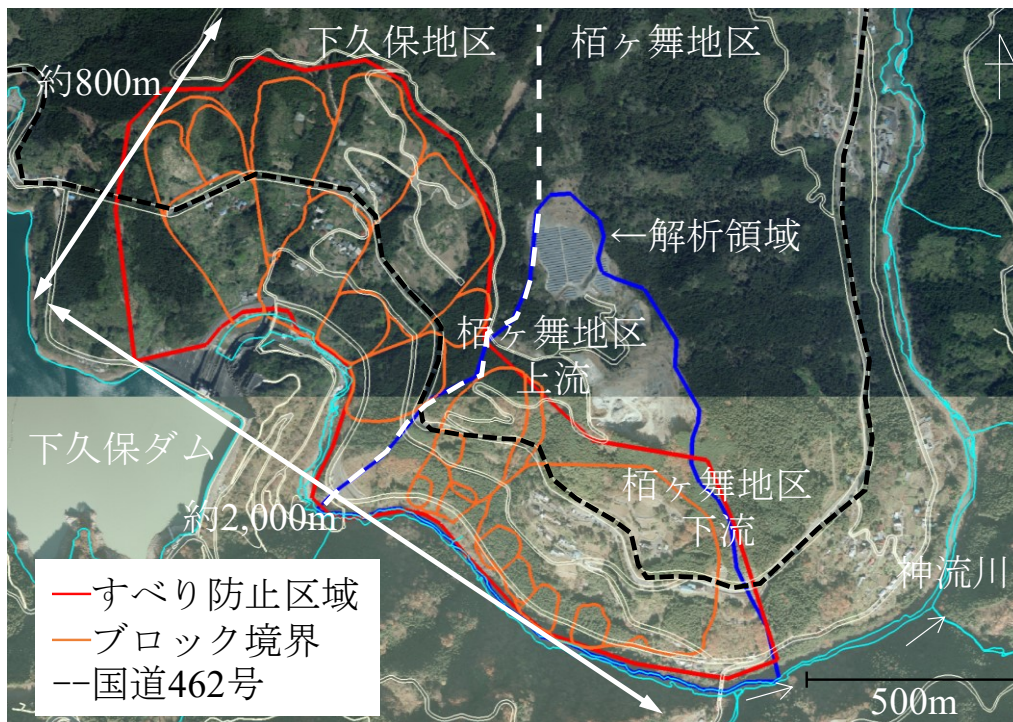


図 4.1 譲原地すべりの平面図

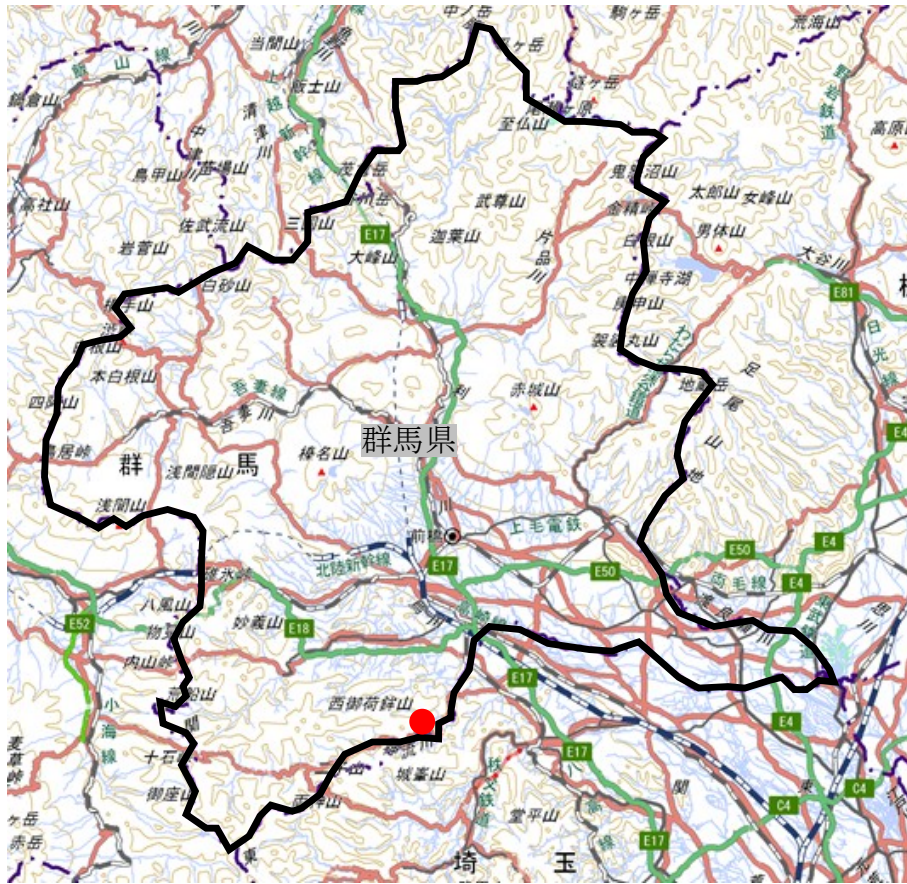


図 4.2 譲原地すべりの位置

4.1.2 譲原地すべりの地質

譲原地すべり周辺の地質分布³⁸⁾は、図 4.3 に示す変成岩が主体であり、三波川帯に属する結晶片岩類（緑色片岩）として解釈されている。本地すべり帯は、層状の構造を持つ変成岩が高圧で破碎されることにより形成したと考えられており、破碎帯地すべりに分類される。

図 4.4 に地質想定断面の平面位置図を示す。同図には解析対象領域内の地質調査ボーリング、水位観測孔の位置も示した。また、図 4.5 に H III, H I, I 測線の地質想定断面データを示す。地層構成は、表層部に崖錐堆積物が分布しており、緑色片岩は風化度合いに応じて3つのタイプに分類されている。表層に近い方から強風化帯(W1)、中風化帯(W2)、未風化部(W3)を基本とする地質層序である。地表から深度 50m は強風化帯の下面に相当し、すべり面はこの深度に分布していると推測されている。



図 4.3 譲原地すべり周辺の広域地質図³⁸⁾

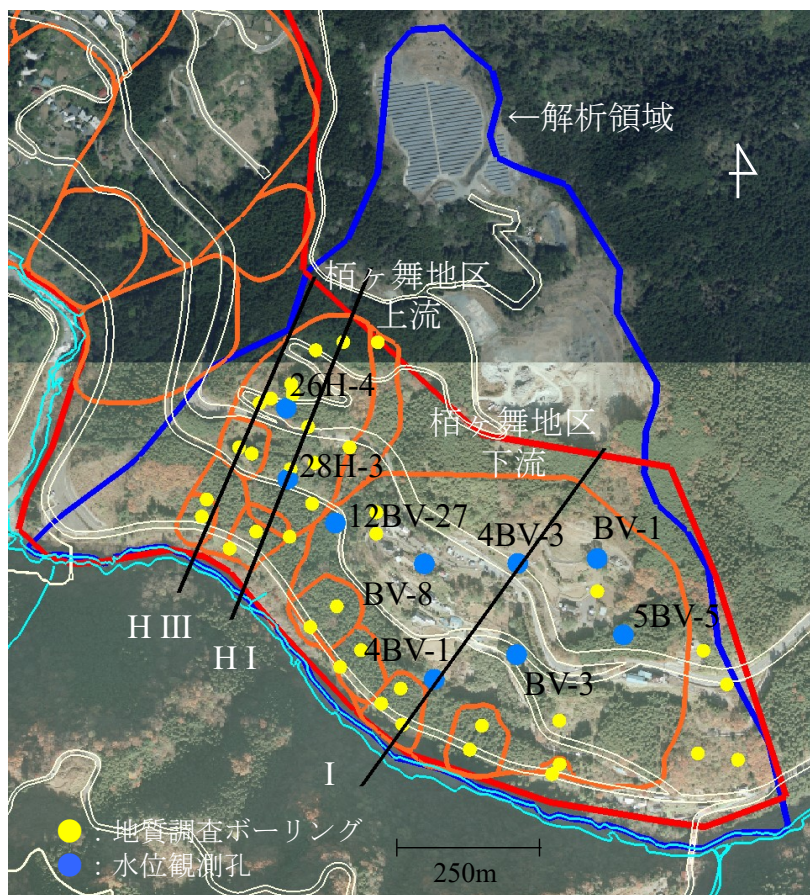


図 4.4 地質想定断面の平面位置図

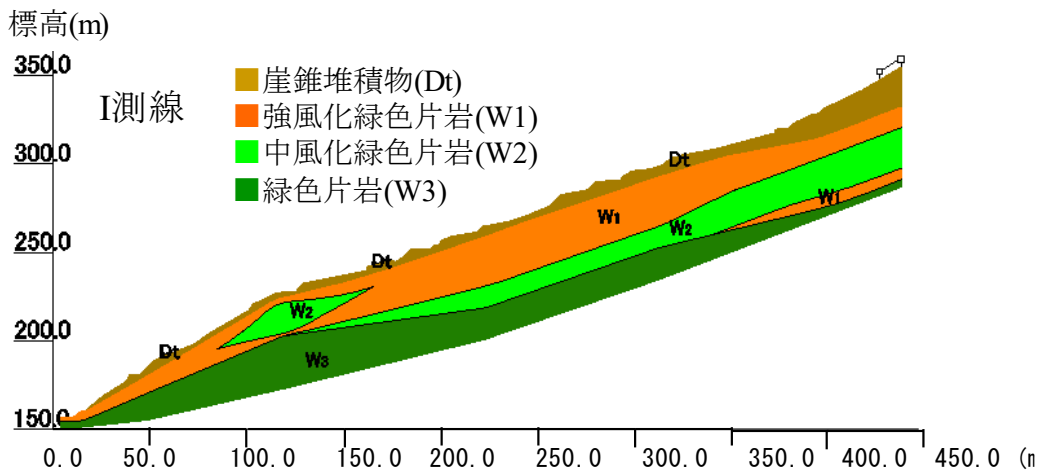
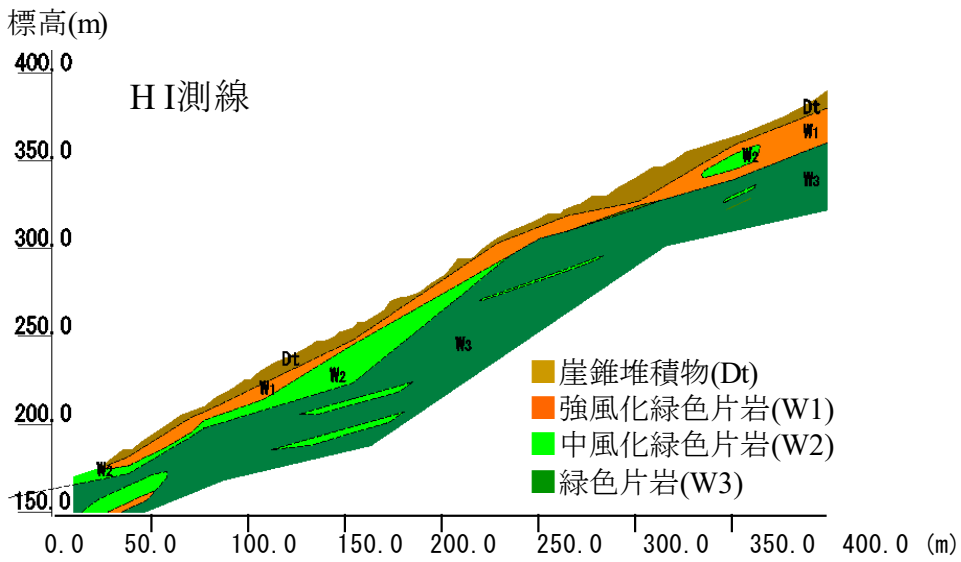
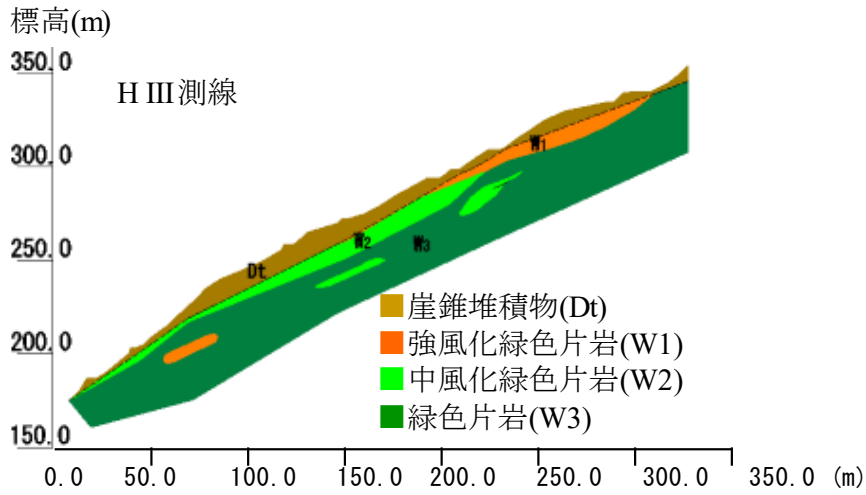


圖 4.5 地質想定断面

4.1.3 検討の流れ

仮想ドレーンモデルを用いた3次元浸透流解析により、譲原地すべりで実施された抑制工を対象に地下水位の低下挙動および排水ボーリングから排水量を求め、これと実測結果を比較した。検討方針は「有限要素法による地すべり解析」³⁹⁾で述べられている流れを参考に、以下の順序で実施した。

- ① 調査・観測データの整理と解析実施計画
- ② 解析モデルの構築
- ③ 水位再現結果による透水特性の推定
- ④ 排水量再現結果による抑制工の排水特性の推定
- ⑤ 抑制工効果の可視化

まず、譲原地すべりの対策工の経緯を整理する。

譲原地すべりは、1991年頃より、集中豪雨によって地すべりが活発化したことを受けて、群馬県により1992年に集水井工および横ボーリング工による排水対策が実施された。その後、1995年に直轄地すべりとして国土交通省により対策事業として継続された。対策事業は大きく4つのステージ（期間）に分けることができ、以下のような建設履歴として整理できる。

期間①：対策工の効果が現れる以前（1993年以前）

期間②：群馬県による抑制工（集水井工①，横ボーリング①）（1993～1996年）

期間③：国土交通省による抑制工（集水井工②，横ボーリング②）（1996～2001年）

期間④：国土交通省による1号および2号排水トンネル（2001年～現在）

各期間の抑制工の位置と増設状況は、図4.6に示すとおりである。各期間で増設された抑制工または排水トンネルは赤色で示した。

観測水位データの例として、BV-1孔の水位変化と、図4.6に示した対策工の建設期間を加えた図を図4.7に示す。ここで、BV-1孔は、栢ヶ舞地区下流ブロックの上部に位置する観測孔であり（図4.4）、対策工の建設によって基底水位の低下が顕著に現れている観測孔の1つである。

ここで、BV-1孔の水位変化からは、次のような特徴が見て取れる。

期間①（対策以前）においては、水位標高は、およそ300m付近に分布していたと考えられるが、期間②では1994年に水位標高280m付近まで基底水位が低下した。期間③は顕著な水位低下は示さなかったが、期間④では2005年に水位標高270m付近まで基底水位が低下した。

期間②における水位低下に関しては、群馬県による抑制工（集水井工14箇所，横ボーリング9箇所）の効果と考えられ、期間④の水位低下は、1号および2号排水トンネルか

らの排水ボーリング（17箇所）の効果と推察される。期間③に顕著な水位低下効果が現れなかったのは、栢ヶ舞地区の上流地区（図 4.4 参照）を重点的に対策が行われており、BV-1 孔とは距離が離れていることが要因と考えられる。

このように、BV-1 孔に見られた対策工による効果を、BV-1 孔以外の観測孔についても

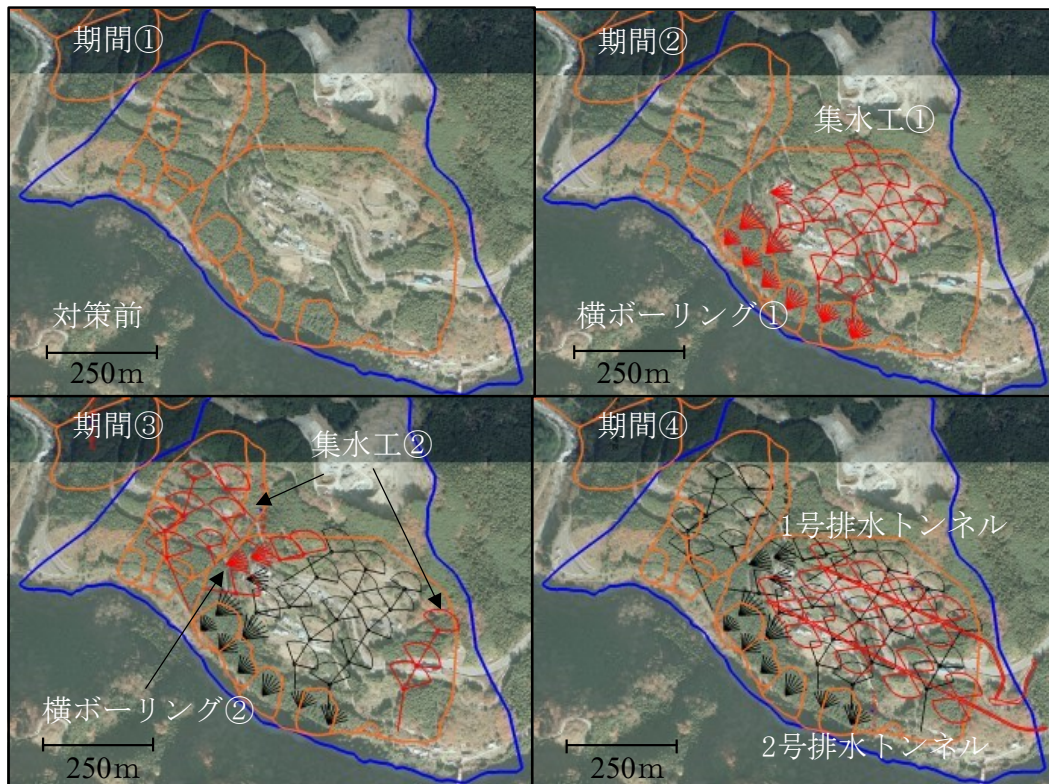


図 4.6 期間ごとの抑制工の増設

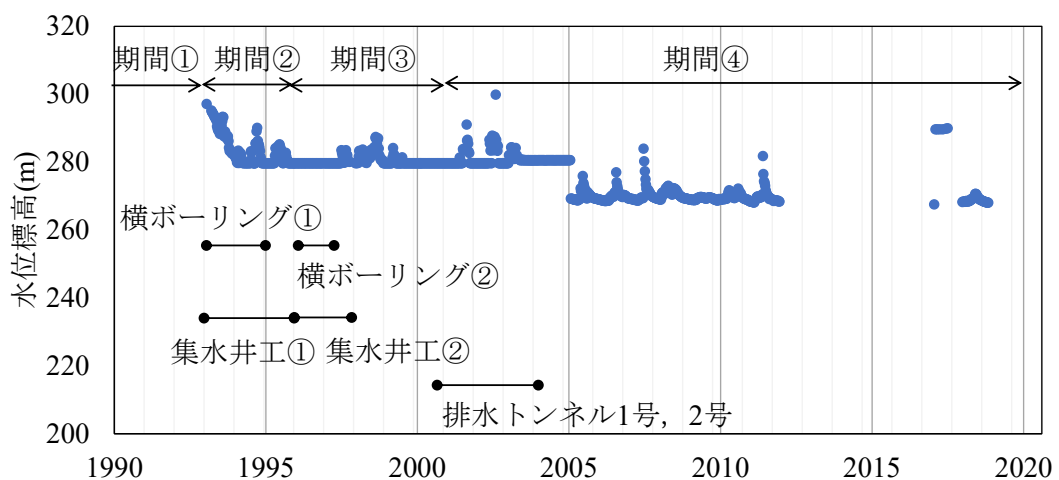


図 4.7 観測データの一例 (BV-1)

期間ごとの水位低下量や抑制工からの排水量に関してデータ整理を行い、仮想ドレーンモデルによる再現性を確認する。まず、対策前（期間①）の水位観測データを用いて、先述した検討の流れ③水位再現結果による透水特性の推定を実施して、地盤の透水係数を最適化するとともに、④排水特性の推定に関して排水量の実測データと仮想ドレーンモデルによる排水量の算出結果との比較を行う。最後に、⑤対策効果の面的な影響範囲について可視化を行う。

なお、解析は3次元飽和-不飽和浸透流解析の定常解析により行った。定常解析を選定した理由は、抑制工ごとの工事着工日は記録があるが、排水ボーリングとして機能を開始した日は特定できなかったため、対策検討の開始となる期間②から経過日数が具体的に設定できなかったことが要因である。

4.1.4 解析モデルの構築

(1) 解析範囲の選定および3次元地質構造モデルの構築

観測地下水位の再現解析は、図4.1に示した栢ヶ舞地区（上流・下流）の地すべり帯を対象として実施した。

解析対象領域は、地形から水理境界を判読する方法⁴⁰⁾に従い、領域南側は神流川を境界として選定し、山体については尾根や沢筋といった分水界を地形データから読み取って境界とした。図4.8に、選定した解析対象領域を示す。尾根や河川位置が分かるように地形コンター上に表示した。なお、図4.1および、図4.4の図中にも前述の考えで選定

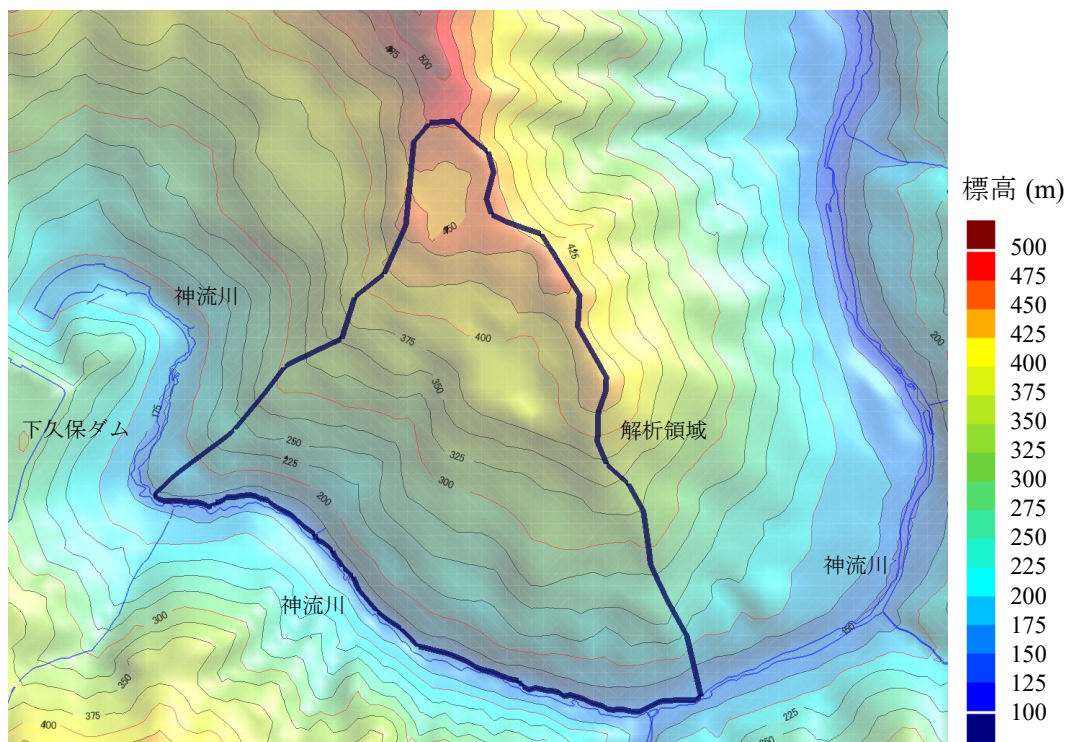


図 4.8 地形図と解析領域

した解析領域を示している。

栢ヶ舞地区内における3次元地質構造モデルは、図4.5に示した3測線の地質想定断面(H III, H I, I測線)と、ボーリングデータ(38箇所)を既知データとし、3次元地質推定手法として広く用いられているBS Horizon^{41),42)}により、解析対象領域を包含するような範囲を推定範囲として選定し、各風化度合いに応じた結晶片岩および崖錐堆積物に対する地質境界面の推定を行った。この時、各地質想定断面(図4.5)の各測線に見られる緑色片岩中にレンズ状に点在している別の風化区分に関しては、各測線のみを示されている特有の構造であったため、3次元的な拡がりや推定できないことから推定対象から除外した。

図4.9に推定された3次元地質構造モデルを示し、図4.10に各測線位置(H III, H I, I測線)と同位置の地質切断面を示す。図中の破線は、図4.5の地質想定断面データの範囲を示している。推定された3次元地質構造モデルと、図4.5に示した各地質想定断面を比較すると、よく再現していることがわかる。

なお、3次元地質構造モデルの推定および、後述する有限要素モデルの構築には、3次元統合可視化ソフトウェアGeo-Graphia⁴³⁾を用いた。

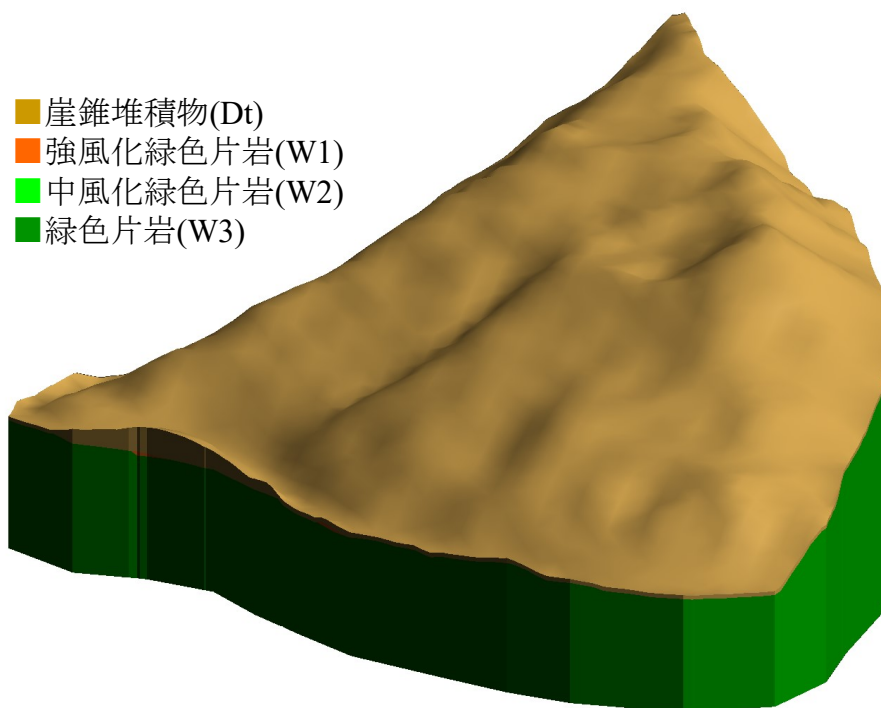
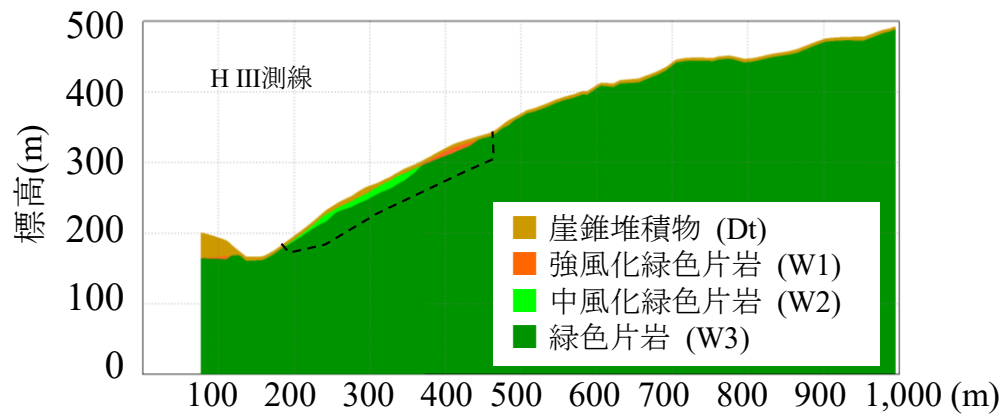
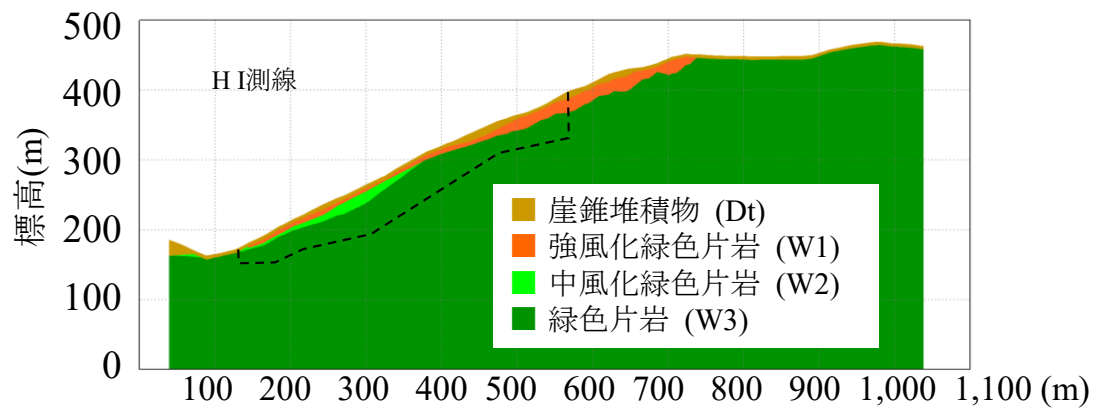


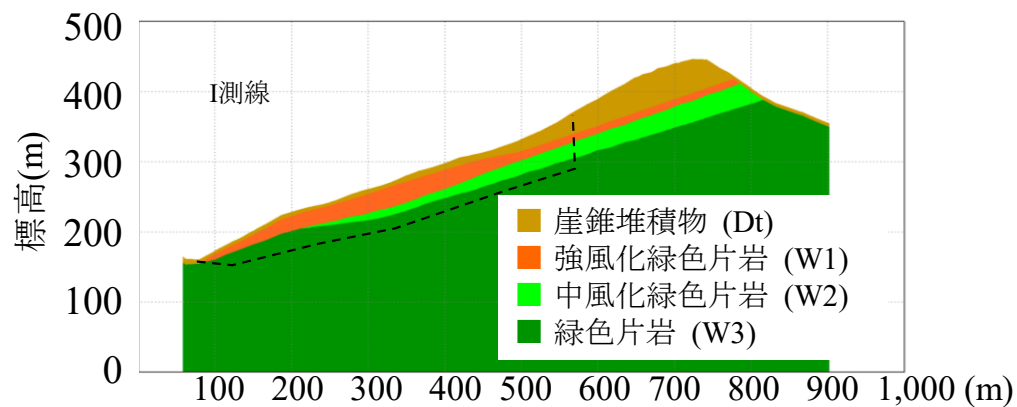
図 4.9 推定された3次元地質構造モデル



a) H III 測線



b) H I 測線



c) I 測線

図 4.10 地質測線断面における地質構造 (切断面表示)

(2) 有限要素モデルと境界条件

要素分割は計算効率に留意して次のように行った。平面的な要素分割では、すべりブロック内を一辺 5m 程度の密なメッシュに、それより外側を粗いメッシュで構築し、最大で一辺 50m 程度とした。また、鉛直方向については、表層～強風化帯は、水位変動が大きいことを念頭に、高さ 0.5m 程度の密なメッシュとし、未風化部(W3)は最大 100m 程度の粗いメッシュ分割とした。

上記のような考えで構築した 3 次元有限要素メッシュと、3 次元地質構造モデルと対比し、要素中心座標が該当する地盤材料を割当て各要素の材料分布を構築した。

構築した 3 次元有限要素メッシュを図 4.1 1 に示す。構築したメッシュの総節点数は 249,860、総要素数は 238,564 である。

ここで、神流川付近の山体低地部は、地すべりの小ブロック帯が点在していることから(図 4.1)、崖錐堆積物に割当てられた要素を「表層土」という名称で区分し、異なる水理地質構造として扱うこととした。

境界条件は、神流川にあたる節点に対し、圧力水頭 0m を設定し、モデル側面は非排水境界とした。また、地表面に対しては降雨設定を行った。降雨量は、図 4.1 2 に示した 1992 年 1 月 1 日～2019 年 3 月 19 日までの現地観測データから日平均雨量 (3.2mm/日) を算出して、後述する降雨浸透率を乗じて降雨涵養量を設定した。

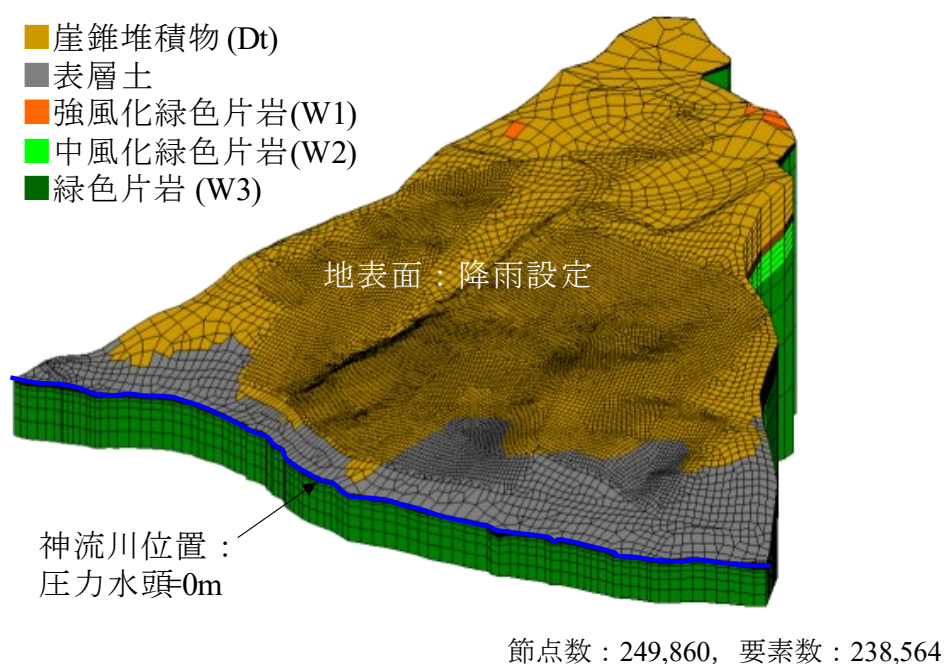


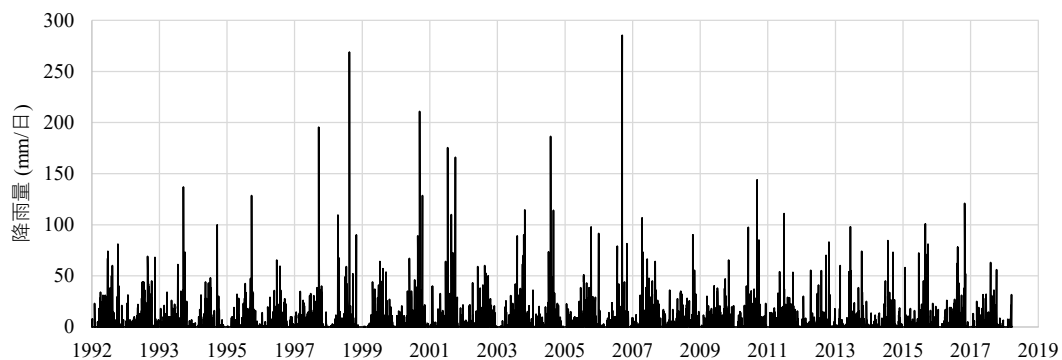
図 4.1 1 3 次元有限要素メッシュ

降雨浸透率は、洪水のピーク流量を推算するための簡便な方法である合理式法⁴⁴⁾に用いられる流出係数を参考にした。具体的には降雨量のうち、地下に浸透する比率は、流出に対する余事象と考えて、「降雨浸透率=1.0-流出係数」として求めた。

表 4.1 に示した地形の状況に対応した流出係数の一覧から、讓原地すべり地は、「急峻な山地」、「起伏のある土地および樹林」、「山地河川」のいずれかの状態が近く、流出係数の候補を 0.5~0.9 (降雨浸透率 0.1~0.5) の範囲とした。この範囲のうち、観測水位および抑制工からの排水量を良好に再現した降雨浸透率 0.4 を採用した。

抑制工に関しては、仮想ドレーンモデルを適用するため、ボーリング孔の位置や長さ、径を設定すればよく、メッシュ化は必要ない。したがって、設計図面から集水井工、排水トンネルからの排水ボーリング、横ボーリング工の位置と孔径情報を収集して、仮想ドレーンモデルの設定を行った。設定した排水ボーリングの総数は、期間④で約 1,500 本にも及ぶ。

検証解析モデルのように、均質な地盤中に一基の集水井工をモデル化する場合とは異なり、地層が複雑に入り組むモデルの中に排水ボーリング 1,500 本の形状を通常法で示した方法のように形状を忠実にメッシュに反映することは現実的ではない。仮想ドレーンモデルは、個々の排水ボーリングの存在を解析モデルに容易に反映できることが利点である。



* 1992/1/1~2019/3/19

図 4.1.2 降雨量の現地観測データ

表 4.1 日本内地河川の流出係数

急峻な山地	0.75~0.90
三紀層山岳	0.70~0.80
起伏のある土地および樹林	0.50~0.75
平坦な耕地	0.45~0.60
かんがい中の水田	0.70~0.80
山地河川	0.75~0.85
平地小河川	0.45~0.75
流域の半ば以上が平地である大河川	0.50~0.75

4.1.5 水位再現結果

水位再現解析に用いる各地盤の透水係数は、原位置における透水試験データがなかったことから、図 4.1 3 に示す結晶片岩の既往文献⁴⁵⁾を参考にして概略値を定めた。この範囲に基づき、各期間別の実施した定常解析により得られた地下水位と、同期間に得られた全ての観測水位の相関性をもとに、繰り返し試行により最適値を求めた。表 4.2 に、各地盤の透水係数の最適値を示す。強風化部(W1)および、中風化部(W2)の透水係数は、図 4.1 3 で頻度の高かった $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ の範囲に同定された。また、未風化部(W3)も頻度分布から逸脱しない範囲で同定された。

図 4.1 4 に観測水位と解析による地下水位標高の比較を示す。ここで、観測水位は期間①については期間平均（1993 年以前の全データの平均）とし、期間②～④は、排水ボーリングが基底水位に与える効果が収束したと認められる期間の平均とした。なお、各期間の観測地点数は、期間①は 15 地点、期間②は 24 地点、期間③は 47 地点、期間④は 73 地点である。

観測水位と解析結果の関係から、線形近似による決定係数 R^2 を求め、各期間の相関性

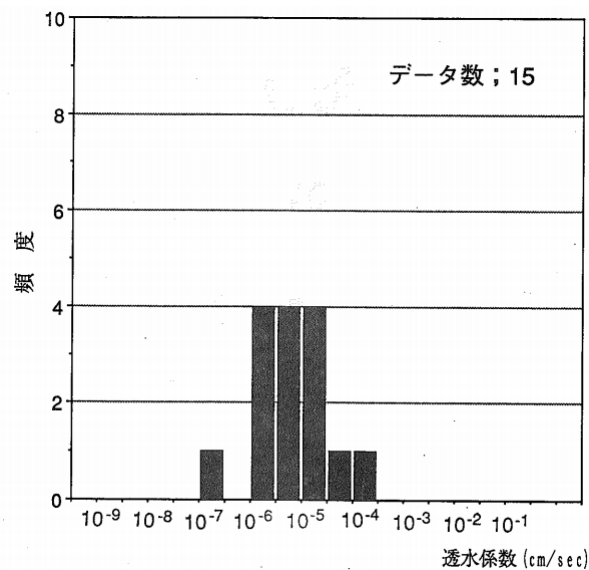


図 4.1 3 結晶片岩類の透水係数データ

表 4.2 解析に適用した透水係数

地盤	透水係数(m/s)
緑色片岩未風化部(W3)	5.0×10^{-9}
中風化緑色片岩(W2)	2.0×10^{-8}
強風化緑色片岩(W1)	2.0×10^{-7}
崖錐堆積物(Dt)	5.0×10^{-7}
表層土	5.0×10^{-6}

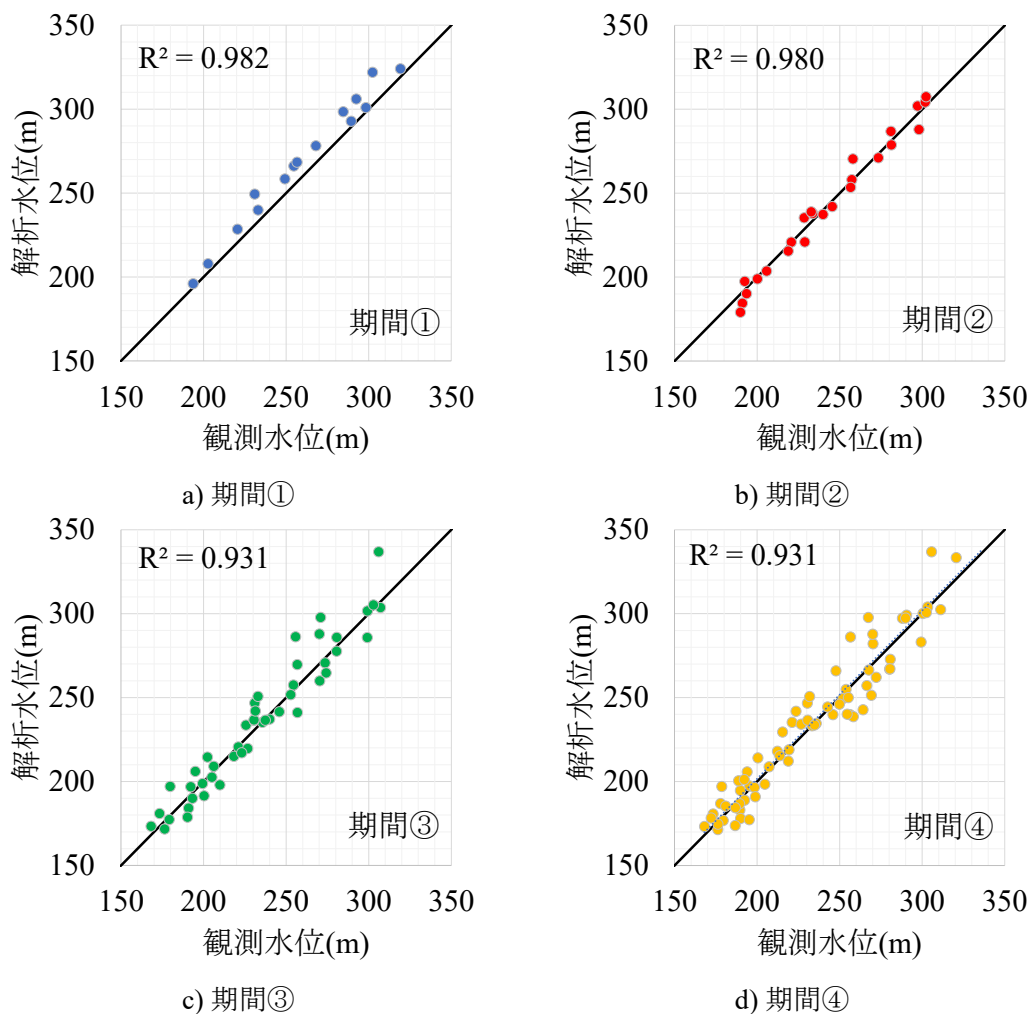


図 4.14 平均化した観測水位と解析結果の比較

を評価した。決定係数 R^2 は、期間①では 0.982 であり、観測地点数が増加するにしたがってわずかに小さくなる傾向を示し、期間④で 0.931 となった。期間が経過するにつれて、決定係数は低下したが、いずれの期間においても観測水位と解析結果には高い相関性があると評価できることから、抑制工による基底水位の低下影響を含めて、山体上部から低地部にかけての対象地域の水位分布が、解析により良好に再現されていることがわかる。

しかし、個々に観測水位と解析結果を対比すると、期間③や期間④では水位の差が 30m 前後と大きい観測孔も見られ、これが期間①からの決定係数 R^2 の低下要因となったと考えられる。この理由としては、地質構造モデルの構築でレンズ状の風化区分を対象から外したように、地質が同じ分類であっても透水性は一樣ではなく、解析モデルの水理地質構造では、局所的な地質分布を反映できていないことが要因の一つとして考えられる。これを是正するためには、局所的な水理地質構造を設定するなどのモデル更新により、再現性の向上を図ることなどが考えられる。

次に、図 4.15 に示した観測孔に対し、各期間の定常解析で得られた解析水位と、観

測水位の経時変化を重ねた結果を図 4.16～図 4.24 に示す。定常解析結果の水位は各期間では一定の値として横線で示し、時系列的に整理した。なお、比較対象にした観測孔は、すべりブロック内全体を俯瞰するために、73 地点の観測水位データの中から位置の偏りが無いよう配慮して選定した。

抑制工が最新状態となる期間④の水位に注目すると、BV-1 および BV-8 を除く観測孔において、観測水位との良好な一致が見られる。栢ヶ舞地区下流ブロックでは、期間②に BV-8、4BV-1、4BV-3、5BV-5、BV-3 が 10～20m 程度の大きな水位低下を示しているが、これは期間②に集水井工が 14 基建設された影響であり、解析結果も同程度の水位低下が再現されている。

4BV-1、4BV-3、5BV-5、BV-3 については、期間③や期間④における水位低下についても良い再現性を示した。他方、BV-1 の解析結果の水位標高は、観測水位と比べて期間①～③では 5～10m 程度高く求められている。また、期間④の排水ボーリングによる水位低下量も小さく、BV-1 近傍の水理地質構造の見直しが必要と考えられる。

26H-4、28H-3 および 12BV-27 に注目すると、水位観測の開始が期間④に含まれるため、全抑制工の建設が完了し、基底水位の低下が収束した後の水位標高が計測されているが、これらは解析結果と良く一致している。このことは、浸透流解析の設定条件と解析結果から過去の水位低下の変遷を推測することができることを示している。例えば、栢ヶ舞地区上流ブロックにある 26H-4、28H-3 は、解析結果を見ると期間②に下流ブロックで実施された集水井工①（図 4.6）の影響を受けておらず、期間③で上流ブロック内に建設された集水井工②（図 4.6）の影響を受けて水位が低下したことがわかる。また、期間④の

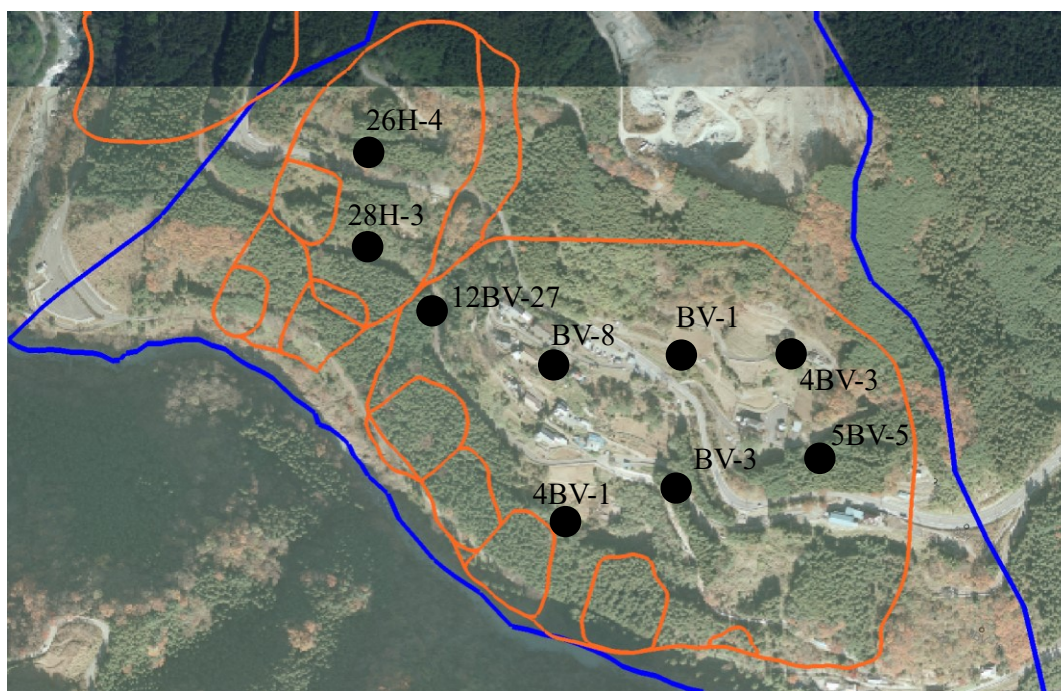


図 4.15 比較対象とした観測孔位置図

排水トンネルの影響を受けていない。このように、現在の状態と整合する解析結果を得ることで、観測データのない箇所過去の水位分布を推測し、抑制工が効果した範囲について考察できることは、建設した抑制工の妥当性を説明する一資料として解析結果が活用できることを示唆している。

以上のように、仮想ドレーンモデルを用いることで、総数 1,500 本にもなる排水ボーリングをメッシュ化せずとも、水位の低下影響を求めることができ、抑制工の建設履歴の各段階に追隨した解析結果を得ることができることがわかった。

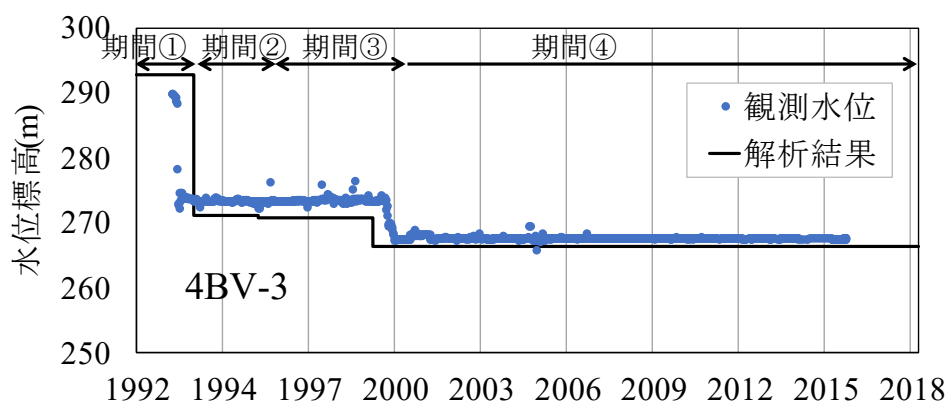


図 4.16 各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (4BV-3)

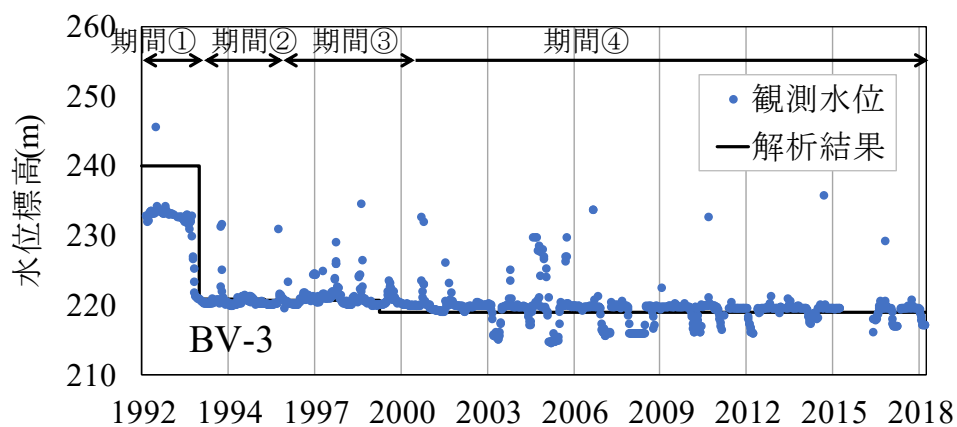


図 4.17 各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (BV-3)

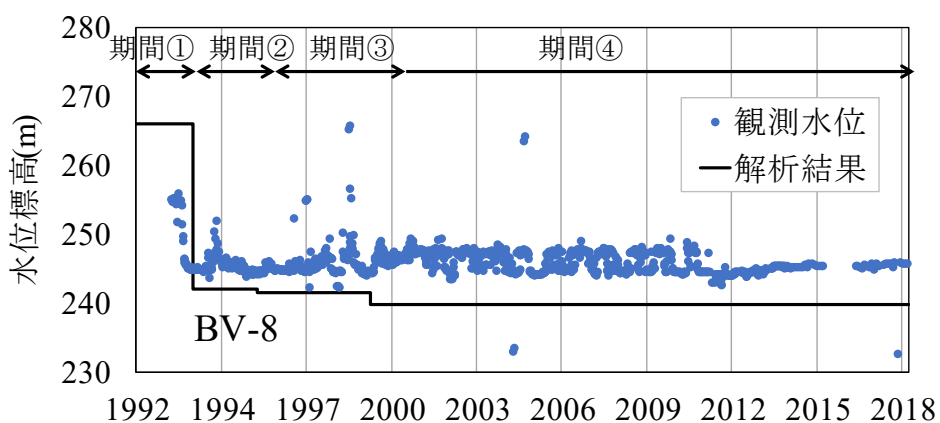


図 4.18 各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (BV-8)

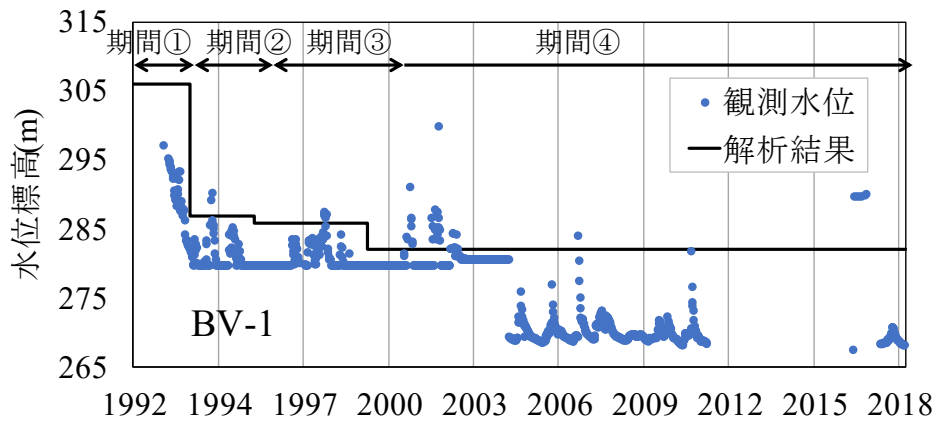


図 4.19 各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (BV-1)

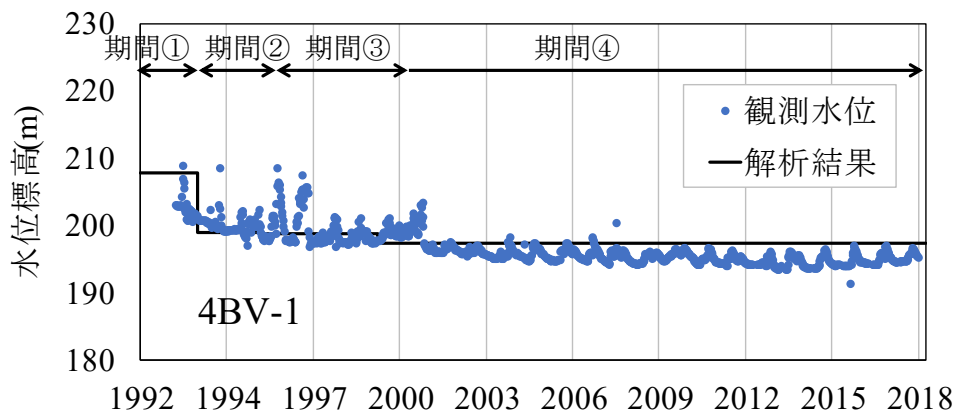


図 4.20 各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (4BV-1)

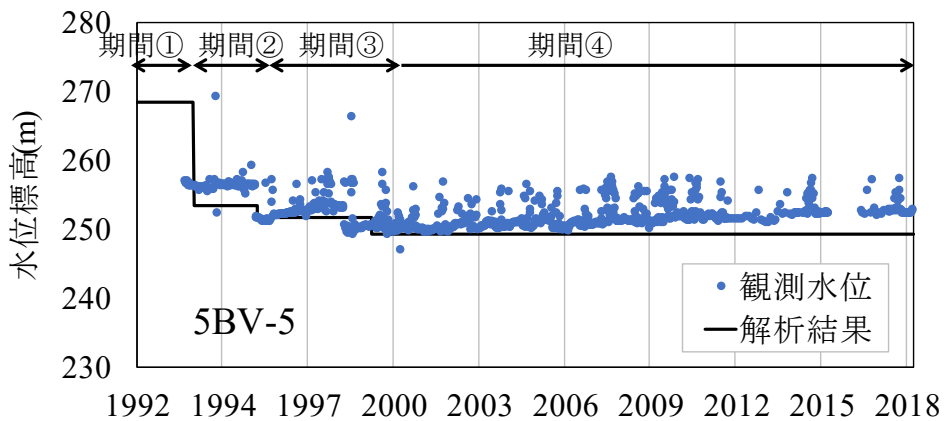


図 4.21 各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (5BV-5)

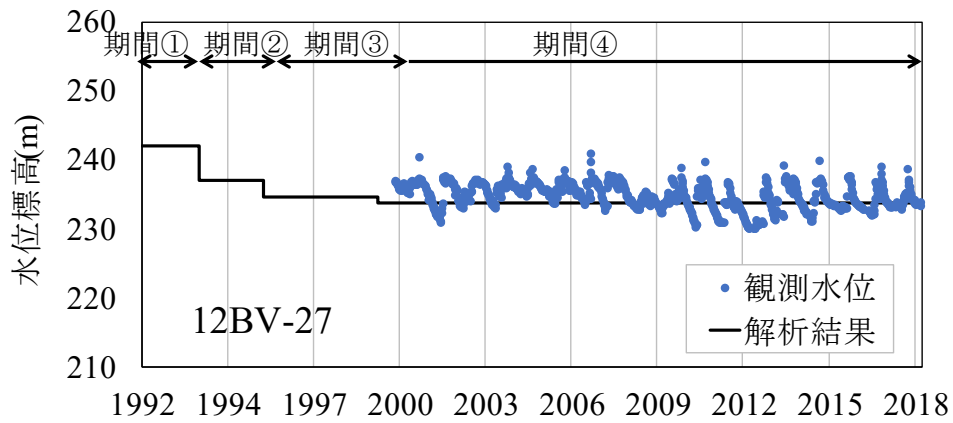


図 4.2.2 各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (12BV-27)

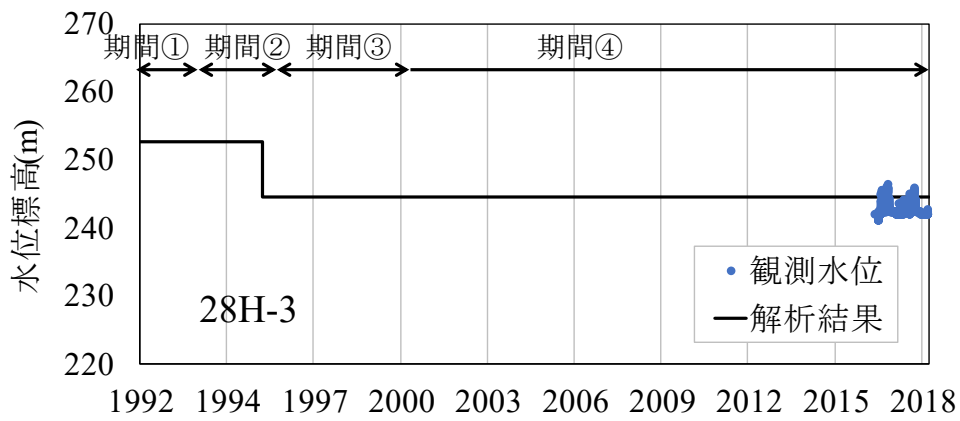


図 4.2.3 各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (28H-3)

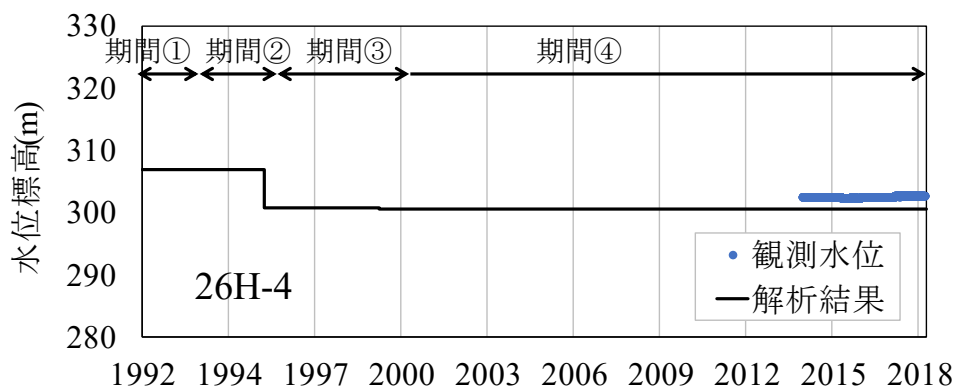


図 4.2.4 各期間の定常解析結果と観測水位の重ね合わせ (26H-4)

4.1.6 排水ボーリングからの排水量

観測水位に続いて、仮想ドレーンモデルで求めた排水量と実測値の比較を行った。なお、排水量の比較は全ての抑制工が稼働している期間④について実施し、期間④の平均排水量を求めて実測値とした。図 4.2 5 に実測の平均排水量と解析結果の比較を示す。ここで、仮想ドレーンモデルにより算出された排水量は、各抑制工に関連する排水ボーリングからの排水量の和を取った（扇状に配置された排水ボーリング 10~12 本の和）。抑制工ごとの排水量で比較を行うと、解析結果が実測を大きく上回る値を示した箇所があり、決定係数 R^2 も 0.358 と低い値となった。

これは、観測水位と解析水位の比較でも見られた傾向であるが、局所的な水理地質構造のモデル化が不十分であることが原因の一つと考えられる。そこで、図 4.2 6 に示すように、上流から神流川方向へ抑制工の流量の集積範囲を設定し、集積範囲ごとに流量を集計した。集積範囲の設定は、譲原地すべりの地下水流れは山体上位から神流川へ地形なりに流下する移行経路であることを念頭に行った。図 4.2 7 に、集積範囲ごとに排水量を整理し直した結果を示す。実測排水量と解析結果は、決定係数 R^2 は 0.949 と高い相関を示していることがわかる。また、全ての抑制工からの排水総量を算出すると、実測が $163\text{m}^3/\text{日}$ に対し、解析結果は $183\text{m}^3/\text{日}$ であり、総量としては良い一致を示している。つまり、今回実施した 3 次元浸透流解析では局所的な水理地質構造の反映が不十分であった

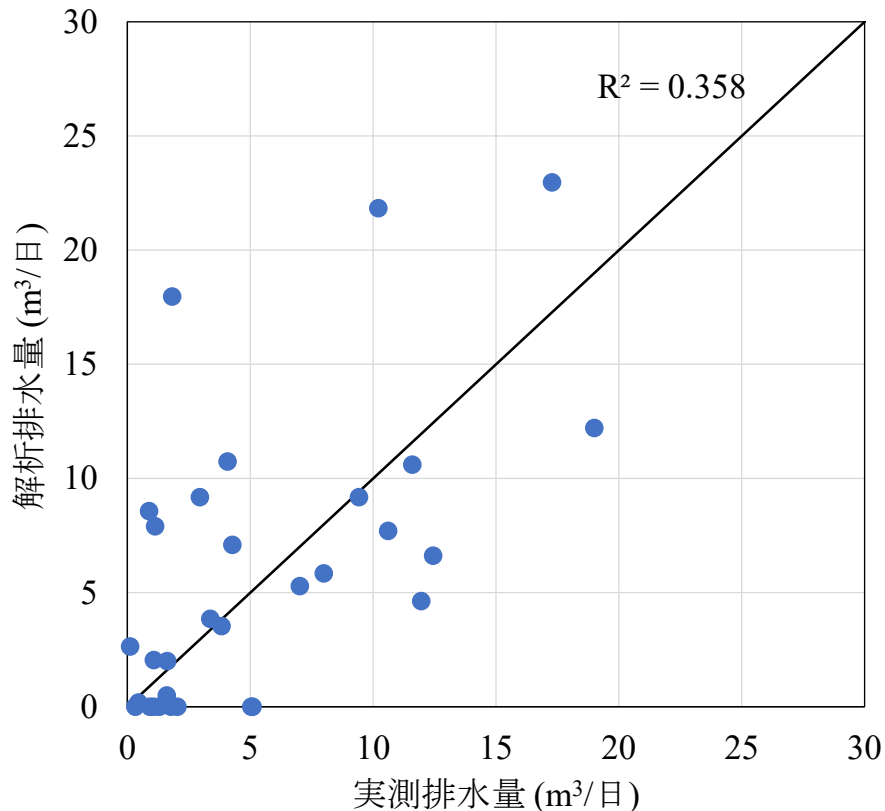


図 4.2 5 各抑制工からの実測の平均排水量と解析結果の比較

ため、抑制工単体での評価に対する再現精度は低かったが、地すべり面全体で評価した場合においては排水量を再現できたと言える。

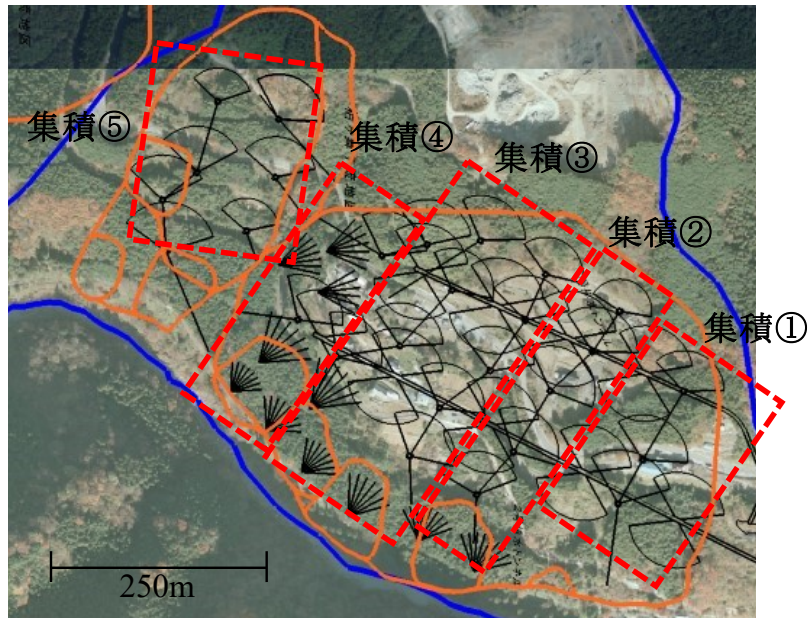


図 4.26 排水量の集積範囲の指定

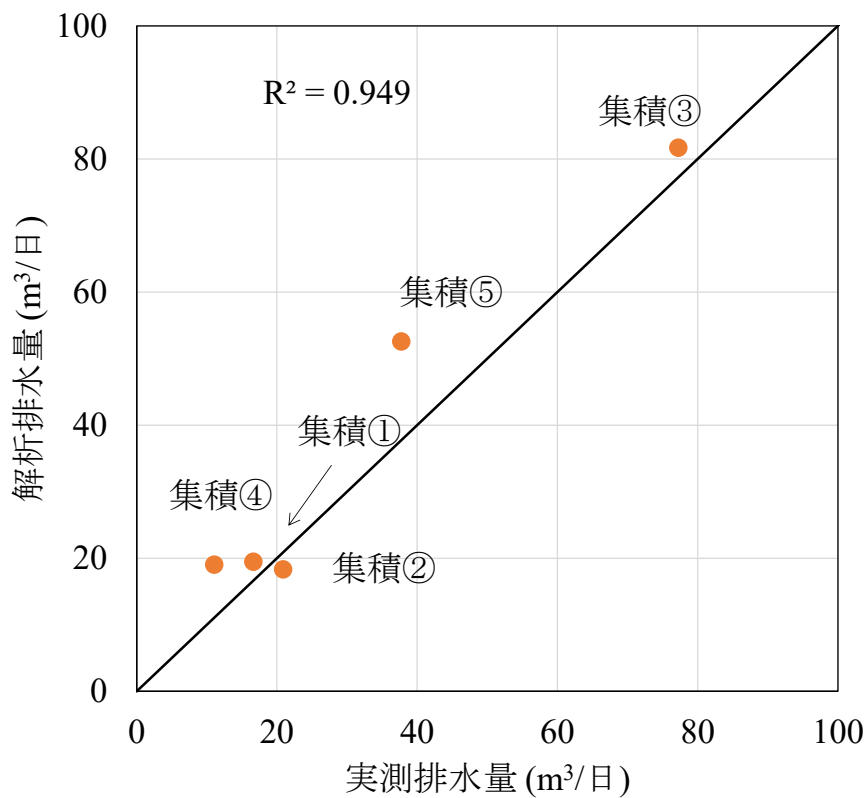


図 4.27 集積範囲ごとの実測の平均排水量と解析結果の比較

4.1.7 抑制工効果の可視化

3次元浸透流解析を実施するメリットには、抑制工による地下水位の低下効果を定量的に、かつ、3次元的に可視化できることが挙げられる。図4.28には、各期間の地下水位の低下量を対策前である期間①との差分で示した。期間②では、栢ヶ舞地区下流ブロックに建設された集水井工14基の影響でブロック内を広く範囲に水位低下が起きている。ただし、上流ブロックにはこの影響はまだ達していない。期間③では、上流ブロックを対象として集水井工が7基建設され、上流ブロックの水位が低下した。図4.29に示す前期間に対する各期間の地下水位の低下量よりその傾向がはっきりと示されている。しかし、下流ブロックほどの低下効果は示されていない。期間④では、排水トンネルからの排水ボーリングの効果により、下流ブロックの水位低下がより顕著となり、期間①から最大で40m程度の水位低下が示されている。期間③からは15m程度の低下量であったことが図4.29からわかる。このように、3次元浸透流解析を用いることで、対策工の効果の影響範囲を可視化し、目標の水位低下量の達成度などの確認に役立てることができる。

さらに本調査地のように1,500本もの排水ボーリングがある地区では、通常法では解析モデルを構築することは現実的ではないが、仮想ドレーンモデルを用いることで効果の影響範囲を可視化できる。

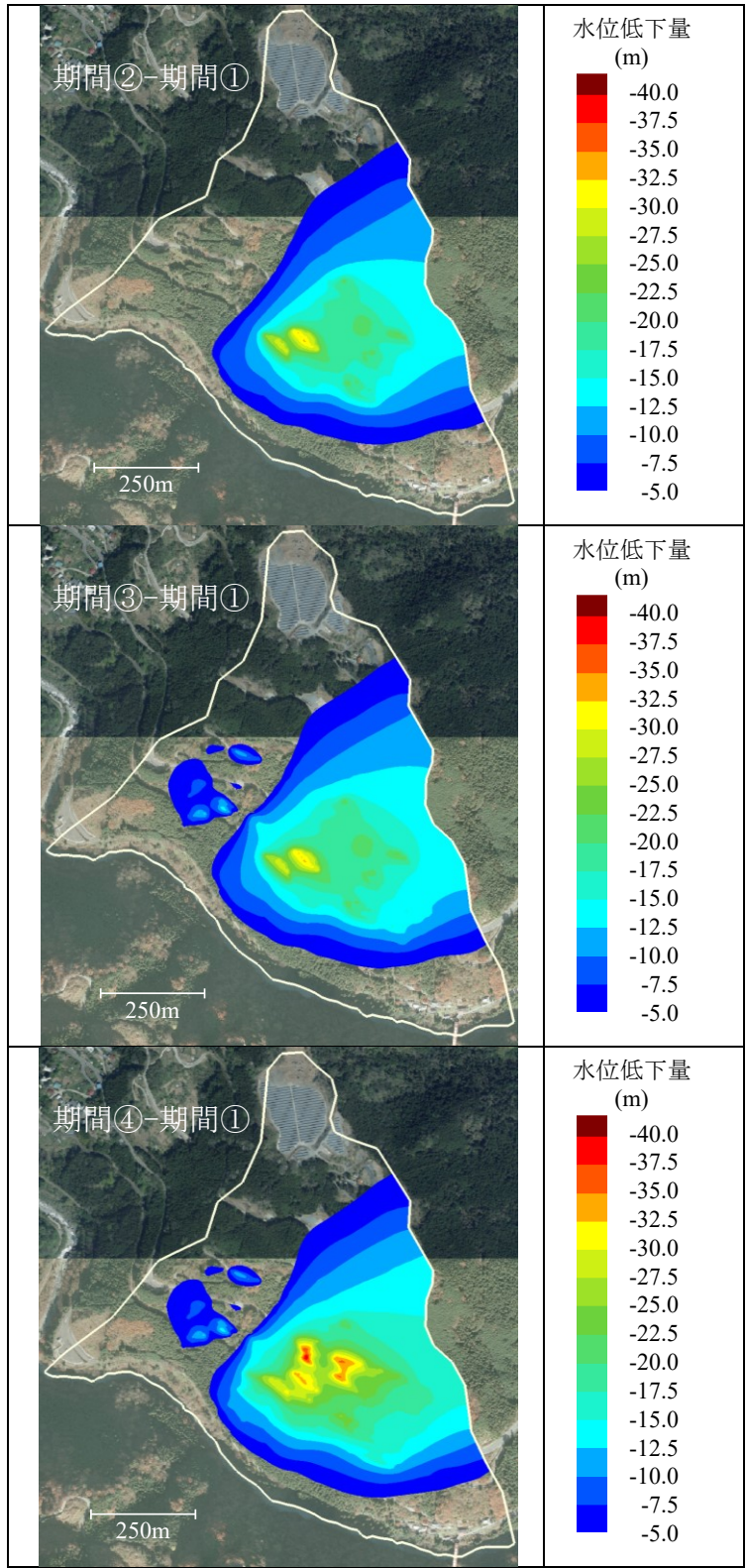


図 4. 2 8 期間①に対する各期間の地下水位の低下量

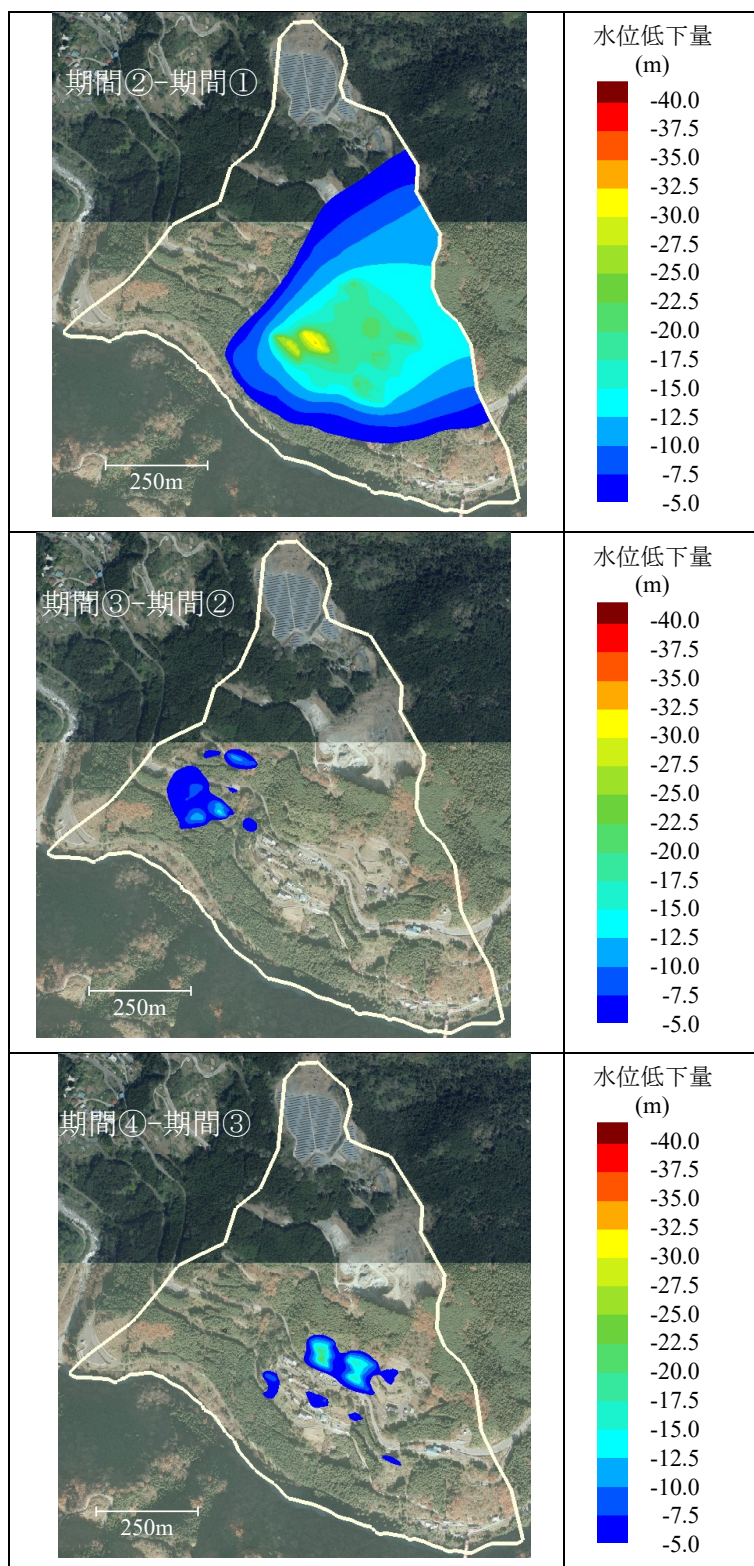


図 4.2.9 前期間に対する各期間の地下水位の低下量

4.1.8 本節のまとめ

本節では、仮想ドレーンモデルを用いた3次元浸透流解析により、地すべり地で計画・建設される抑制工による水位低下効果を評価する方法を検討した。

この結果、以下のような成果が得られた。

- ・ 譲原地すべり帯で実施されたボーリング調査に基づいて整理された風化度合いによる地質構造を3次元化し、解析メッシュを構築して、抑制工が建設される以前の観測水位をターゲットに文献調査で得た結晶片岩の透水係数値を基本として繰り返し試行による再現解析を実施した。この結果、決定係数が0.982となる高い相関を得ることができ、各地盤の透水性を最適化した。
- ・ 最適化された透水係数を用いて、排水対策を期間②～④に区分し、それぞれの期間ごとに排水ボーリングを仮想ドレーンモデルで入力して定常解析によって平均地下水位（基底水位）の低下を再現した。この結果、各期間の決定係数は徐々に低下したものの0.931となり、高い相関を維持することができた。
- ・ 相関係数が低下した理由としては、観測孔が増設され、新たな水位データが追加されたことが要因と考えられるが、地下水面が位置する強風化部の水理地質構造の不均質性がモデルに反映されていないことが大きな要因と考えられる。
- ・ 排水ボーリングから排水量に関しては、抑制工ごとに実測の排水量データ集計し、その平均値と仮想ドレーンモデルより求めた排水量を比較した。この結果、全ての抑制工からの排水総量は、実測と仮想ドレーンモデルは一致したが、抑制工ごとに比較すると再現性が低く、相関が低い結果となった。この原因は、水位再現の考察と同様に局所的な水理地質構造の不均質性が影響したと考えられる。
- ・ 譲原地すべりの地下水流れは、山体上位から神流川へ地形なりに流下する挙動となるため、集積範囲を設定し、集積範囲ごとに集計した排水量と仮想ドレーンモデルの比較を実施した。この結果、決定係数は0.949と高い相関を示した。つまり、地すべり帯としての地下水流れの傾向に関しては、解析結果は再現しているが、どの排水ボーリングがどれだけの地下水を回収したか、までは再現しきれていなかったことを意味する。この理由は水理地質構造の不均質性の反映状況と関係していると推察される。

今後は、地質構造モデルや有限要素分割において、局所的な水理地質構造をモデルに反映し、その領域に与える透水性を決定する方法を検討し、実測との精度をさらに高めていく所存である。

仮想ドレーンモデルは、抑制工の配置を自由に入力することができ、解析に要する時間が短い。また、地すべり帯に配置される排水ボーリングは、譲原地すべりのように多数の存在を忠実にモデル化することは、通常法の適用限界を超えたモデリング技術であると言っても過言ではない。仮想ドレーンモデルは、本数に制限を設けることなく、それがどこに存在していてもモデルに反映して解析を実行することが可能であることから、この利点

を活かし、抑制工の施工段階ごとに得られた計測結果や新たに得られた地質情報をもとに、設置位置や対策規模の最適化を行うことへの貢献といったことも期待できる。

また、このような検討の流れは、現場計測、地質、対策工の情報などを一元化していく作業であり、近年、活用が進んでいる BIM/CIM との親和性が高い技術と言える。このような視点からも、地すべり地の抑制工に対する仮想ドレーンモデルの活用が期待できると考える。

4.2 九州新幹線木場トンネル

4.2.1 木場トンネルの概要と解析対象範囲

木場トンネルは、武雄温泉～長崎間の工事延長が67km、線路延長が66kmから成る九州新幹線の西九州ルート路線のうち、長崎県大村市に位置する延長2,885mの山岳トンネルである。ここで、九州新幹線の路線図⁴⁶⁾を図4.30に示す。木場トンネルの掘削工事の範囲は、図4.31に示す位置である。ここは多良岳の山裾付近となり、海岸線に対して平行に南北方向に延びる路線計画である。この場所は現場周辺や掘削ルート上に民家などがあることから、発破による掘削ではなく、騒音振動の少ない機械掘削方式が採用され、上下半の掘進差が5m前後のミニベンチカット工法によって施工された。

また、木場トンネルは青函トンネル以来となる海拔ゼロメートル以下を通過する計画であったため、トンネル掘削による坑内湧水量が多くなることや、それに伴う周辺の地下水環境に与える影響が危惧されていた。木場トンネルの施工は、2015年7月に着工が開始され、2019年1月に貫通した。



図 4.30 九州新幹線路線図⁴⁶⁾

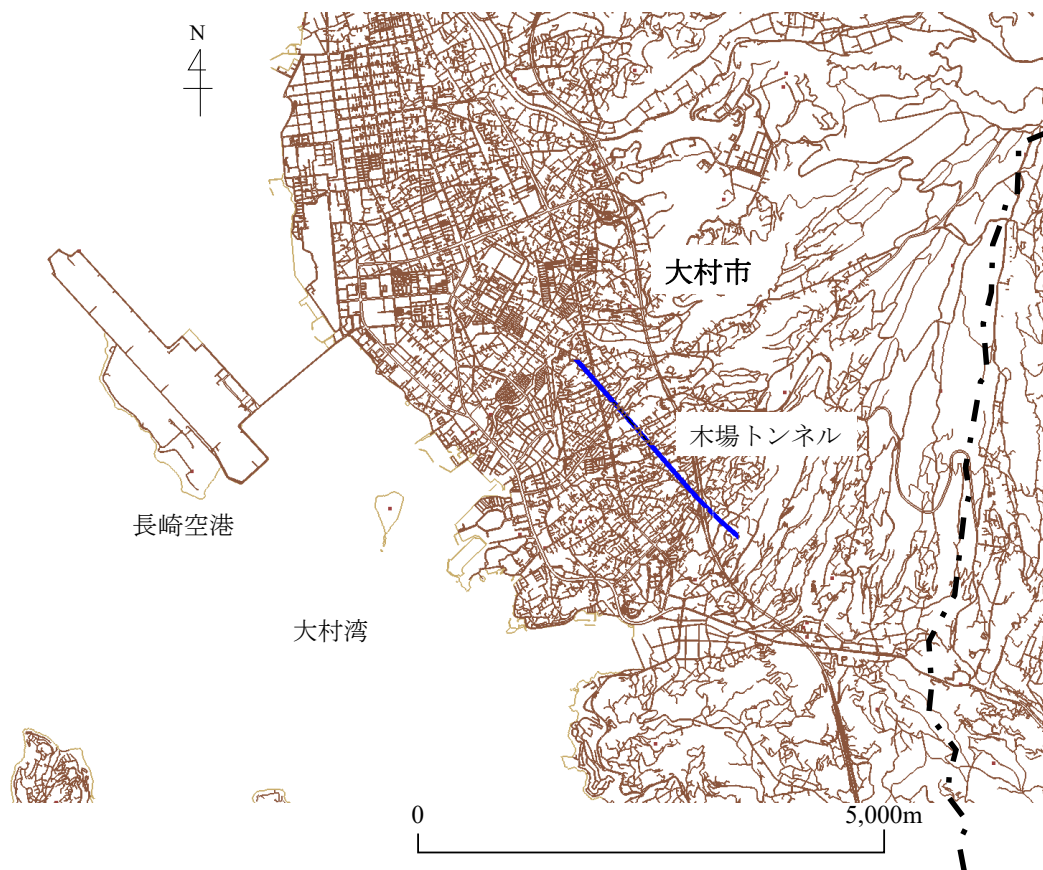


図 4.31 木場トンネル建設位置図

4.2.2 木場トンネル周辺の地質情報

地質構造モデルの構築には、解析領域全体の地層構成が把握できる広域地質分布図⁴⁷⁾ (図 4.3 2) に加えて、事前調査によって得られたトンネル縦断地質図 (図 4.3 3) を利用した。木場トンネルは、多良岳 (山頂標高 966m) の南西方向の裾野に位置しており、多良岳の噴火に影響された火山岩主体の地質構成となっている。

多良岳の地質構造の詳細は、多良岳山頂付近に古期安山岩類が分布し、木場トンネル周辺は火山麓扇状地堆積物が広く分布している。また、海岸線に近い低地部は沖積層が堆積しており、部分的に多良岳古期玄武岩類が露頭している。また、広域地質図の中央付近に東西方向に引かれている A-A'位置において深度方向の地質構造が断面図としてまとめられており (図 4.3 2 下段)、同図から多良岳古期玄武岩類が基盤岩であることがわかる。また、火山麓扇状地堆積物は、原位置における事前調査の地質縦断図である図 4.3 3 に示す分布から凝灰角礫岩 (Kcg) と解釈される。広域地質図とトンネル地質縦断図の記載名称の対比については、表 4.3 に示すような対応を図った。以降の記述はトンネル縦断図に示された呼称で行う。

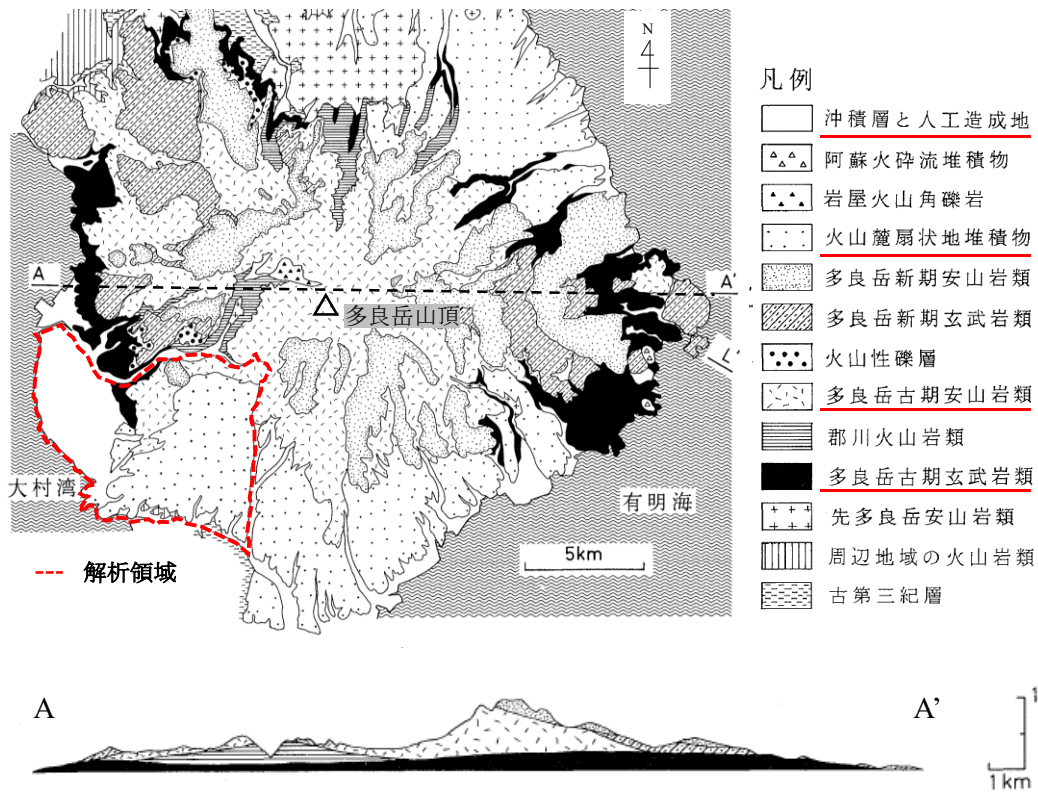
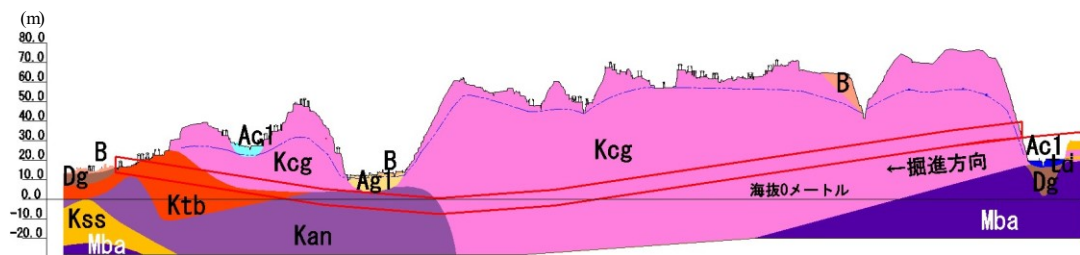


図 4.3 2 解析領域周辺の広域地質図および地質縦断面図
(広域地質図⁴⁷⁾に解析領域を加工)



記号	地質名
B	盛土
Ac1	沖積粘性土
Ag1	沖積礫質土
Dg	扇状地堆積物
Kan	安山岩
Ktb	凝灰角礫岩(火砕岩)
Kcg	凝灰角礫岩(火山円礫岩)
Kss	凝灰質砂岩
Mba	玄武岩

図 4.3 3 トンネル地質縦断面図

表 4.3 広域地質図とトンネル縦断図の呼称対応

広域地質図	トンネル縦断図
沖積層と人工造成地	沖積層(B,Ac1,Ag1,Dg)
火山麓扇状堆積物	凝灰角礫岩(Ktb,Kcg)
多良岳古期安山岩類	安山岩(Kan,Kss)
多良岳古期玄武岩類	玄武岩(Mba)

3次元地質構造モデルの構築方法^{48),49)}は、まず、図 4.3 2および、図 4.3 3に示した地質平面図およびトンネル地質縦断を平面直角座標系として3次元空間に配置したうえで、各地層境界の3次元座標を取得した。この情報を基に、後述する解析領域を包含する範囲を対象に地球統計学的推定手法であるクリギング手法^{50),51)}を用いて各地盤の地層境界面を3次元の面情報として空間推定した。次に、それぞれの地層境界面に優先度（プライオリティ）を設定し、交差が生じた際に面の残存・消失を判定する、いわゆる「切り合い」の処理を実行して境界面の更新を行った。

ここで、「切り合い」のイメージは図 4.3 4に示すように優先度の低い地層境界は、優先度の高い地層の中に境界線情報があったとしても、交差面より奥には分布できず、交差面で行き止まりとなり地層境界は消失する。

このような処理を経て構築した木場トンネルを包含する3次元地質構造モデルを図 4.

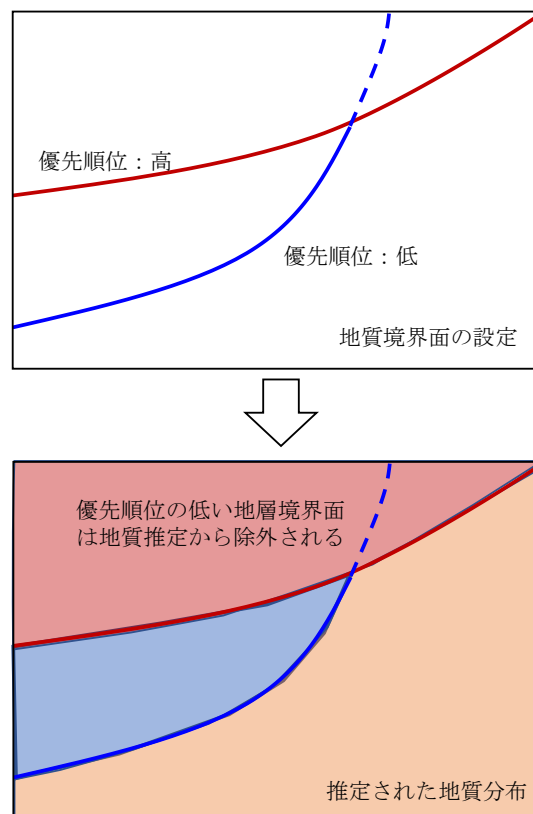


図 4.3 4 地質構造の優先度による切り合いのイメージ

35に示す。また、トンネル軸方向および横断方向に対し、図4.36に示す測線を設定し、トンネル軸方向の地質断面(1-1'断面)を図4.37に、トンネル横断方向の地質断面(2-2'断面)を図4.38にそれぞれ示した。

1-1'断面の地質推定結果は、図4.33の原位置取得データの地質分布を良く再現していることがわかる。また、2-2'断面では、山体で安山岩が露頭する状態が推定されているが、これは図4.32の広域地質図が示している傾向を反映したものであり、収集データを反映した地質構造解析が適切に行えたことと言える。

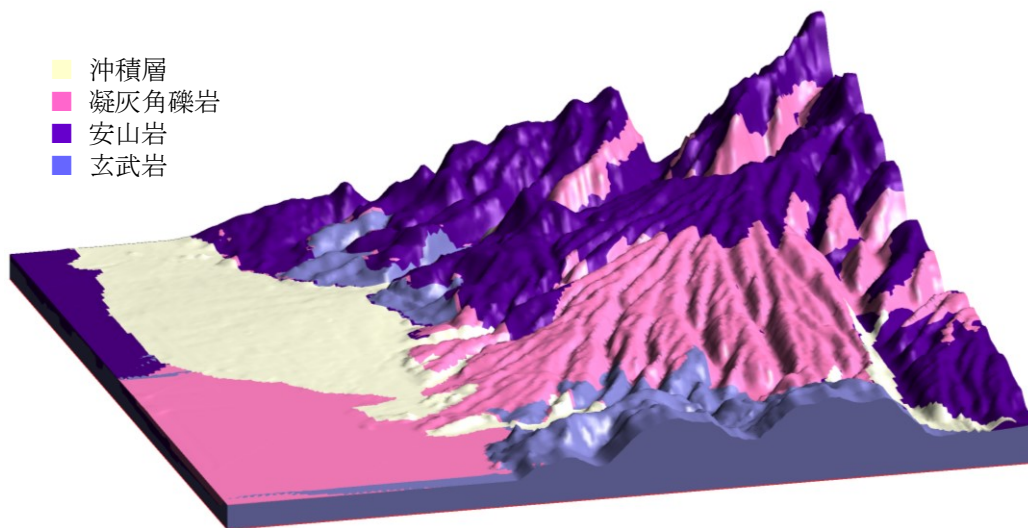


図 4.35 木場トンネル周辺を対象とした3次元地質構造モデル

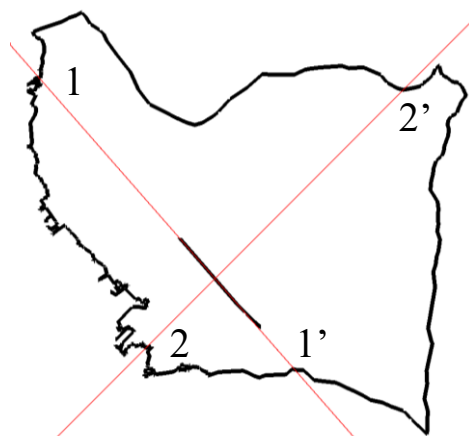


図 4.36 地質断面図の表示測線

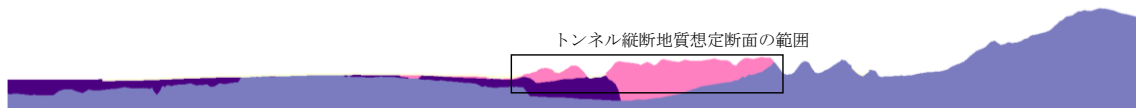


図 4.37 1-1' 断面の地質断面図



図 4.38 2-2' 断面の地質縦断面図

4.2.3 解析モデルの構築

(1) 解析領域の選定

解析対象範囲は、譲原地すべりの検討時と同様の考えを用いて選定した。図 4.39 に国土地理院が公開している地形データ⁵²⁾を示す。この地形分布から、木場トンネル掘削

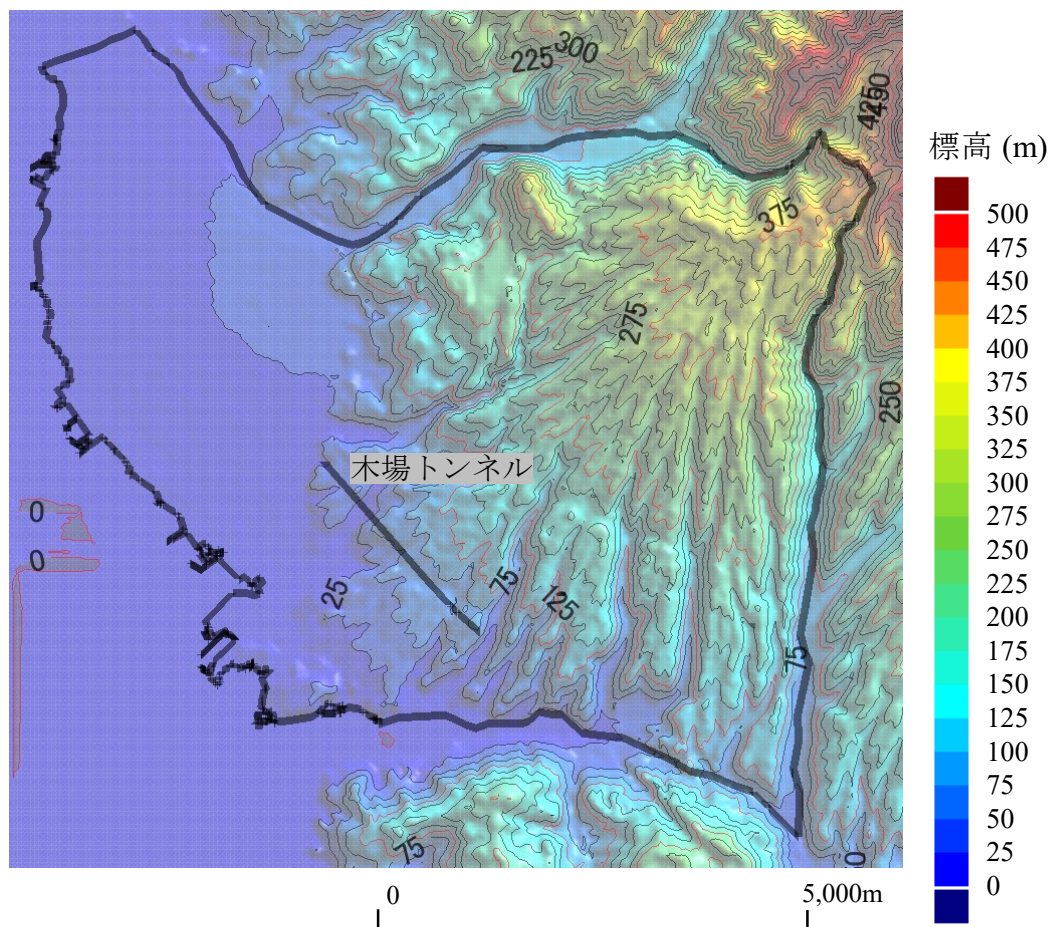


図 4.39 木場トンネル掘削影響解析の対象範囲

範囲を十分に包含する水理境界を判読するが、ここでは領域の北西から南にかけては大村湾の海岸線を、領域北側および東側は河川や沢筋を選定して解析領域とした。解析範囲は南北および東西方向ともに 10km 程度の範囲である。

(2) 解析メッシュの構築

図 4.3 5 に示した 3 次元地質構造モデルを用いて、図 4.3 9 に示した解析対象範囲を切り出して格子状に分割し、3 次元有限要素メッシュを生成した。生成された各要素について、要素中心座標が該当する地盤区分を 3 次元地質構造モデルから割当てて方法で地盤

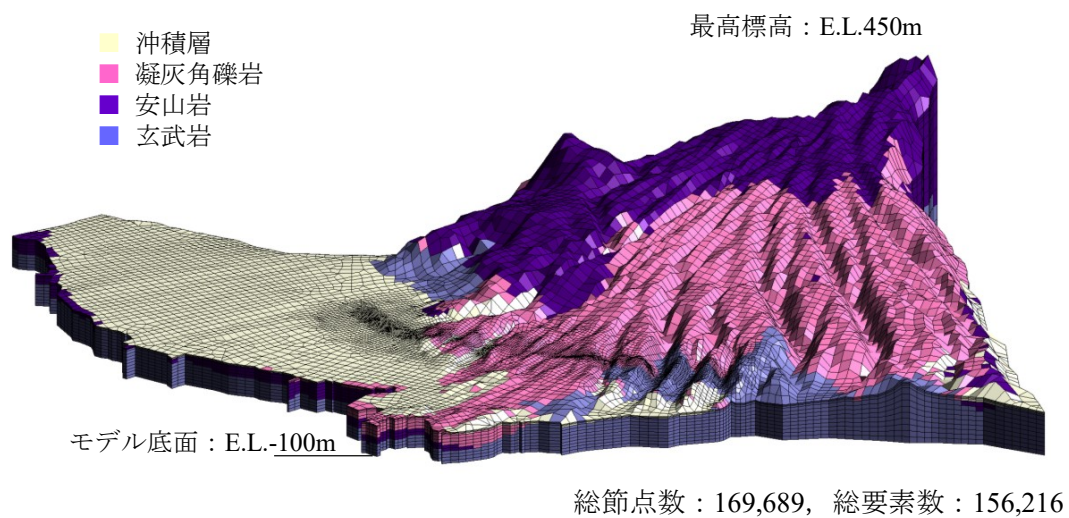


図 4.4 0 木場トンネル周辺の 3 次元地質構造モデルを反映した有限要素メッシュ

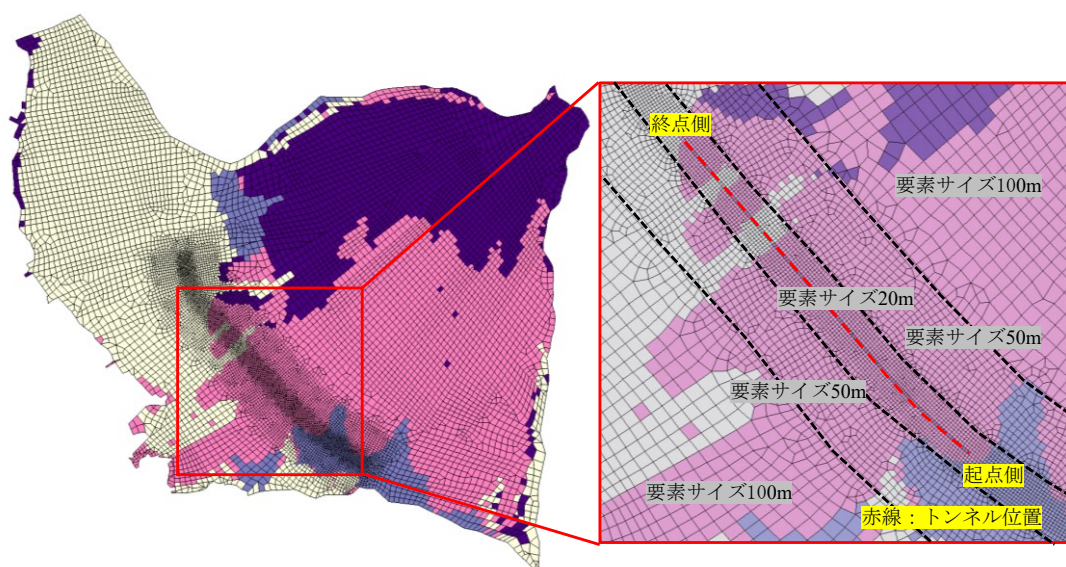


図 4.4 1 構築した有限要素メッシュのサイズ

材料を反映させた。図 4.4 0 に構築した解析メッシュを示す。平面の要素サイズは、図 4.4 1 に示すように、トンネル周辺は、要素サイズ 20m 程度に細分化し、トンネルから離れるにしたがって、要素サイズを大きくしていくことで、計算効率の向上を意識した要素分割を行った。鉛直方向の要素分割は、モデル底面から地表面の間を 11 要素に等分割し、地表面の要素については、さらに 2 分割して計 12 分割した。地形分布は海岸線で標高 0m、山体の最高標高は、450m 程度であるため、山体の鉛直方向の要素分割は粗く、約 50m 程度（地表面 450m、モデル底面-100m であるため、総距離 550m を 11 等分）の要素サイズとなり、標高が低い箇所ほどモデル底面との距離が小さくなるため、要素分割はおよそ 10m 程度となる。構築した解析メッシュの総節点数は 169,689、総要素数は 156,216 である。

なお、この一連の地質構造ならびに、有限要素メッシュの構築に関しては、譲原地すべりの検討と同様に Geo-Graphia⁴³⁾を用いた。

4.2.4 掘削前の自然状態に対する地下水再現解析

トンネル掘削による坑内湧水量の予測解析に先立ち、掘削開始以前の解析対象領域内の水位分布を定常解析によって再現し、この結果を原位置で観測された地下水位データと比較した。再現が不十分な場合には、繰り返し試行により各地層の透水係数を調整した。

再現対象となる観測水位データには、木場トンネル周辺の 73 箇所において実施された調査結果を用い、掘削開始となる 2015 年 7 月以前のデータから観測井ごとに平均水位を求めて実測水位とした。

境界条件は、図 4.4 2 に示すように、大村湾の海岸線および、大村湾へ流下する河川に相当する節点について、圧力水頭 0m を固定条件として与えた。地表面に設定する降雨

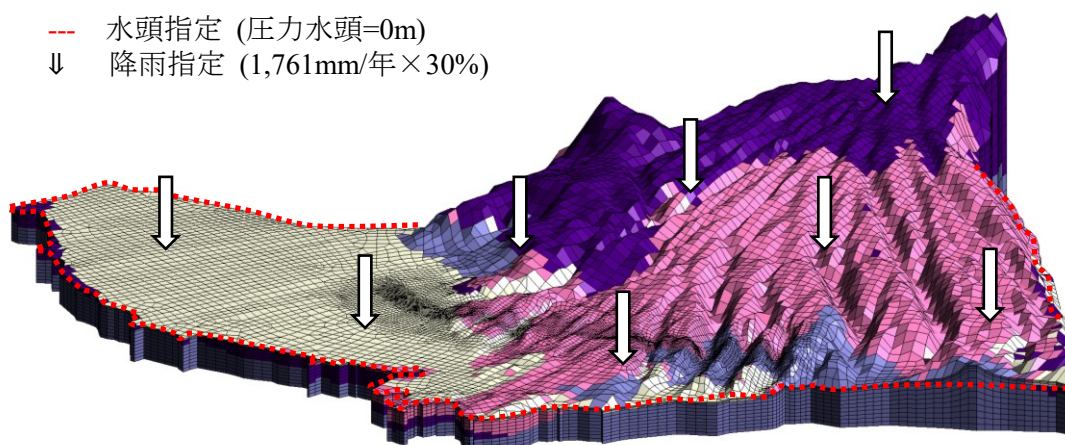


図 4.4 2 木場トンネル掘削解析の境界条件位置図

量は、気象庁のアメダス統計データ⁵³⁾から、木場トンネルの近隣の雨量観測所である大村観測所の2000年～2016年の年平均雨量1,761mmを用いた。入力する涵養量は、表4.1に示した流出係数を参考に、降雨浸透率30%として降雨量に乗じて設定した。

表4.4に原位置透水試験で得られた透水係数を示す。トンネル断面が位置する凝灰角礫岩は、複数の試験値があり、その最大および最小値を示した。この原位置透水試験データを繰り返し試行の基本データとして、実測水位と解析水位の決定係数 R^2 が高くなる各地層の透水係数を求めた。

表 4.4 木場トンネル建設工事時に調査された原位置透水試験結果

地質	透水係数(m/s)
沖積層	7.24×10^{-6}
凝灰角礫岩	$2.53 \times 10^{-6} \sim 1.22 \times 10^{-7}$
安山岩	5.11×10^{-6}

繰り返し試行解析の過程の一部として、凝灰角礫岩に原位置透水試験結果の最大値と最小値をそれぞれ用いた2ケースについて、実測水位と解析水位との相関を図4.4.3に示した。これらのケースでは、沖積層および安山岩には原位置透水試験の値をそのまま用いている。

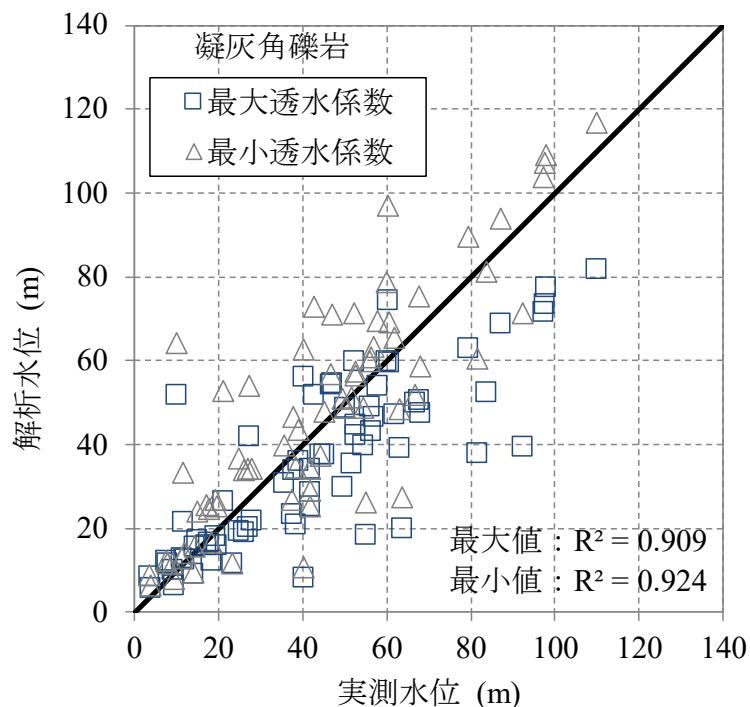


図 4.4.3 凝灰角礫岩の透水係数入力値の影響

まず、凝灰角礫岩の最大透水係数 (2.53×10^{-6} m/s) を用いたケースの解析結果は、実測水位に比べて全体的に水位が低く求まり、特に実測水位 80m 以上の再現性に課題がある。このケースでは、山体上位の地下水の状態（高まり）を十分再現できていないと判断できる。なお、決定係数 R^2 は 0.909 であった。他方、最小透水係数 (1.22×10^{-7} m/s) を用いたケースでは、実測より解析結果が高い値に求まっており、特に水位標高 10~60m 付近の再現精度に課題がある。決定係数 R^2 は 0.924 であった。

実施した 2 ケースの傾向から、凝灰角礫岩の透水係数は最大値と最小値の間に最適値があると推測できる。このような透水係数の変化が結果に与える効果を分析しながら、引き続き試行計算を実施し、凝灰角礫岩以外の地層の透水係数も感度を分析して、実測水位と解析結果の相関をさらに向上させた。

繰返し試行による検討の結果、最適値として求めた各地層の透水係数を表 4.5 に、実測水位と解析結果の相関を図 4.4 4 に示す。凝灰角礫岩の最大または最小透水係数を用いた場合の結果と比較して、低水位帯から高水位帯に至るまでの良好な地下水位分布の再

表 4.5 最適値として同定した各地層の透水係数

地質	透水係数 (m/s)	備考
沖積層	7.24×10^{-6}	原位置試験値
凝灰角礫岩	5.56×10^{-7}	最大-最小の対数平均
安山岩	2.56×10^{-6}	原位置試験値 $\times 0.5$ 倍
玄武岩	5.0×10^{-7}	安山岩試験値の約 1/10

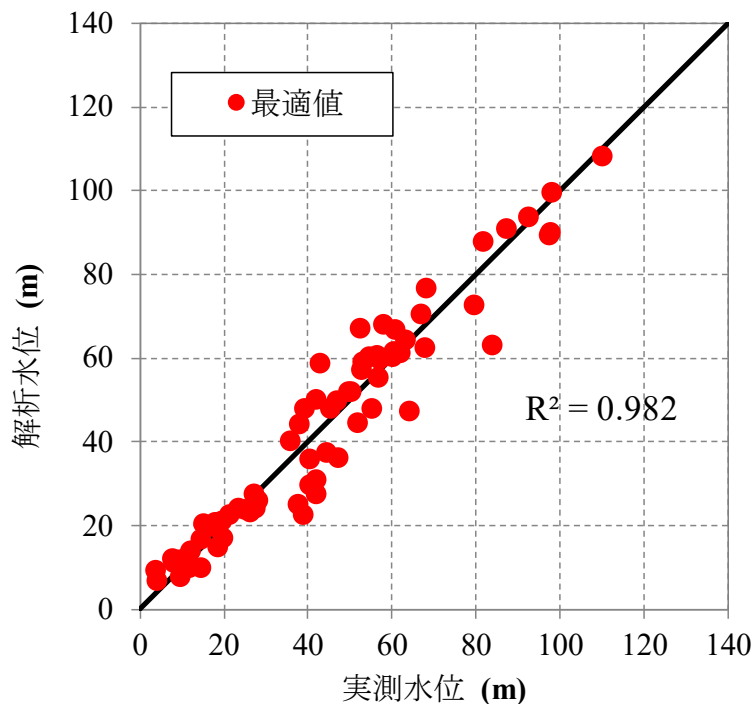


図 4.4 4 透水係数最適値による再現解析結果

現性が認められた。なお、決定係数 R^2 は 0.982 に向上した。

4.2.5 坑内湧水量の予測

再現解析で求められた地下水分布を初期状態として、仮想ドレーンモデルによる非定常浸透流解析を実施し、解析結果と実測の坑内湧水量との比較を行った。境界条件は、大村湾の海岸線および大村湾に流下する河川位置に対して、定常解析による再現解析時と同様に圧力水頭 0m とした。地表面に対しては、トンネル掘削期間中の雨量観測記録を大村雨量観測所⁵³⁾から収集し(図 4.4.5)、定常解析と同様に、降雨浸透率 30% が地下に涵養される条件を設定した。降雨量は、2015 年 8 月 12 日に最大日雨量 231mm を観測している。また、図 4.4.6 に実測されたトンネル坑内湧水量データを示す。掘削が進行するにしたがって坑内湧水量の増加が見られる。突発的に湧水量が増加している期間は、降雨による影響もしくは、地質性状の変化が要因と考えられる。

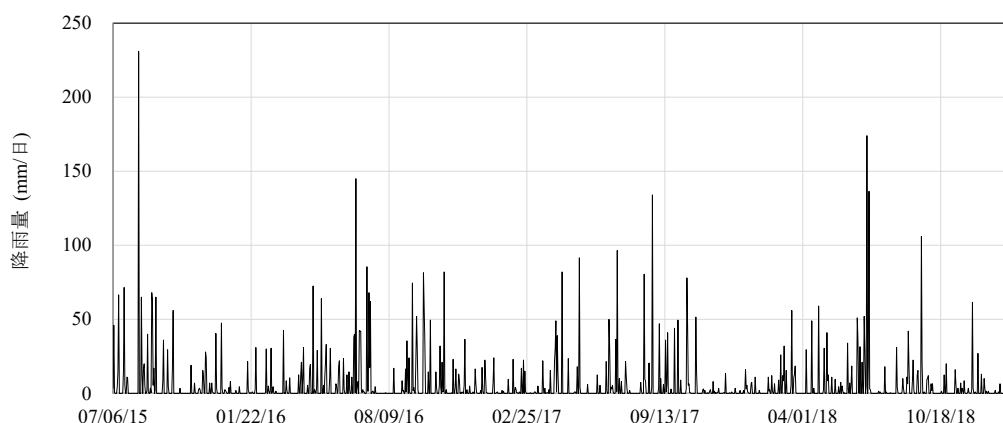


図 4.4.5 解析に用いる雨量データ (大村雨量観測所)

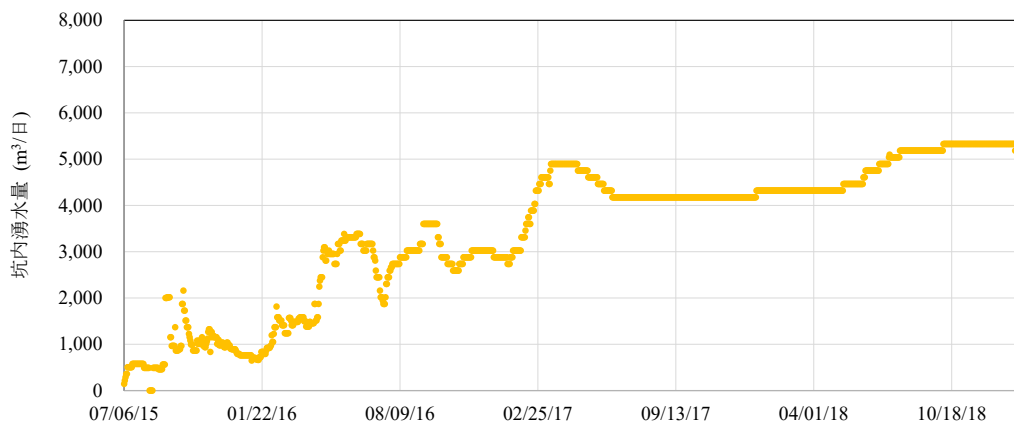


図 4.4.6 トンネル坑内湧水量実測データ

仮想ドレーンモデルの掘削に関する入力項目は、2.4節で記述したとおり、トンネル線形の3次元座標と切羽位置の時間変化および掘削径である。これらは木場トンネルの実際の工事記録を参照し、起点から終点までの実績の掘削距離を座標換算して入力した。図4.4.7に工事記録に基づいて表示したトンネル計画線形を示す。同図にはトンネル線形に対する海拔0mラインも加えた。掘進方向に対し、トンネル計画路線の中間を過ぎた辺りで、海拔0m以深の掘削が行われる。

なお、入力するトンネルの径については、仮想ドレーンモデルではトンネルの掘削断面を等価な円形の形状として取り扱うため、図4.4.8に示す計画図面を参考にし、掘削面積と同じ面積を持つ円の半径を算出して入力した。

実測の坑内湧水量と、仮想ドレーンモデルを適用した予測解析結果の比較を図4.4.9に示す。両者には良好な一致が見られる。先述した通り、実測の坑内湧水量は、掘削が進

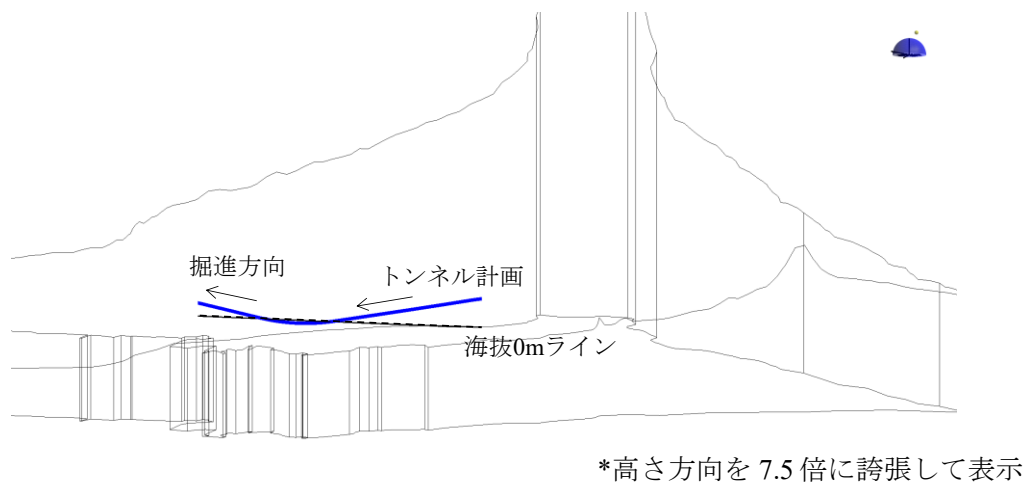


図 4.4.7 トンネル計画ラインと海拔0mライン

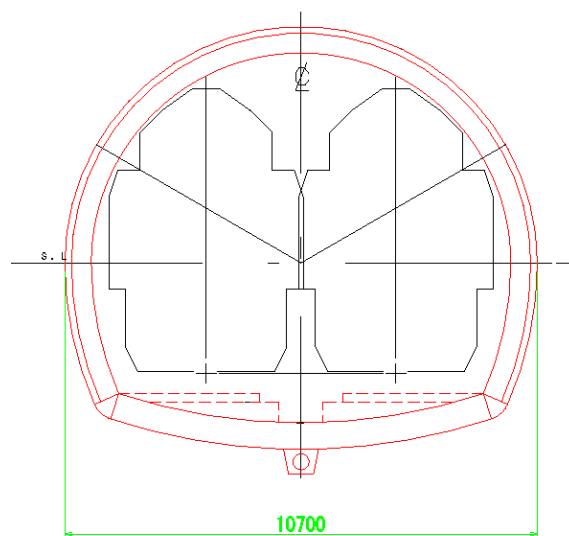


図 4.4.8 木場トンネルの掘削形状

むにつれて湧出面積が増加するため、右肩上がりの傾向を示している。解析結果もこれと同様の傾向となっており、トンネル全域にわたって解析結果が坑内湧水量を予測し得たことを表している。良好な一致を示すことができた背景には、構築した3次元地質構造モデルや、各層に設定した透水係数が、繰り返し試行による事前水位との再現解析によって水理地質構造として適切であったことが挙げられる。

しかし、部分的に見ると実測の坑内湧水量は突発的な増加を示している箇所もあり、この挙動については再現性に欠ける期間も見られた。これは、解析モデルの地質構造は、図4.49の上段に示した図のように、切羽周辺は凝灰角礫岩に分類されているため、透水性としては均質な状態となるが、実際は同じ凝灰角礫岩でも水理地質構造は部分的に異なり、透水係数は場所によってばらつきがあると考えられ、これが要因で突発的な湧水量の変化への対応が追従できなかったと考えられる。水理地質構造の部分的な違いを実測と解析結果の差異の要因とした理由は、実測の坑内湧水量と雨量の関係を見ると、大雨や連続的に降雨が発生している期間に湧水量が増加しているとは言い切れないためである。

このように事前調査による水位観測データを利用して入力するパラメータを精査しておくことで、予測精度の高い解析結果を得ることができ、実測との乖離が生じた場合は、その要因を絞り込み、部分的な水理地質構造の見直しを行って湧水予測を速やかに更新する対応や、先進ボーリングなど前方探査の調査を提案し、それに基づいて湧水予測も更新する対応といった現場施工の合理化を支援することができる可能性が示された。

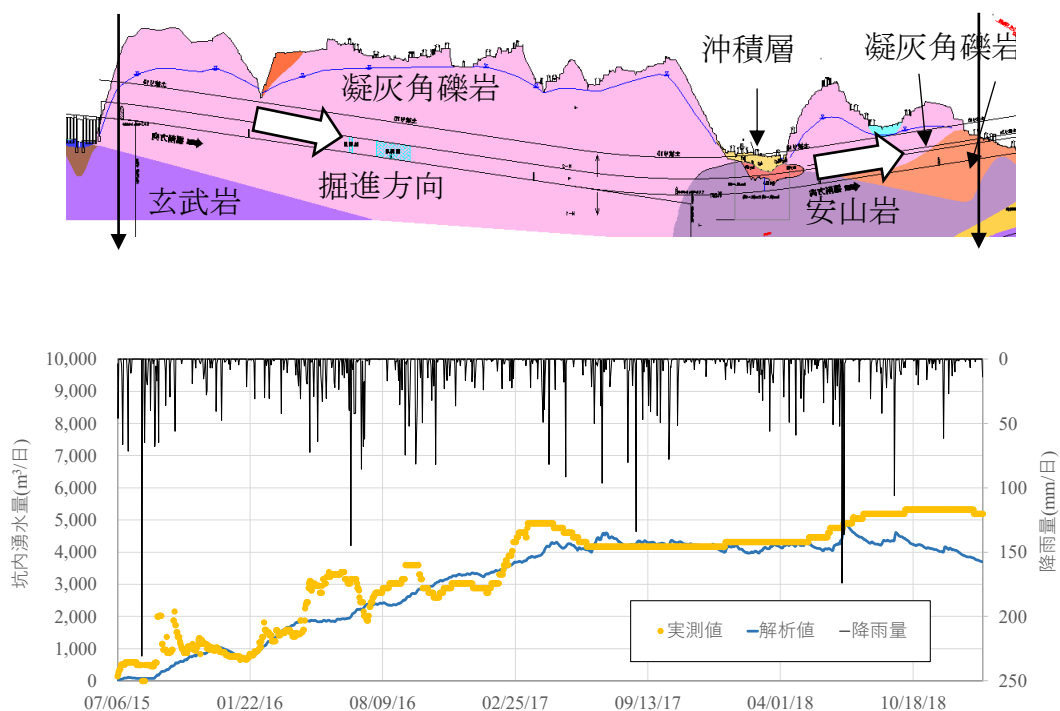


図 4.49 坑内湧水量の実測と解析結果の比較
(上図：トンネル縦断方向の地質分布，下図：坑内湧水量の実測と解析結果の比較)

なお、この予測解析の所要時間は 14 時間程度であった。これを通常法で実施した場合、掘進方向のメッシュ分割数の調整具合にもよるが、表 3.8、表 3.9 に示した計算時間の比較から、この 2～5 倍程度の時間を要すると考えられる。

4.2.6 水位低下影響

掘削に伴う地下水低下の影響は、図 4.5 0～図 4.5 4 に示すような変化を示した。同図は、掘削を行わない場合の解析を実施し、全節点について、「掘削あり—掘削なし」の差分を算出して 200m 掘進ごとに低下影響の範囲をコンター図化した結果である。ここで、低下影響は 5.0m 以上となった範囲を表示した。

掘削開始から 200m 掘進した際に、わずかに 5.0m を下回る水位低下を示した。その後、掘進とともに影響範囲は拡大していき、トンネル横断方向にも水位低下が拡大している。トンネル終点の手前で、低下影響が小さくなっているのは、この付近は土被りが小さいために地下水位も低い中を掘削したことが要因である。

このような水位低下領域の可視化は、事前に地下水低下影響の傾向を把握するばかりでなく、近隣地域の井戸枯れの懸念、または水道補償の必要性などの地下水保全の観点、さらには地盤沈下が懸念される地域では災害の観点で、未然に防止対策を検討できる資料として、現場施工の品質向上に役立てられるものである。

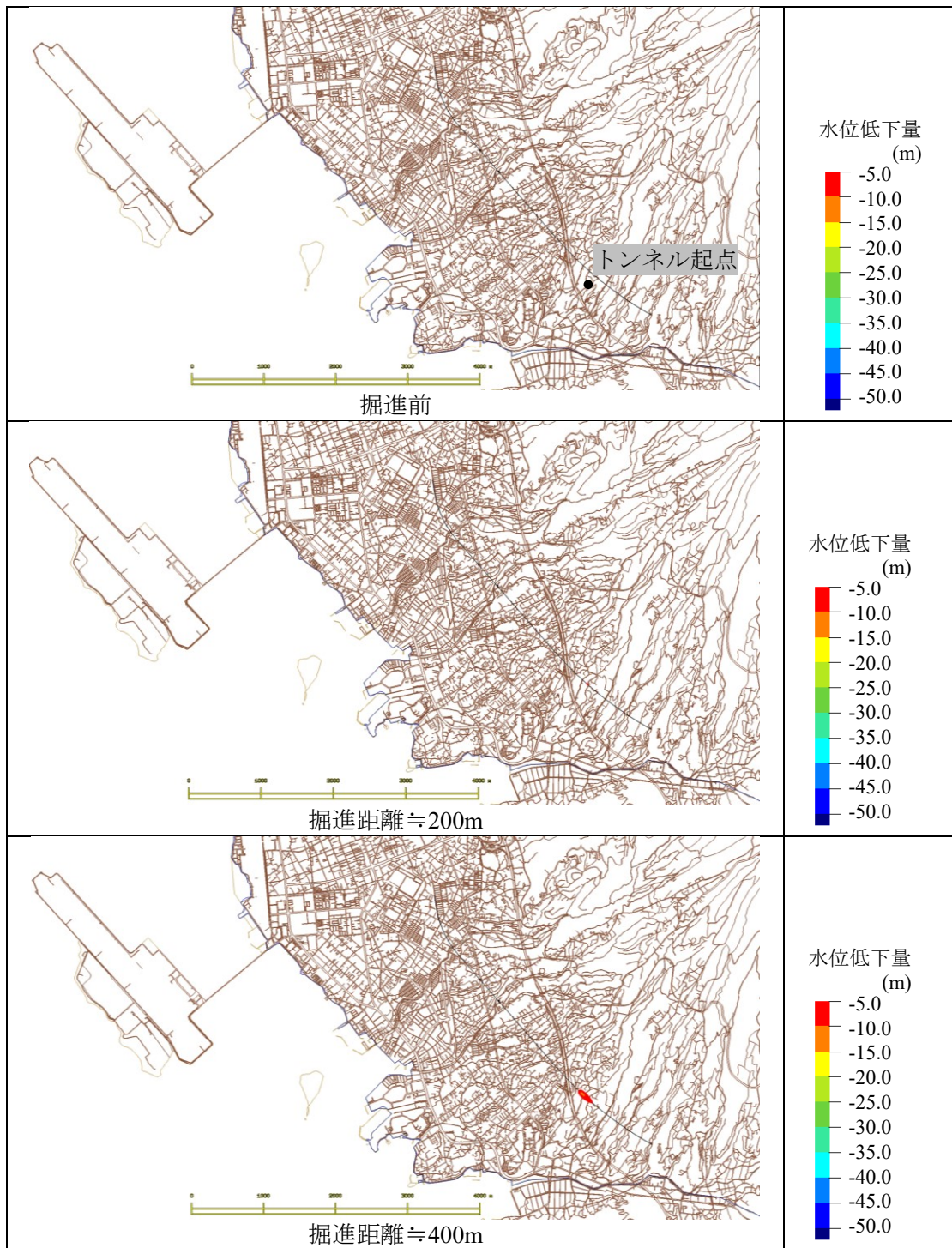


図 4.50 掘進に伴う水位低下影響 (1/5)

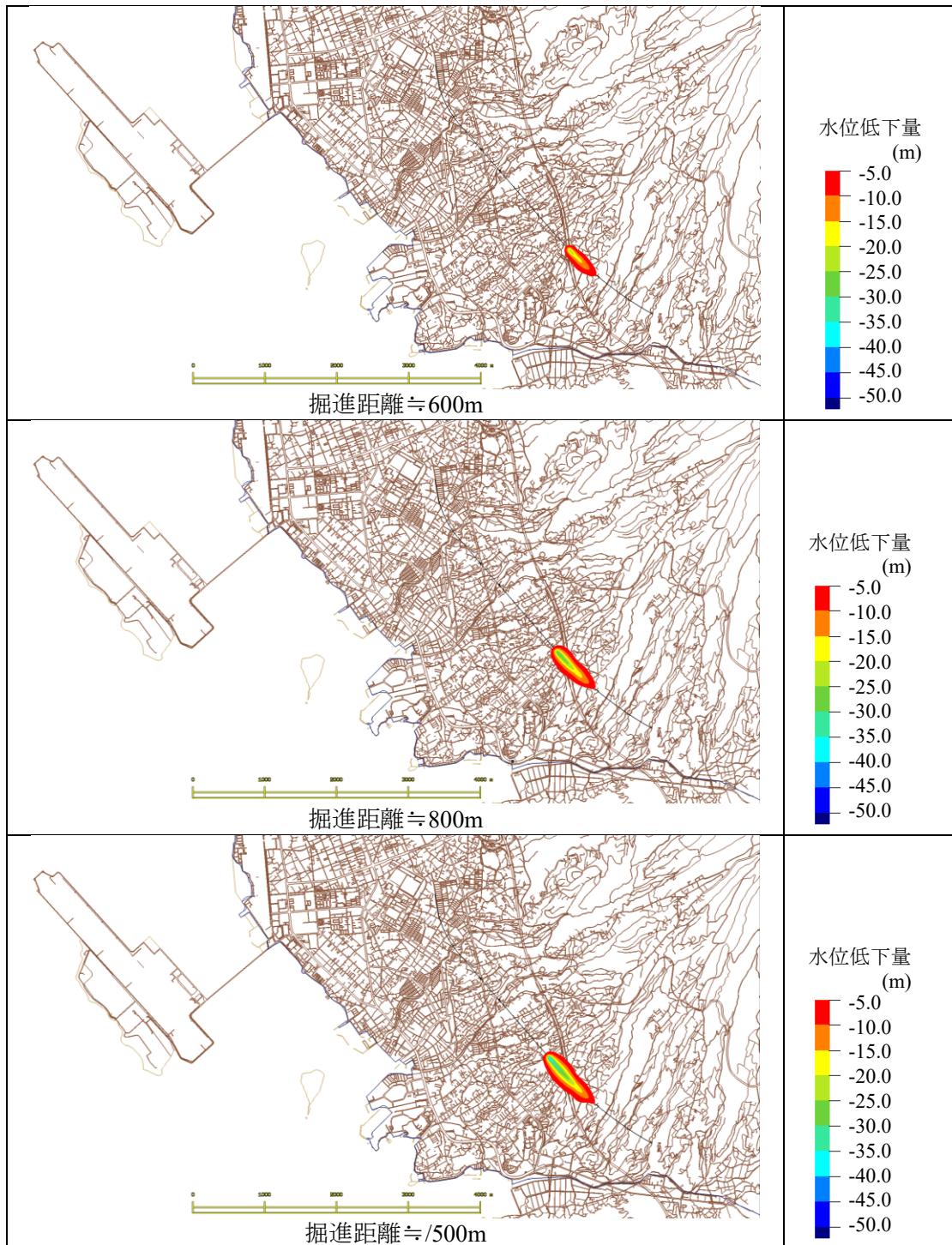


図 4.5 1 掘進に伴う水位低下影響 (2/5)

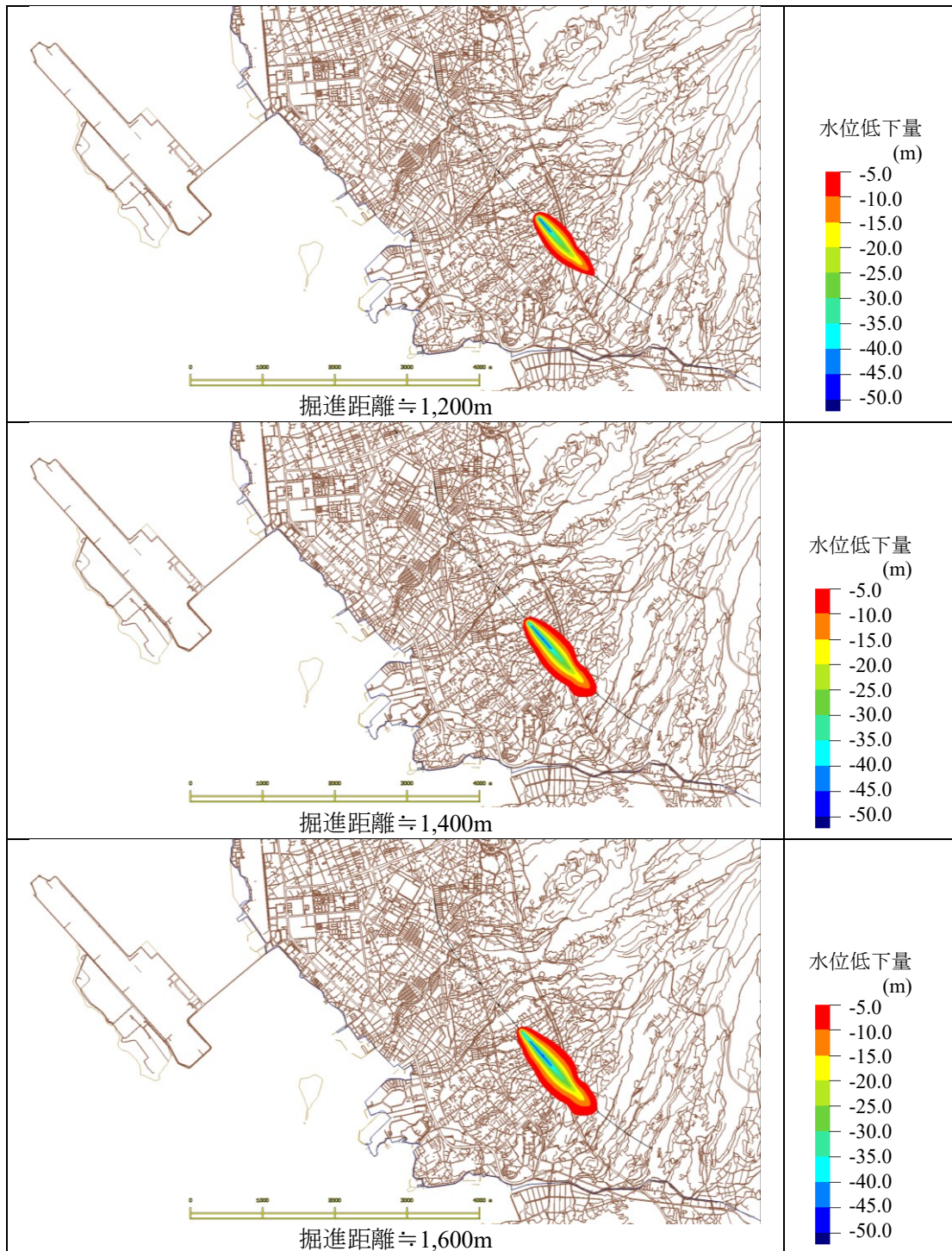


図 4.5 2 掘進に伴う水位低下影響 (3/5)

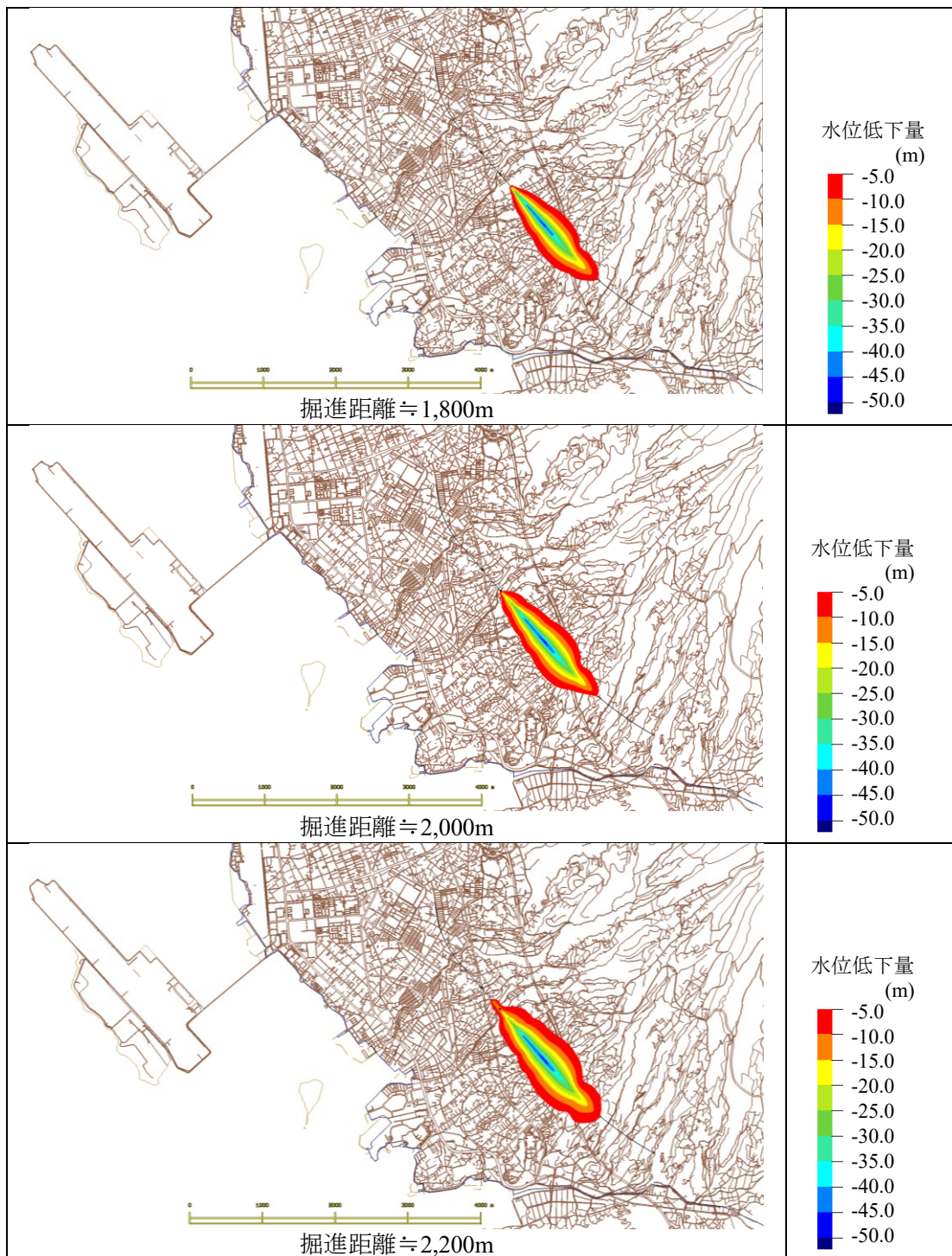


図 4.53 掘進に伴う水位低下影響 (4/5)

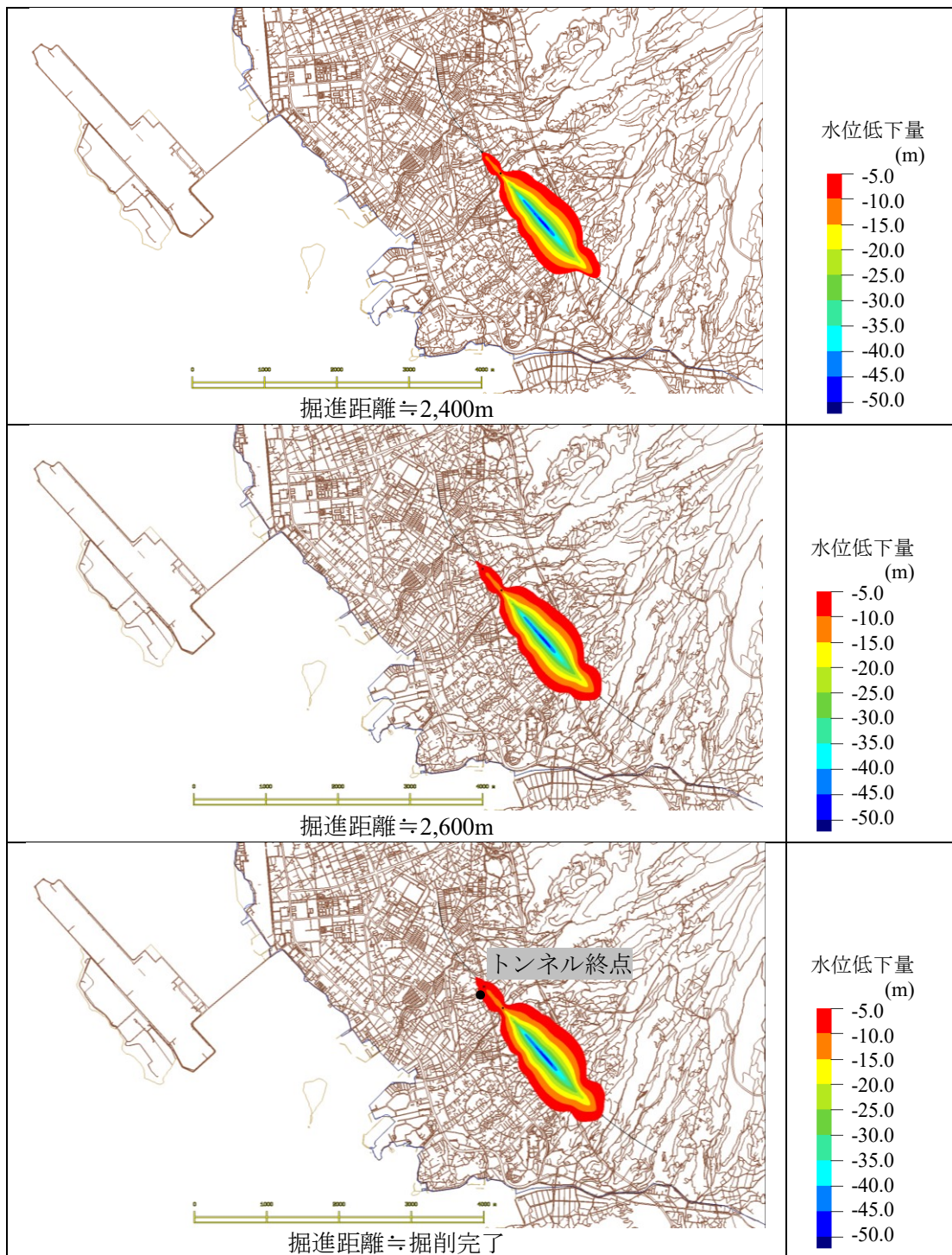


図 4.5.4 掘進に伴う水位低下影響 (5/5)

4.2.7 本節のまとめ

本節では、トンネルの坑内湧水量を効率的に予測するという観点から、九州新幹線木場トンネルを対象として、実際の現場で発生した坑内湧水量に対する予測解析を実施した。掘削に関する情報は、現場の掘進管理データを参照して仮想ドレーンモデルへの入力を行った。

この結果、以下のような成果が得られた。

- ・ 原位置透水試験結果を用いて、そのデータに基づいてトンネル掘削前の事前水位をターゲットとして繰り返し試行による透水係数の最適化を実施した。地下水面が分布する凝灰角礫岩中の透水係数試験値から、最大値を適用した場合と最小値を適用した場合を実施し、それぞれの解析水位と実測水位の関係から透水係数の修正方向に対する知見を整理して最適化を進めた。この結果、実測水位と相関の高い解析結果を得ることができた。
- ・ 仮想ドレーンモデルによる掘削は、切羽位置の座標の進行と削孔径を入力することで計算の実行が可能となるため、現場の掘削工事記録を参照して掘進量を3次元座標に換算し、トンネル計画断面と等価な面積となる円の半径を計算して入力データを作成した。
- ・ 浸透流解析は最適化した透水係数と掘削工程を入力して、算出された坑内湧水量の結果を実測と比較するブラインド方式で実施した。解析の結果、仮想ドレーンモデルの結果は、掘削の進行に伴う湧水量の増加傾向も含め、実測された湧水量の変化との良好な一致が見られた。これにより、不均質性を有する地盤の実現場においても合理的なトンネル湧水量の予測が可能となることが示唆された。
- ・ 降雨設定や水位固定条件などを変更せずに、掘削を実施しなかった場合の浸透流解析を実施し、掘削による水位低下の影響を可視化した。これにより、水位低下の影響範囲を把握でき、地下水保全や地盤沈下といった防災に関して、対応・対策の必要性を判断する際意思決定を支援できる可能性が示唆された。

仮想ドレーンモデルは、線状排水構造物を円筒形と仮定し、この壁面の法線方向に一様に地下水流れが生じていることを前提としているため、モデル化する線状排水構造物が矩形断面を有している場合に近似度が低くなる可能性がある、また、重み係数(式(66))を用いて線状排水構造物の位置と節点までの距離の偏りをなくす方法を採用しているが、構築した要素より極端に短い線状排水構造物などの場合、近似度が低くなる場合もあることには留意する必要がある。

しかし、仮想ドレーンモデルは線状排水構造物であれば適用可能であることから、トンネル壁面から前方に削孔する水抜きボーリングのモデル化や、トンネルの路線変更など、通常法ではメッシュ化が困難と思われる場合でも、線状排水構造物の位置や径を追加・変更することで解析を実施し、排水量などを予測することができる点は大きなメリットであ

る。

また、線状排水構造物をモデルに反映する必要がないことから、地質構造モデルに対応したメッシュ生成に注力することで解析モデルが作成できる点は、解析作業者の労力軽減や解析実行までの時間短縮に貢献するものである。仮想ドレーンモデルは、前方探査などで明らかになった情報をもとに地質モデルを更新し、迅速に湧水量の予測を修正し、より適切な対策工などの検討を行う、いわば地下水情報化施工をより身近なものにすると考える。

5. 結論

従来の3次元浸透流解析では、複雑な地層構成に加えて、その地盤内部に配置される線状排水構造物を反映した解析モデルを構築するために多大な労力が必要となる。また、線状排水構造物の近傍では要素が細分化されることから、節点数が増加し、計算時間を要するといった課題があった。この課題を解決するため、仮想ドレーンモデルと称する線状排水構造物をモデル化せずともその効果を予測できる新しい浸透流解析手法を考案した。

本研究では、仮想ドレーンモデルの地すべり地における抑制工の効果や、トンネルの湧水予測といった実現場における地下水流れの問題に対する実用性を確認することを目的とした。最初に、簡易モデルを用いて、従来の3次元浸透流解析で実施されてきた、線状排水構造物を忠実にモデル化する方法による解析結果と、仮想ドレーンモデルによる解析結果を比較し、本手法の妥当性を検証した。次に、国土交通省の直轄地すべりである譲原地すべり、九州新幹線の木場トンネルの実現場を対象として、抑制工の排水ボーリングによる地すべり帯の水位低下挙動や排水量、トンネル掘削時の坑内湧水量について、実測データと解析結果の比較を行った。

これらの検討から、以下のような結論を得た。

(1) 簡易モデルを用いた検証

- ・ 従来実施されてきた線状排水構造物をモデル化する方法（通常法）と、仮想ドレーンモデルによる解析結果を比較した。排水総量の比較では、排水ボーリングを対象とした場合で通常法に対しては94%以上、トンネルを対象とした場合で同じく90%以上の近似度が得られた。また、地下水位低下量は、要素分割の粗い仮想ドレーンモデルが高い結果を示したが、その影響は線状排水構造物近傍にとどまっており、低下量の分布傾向は一致していた。
- ・ 仮想ドレーンモデルの計算時間に関しては、排水ボーリングを対象とした場合で通常法の0.25程度、トンネルを対象とした場合で通常法の0.37～0.91であった。これは、いずれも通常法と仮想ドレーンのそれぞれで用いたモデルの節点総数の比よりも大きな低減効果であり、仮想ドレーンモデルの時間短縮効果が確認できた。
- ・ 通常法でトンネルの逐次掘削を解析する場合、1掘進長はトンネル掘進方向のメッシュサイズに依存する。これに対し、仮想ドレーンモデルは、掘進長を浸透流解析の時間刻みで設定するため、1掘進長を小さくできる。この効果として、仮想ドレーンモデルは、掘進方向の要素分割が粗い場合でも、通常法で掘進方向の要素分割を細分化した場合と同等の解析結果が得られることが示された。
- ・ 簡易モデルによる検証の結果から、仮想ドレーンモデルの通常法に対する近似度は、地盤の透水性、掘削方向（横坑、立坑）、削孔径（排水ボーリングは小径、トンネルは大径）、さらには地盤の不均質性にも影響を受けにくいことが示された。

(2) 実現場を対象とした実用性評価

- ・ 譲原地すべりを対象に仮想ドレーンモデルを適用した結果、抑制工の建設履歴に追従して観測地下水位の低下挙動を再現できることが示された。ただし、観測孔によっては再現性が不十分であることもわかった。これは、同じ風化度合いでも、場所によっては透水性が均質ではなく、解析にあたっては水理地質構造の不均質性を十分考慮する必要があることを示唆している。また、排水ボーリングからの排水量に関しても、仮想ドレーンモデルの解析結果は実測値と整合したものであった。ただし、個々の抑制工ごとに比較をすると、実測との差異が大きい箇所もあり、前述した水理地質構造の不均質性が影響していると推察される。
- ・ 譲原地すべりの抑制工建設による排水ボーリングの総数は、横ボーリング工、集水井工、排水トンネルを合わせると1,500本にも及ぶ。この本数を実際に合わせて忠実に解析メッシュとして構築することは現実的ではない。地下水排除工をメッシュレスとすることで、このような本数を解析に反映し、それぞれの排水量を個別に評価することができる点は、仮想ドレーンモデルの利点である。
- ・ 仮想ドレーンモデルによって得られた地下水位低下効果に関して、対策前の地下水位分布からの差分量を求めて譲原地すべり帯における対策効果の可視化を行った。これにより、地すべり面全体または、対策工ごとの地すべり面に対する地下水位低下効果の範囲を詳細に把握でき、配置した抑制工の適正を確認することができる。また、仮想ドレーンモデルを用いて抑制工の増設、新設に対する予備検討を行うことで、効果を事前に予測することができ、現場施工の省力化に貢献できると考える。
- ・ 九州新幹線の木場トンネルを対象に、工事实績に対応させた掘進を仮想ドレーンモデルに入力し、日変化する降雨量を境界条件として非定常浸透流解析を実施して、実測の坑内湧水量との比較を行った。この結果、実測の坑内湧水量に対して、再現性の高い解析結果が得られた。高い再現性が得られた背景には、トンネル施工前に観測された地下水位をターゲットに繰り返し試行による透水係数の感度分析を行い、地盤の透水性を最適化して事前地下水位を再現したことが挙げられる。
- ・ 同じ降雨条件で、掘削を行わないケースを実施し、掘削実施ケースとの差分を分布図として可視化した。この結果、掘削の進行とともに、地下水位低下範囲が広がる傾向が示された。このような可視化技術は、土地利用図などの地理空間情報と合わせて低下影響を確認することで、地下水保全や防災に役立つ情報となる。
- ・ 仮想ドレーンモデルを用いて事前にトンネルの坑内湧水量を予測しておくことで、実測の坑内湧水量との乖離に目を向けることができ、前方探査の提案や、その後の施工法を変更する、いわば地下水情報化施工の可能性を示した。

以上の研究成果から、仮想ドレーンモデルは線状排水構造物をメッシュ化せずとも、これによる排水効果を表現できること、および実現場を対象とした3次元浸透流解析においても実用性を有することが確認できた。

仮想ドレーンモデルを使うことで、地すべり地における抑制工の新設や増設による効果、トンネル工事における先進ボーリングによる水抜き効果などを、精度を下げることなく短時間に予測することができる。このことは、仮想ドレーンモデルが、実現場で必要となる迅速な意思決定に貢献する手法であることを示している。

(3) 今後の技術展望

3次元浸透流解析による地下水排水影響の予測においては、降雨量の把握も重要である。気象予測の精度は、予測手法の精緻化やコンピュータ性能の向上を背景に年々向上している。このような技術を利用し、大雨に関する想定と仮想ドレーンモデルによる浸透流解析を組合せ、数日後の地すべり地の地下水上昇量やトンネル坑内湧水量を、現場で迅速に予測できるようにすることは、防災や施工の安全性に有用である。

また、ICT技術を活用し、リアルタイムに降雨量や地下水位の観測データを取得することも可能となっている。得られたデータと予測結果の乖離をいち早く察知することができれば、事前に推測した地質構造（水理地質構造）の見直しや予測結果の更新をより迅速に行うことにつながり、施工現場に有益な情報をもたらすと考える。

3次元浸透流解析では、予測精度を向上させるために、透水係数等のパラメータを精査する必要がある。本研究では繰り返し試行によるパラメータの最適化を実施した。しかし、この方法は、解析技術者の経験に頼るところが大きい。従前より研究が進んでいる逆解析手法や、近年、様々な工学分野でも利用されている機械学習は、このような場面において技術者の判断をサポートする役割を担う。これらの技術と浸透流解析とを融合し、観測データの取得から予測解析までを一貫して行うシステムを開発することが、事業の効率化や省力化に貢献すると考える。

謝辞

本研究を遂行するにあたっては、多くの方々にご指導、ご協力を賜りました。大学を卒業して現職場である地層科学研究所に入社してから、現在に至る約 23 年間、解析全般のみならず、社会人として業務に携わる姿勢を指導して頂いた里優会長、木下直人氏には深く感謝しています。本研究の仮想ドレーンモデルについては、里会長のご指導が核心をつくもので大変勉強させて頂きました。心より感謝申し上げます。

現職場の横山裕之社長は、群馬大学へ進学して学位を目指すことに勧めて頂き、これをきっかけに本研究を本格的に進める意思を固めることができました。また、河原裕徳氏には、本研究の解析コード開発で多大な尽力を頂きました。里会長、横山社長、河原氏をはじめ、地層科学研究所の方々には大変お世話になりました。ここの感謝の意を表します。

大成建設株式会社の井尻裕二氏には、地層科学研究所に入社して間もない甚だ未熟な頃、仕事をご一緒する機会を与えて頂き、地下水解析の基礎を熱心にご指導してくださいました。この期間の経験が本研究をまとめる礎になっています。心より感謝申し上げます。

大成建設株式会社の本島貴之氏、小野誠氏は、業務を通じて多くのコミュニケーションの場を与えて頂きました。ここに感謝申し上げます。

仮想ドレーンモデルは、著者らが 2016 年ころから企業内の研究開発として立ち上げた構想でした。開発当初から、実現場での本手法の実用性を確認することを念頭にしていました。その土壌がなく、実地盤を模擬した検討などを行い、学会発表などを通じて機会を伺っていました。清水建設株式会社の福田毅氏、藤野晃氏、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構の江島武氏には、木場トンネルを題材にすることをご提案頂き、工事記録や計測データのご提供頂きました。ここに記してお礼申し上げます。

群馬大学の若井明彦先生には、論文審査ならびに本論文をまとめていくに際して、様々な助言を賜りました。そればかりでなく、仮想ドレーンモデルの実用性を地すべり地で検証することをご提案頂き、譲原地すべりで検討する機会と、国土交通省利根川水系砂防事務所とのご縁をつくって頂きました。厚く感謝申し上げます。

利根川水系砂防事務所の永田雅一氏、星野光男氏、上原舞氏には譲原地すべりの貴重なデータを提供頂きました。ここに記してお礼申し上げます。

群馬大学の清水義彦先生、小澤満津雄先生、蔡飛先生、鶴崎賢一先生にはお忙しい中、本論文の内容に対して貴重なご助言を賜りました。ここに感謝申し上げます。

岩手大学時代の指導教官であった小林晃先生には、修士課程を卒業するまでの 6 年間、厳しくも心温かいご指導を賜りました。小林先生との出会いが、ここに記させて頂いた皆様とのご縁のはじまりです。厚く感謝申し上げます。

最後に、妻の加奈子、長女の侑唯、次女のみなみ、長男の訓孝には、年齢 42 歳での大学進学に不安な思いを与えたにも関わらず、常に精神面を支えてくれました。家族の支えが活力の根源です。感謝しています。

参考文献

- 1) 気象庁 (2022) : 大雨や猛暑日など(極端現象)のこれまでの変化, < https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html > (入手 2022.11.14)
- 2) 国土交通省 (2022) : 砂防 NEWS, < <https://www.gov-base.info/2022/03/18/150893> > (入手 2022.10.12)
- 3) 細野賢一, 河原裕徳, 里優(2016) : 仮想ドレーンモデルによる 3次元浸透流解析, 日本地下水学会 2016 年秋季講演会, pp174-179.
- 4) 細野賢一, 河原裕徳, 里優(2017) : 仮想トンネルモデルによる 3次元浸透流解析手法, 第 14 回岩の力学国内シンポジウム, 公演番号 0120.
- 5) 細野賢一, 河原裕徳, 里優(2017) : 仮想ドレーンモデルのトンネル情報化施工への適用の試み, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.1381-1382.
- 6) 江島武, 細野賢一, 里優, 福田毅, 藤田晃(2018) : 仮想ドレーンモデルを適用した地下水情報化施工の試み, トンネル工学報告集, 第 28 巻, I-35, pp.1-7.
- 7) 細野賢一, 河原裕徳, 里優(2018) : トンネル施工時の湧水対策効果に対する早期予測解析手法の提案, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.1597-1598.
- 8) 細野賢一, 福田毅, 藤野晃, 江島武(2019) : 仮想ドレーンモデルを用いたトンネル掘削における先進ボーリングの効果の検討, 第 54 回地盤工学研究発表会, pp.1417-1418.
- 9) 細野賢一, 大野博之, 山内一志, 登坂博行(2020) : 浸透流解析を用いた廃棄物最終処分場の底面遮水工への揚圧低下検討, 第 55 回地盤工学研究発表会, pp.23-7-3-03.
- 10) 細野賢一, 若井明彦, 永田雅一, 上原舞, 星野光男, 山本優介(2021) : 仮想ドレーンモデルを用いた 3次元浸透流解析による抑制工の効果予測, 第 56 回地盤工学研究発表会, pp.13-10-3-07.
- 11) 細野賢一, 福田毅, 藤野晃, 江島武, 若井明彦(2022) : 仮想ドレーンモデルを用いたトンネル坑内湧水量予測の高度化に関する研究, 土木学会論文集 F1(トンネル工学), Vol.78, No.1, pp.1-12.
- 12) 細野賢一, 蚊爪康典(2022) : 地すべり斜面における抑制工の 3次元浸透流と変形解析の利用, 計算工学会, Vol.27, No.2, pp4413-4416.
- 13) 細野賢一, 若井明彦, 蚊爪康典(2022) : 仮想ドレーンモデルによる地すべり地の排水ボーリングの効果予測, 第 61 回日本地すべり学会研究発表会, pp.27-28.
- 14) 細野賢一, 若井明彦(2023) : 仮想ドレーンモデルを用いた地すべり地における抑制工の効果予測のための 3次元浸透流解析, 日本地すべり学会誌(掲載決定)
- 15) Tsuyoshi Fukuda, Shuro Yoshikawa, Kenichi Hosono, Shoji Iwanaga(2023) : DEVELOPMENT OF A GROUND FORECASTING SYSTEM BASED ON THE GEOLOGIC AND GROUNDWATER CONDITIONS IN MOUNTAIN TUNNELING, World Tunnel Congress 2023 (掲載決定)

- 16) 鶴飼恵三, 蔡飛, 若井明彦, 坂上最一(1998) : 集水ボーリング工の効果に関する定量的評価方法の提案, 地すべり, Vol.35, No.3, pp.1-7.
- 17) 國眼定, 太田英将, 林義隆, 北方泰憲(2005) : 地下水モデルを用いた地下水排除工の評価方法, 日本地すべり学会誌, Vol.42, No.3, pp.32-41.
- 18) 岩堀康希, 阿部真朗, 吉松弘介, 西真佐人, 森屋洋(2005) : 平根地すべりにおける地下水排除工の効果予測, 日本地すべり学会誌, Vol.41, No.5, pp.96-103.
- 19) 井良沢道也, 南雲政博, 大川滋(2002) : 三次元シミュレーション解析を用いた地下水排除工の定量的効果判定, 地すべり, Vol.39, No.2, pp.34-44.
- 20) 角田信吉, 鶴飼恵三, 若井明彦, 蔡飛, 倉岡千郎, 牧野孝久, 藤原民章, 新屋浩明(2004) : FEM 浸透流解析による集水井の最適配置の検討, 日本地すべり学会誌, Vol.41, No.4, pp.103—107.
- 21) 藤田重敬, 安達忠浩, 倉岡千郎, 牧野孝久(2014) : 3次元浸透流解析による地すべり地の地下水のモデル化方法と移動機構の検討-甚之助谷地すべりを例として-, 日本地すべり学会誌, Vol.51, No.4, pp.1—11.
- 22) Der-Guey Lin, Kuo-Ching Chang, Cheng-Yu Ku and Jui-Ching Chou(2020) : Three-Dimensional Numerical Investigation on the Efficiency of Subsurface Drainage for Large-Scale Landslides, Applied Sciences, vol.10, issue10, pp.1-23.
- 23) 西田憲治, 山上拓男, 蔣景彩(2000) : 三次元有限要素浸透流解析に基づく排水ボーリング効果の定量的評価法, 地すべり, Vol.37, No.3, pp.1-9.
- 24) 土木学会(1999) : 水理公式集, pp. 341-348, 丸善.
- 25) 高橋健二, 大西有三, 安田亨(2008) : 山岳トンネルの地下水情報化施工簡易システム(SWING)の構築, 地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol. 13, pp. 147-150.
- 26) 文村賢一, 下茂道人(2003) : GISを用いたトンネル湧水濁水予測システムの開発, トンネル工学研究論文報告書, 第13巻, pp. 327-332.
- 27) 佐藤邦明(1982) : 山岳トンネル地下水のモデル化とシミュレーション手法の応用, 応用地質, 第23巻3号, pp. 50-56.
- 28) 明石健, 木村哲, 小吹章(2009) : SWING法による山岳トンネル湧水量の推定(18安房農用道3号トンネル工事), 西松建設技報, Vol. 32, pp. 49-54.
- 29) 西岡敬治, 高橋健二, 安田亨, 大西有三, 大津宏康(2003) : トンネル工事における環境保全に配慮した地下水情報化施工, 材料, Vol. 52, No. 5, pp. 516-522.
- 30) Peaceman, D. W.(1978) : Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation, *Society of Petroleum Engineers Journal*, pp. 183-194.
- 31) Peaceman, D. W.(1983) : Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation with nonsquare grid blocks and anisotropic permeability, *Society of Petroleum Engineers Journal*, pp. 531-543.
- 32) Peaceman, D. W.(1993) : Representation of a horizontal well in numerical reservoir simulation, *SPE Adv. Technology Series*, Vol. 1, No. 1, pp. 7-16.

- 33) 登坂博行, 小島圭二, 三木章生, 千野剛司(1996): 地表流と地下水流を結合した3次元陸水シミュレーション手法の開発, 地下水学会誌, 第38号, 第4号, pp. 253-267
- 34) 山田俊子, 櫻井英行, 鈴木誠(2015): 有限要素法を用いた浸透流解析における注水・揚水孔の実用的な簡易モデル, 土木学会論文集C (地圏工学), Vol. 71, No. 4, pp. 407-417.
- 35) Svensson, U. and Follin, S.(2010): Groundwater flow modelling of the excavation and operational phases – Forsmark, SKB Report, R-09-19, pp. 91-95.
- 36) 地層科学研究所(2011): 3D-Flow ver.1.3.2.
- 37) 菱谷智幸, 西垣誠, 橋本学(1999): 物質移行を伴う密度依存地下水流の3次元数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集, No.638/III49, pp.59-69.
- 38) 産業技術総合研究所(2022): 20万分の1日本シームレス地質図, <
<https://gbank.gsj.jp/seamless/>>, (入手 2020.8.3)
- 39) 社団法人日本地すべり学会(2006): 有限要素法による地すべり解析, 株式会社山海堂, pp.86-88.
- 40) 岡山地下水研究会(2003): 実務者のための地下水環境モデリング, 技報堂出版(株), pp.31-36.
- 41) 塩野清治, 能美洋介, 升本眞二, 坂本正徳(2001): Horizon2000: 等式・不等式制約条件や傾斜データを活用した地層面推定プログラムの改良, 情報地質, Vol.12, No.4, pp.229-249.
- 42) 野々垣進, 升本眞二, 塩野清治(2008): 3次 B-スプラインを用いた地層境界面の推定, 情報地質, Vol.19, No.2, pp.61-77.
- 43) 地層科学研究所(2020): Geo-Graphia ver.2.3.60524.0.
- 44) 社団法人日本河川協会(2004): 建設省河川砂防技術基準(案)同解説・調査編, 株式会社山海堂, pp.86-87.
- 45) 柳澤孝一, 古谷和夫, 大澤英昭, 若松尚則, 梅田浩司(1992): 我が国における地盤の透水性に関する調査・研究 (その1), 動力炉・核燃料開発事業団研究開発報告書, p.25.
- 46) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構: 九州新幹線(西ルート)概要, <
<https://www.jrtt.go.jp/project/kyushu.html#situation>> (入手 2022.11.24)
- 47) 小形昌徳(1989): 九州北西部, 多良岳地域の火山地質, 地質学雑誌, 第95巻, 第10号, pp. 755-768.
- 48) 西山昭一, 小川卓司, 原弘(2002): 地盤技術者のための3次元地質モデル構築とその利用—IG-Infoによる地質情報表現を例にして—, 応用地質技術年報, No. 22, pp. 149-153.
- 49) 3次元地質解技術コンソーシアム(2021): 3次元地質解析マニュアルVer3.0.
- 50) Journal, A. G. and Huijbregts, Ch. J.(1978): *Mining Geostatics*, Academic Press, pp. 303-410.

- 51) 新井勝男(1985)：地球統計学の基本的概念とその応用—鉱床品位のクリッキングとシミュレーションについて，鉱山地質，pp. 299-311.
- 52) 国土地理院：基盤地図情報ダウンロードサービス，
<<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>>（入手 2020.8. 3）
- 53) 気象庁：過去の気象データ検索， <<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>>
（入手 2020.8.3）