

処分システムに求められる 閉鎖性能の考え方

処分場パネル規模の水理に関する試解析

杉田 裕, 高橋美昭, 浦上 学, 北山一美
原子力発電環境整備機構

藤田朝雄, 油井三和
日本原子力研究開発機構

2007 年 3 月
原子力発電環境整備機構

本報告書は日本原子力研究開発機構 技術報告書 JAEA Research 2007-023 の内容と同じものである。

This report is equivalent to JAEA Technical report, JAEA Research 2007-023.

2007 年 3 月

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記へお問い合わせください。

〒108-0014 東京都港区芝 4 丁目 1 番地 23 号 三田 NN ビル 2 階
原子力発電環境整備機構 技術部
電話 03-4513-1114 (技術部) FAX03-4513-1599

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Science and Technology Department
Nuclear Waste Management Organization of Japan
Mita NN Bldg, 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan
Phone +81-3-4513-1114 Fax +81-3-4513-1599

©原子力発電環境整備機構
(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2007

処分システムに求められる 閉鎖性能の考え方

処分場パネル規模の水理に関する試解析

杉田 裕, 高橋美昭, 浦上 学, 北山一美
原子力発電環境整備機構

藤田朝雄, 油井三和
日本原子力研究開発機構

2007 年 3 月
原子力発電環境整備機構

2007 年 3 月

処分システムに求められる閉鎖性能の考え方
－処分場パネル規模の水理に関する試解析－
(研究報告)

杉田 裕¹⁾, 高橋美昭¹⁾, 浦上 学¹⁾, 北山一美¹⁾,

藤田朝雄²⁾, 油井三和²⁾

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価においては、処分場の閉鎖性能が極めて重要である。原子力発電環境整備機構と日本原子力研究開発機構は、地層処分システムに求められる閉鎖性能の考え方を示し、そこで示される坑道の埋め戻し材や粘土プラグ等の閉鎖要素の設計要件を明らかにするとともに今後の技術開発等の方向性を導出することを目的に、協力協定に基づき、共同で検討していくための場として 2004 年度から「処分場の閉鎖技術に関する検討会」を設置した。

2005年度に行った本検討では、初年度に坑道交差部を対象として得られた知見を基に、水理解析の対象を坑道交差部から処分場パネル規模へと拡張を行った。処分場パネル規模での水理解析では、処分パネルを構成する全ての処分坑道をモデル化する必要があり、モデルの構造が複雑になることから、坑道周囲に対して等価透水係数の考え方を適用した。解析では、粘土プラグの設置位置、埋め戻し材の透水係数、処分坑道の透水係数、動水勾配の方向をパラメータとし、解析結果への影響について概略評価することとした。

その結果、処分坑道の流量は、動水勾配の方向、処分坑道への粘土プラグの設置の有無、主要坑道の透水係数の大きさが影響することがわかった。

本研究は、日本原子力研究開発機構と原子力発電環境整備機構との協力協定に基づいて実施した「処分場の閉鎖技術に関する検討会」の成果である。

- 1) 原子力発電環境整備機構 技術部
- 2) 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門

March, 2007

Discussion on Sealing Performance Required in a Disposal System
— Preliminary Study on Hydraulic Analysis of Disposal Panel —

(Research document)

Yutaka SUGITA¹⁾, Yoshiaki TAKAHASHI¹⁾, Manabu URAGAMI¹⁾, Kazumi KITAYAMA¹⁾,

Tomoo FUJITA²⁾ and Mikazu YUI²⁾

Abstract

The sealing performance of a repository is very important for the safety assessment of the geological disposal system for high-level radioactive waste. NUMO and JAEA set up a technical commission to investigate sealing technology in a repository in 2004 following a cooperation agreement between these two organisations. The objectives of this commission were to present a concept of sealing performance required in the disposal system and to direct future R&D for design requirements of closure components (backfilling material, clay plug, etc.).

Hydraulic analyses on tunnel intersections were carried out during the first year in 2004. This was expanded into a hydraulic analysis of a complete disposal panel with all tunnels during the second year in 2005.

Since the model structure in 2005 was more complicated than the one used in 2004, the concept of equivalent permeability was adopted in and around each tunnel in the hydraulic analyses. Parameters used in the hydraulic analyses were installation positions of clay plugs, permeability of the backfilling material, permeability of disposal tunnel and directions of hydraulic gradient to estimate influences to the analytical results preliminary.

Analytical results showed that flow rate in a disposal tunnel was influenced by directions of hydraulic gradient, installation of the clay plug at the both ends of each disposal tunnel and permeability of the main tunnel.

Keywords: Sealing performance, Hydraulic analysis, Disposal panel, Closure components, Clay plug

This work has been performed in “Technical Commission on Sealing Technology of Repository” based on the cooperation agreement.

1) Science and Technology Department, Nuclear Waste Management Organization of Japan

2) Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency

目 次

1. はじめに	1
1.1 背景	1
1.2 検討会設置の主旨及び活動の目的	1
1.3 検討会の進め方	1
1.4 検討会でのこれまでの実施概要	3
1.5 報告書の内容	3
2. 水理解析領域の設定	4
2.1 処分場を対象とした水理解析における解析領域の設定	4
2.2 地下施設を対象とした水理解析における解析領域の設定	5
3. パネル規模の水理解析	6
3.1 等価透水係数の導入	6
3.2 解析条件	12
4. 解析結果	16
4.1 1本の処分坑道全長の地下水流動	17
4.2 処分パネル全体における坑道交差部の地下水流動	23
4.3 流量評価点の代表点における傾向	58
4.4 最大値による評価	62
5 考察	68
6. おわりに	69
謝 辞	69
参考文献	70

CONTENTS

1. Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Reasons for establishing the commission and objectives of its activities	1
1.3 Procedural steps of the commission	1
1.4 Outline of activities of the commission	3
1.5 Contents of the report	3
2. Definition of area for hydraulic analysis	4
2.1 Definition of area for hydraulic analysis for repository	4
2.2 Definition of area for hydraulic analysis for underground facility	5
3. Hydraulic analysis of disposal panel	6
3.1 Introduction of equivalent permeability	6
3.2 Analysis conditions	12
4. Results	16
4.1 Hydraulic behaviour of one disposal tunnel over its entire length	17
4.2 Hydraulic behaviour at tunnel intersections of whole disposal panel	23
4.3 Trends at major estimation points of flow rate	58
4.4 Estimation based on maximum flow rate	62
5. Discussion	68
6. Conclusions	69
Acknowledgements	69
References	70

表 目 次

表-3.1	透水係数の算出値一覧	10
表-3.2	粘土プラグの設置位置と透水係数の設定値一覧	14

図 目 次

図-1.1	閉鎖要素の要求性能抽出のフロー	2
図-2.1	解析領域のイメージ	4
図-2.2	水理解析で対象とする解析領域の地下施設での設定イメージ	5
図-3.1	解析で評価対象とする処分パネル	6
図-3.2	等価透水係数の設定	6
図-3.3	材料の組合せと流れの方向	7
図-3.4	等価透水係数の設定（並列）	7
図-3.5	等価透水係数の設定（直列）	8
図-3.6	断面形状の簡略化	11
図-3.7	解析モデルの鳥瞰図	12
図-3.8	解析モデル断面図	12
図-3.9	解析メッシュ	13
図-3.10	解析モデルの境界条件	13
図-3.11	主要坑道の有無を表現したイメージ	14
図-3.12	各ケースにおけるプラグの設置状況	15
図-4.1	解析での評価点の位置関係	16
図-4.2	流量評価点（断面図）	17
図-4.3	処分坑道 No.1, No.35 における通過流量の分布（直交圧力勾配）	18
図-4.4	処分坑道 No.1, No.35 における通過流量の分布（平行圧力勾配）	18
図-4.5	処分坑道 No.1, No.35 における通過流量の分布（直交圧力勾配）	19
図-4.6	処分坑道 No.1, No.35 における通過流量の分布（平行圧力勾配）	20
図-4.7	処分坑道 No.1, No.35 における通過流量の分布（直交圧力勾配）	21
図-4.8	処分坑道 No.1, No.35 における通過流量の分布（平行圧力勾配）	22
図-4.9	評価点における流れの方向の正負	23
図-4.10	流量評価点における通過流量（主要坑道の透水係数 10^{-5}m/s , 粘土プラグ設置の効果）（直交圧力勾配）	30
図-4.11	流量評価点における通過流量（主要坑道の透水係数 10^{-6}m/s , 粘土プラグ設置の効果）（直交圧力勾配）	31
図-4.12	流量評価点における通過流量（主要坑道の透水係数 10^{-7}m/s , 粘土プラグ設置の効果）（直	

	交圧力勾配)	32
図-4.13	流量評価点における通過流量(粘土プラグを処分坑道, 主要坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)(直交圧力勾配)	33
図-4.14	流量評価点における通過流量(粘土プラグを処分坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)(直交圧力勾配)	34
図-4.15	流量評価点における通過流量(粘土プラグを主要坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)(直交圧力勾配)	35
図-4.16	流量評価点における通過流量(粘土プラグの設置なし, 主要坑道の透水係数の影響)(直交圧力勾配)	36
図-4.17	流量評価点における通過流量(主要坑道の透水係数 10^{-5} m/s, 粘土プラグ設置の効果)(平行圧力勾配)	37
図-4.18	流量評価点における通過流量(主要坑道の透水係数 10^{-6} m/s, 粘土プラグ設置の効果)(平行圧力勾配)	38
図-4.19	流量評価点における通過流量(主要坑道の透水係数 10^{-7} m/s, 粘土プラグ設置の効果)(平行圧力勾配)	39
図-4.20	流量評価点における通過流量(粘土プラグを処分坑道, 主要坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)(平行圧力勾配)	40
図-4.21	流量評価点における通過流量(粘土プラグを処分坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)(平行圧力勾配)	41
図-4.22	流量評価点における通過流量(粘土プラグを主要坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)(平行圧力勾配)	42
図-4.23	流量評価点における通過流量(粘土プラグの設置なし, 主要坑道の透水係数の影響)(平行圧力勾配)	43
図-4.24	流量評価点における通過流量(主要坑道の透水係数 10^{-5} m/s, 粘土プラグ設置の効果)(直交圧力勾配)	44
図-4.25	流量評価点における通過流量(主要坑道の透水係数 10^{-6} m/s, 粘土プラグ設置の効果)(直交圧力勾配)	45
図-4.26	流量評価点における通過流量(主要坑道の透水係数 10^{-7} m/s, 粘土プラグ設置の効果)(直交圧力勾配)	46
図-4.27	流量評価点における通過流量(粘土プラグを処分坑道, 主要坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)(直交圧力勾配)	47
図-4.28	流量評価点における通過流量(粘土プラグを処分坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)(直交圧力勾配)	48
図-4.29	流量評価点における通過流量(粘土プラグを主要坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)(直交圧力勾配)	49
図-4.30	流量評価点における通過流量(粘土プラグの設置なし, 主要坑道の透水係数の影響)(直交圧力勾配)	50
図-4.31	流量評価点における通過流量(主要坑道の透水係数 10^{-5} m/s, 粘土プラグ設置の効果)(平行圧力勾配)	51
図-4.32	流量評価点における通過流量(主要坑道の透水係数 10^{-6} m/s, 粘土プラグ設置の効果)(平	

	行圧力勾配)	52
図-4.33	流量評価点における通過流量(主要坑道の透水係数 10^{-7}m/s , 粘土プラグ設置の効果)(平行圧力勾配)	53
図-4.34	流量評価点における通過流量(粘土プラグを処分坑道, 主要坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)(平行圧力勾配)	54
図-4.35	流量評価点における通過流量(粘土プラグを処分坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)(平行圧力勾配)	55
図-4.36	流量評価点における通過流量(粘土プラグを主要坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)(平行圧力勾配)	56
図-4.37	流量評価点における通過流量(粘土プラグの設置なし, 主要坑道の透水係数の影響)(平行圧力勾配)	57
図-4.38	流量評価点における通過流量(主要坑道の透水係数の影響)(直交圧力勾配)	60
図-4.39	流量評価点における通過流量(主要坑道の透水係数 10^{-6}m/s , 粘土プラグ設置の効果)(直交圧力勾配)	61
図-4.40	各ケースの最大流量の比較(直交圧力勾配)	62
図-4.41	プラグ設置の効果(直交圧力勾配)	63
図-4.42	各ケースの最大流量の比較(平行圧力勾配)	63
図-4.43	プラグ設置の効果(平行圧力勾配)	64
図-4.44	各ケースの最大流量の比較(直交圧力勾配)	65
図-4.45	プラグ設置の効果(直交圧力勾配)	65
図-4.46	各ケースの最大流量の比較(平行圧力勾配)	66
図-4.47	プラグ設置の効果(平行圧力勾配)	67
図-5.1	地下水流動の模式図(直交圧力勾配)	68
図-5.2	地下水流動の模式図(水平圧力勾配)	68

1. はじめに

1.1 背景

高レベル放射性廃棄物（以下、「高レベル廃棄物」）の地層処分システムの安全評価を行うためには、処分場の閉鎖性能を理解することが重要である。処分場の閉鎖に関わる技術（以下、「閉鎖技術」）には、処分場のレイアウト設計や坑道掘削前後の止水対策（止水グラウト等）、掘削影響領域の影響低減対策等も関係するが、本検討では、処分場の長期挙動を考慮し、人工バリア定置後の坑道の処置技術を検討の対象とする。処分場の閉鎖性能を評価するためには、処分技術で対応可能である坑道周辺の処置技術（物質移行経路を分断する等）と、その処置部分の安全評価におけるモデル化や解釈の間で整合性を確保しておく必要がある。

1.2 検討会設置の主旨及び活動の目的

核燃料サイクル開発機構（現在の日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」））は、第2次取りまとめ^{1) 2) 3)}以降進めてきた埋め戻し材や粘土プラグ等の地下環境での機能に関する研究成果^{4) 5) 6) 7) 8)}を処分事業へ反映させるためには、実施主体である原子力発電環境整備機構（以下、「原環機構」）のニーズを考慮する必要がある。一方、原環機構は、最終処分事業を的確かつ効率的に推進するため、実施主体としての技術基盤を確保する上で必要な技術開発の一つとして取り組んでいる処分場閉鎖技術の評価手法の開発を的確かつ効率的に実施するためには、原子力機構のこれまでの成果を活用しつつ、自らの評価手法の整備を図ることが適切である、との双方のニーズから、原子力機構と原環機構は、処分システムに求められる閉鎖性能の考え方を整理するため、両者で締結されている「特定放射性廃棄物の地層処分技術に関する協力協定」に基づき協力を実施するものとし、「処分場閉鎖技術に関する検討会」を2004年度に設置し、検討を開始した⁹⁾。

本検討会は、高レベル放射性廃棄物地層処分システムの安全評価上重要と考えられる、処分システムに求められる閉鎖性能の考え方を示し、そこで示される閉鎖要素の設計要件の考え方に対する今後の技術開発等の方向性を導出することを目的とする。

本検討を実施することにより、原子力機構は、処分場の閉鎖性能に関する考え方の整理、及びそれらを検証する幌延深地層研究センターにおける閉鎖技術の試験研究計画の策定が可能となる。また、国が実施する地層処分に関する安全規制等の策定に資する技術基盤情報の蓄積が可能となる。原環機構は、埋め戻し材・プラグ等に対する具体的な機能を考慮することにより、概要調査地区等選定段階における応募区域の具体的な地質環境条件に合わせた閉鎖設計が可能となる。また、本検討での知見を基に閉鎖技術や閉鎖要素の機能を考慮した解析・評価を実施することで、詳細な安全評価手法の整備が可能となる。

なお、地層処分事業は段階ごとに進められることとなるが、検討会では処分場の閉鎖段階に移るための判断基準等は扱わないものとし、技術的問題の検討に焦点を絞ることとしている。

1.3 検討会の進め方

図-1.1に本検討における閉鎖要素の要求性能抽出のフローを示す。

検討の第一段階として閉鎖要素を設定する。昨年度の報告書で示したように、本検討会で対象としている処分場の閉鎖性能に関わる閉鎖要素とは、閉鎖のために必要となる要素だけではなく、閉鎖性能を評価する上で考慮することが必要となる要素を閉鎖要素として取り扱っており、その内訳は、坑道（処分坑道、連絡坑道、主要坑道、アクセス坑道）、掘削影響領域（Excavated Disturbed

Zone, (以下, 「EDZ」)), 支保工, プラグ (止水性を期待する粘土プラグ, 構造物としての機能を期待するコンクリートプラグ), 母岩である⁹⁾。

次に, 設定された閉鎖要素を考慮して水理解析を行う。水理解析の目的は, 核種移行挙動の把握のために着目すべき領域を設定することである。このため, 水理解析では解析領域, 閉鎖要素のモデル化, 各要素の物性値, 境界条件を変えたさまざま解析を行い, それぞれの設定について解析結果に与える影響を概略把握する。

ただし, 構成要素全ての物性値をパラメータとすると, 膨大な解析ケースについて評価が必要となることから, 母岩は堆積岩を仮定し, 透水係数は一定値とする。EDZの透水係数は, 坑道の直径に応じて母岩より1桁あるいは2桁大きい値とする⁹⁾。粘土プラグやコンクリートプラグは, 設置位置について考慮し, コンクリートプラグは物性値についても考慮する。

この水理解析に関しては, 1.4節に後述するように, 昨年度(2004年度)処分坑道と主要坑道の交差部に着目した解析を行い, 2005年度は処分場パネル規模の解析に着手した。これらの成果を考慮して, 更に詳細な解析を行う計画である。

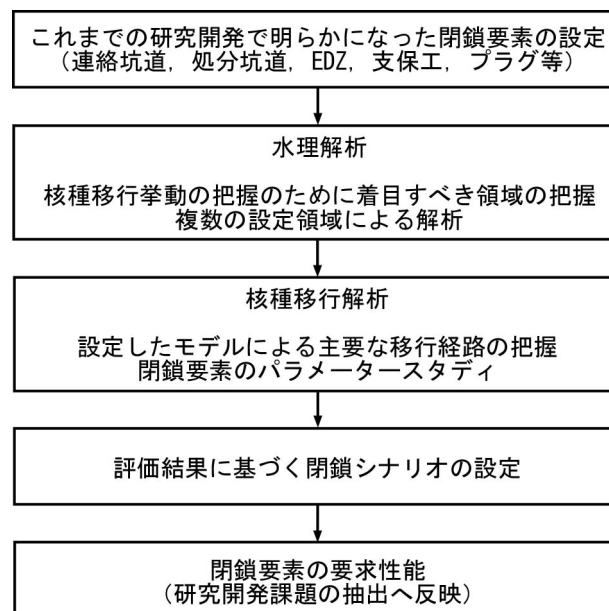


図-1.1 閉鎖要素の要求性能抽出のフロー

次に, 水理解析の解析結果を適切に評価して核種移行解析を行う。ここでは, 主要な核種の移行経路を把握し, 閉鎖要素の物性値をどう設定する(設計する)ことが核種移行上適切であるかを評価する。核種の放出は, 人工バリアを定置することとなる処分坑道から行うこととする。本解析で扱うような低透水性の場合は, 核種の移行は拡散により進展するため, 水理解析で求められた流れの方向と核種の移行経路とは必ずしも一致するものではないことが予想されることから, 解析条件の設定が重要となる。

次に, 核種移行評価結果に基づき閉鎖シナリオを設定する。ここでは, 核種移行解析結果に基づき, 閉鎖要素の物性値による複数の閉鎖シナリオが考えられるが, 基本的なシナリオを設定し, それの変動として各種のシナリオを設定することとなる。

閉鎖シナリオの構築から, 各閉鎖要素に求められる要求性能が示されることになる。これらの要

求性能を発揮するための各技術が確立されていない場合は、これらの要求性能を発揮するために必要となる技術開発が課題となる。ここで挙げられた課題の解決策を今後の課題として抽出する。

本検討は、2004 年度から3 年間を検討期間の目安として実施しているが、検討期間に関しては、検討状況に応じて柔軟に対応することとする。

1.4 検討会でのこれまでの実施概要

2004年度は、構成要素間の相互影響や埋め戻し材、粘土プラグ等の効果等を概略把握するため、これらの構成要素が含まれていて、かつ処分場の一般的な部位であると考えた処分坑道と主要坑道の交差部及びその周辺に着目し、人工バリア周囲における地下水の流速や通過流量を感度の指標とし、処分場に存在すると考えられる構成要素を考慮した水理解析を行った⁹⁾。

2005年度は、水理解析でモデル化する解析領域の対象を、初年度（2004年度）の坑道交差部から処分場パネル規模へと拡張を行った。ここでは、解析モデルの大きさを考慮して、構成要素の透水係数の設定において、等価透水係数の考え方を導入した。粘土プラグの設置位置、埋め戻し材の透水係数、処分坑道の透水係数、動水勾配の方向をパラメータとした。

1.5 報告書の内容

本報告書は、2005 年度に実施した水理解析の結果について示すものである。2 章で水理解析領域の設定、3 章でパネル規模の水理解析、4 章で解析結果、5 章で考察について示す。

本報告書で使用する用語類は、第2次取りまとめ^{1) 2) 3)}を参考として使用する。

2. 水理解析領域の設定

1.3節で示したように、水理解析は核種移行解析で着目すべき領域の把握のために実施する。水理解析で重要な考慮項目は、①解析領域、②モデル化する構成要素、③各構成要素の物性、そして④境界条件であり、これらのうち、一つでも設定が不適切な場合は十分な解析結果を導くことは出来ない。

解析領域の設定に関しては、2.1節で詳しく示すが、計算能力に余裕があり、モデルの大きさにも制限が無いような場合は、解析したい対象とする領域全体をカバーするような大きなモデルで計算するのが理想的である。しかしながら、モデルが大きくなることにより計算機への負荷が大きくなる。

解析領域とモデル化する構成要素の数には密接な関係がある。処分場の構成要素を考えた場合、坑道は支保工、EDZ、坑道内部の充填材（緩衝材や埋め戻し材）であり、複数の坑道をモデル化する場合それらの接続についてもモデル化が必要となる。解析で対象とする領域が広がると、考慮する坑道の数も多くなり、モデルは急激に複雑になる。本検討で用いた解析コードは有限要素法の移流分散解析ソフトDtransu-3D-EL¹⁰⁾であり、モデルを要素で分割することとなる。この際、メッシュの分割では構成要素の種類が多くなると要素同士の接触する部分は細かいメッシュとする必要があり、構成要素が多くなること、あるいは構成要素の形状が複雑になることで解析モデル全体の節点数や要素数は膨大なものとなり、計算機への負担は大きくなる。このため、細部に特化した解析では解析モデルで忠実に構成要素を考慮するものの、大規模なモデルでは複数の構成要素を統合して単純化するなど、解析上の工夫が必要になる。この際、構成要素の取り扱いが重要になる。

2.1 処分場を対象とした水理解析における解析領域の設定

処分場における地下水流動を把握する目的で水理解析を行う際、解析でモデル化する領域や設定する境界条件によって解析結果が異なることから、解析で着目する対象を明確にするとともに、適切な解析領域を設定することが重要となる。処分場を対象とした解析領域のイメージを図-2.1に示す。最も大きい解析領域は地上施設も含めた処分場全領域であり、地下施設全体、パネル規模の順に解析領域はより限定されたものとなる。

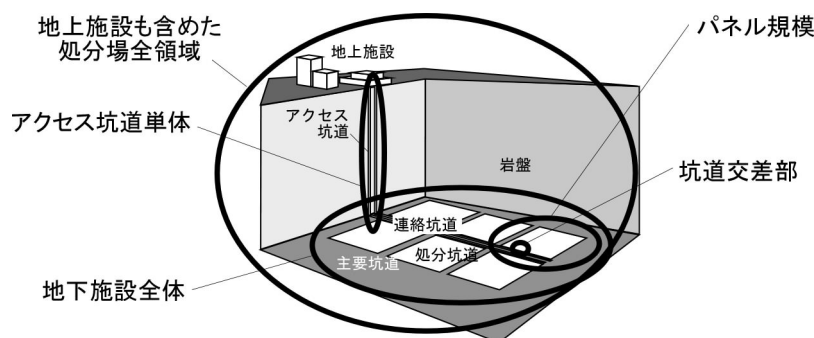


図-2.1 解析領域のイメージ

パネル規模よりも更に焦点を絞った解析領域として、坑道交差部が考えられる。地層処分では地下施設からの核種の移行が重要な評価対象となることから、地上一地下間の垂直方向の流動に着目するアクセス坑道単体に着目した解析も考えられる¹¹⁾。

閉鎖要素の性能を把握するためには、閉鎖要素を個別にモデル化することが必要であり、その場合に処分場全領域、地下施設全体のような大きな解析領域を対象とした大規模な解析モデルを構築することは、解析モデルの構成そのものを非常に複雑にするとともに、節点数、要素数が膨大となり、計算機への負担も大きくなる。結果として一つの解析結果を得るために多くの時間を費やすこととなり、効率的ではない。

そこで、構造を単純化したモデルで概略の傾向を把握する方法と、局所の限定した領域を対象とした小さい解析モデルを用いた詳細な検討の両者のアプローチを併用することが有効と考えられる。

2.2 地下施設を対象とした水理解析における解析領域の設定

ここで、地下施設におけるパネル規模、坑道交差部を対象とした解析領域の設定例を図-2.2に示す。図中(a)は、処分パネルの端部に当たる処分坑道と主要坑道の交差部に相当する。2004年度に実施した水理解析は、本解析領域を対象とした解析を実施した⁹⁾。(b)は、一つの処分パネル全体をモデル化したものである。(a)では、坑道のモデル化に当たって、坑道そのもの、EDZ、支保工を考慮することが出来る。さらに、プラグに関しては、プラグの大きさや形に関してもモデル化でき、坑道から岩盤部への切欠きについても考察が可能である。

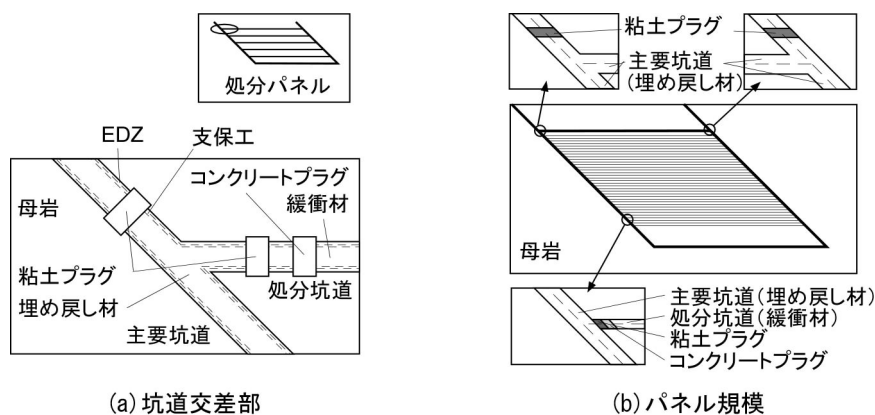


図-2.2 水理解析で対象とする解析領域の地下施設での設定イメージ

(b)のパネル規模の解析では、数十本に及ぶ処分坑道をモデル化することとなり、同様の詳細度での解析は難しくなる。このような規模の大きい解析では、3章で後述するように、複数の構成要素を合わせた物性の設定を行う等、モデルを簡略するための工夫が必要となる。つまり、数十本という坑道をモデル化する際に、それを構成する要素の直列および並列の透水係数を等価透水係数として算出し、解析条件に応じて適切な設定値を適用するという考え方である。

物性値だけでなく、境界条件の設定もまた、解析結果に大きく影響することとなる。特に、局部に焦点を当てた解析ではその傾向は強いと考えられることから、境界条件の設定に関しても、十分な配慮が必要である。

水理解析の解析領域の設定には上述したように複数の領域が考えられるが、本検討の2年目に当たる2005年の解析では、地下施設を対象とした解析として、図(b)で示したパネル規模を解析領域に設定し、解析結果への影響について概略評価することとした。

3. パネル規模の水理解析

パネル規模の水理解析は、図-2.2に示したように、1つの処分パネルをモデル化する。ここでの解析では、処分坑道とその周囲を取り巻く主要坑道をモデル化し、主要坑道と処分坑道の透水係数や、プラグの設置位置が変わることによる、処分坑道内あるいは周囲の地下水流動を把握する。

3.1 等価透水係数の導入

(1) 等価透水係数の考え方

パネル規模での解析では、図-3.1に示すように35本の処分坑道（図では鶯色の坑道）およびその周辺を取り巻く主要坑道（図では茶色の坑道）で構成される1つの処分パネル¹²⁾を考慮したモデルを用いる。この解析では、考慮する1本ずつの坑道に対して緩衝材、埋め戻し材、EDZ、支保工等を考えることは解析モデルが複雑になり、解析モデルの作成そのものが容易ではない。また、第2次とりまとめで示された坑道の断面形状は、堆積岩の横置き方式の場合、処分坑道は円形、主要坑道は三芯円である²⁾。坑道の数のみならず、坑道断面の異なる坑道の交差部が存在する本解析では、支保工部分やEDZ部分の接続部等、坑道形状を解析モデルで忠実に表現することも、解析モデルの複雑さから容易ではない。さらに、坑道を取り巻く支保工やEDZは、異なる透水係数を持つことから、まともに水理解析を行うとすれば、これらを解析モデルで表現する必要がある。

そこで、本解析では図-3.2に示すように、坑道を円形断面と仮定して等価透水係数を導入し、異なる透水係数を持つ坑道、支保工、EDZを一つの材料とみなし、等価透水係数 K に代表させた。等価透水係数の考え方を導入することで解析モデルを簡略化し、大規模な解析である、処分パネル規模の解析を可能にした。以下に、等価透水係数の設定について示す。

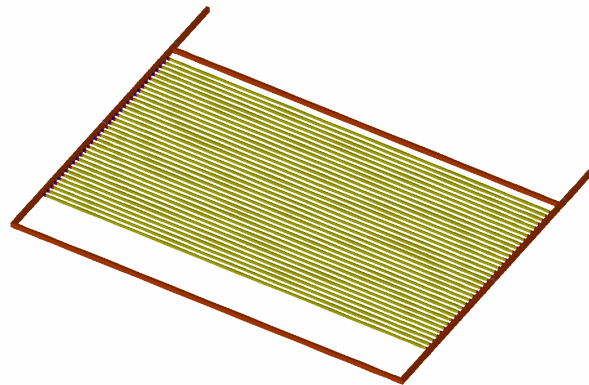


図-3.1 解析で評価対象とする処分パネル

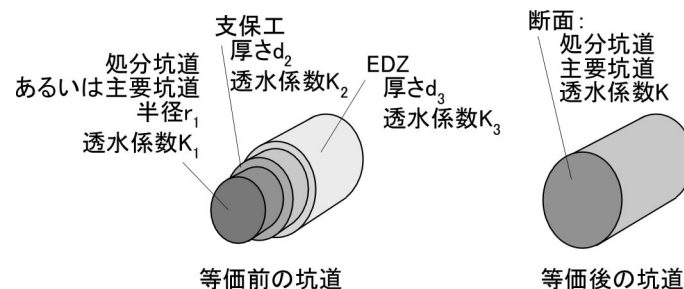


図-3.2 等価透水係数の設定

異なる透水係数 ($K_1, K_2, \dots, K_n$) を持つ材料1, 材料2, $\dots$, 材料nからなる材料の透水係数を一つの材料 (材料0) の透水係数で表現することを考える。複数の材料の透水性を表現する場合, 透水係数は材料の組合せの並びとそれに対する流れの方向の組合せにより変化する。たとえば, 図-3.3に示すように透水係数 (K_1, K_2, K_3) を持つ材料1, 材料2, 材料3に対して並列 (Parallel) となる方向と直列 (Series) となる方向の2方向の透水性が考えられる。その透水係数は, 並列の場合 K_p , 直列の場合 K_s と表現することとする。

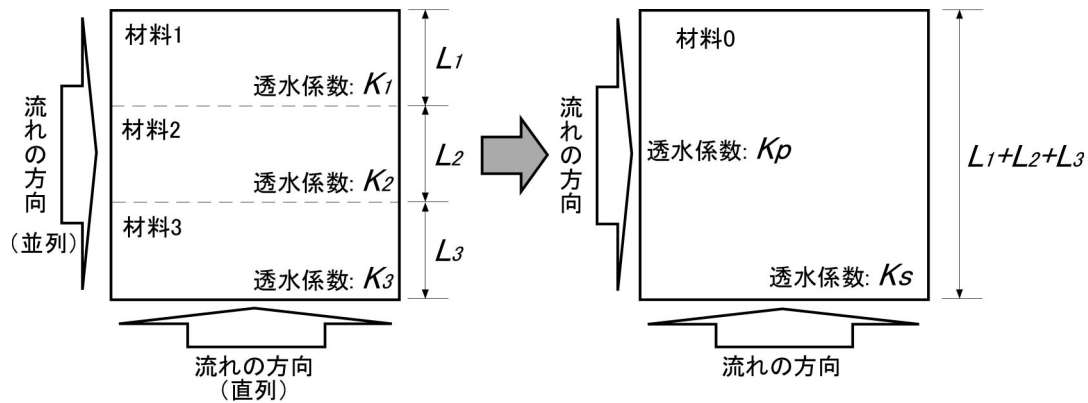


図-3.3 材料の組合せと流れの方向

はじめに, 図-3.4に示すように並列の場合を考える。材料0の透水係数 K_p と材料1, 材料2, 材料3の透水係数の間には各材料の透過断面幅を用いて式 (3.1) の関係が成立する。

$$K_p(L_1 + L_2 + L_3) = K_1L_1 + K_2L_2 + K_3L_3 \quad (3.1)$$

これより,

$$K_p = \frac{K_1L_1 + K_2L_2 + K_3L_3}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (3.2)$$

となり, 等価後の透水係数は等価前の各材料の透水係数と各材料の透過断面幅で表現することが出来る。

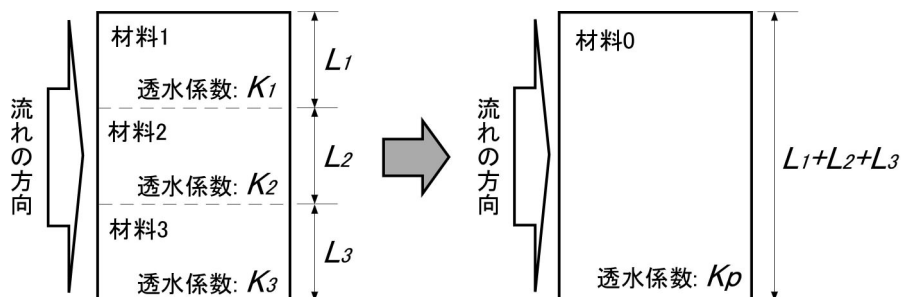


図-3.4 等価透水係数の設定（並列）

次に, 図-3.5に示すように直列の場合を考える。並列の場合と同様に, 材料0の透水係数 K_s と材料1, 材料2, 材料3の透水係数の間には各材料の透過断面長さをを用いて式 (3.3) の関係が成立する。

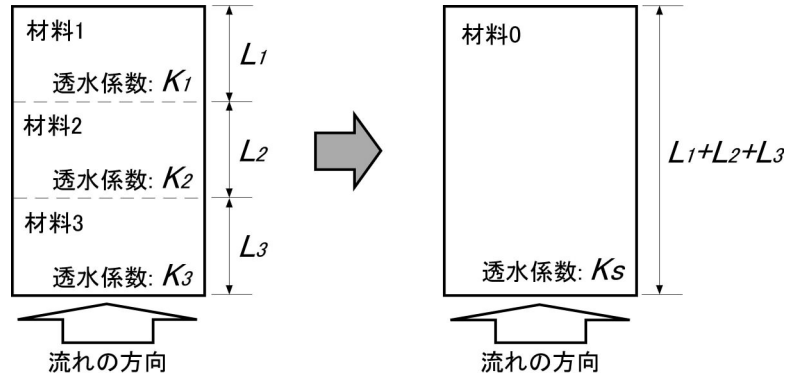


図-3.5 等価透水係数の設定（直列）

$$\frac{L_1 + L_2 + L_3}{K_s} = \frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_3} \quad (3.3)$$

これより

$$K_s = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{L_1 / K_1 + L_2 / K_2 + L_3 / K_3} \quad (3.4)$$

となり、こちらも同様に等価後の透水係数は等価前の各材料の透水係数と各材料の透過断面長さで表現することが出来る。

ここで、 K_p と K_s の大小を考える。

$$\begin{aligned} K_p - K_s &= \frac{K_1 L_1 + K_2 L_2 + K_3 L_3}{L_1 + L_2 + L_3} - \frac{L_1 + L_2 + L_3}{L_1 / K_1 + L_2 / K_2 + L_3 / K_3} \\ &= \frac{(L_1 / K_1 + L_2 / K_2 + L_3 / K_3)(K_1 L_1 + K_2 L_2 + K_3 L_3) - (L_1 + L_2 + L_3)^2}{(L_1 + L_2 + L_3)(L_1 / K_1 + L_2 / K_2 + L_3 / K_3)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

ここで、分子（3.6）式は（3.7）式のように変換できる。

$$\begin{aligned} &(K_1 L_1 + K_2 L_2 + K_3 L_3) \left(\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_3} \right) - (L_1 + L_2 + L_3)^2 \\ &= \left(L_1^2 + \frac{K_1}{K_2} L_1 L_2 + \frac{K_1}{K_3} L_1 L_3 + \frac{K_2}{K_1} L_1 L_2 + L_2^2 + \frac{K_2}{K_3} L_2 L_3 + \frac{K_3}{K_1} L_1 L_3 + \frac{K_3}{K_2} L_2 L_3 + L_3^2 \right) \\ &\quad - (L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 + 2L_1 L_2 + 2L_2 L_3 + 2L_3 L_1) \\ &= L_1 L_2 \left(\frac{K_1}{K_2} + \frac{K_2}{K_1} - 2 \right) + L_2 L_3 \left(\frac{K_2}{K_3} + \frac{K_3}{K_2} - 2 \right) + L_3 L_1 \left(\frac{K_3}{K_1} + \frac{K_1}{K_3} - 2 \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

ここに $K_1 K_2 K_3$ を乗じると、

$= K_3 L_1 L_2 (K_1^2 + K_2^2 - 2K_1 K_2) + K_1 L_2 L_3 (K_2^2 + K_3^2 - 2K_2 K_3) + K_2 L_3 L_1 (K_3^2 + K_1^2 - 2K_3 K_1)$ よって、
分子は

$$= K_3 L_1 L_2 (K_1 - K_2)^2 + K_1 L_2 L_3 (K_2 - K_3)^2 + K_2 L_3 L_1 (K_3 - K_1)^2 \quad (3.8)$$

となる。

一方、分母は同様に $K_1 K_2 K_3$ を乗じて

$$\begin{aligned} & K_1 K_2 K_3 (L_1 + L_2 + L_3) (L_1 / K_1 + L_2 / K_2 + L_3 / K_3) \\ &= (L_1 + L_2 + L_3) (K_2 K_3 L_1 + K_3 K_1 L_2 + K_1 K_2 L_3) \end{aligned} \quad (3.9)$$

となる。

以上のことから、(3.5) 式は、

$$Kp - Ks = \frac{K_3 L_1 L_2 (K_1 - K_2)^2 + K_1 L_2 L_3 (K_2 - K_3)^2 + K_2 L_3 L_1 (K_3 - K_1)^2}{(L_1 + L_2 + L_3) (K_2 K_3 L_1 + K_3 K_1 L_2 + K_1 K_2 L_3)} > 0 \quad (3.10)$$

となり、常に、並列の透水係数が大きいことが分かる。

したがって、より水を通しやすい Kp を坑道の透水係数の代表値 K として用いることで、処分場における地下水流動場の評価としては安全側の評価となる。本検討の場合も、坑道に平行な流れの等価透水係数は、坑道を横切る方向の流れの等価透水係数よりも大きいことから、地下水流動場の評価としては安全側の評価となる。

等価透水係数の代表値とした並列の場合で、関係式を求める。まず、図-3.2から、坑道（処分坑道、主要坑道）、支保工、EDZの断面（ S_1 , S_2 , S_3 ）は、それぞれ

$$S_1 = \pi r_1^2 \quad (3.11)$$

$$S_2 = \pi (r_1 + d_2)^2 - S_1 = \pi (d_2^2 + 2d_2 r_1) \quad (3.12)$$

$$S_3 = \pi (r_1 + d_2 + d_3)^2 - S_1 - S_2 = \pi (d_3^2 + 2d_3 r_1 + 2d_2 d_3) \quad (3.13)$$

であり、並列の場合の透水係数とその材料の断面積の関係（式（3.2）参照）から、

$$K = \frac{K_1 S_1 + K_2 S_2 + K_3 S_3}{S_1 + S_2 + S_3} \quad (3.14)$$

を得る。式（3.11）（3.12）（3.13）を代入して、

$$K = \frac{K_1 r_1^2 + (d_2^2 + 2d_2 r_1) K_2 + (d_3^2 + 2d_3 r_1 + 2d_2 d_3) K_3}{(r_1 + d_2 + d_3)^2} \quad (3.15)$$

を得る。

(2) 等価透水係数の算出

これまでに示した関係を用いて等価透水係数を算出する。緩衝材、粘土プラグ、岩盤、EDZの透水係数は固定とし、それぞれ $1.0 \times 10^{-12} \text{m/s}$ ⁹⁾、 $1.0 \times 10^{-11} \text{m/s}$ ⁴⁾、 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ ⁹⁾、及びEDZについては $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ （主要坑道の場合）、 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ （処分坑道の場合）とした。埋め戻し材とコンクリート材料は3通りの透水係数を設定した。埋め戻し材の透水係数は $1.0 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ⁹⁾、コンクリート材料の透水係数は、 $1.0 \times 10^{-13} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ⁹⁾とした。

坑道の半径、支保工の厚さ、EDZの厚さに関しては、第2次取りまとめ²⁾の仕様を基本として円形断面とし、処分坑道は、直径2m、支保工厚さ10cm、EDZ厚さ50cmとした。主要坑道は、直径4m、支保工厚さ50cm、EDZ厚さ50cmとした。

埋め戻し材、コンクリート材料の透水係数をパラメータとした各坑道の等価透水係数の算出値一覧を表-3.1に示す。処分坑道の透水係数は、緩衝材相当の場合、最小値は $5.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 、最大値は $9.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ である。埋め戻し材相当時の処分坑道の透水係数は、最小値は $4.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 、最大値は $5.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ である。主要坑道の透水係数は、最小値は $3.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 、最大値は $7.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ である。

解析で用いる等価透水係数は、表-3.1から、主要坑道の透水係数の算出値は最小値が $3.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 、最大値が $7.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ であることから、これらの透水係数の幅を包含するように $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の3通りを設定した。処分坑道の等価透水係数は、緩衝材を想定する場合は最大値をカバーするように $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 、埋め戻し材を想定する場合は、ほぼ中間値である $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ とした。

表-3.1 等価透水係数の算出値一覧[m/s]

パラメータ		等価透水係数の算出値		
埋め戻し材	コンクリート材料	処分坑道 (緩衝材)	処分坑道 (埋め戻し)	主要坑道
1.0×10^{-11}	1.0×10^{-13}	5.0×10^{-8}	5.0×10^{-8}	3.0×10^{-7}
1.0×10^{-11}	1.0×10^{-9}	5.0×10^{-8}	5.0×10^{-8}	3.0×10^{-7}
1.0×10^{-11}	1.0×10^{-5}	9.0×10^{-7}	9.0×10^{-7}	3.0×10^{-6}
1.0×10^{-8}	1.0×10^{-13}	5.0×10^{-8}	6.0×10^{-8}	3.0×10^{-7}
1.0×10^{-8}	1.0×10^{-9}	5.0×10^{-8}	6.0×10^{-8}	3.0×10^{-7}
1.0×10^{-8}	1.0×10^{-5}	9.0×10^{-7}	9.0×10^{-7}	3.0×10^{-6}
1.0×10^{-5}	1.0×10^{-13}	5.0×10^{-8}	4.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}
1.0×10^{-5}	1.0×10^{-9}	5.0×10^{-8}	4.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}
1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	9.0×10^{-7}	5.0×10^{-6}	7.0×10^{-6}

前述したように、第2次取りまとめの堆積岩の仕様²⁾では処分坑道の形状は円形、主要坑道の断面形状は三芯円であるが、ここでは円形断面と仮定して等価透水係数を求めた。しかしながら、円形断面かつ断面積が異なる坑道の接続部は複雑な形状であり、解析モデルは複雑になる。そこで、更なる計算の簡略化を図るため、解析モデルにおける坑道形状は、図-3.6に示すように円形断面を矩形断面に置き換えた。形状の変換において、計算の効率化から断面積そのものは若干小さく設定したが、EDZまでを含めた坑道断面積比がほぼ等しくなることに留意した。円形断面での支保工およびEDZを含めた主要坑道と処分坑道の坑道断面積比は $28 \text{m}^2 : 8 \text{m}^2 (=3.5 : 1)$ である。矩形断面の主要坑道は4m角、処分坑道は2m角とした。この場合の坑道断面積比は4 : 1となり、主要坑道と

処分坑道の断面積比はほぼ等しい。

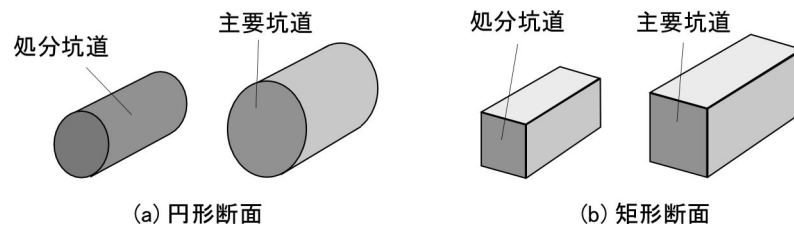


図-3.6 断面形状の簡略化

3.2 解析条件

解析は、昨年の解析と同様、移流分散解析ソフトDtransu-3D-EL¹⁰⁾を用いた飽和浸透流解析である。解析モデルの鳥瞰図のカットモデルを図-3.7に、パネル部分の断面図を図-3.8に示す。図-3.1に示したように、第2次とりまとめ^{1) 2) 3)}や原環機構の技術報告書¹²⁾で示された処分パネルの例の一つをモデル化した。処分坑道は35本で、その周囲に主要坑道がある。主要坑道と処分坑道の交差角度は45度である。また、モデルの境界部と処分パネル（処分坑道）との距離は、100m以上を確保した。

図-3.8に示すように、坑道の断面形状は、主要坑道が4m角の矩形、処分坑道は2m角の矩形である。各処分坑道の端部（主要坑道との交差部）にはコンクリートプラグを設置し、コンクリートプラグの外側には粘土プラグを設置する。ただし、後述するように粘土プラグは解析ケースによって設置しないため、その場合はコンクリートプラグが主要坑道の交差部に位置することとなる。図の上部に示すように、主要坑道の交差点から10mの地点に位置する主要坑道には粘土プラグを設置する。ただし、この粘土プラグも解析ケースによっては設置しない。粘土プラグ、コンクリートプラグは厚さを2mとした。

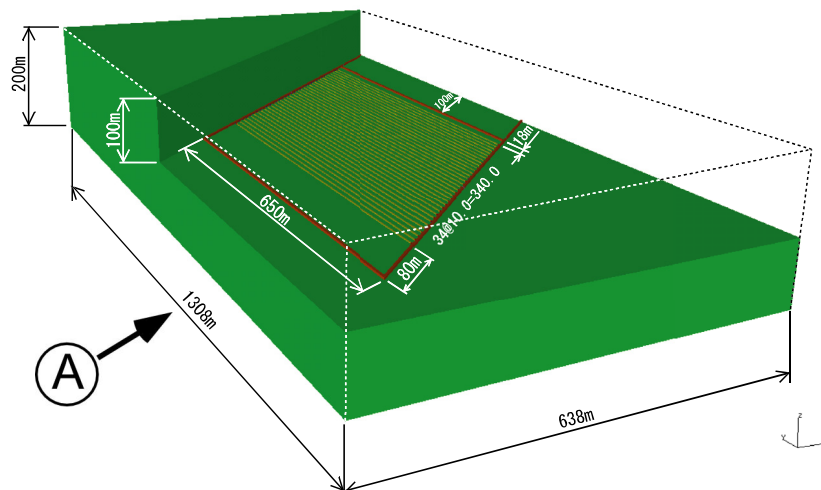


図-3.7 解析モデル鳥瞰図

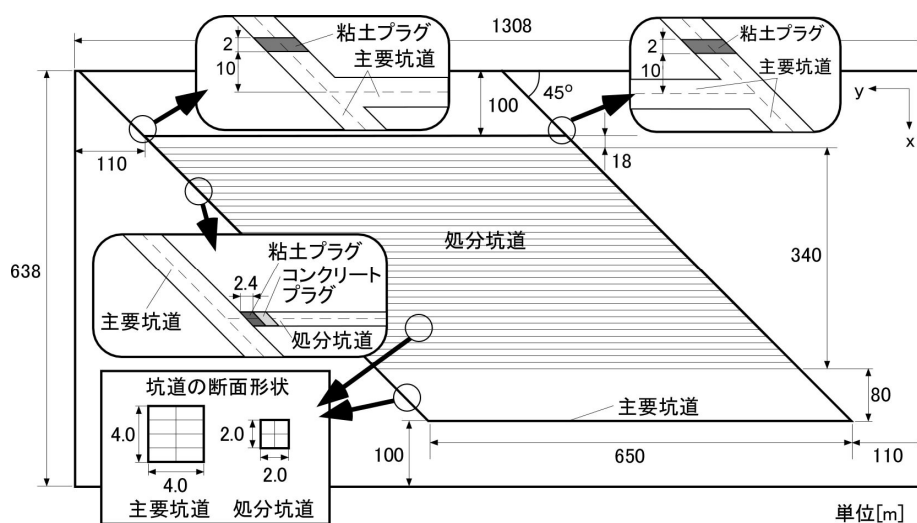


図-3.8 解析モデル断面図（図-3.7のAより観た図）

解析に用いたメッシュを図-3.9に示す。節点数は219,360、要素数は217,341である。解析メッシュは、処分坑道や主要坑道の部分が細かい分割となるように工夫した。

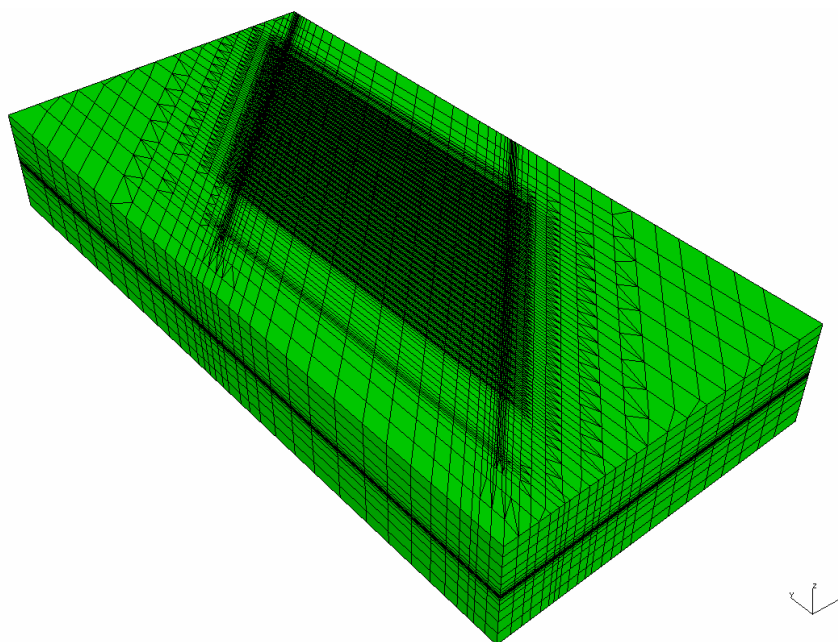


図-3.9 解析メッシュ

解析で用いた境界条件を図-3.10に示す。圧力勾配は他の解析⁹⁾と同様0.01とし、図の矢印で示すように処分坑道に対して直交方向と平行方向の2方向を設定した。直交方向の圧力勾配の場合、図の矢印の方向に流れが生じるように図の左側（高）と右側（低）に0.01の圧力差を与えた。ほかの境界断面は、不透水境界とした。平行方向の圧力勾配の場合、図の矢印の方向に流れが生じるように図の手前側（高）と奥側（低）に0.01の圧力差を与えた。ほかの境界断面は、不透水境界とした。

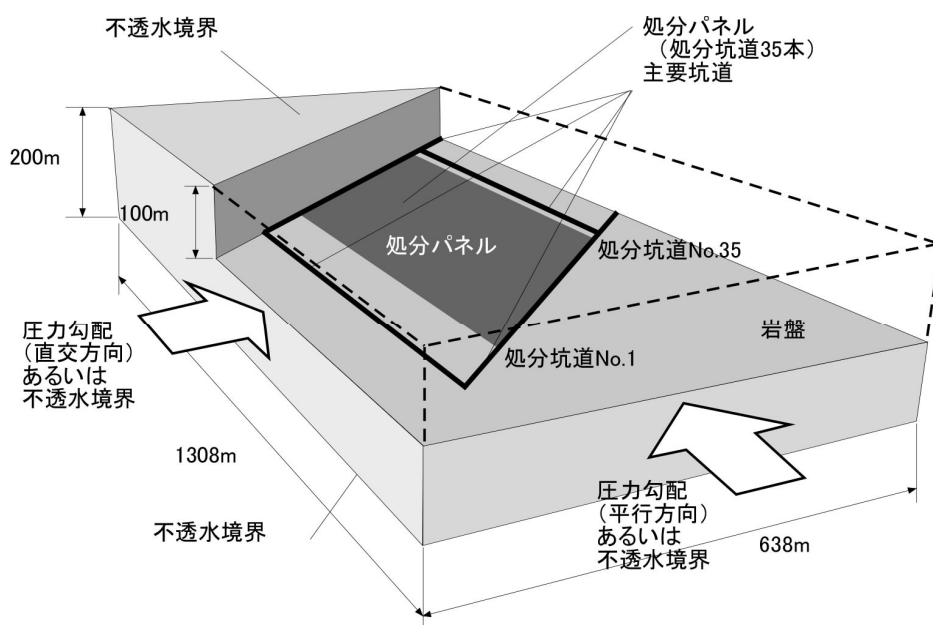


図-3.10 解析モデルの境界条件

解析では、処分坑道の周囲に存在する主要坑道があることによる影響を把握するため、主要坑道がない場合のケースも解析を行う。主要坑道の有無を表現したイメージを図-3.11に示す。図-3.11の主要坑道無しの場合は、理想的に処分坑道を地下に設置した場合であり、解析では、処分坑道の緩衝材部分あるいは埋め戻し材部分のみが岩盤内にあるという設定と考え、主要坑道、各プラグは岩盤と同じ物性とした。

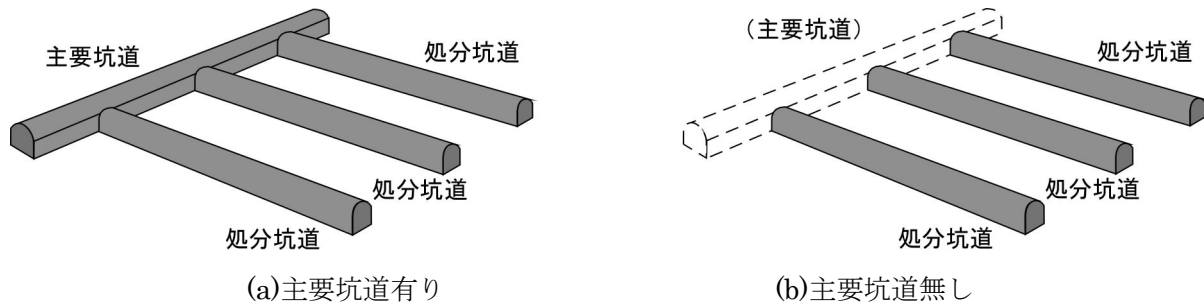


図-3.11 主要坑道の有無を表現したイメージ

各解析ケースの粘土プラグの設置位置、各坑道における透水係数の設定値一覧を表-3.2に示す。解析ケースの名称に付加した O, P は、圧力勾配の方向である処分坑道に対して直交方向 (Orthogonal), 平行方向 (Parallel) を示している。3.1.2 節で示したように、主要坑道の等価透水係数は $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$, $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$, $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の3通りを設定した。処分坑道の等価透水係数は、緩衝材を想定する場合は $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$, 埋め戻し材を想定する場合は $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ とした。なお、コンクリートプラグは $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の一定値とした。

表-3.2 粘土プラグの設置位置と透水係数の設定値一覧

ケース名	粘土プラグの設置 (○: あり, ×: なし)		コンクリート プラグ [m/s]	主要坑道	処分坑道
	処分坑道	主要坑道		[m/s]	[m/s]
41O,41P	○	○	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	埋め戻し材を 想定する場合 1.0×10^{-6}
42O,42P	○	○		1.0×10^{-6}	
43O,43P	○	○		1.0×10^{-7}	
51O,51P	○	×		1.0×10^{-5}	
52O,52P	○	×		1.0×10^{-6}	
53O,53P	○	×		1.0×10^{-7}	
61O,61P	×	○		1.0×10^{-5}	緩衝材を 想定する場合 1.0×10^{-7}
62O,62P	×	○		1.0×10^{-6}	
63O,63P	×	○		1.0×10^{-7}	
71O,71P	×	×		1.0×10^{-5}	
72O,72P	×	×		1.0×10^{-6}	
73O,73P	×	×		1.0×10^{-7}	

ここで、処分坑道の透水係数の設定は、解析ケースの設定が繁雑になることから、緩衝材としての解析なのか、埋め戻し材としての解析なのかを解析ケースに明記することとする。たとえば、処分坑道を緩衝材の設定で、処分坑道及び主要坑道に粘土プラグを設置し、直交圧力勾配の解析の凡例は、41O（緩衝材）と表記する。

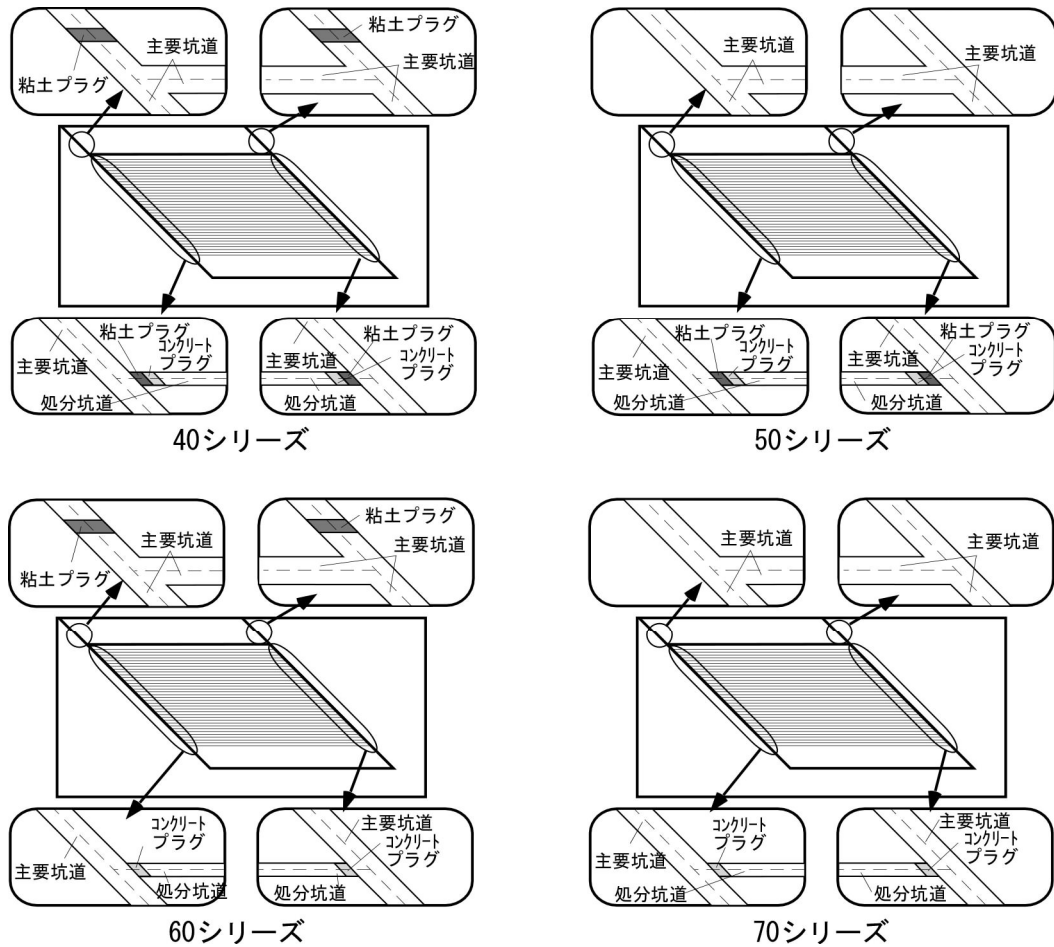


図-3.12 各ケースにおけるプラグの設置状況

各解析ケースにおけるプラグの設置状況を図-3.12に示す。40シリーズ（41，42，43）は，全ての処分坑道と主要坑道2ヶ所に粘土プラグを設置する。50シリーズ（51，52，53）は，全ての処分坑道のみに粘土プラグを設置する。60シリーズ（61，62，63）は，主要坑道2ヶ所のみに粘土プラグを設置する。70シリーズ（71，72，73）は，粘土プラグは設置しない。各シリーズの1，2，3は，主要坑道の透水係数の違い（それぞれ，1： 1.0×10^{-5} m/s，2： 1.0×10^{-6} m/s，3： 1.0×10^{-7} m/s）を示す。

4. 解析結果

本章では、解析結果を示す。解析結果は4段階で整理した。

第1段階では、処分坑道1本の全長における通過流量の分布を把握した。図-4.1に示す処分パネルを構成する処分坑道の並びで端部に位置する2本の処分坑道（パネル手前の処分坑道No.1、パネル奥側の処分坑道No.35）に着目した。流量評価点は坑道の中心線に位置する節点である。この段階では、図-3.11で示した主要坑道の無いケースを考慮した。

次に、処分坑道1本の全長における通過流量の分布から、処分坑道の地下水流動への影響として重要な箇所と導き出された、処分坑道と主要坑道の交差部における通過流量に関して、第2から第4の3つの段階で解析結果を整理した。処分坑道と主要坑道の交差部の解析結果の分析で着目したのは、図-4.1に示す処分パネル全域の処分坑道と主要坑道の交差部である。処分パネルを構成する処分坑道は35本あることから、交差部は70箇所ある。評価した流量は図に示す流量評価点、つまり、処分坑道の流量は処分坑道の両端部に位置する処分坑道の中心点での通過流量、主要坑道の流量は処分坑道との交差部における坑道の中心線の交点での通過流量である。処分坑道に関しては、第1段階の流量の評価点番号1および評価点番号25が、第2段階以降の解析結果での処分坑道の流量評価点と一致する。

第2段階では、図-4.1で示す処分坑道70点（処分坑道35本の両端の2点）、主要坑道70点（処分坑道の交差部）の流量評価点における通過流量の分布を把握した。

第3段階では、第2段階の結果から処分パネルの両端部および中心に位置する処分坑道No.1, No.18, No.35が流量の分布の代表値として捉えることが出来たことから、この3つの処分坑道と主要坑道の交差部における通過流量に着目し、解析ケース間での比較を行った。ここでは、通過流量の方向に関係なく流量の比較を行うため、通過流量は絶対値とした。

最後に、第4段階として各解析ケースでの処分坑道、主要坑道の流量評価点でのそれぞれの通過流量の最大値（流れの方向に関係なく、流量が多いものを最大値とした）で解析ケース間の比較を行った。

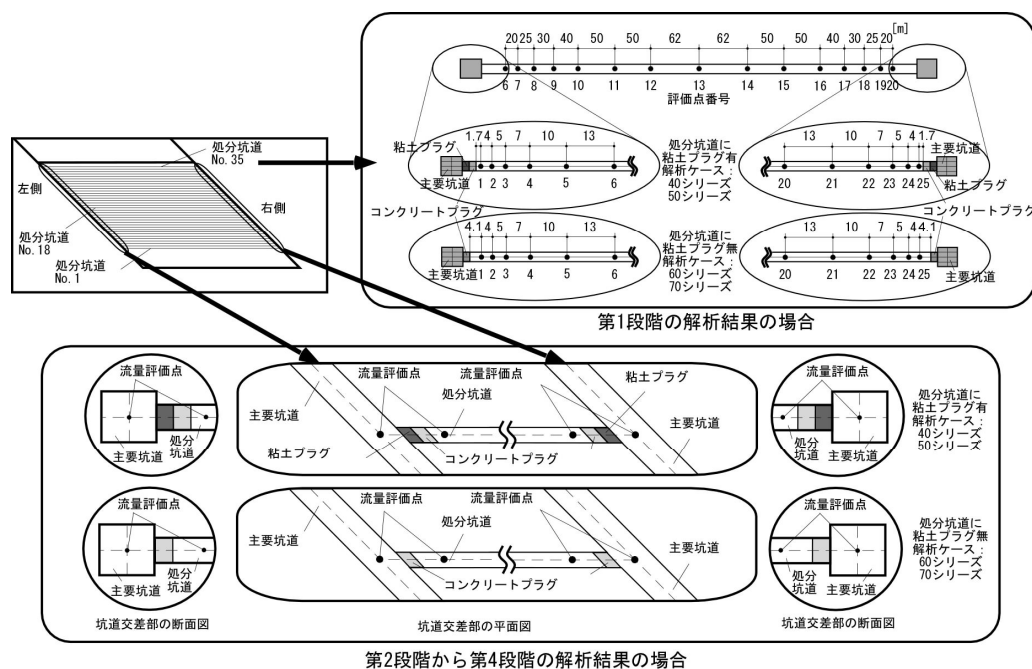


図-4.1 解析での評価点の位置関係

4.1 1本の処分坑道全長の地下水流動

ここでは、第1段階の「1本の処分坑道全長の地下水流動」の結果を示す。パネル規模の解析では、処分パネルを構成する全ての処分坑道をモデル化することができる。そこで、実際の処分場では存在する主要坑道が、処分坑道内における地下水流動にどのような影響を及ぼすのか、図-3.11に示すような解析モデルの設定により、主要坑道の有無を条件とした解析結果の比較を行った。通過流量の比較が容易なように、解析結果の図中の軸はあわせて表示した（図-4.3から図-4.8）。

流量評価点は、図-4.2に示す。図は、図-4.1から第1段階の解析結果に関わる部分を抽出したものである。図-3.9で示したように、解析メッシュは坑道交差部で密であり、坑道中間部では粗くなっている。メッシュの節点を反映した25点を評価点とした。解析ケースの60, 70シリーズの解析では、処分坑道には粘土プラグが設置されないため、粘土プラグにコンクリートプラグが設置され、コンクリートプラグ部分は緩衝材あるいは埋め戻し材となる。評価点の番号および位置は、No.1からNo.25まで全ての解析ケースにおいて同じである。

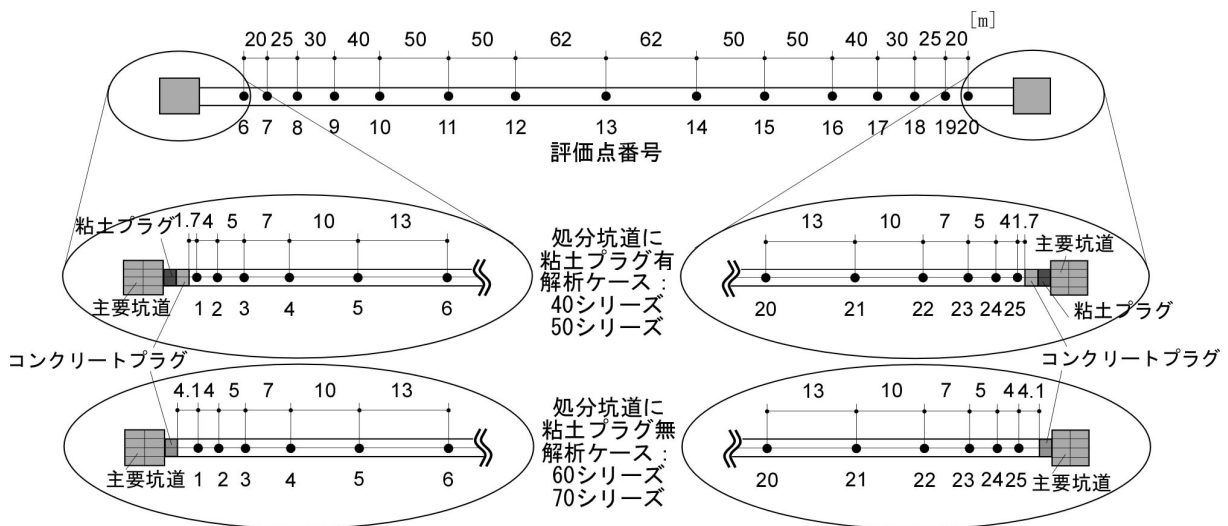


図-4.2 流量評価点（断面図）

(1) 主要坑道無しで処分坑道の透水係数が 10^{-7}m/s の場合

主要坑道が無い解析では、主要坑道の透水係数は 10^{-7}m/s （緩衝材相当）とした。図-4.3、図-4.4は主要坑道が無い、処分坑道のみをモデル化したものの処分坑道 No.1 と No.35 の通過流量を示したものである。

図-4.3は直交圧力勾配下のもの、図-4.4は平行圧力勾配下のものである。図では、処分坑道 No.1 と No.35 の結果を示しているが、両結果はほぼ同じ値であり、グラフは1本に重なって見える。

直交圧力勾配下では、通過流量はほぼゼロである。これに対して、平行圧力勾配下では、処分坑道が圧力勾配に対して平行であることから、処分坑道内には圧力勾配の方向（坑道の右側から左側）に流れが発生し、通過流量は $10 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$ 程度である。

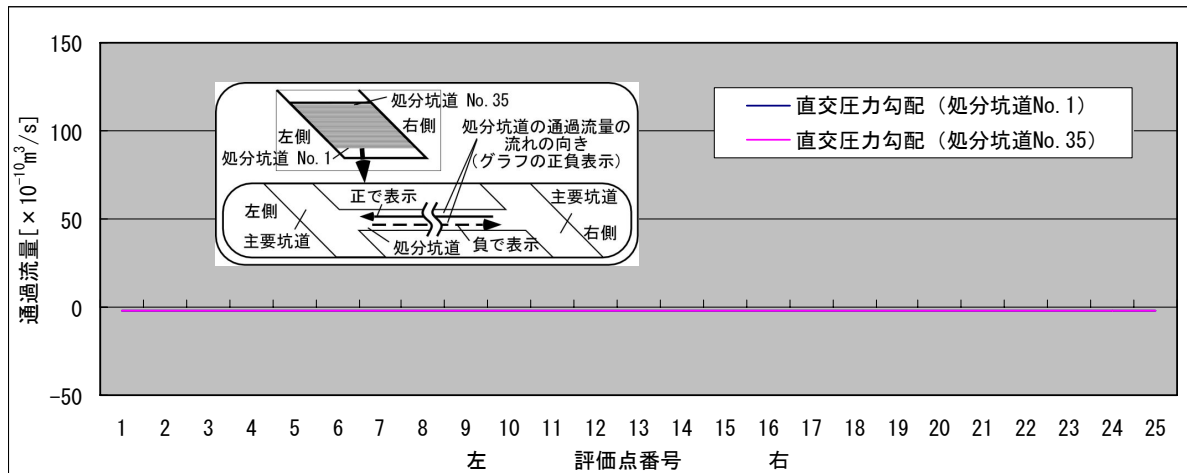


図-4.3 処分坑道 No.1, No.35 における通過流量の分布
(直交圧力勾配)

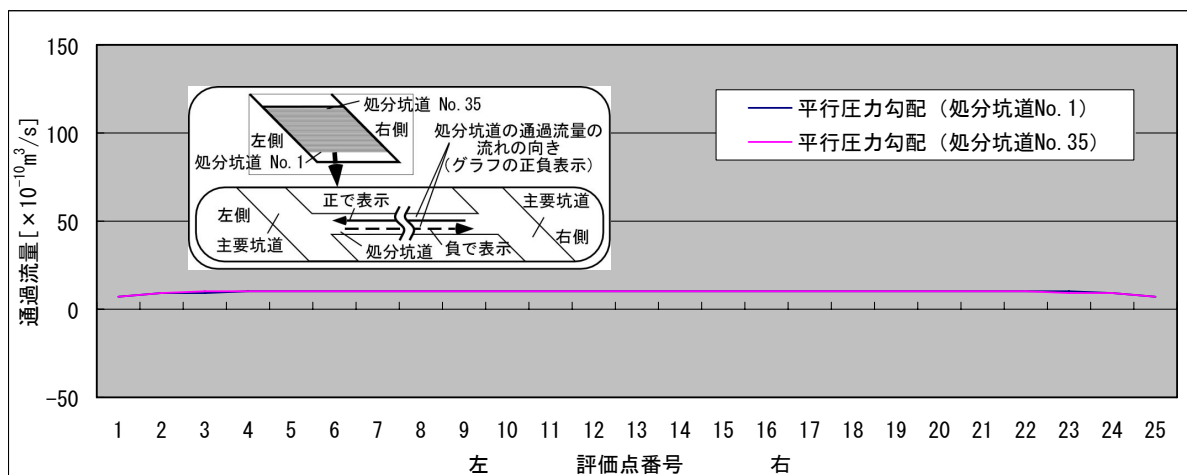


図-4.4 処分坑道 No.1, No.35 における通過流量の分布
(平行圧力勾配)

(2) 主要坑道有りで処分坑道の透水係数が 10^{-7}m/s の場合

処分坑道の透水係数が緩衝材相当 (10^{-7}m/s) の場合の結果を図-4.5, 図-4.6 に示す。各解析ケースでの変化を把握するため、処分坑道 No.1 と No.35 を分けて図示した。グラフの正負とそれによる流れの方向は図-4.3, 図-4.4 と同様である。

図-4.5 に示すように、直交圧力下の場合、処分坑道の中心部では通過流量はほぼゼロに近く、主要坑道無しの場合と通過流量の大きさでは大きな差は認められないが、主要坑道との交差部に近い処分坑道端部では通過流量に変化が見られる。処分坑道手前側 No.1 ではこの変化はかなり小さいものの、処分坑道奥側 No.35 では、この変化が大きい。処分坑道の左側では負の値、処分坑道の右側では正の値に通過流量が増えており、これは、主要坑道からの水の流れ込みの影響を示している。

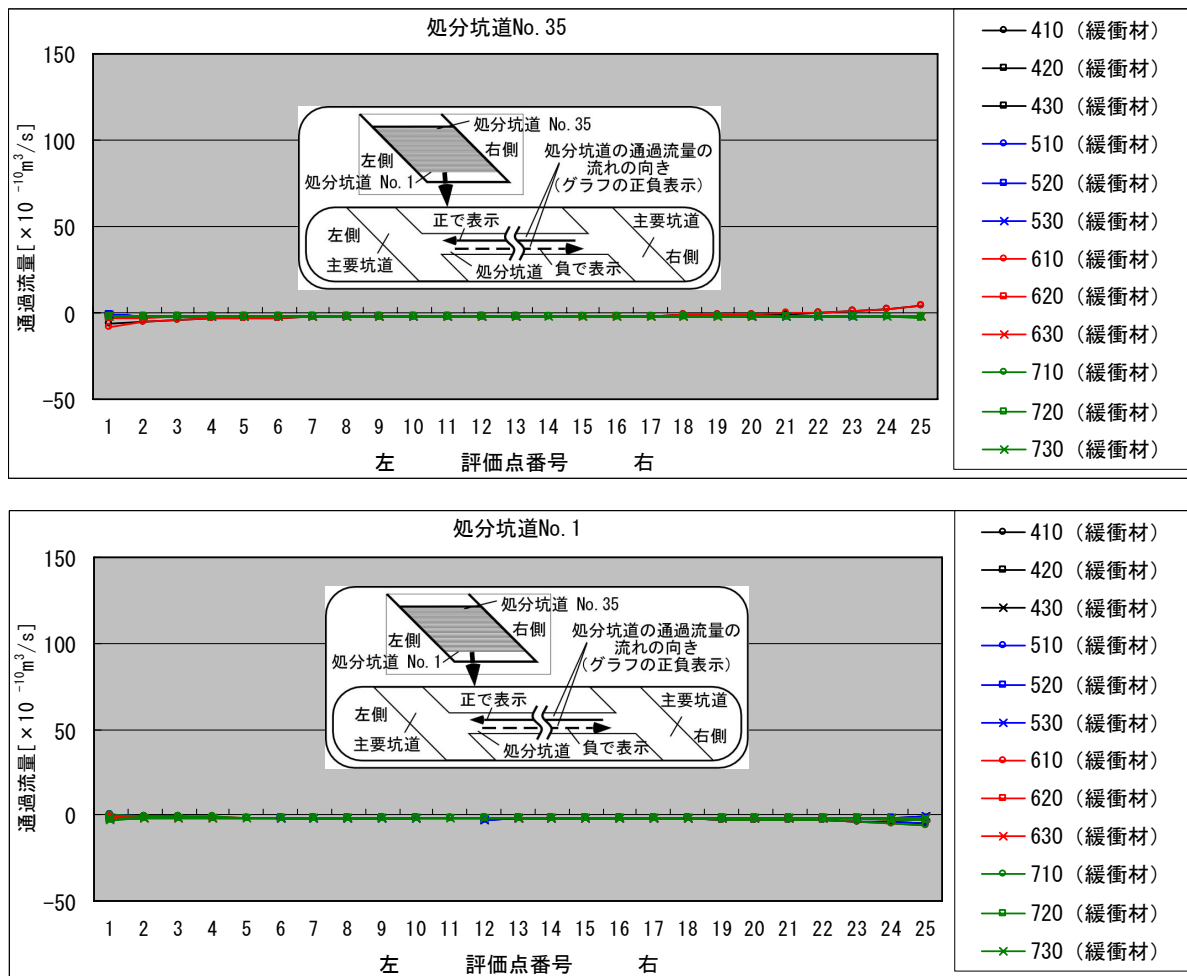


図-4.5 処分坑道 No.1, No.35 における通過流量の分布
(直交圧力勾配)

次に、図-4.6 に平行圧力勾配下での結果を示す。処分坑道中心部における通過流量は $10 \times 10^{-10}\text{m}^3/\text{s}$ 程度で、これは、主要坑道無しの場合 (図-4.4) とほぼ同様である。処分坑道 No.1 では、解析ケースによっては処分坑道端部で通過流量が減少する傾向を示すものもあるが、逆に通過流量が増加するケースもある。一方、処分坑道 No.35 では、坑道端部で通過流量が減少するケースでは、処分坑道の左でその変動幅が大きい。61P (緩衝材), 62P (緩衝材), 41P (緩衝材) では、評価点 1 の流

れの方向が変わり、処分坑道に流れ込む結果となっている。

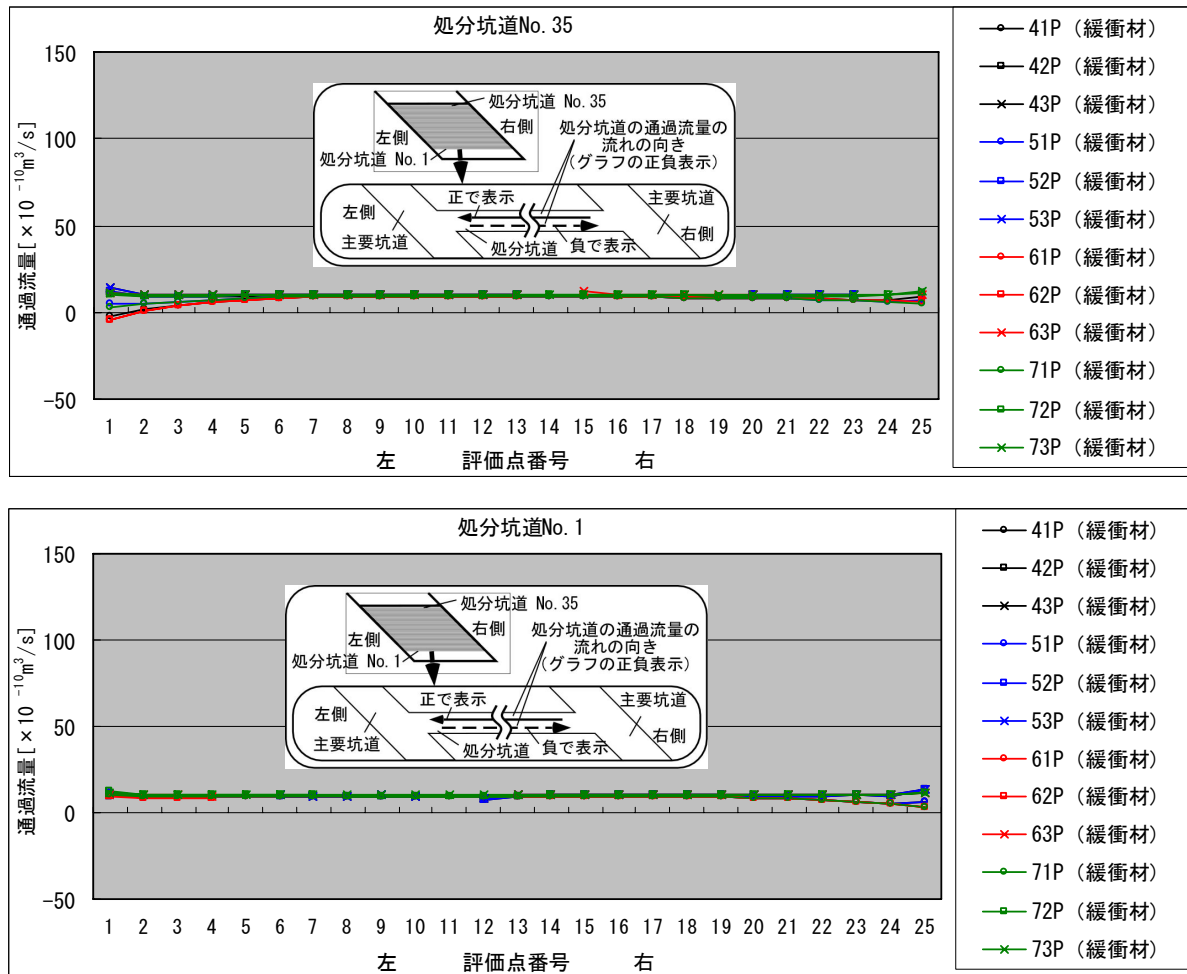


図-4.6 処分坑道 No.1, No.35 における通過流量の分布
(平行圧力勾配)

(3) 主要坑道有りで処分坑道の透水係数が 10^{-6}m/s の場合

図-4.7 に直交圧力勾配下での処分坑道 No.1 と No.35 の各 1 本分における通過流量の分布を示す。グラフの正負、流れの方向はこれまでと同じである。直交圧力勾配下の場合、処分坑道中心部では通過流量はほぼゼロであるが、主要坑道との交差部に近い処分坑道端部では通過流量が大きくなるケースもある。処分坑道 No.1 では処分坑道から流れ出る方向、処分坑道 No.35 では、処分坑道に流れ込む方向になっている。処分坑道の透水係数が大きくなることによって、変化の起こる部分では、処分坑道における通過流量が増加している。

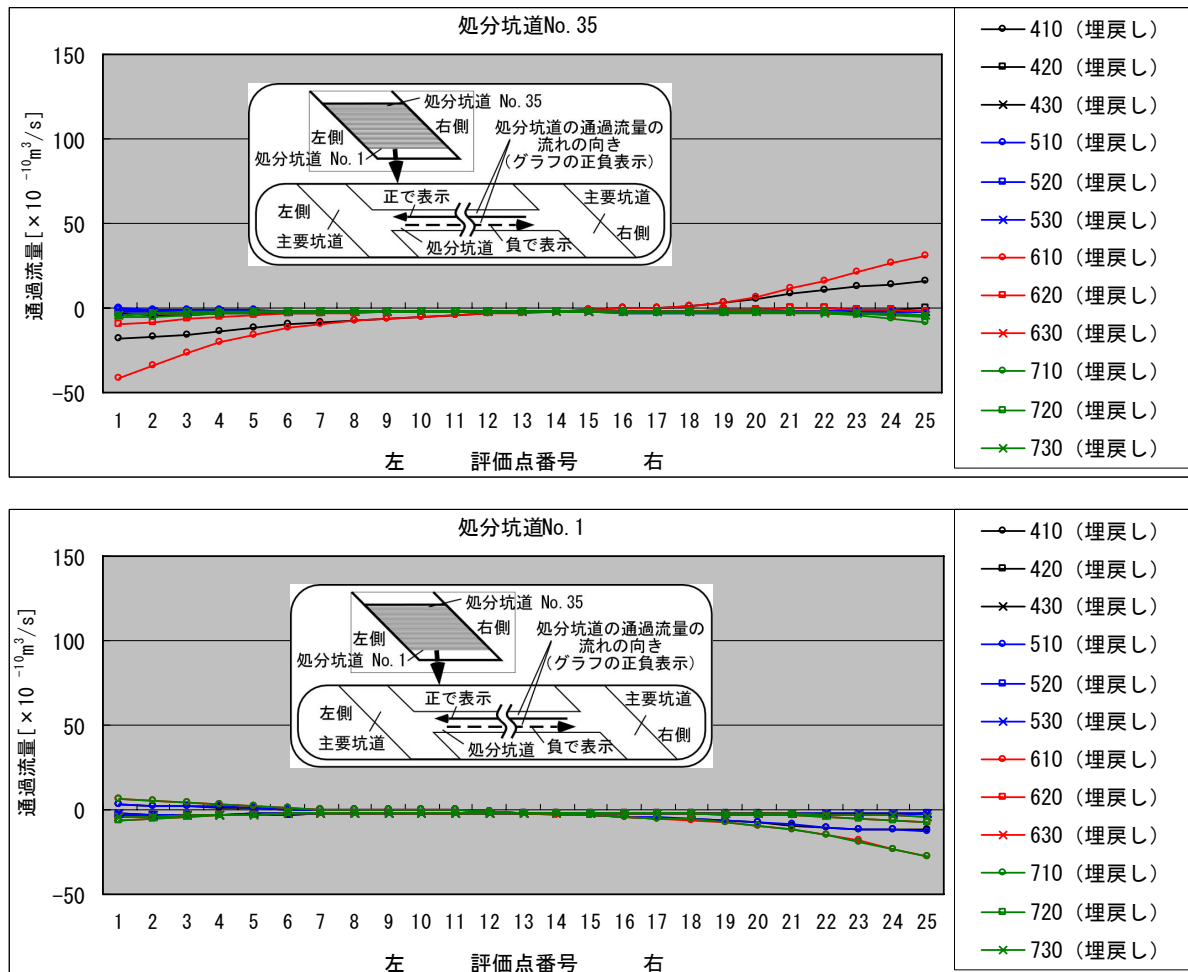


図-4.7 処分坑道 No.1, No.35 における通過流量の分布
(直交圧力勾配)

次に、図-4.8 に平行圧力勾配下での処分坑道 No.1 と No.35 の各 1 本分における通過流量の分布を示す。グラフの正負、流れの方向は図-3.14 と同じである。平行圧力勾配下の場合、直交圧力勾配下の場合に比較して、処分坑道沿いの流れが大きくなっている。その方向は圧力勾配に沿った方向となっている。処分坑道中心部における通過流量は $100 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$ 程度となっている。全ての主要坑道との交差部に近い処分坑道の端部では、通過流量の減少が見られる。また、図-4.6 で見られたように、61P (埋戻し) の場合、評価点 1 で流れの向きが逆転し、処分坑道に流れ込む結果となっている。

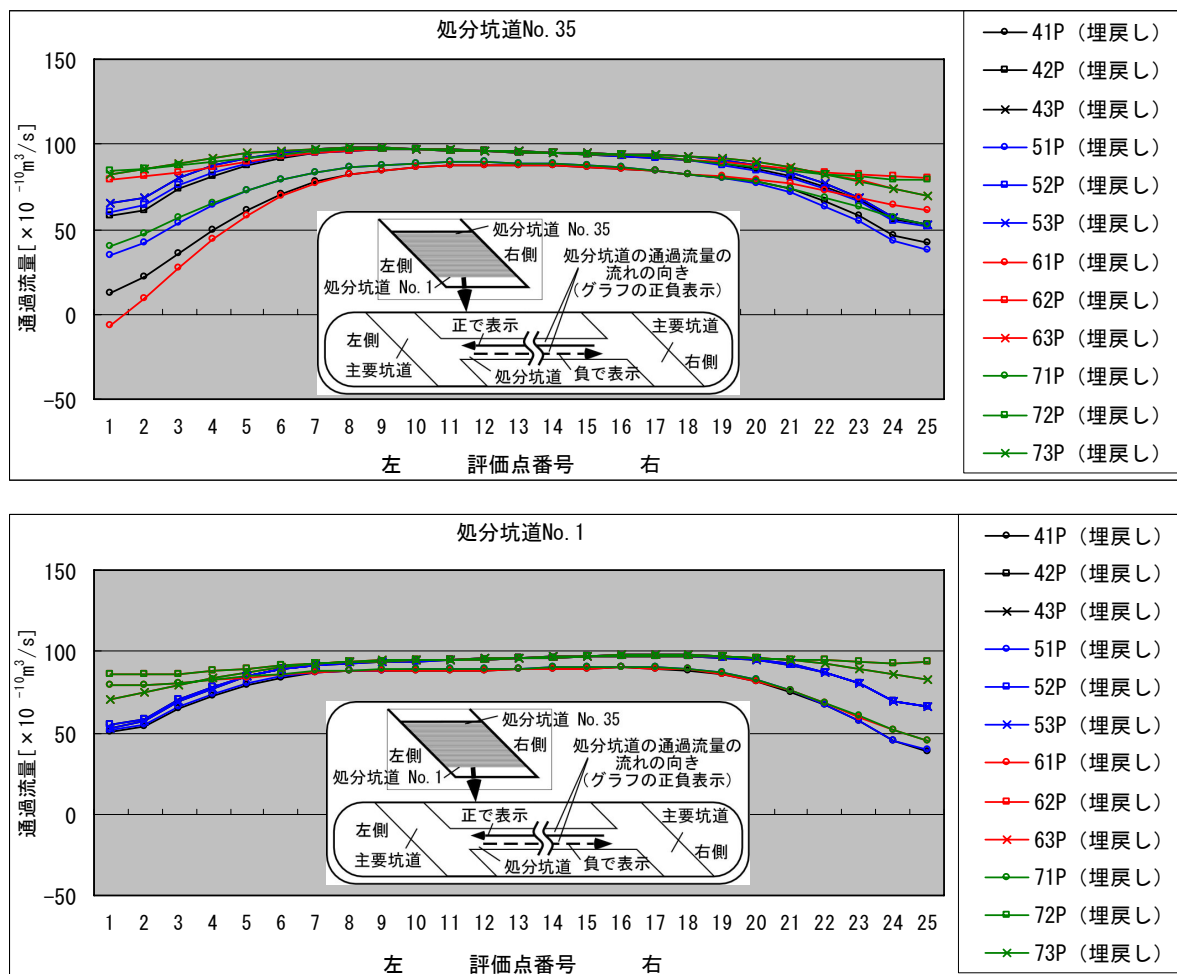


図-4.8 処分坑道 No.1, No.35 における通過流量の分布
(平行圧力勾配)

(4) 考察

1 本の坑道全長の地下水流動の評価では、処分坑道の透水係数が 10^{-7}m/s で同じ場合、処分坑道のみの解析とその周囲の主要坑道を考慮した解析の結果の比較から、処分坑道の中心部における通過流量には大きな差が無いことが分かった。これに対して、処分坑道の端部では、主要坑道が存在することに影響する通過流量の変化が見られた。解析ケースによるが、処分坑道端部で通過流量が変化するのは主要坑道が存在することが原因と考えられる。

通過流量の変化がほとんど見られないのは処分坑道に粘土プラグが設置されるケースであり、これは、処分坑道端部に低透水性の粘土プラグが設置されることにより、見かけ上、主要坑道が無い、つまり岩盤内に処分坑道のみが存在するケースに近くなるためと考えられる。

特に、処分坑道 No.35 で通過流量の変化が激しいが、これは、主要坑道の透水係数が大きく、主要坑道に粘土プラグが設置されるケースに当てはまる。

以上から、処分坑道内の通過流量の把握には、主要坑道との交差部にあたる処分坑道端部での地下水流動と、主要坑道そのものにおける地下水流動の関係が重要であると考えられる。

4.2 処分パネル全体における坑道交差部の地下水流動

ここでは、第2段階の「処分パネル全体における坑道交差部の地下水流動」の結果を示す。

図-3.8 で示したように、解析モデルは35本の処分坑道を考慮している。処分坑道 No.1 と処分坑道 No.35 と平行するように、処分坑道列の外側に1本ずつ主要坑道が配置され、これら全ての処分坑道と処分坑道に平行する主要坑道は、その両端部で主要坑道2本と接続している。第1段階の1本の坑道全長の地下水流動で示した解析結果から、処分坑道内の地下水流動の評価には、処分坑道と交差する主要坑道の評価が重要であることが分かった。そこで、ここでは処分坑道の端部とそれに対応する主要坑道における通過流量から処分パネル全体における坑道交差部の地下水流動を把握する。

図-4.1 で示したように、各処分坑道に対応する通過流量の評価点位置は、処分坑道の左右の2点、処分坑道と主要坑道の交差部に位置する主要坑道の左右の2点で合計4点となる。解析ケースの40, 50 シリーズと 60, 70 シリーズでは粘土プラグの設置の関係で処分坑道端部の構成が異なるが、処分坑道における評価点位置は、粘土プラグとコンクリートプラグの2個が設置されるケースでも、プラグの内側の処分坑道内部に位置する地点とした。

流量評価点における通過流量の方向を図-4.9 に示す。処分坑道の評価点では、坑道交差部において主要坑道から処分坑道に流れ込む方向を正とした。主要坑道の評価点では、処分坑道 No.1 から処分坑道 No.35 へ向かう流れを負とした。処分パネルは45度傾斜した平行四辺形であるため、圧力勾配が直交の場合も平行の場合も、圧力勾配に対して下流側への流れを負とする。

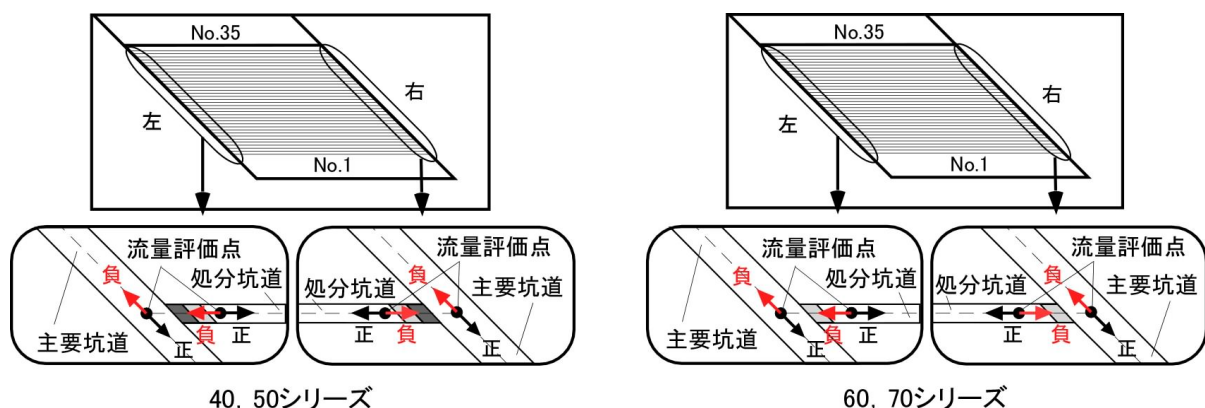


図-4.9 評価点における流れの方向の正負

図-4.10 から図-4.37 に流量評価点における通過流量の図を示す。図は、4枚のグラフでセットとなっている。各図において上から主要坑道左側の評価点位置の通過流量、次に処分坑道左側の評価点位置の通過流量、次に処分坑道右側の評価点位置の通過流量、そして一番下側に主要坑道右側の評価点位置の通過流量を示す。また、図中の軸である評価点位置というのは、処分坑道の番号に対応する評価点を意味する。たとえば、処分坑道 No.1 の評価点位置に対応する点が、図中の軸の1に対応する。また、処分坑道の各グラフにおける通過流量の軸は、目盛りを合わせており、通過流量を直接比較することが出来る。

(1) 処分坑道の透水係数が 10^{-7} m/s (緩衝材相当) の場合

はじめに、処分坑道の透水係数が 10^{-7} m/s の場合の解析結果を示す。図-4.10 から図-4.16 は直交

圧力勾配下の結果，図-4.17 から図 4.23 は平行圧力勾配下の結果である。以下順を追って結果を示す。

(i)直交圧力勾配下の結果

図-4.10 から図-4.12 は粘土プラグ設置の効果を，主要坑道の透水係数がそれぞれ $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ， $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ ， $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の場合において比較したものである。

図-4.10 に示すように，主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の場合，主要坑道の地下水の流れは左右いずれも圧力勾配に対して下流側への流れとなっている。通過流量は $1,000 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$ 程度で，粘土プラグ設置の影響は小さい。すべての解析ケースで，処分坑道 No.1 側で通過流量が減少する傾向がある。さらに，主要坑道に粘土プラグが設置されるケース（41O（緩衝材），61O（緩衝材））では，処分坑道 No.35 側においても通過流量が減少する傾向がある。

処分坑道における通過流量の傾向は，通過流量そのものが主要坑道の通過流量に比較して小さいことがわかる。処分坑道左側において，処分坑道 No.1，No.2 を除き，処分坑道では主要坑道から処分坑道へ流れ込む方向の流れとなっている。さらに，主要坑道に粘土プラグが設置されるケース（41O（緩衝材），61O（緩衝材））では，その通過流量は処分坑道 No.35 の方向に向かうに従い大きくなっている。処分坑道右側において，主要坑道に粘土プラグが設置されるケース（41O（緩衝材），61O（緩衝材））での処分坑道 No.1 から No.30 では，処分坑道から主要坑道への流出の方向となっており，通過流量は処分坑道 No.30 の方向に向かうに従い大きくなる。また，処分坑道 No.31 から No.35 では，主要坑道から処分坑道への流入の方向であり，通過流量は処分坑道 No.35 の方向に向かうに従い大きくなる。一方，主要坑道に粘土プラグが設置されないケース（51O（緩衝材），71O（緩衝材））では，すべての処分坑道の通過流量は，処分坑道から主要坑道へ流れ出る方向となっており，通過流量は処分坑道 No.1 に向かうに従い大きくなる。

図-4.11 に示すように，主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ の場合，主要坑道の通過流量は左右いずれも圧力勾配に対して下流側への流れの方向であることは主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の場合と同じ傾向であるが，各ケースにおける評価点位置間での差はほとんどなくなり，絶対量も小さくなっている。主要坑道の通過流量は，処分坑道に粘土プラグが設置されるケース（42O（緩衝材），52O（緩衝材））の方が，処分坑道に粘土プラグが設置されないケース（62O（緩衝材），72O（緩衝材））より大きい。

処分坑道における通過流量の傾向は，主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の場合と異なり，処分坑道左側は全ての評価点位置で処分坑道に流れ込む方向であり，処分坑道右側においては処分坑道から流れ出る方向である。各ケースにおける評価点位置間での差はほとんどない。

図-4.12 に示すように，主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の場合，主要坑道，処分坑道とも流れの方向は主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ の場合と同じである。主要坑道の通過流量はさらに減少する。ここでも，各ケースにおける流量評価点位置による通過流量の差は認められず，一様の通過流量となっている。処分坑道の通過流量の分布は，主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ の場合と同じように，各ケースにおいては流量評価点位置による通過流量の差は認められず，一様の通過流量となっている。

処分坑道の通過流量は、処分坑道に粘土プラグが設置されないケース（63O（緩衝材），73O（緩衝材））で、通過流量が大きくなっている。

図-4.13 から図-4.16 は、粘土プラグを設置した場合に、主要坑道の透水係数をそれぞれ $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$, $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$, $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ と変化させた場合を比較したものである。ここでは、主要坑道の各グラフについても、通過流量を直接比較することが出来るように、通過流量の軸は目盛りを合わせた。

図-4.13 に示すように、粘土プラグを主要坑道と処分坑道の双方に設置した場合、主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ のケース（41O（緩衝材））では、主要坑道の通過流量は他のケース（42O（緩衝材），43O（緩衝材））に比して非常に大きい。主要坑道の処分坑道 No.1 側および No.35 側の通過流量は、中央（No.18）付近に比べ若干減少する傾向にある。主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ になると通過流量は大きく減少し、 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ ではさらに減少する。主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$, $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ では、流量評価点位置間での通過流量の差もほとんどない。

処分坑道の通過流量は、主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ （42O（緩衝材））， $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ （43O（緩衝材））のケースの処分坑道の左側では、全て処分坑道に流れ込む方向であり、ほぼ一定値である。一方、処分坑道の右側では、全て処分坑道から流れ出す方向であり、ほぼ一定値である。しかしながら、主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ のケース（41O（緩衝材））では、処分坑道 No.1 側では通過流量は流れ出す方向で、No.35 側では処分坑道に流れ込む方向の通過流量になっている。

図-4.14 に示すように、粘土プラグを処分坑道のみに設置する場合、主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ のケース（51O（緩衝材））では、主要坑道の通過流量は他のケース（52O（緩衝材），53O（緩衝材））に比べて非常に大きい。主要坑道の処分坑道 No.1 側の通過流量は若干減少する傾向である。主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ になると通過流量は大きく減少し、 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ ではさらに減少する。

処分坑道の通過流量は、主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ （52O（緩衝材））， $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ （53O（緩衝材））のケースの処分坑道の左側では、全て処分坑道に流れ込む方向であり、ほぼ一定値である。一方、処分坑道の右側では、全て処分坑道から流れ出す方向であり、ほぼ一定値である。しかしながら、主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ のケース（51O（緩衝材））の場合、処分坑道の左側における通過流量は、処分坑道 No.1 から No.3 では、処分坑道から主要坑道への流出の方向となっており、処分坑道 No.4 から No.35 では、主要坑道から処分坑道への流入の方向となっている。処分坑道 No.4 側および No.35 側の通過流量は中央（No.18）付近に比べ減少する傾向にある。処分坑道の右側では、全ての処分坑道において、処分坑道から流れ出す方向になっており、処分坑道 No.1 側では通過流量は増加している。

図-4.15 に示すように、主要坑道のみに粘土プラグを設置する場合、主要坑道の通過流量は主要坑道と処分坑道の双方に粘土プラグを設置する場合（図-4.13）とほぼ同じ傾向である。処分坑道における通過流量も同様に、主要坑道と処分坑道の双方に粘土プラグを設置する場合とほぼ同じ傾向を示すが、通過流量そのものは、処分坑道に粘土プラグが設置されていないことを反映して増加している。

図-4.16 に示すように、粘土プラグを設置しない場合、主要坑道及び処分坑道の通過流量の分布は粘土プラグを処分坑道のみに設置する場合、つまり主要坑道に粘土プラグを設置しない場合（図-4.14）とほぼ同じ傾向である。処分坑道における通過流量は、処分坑道に粘土プラグが設置されていないことを反映して、若干増加している。

(ii) 平行圧力勾配下の結果

次に、平行圧力勾配の結果を示す。図-4.17 から図-4.19 は粘土プラグ設置の効果を、主要坑道の透水係数がそれぞれ $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の場合において比較したものである。

図-4.17 に示すように、主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の場合、主要坑道の通過流量は左右いずれも圧力勾配に対して下流側への流れの方向となっている。主要坑道の通過流量は直交圧力勾配の場合と同様、 $1,000 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$ 程度である。主要坑道左側では、処分坑道 No.35 側で通過流量の低下が見られる。主要坑道に粘土プラグが設置されるケース（41P（緩衝材）、61P（緩衝材））でその傾向が顕著である。主要坑道右側では、処分坑道 No.35 側に行くに従い通過流量は増加する。

処分坑道の通過流量の方向は、2 ケース（61P（緩衝材）、41P（緩衝材））の処分坑道 No.32 から No.35 の左側を除き、全て処分坑道に流れ込む方向である。処分坑道左側では、処分坑道 No.35 側に行くに従い、処分坑道に流れ込む通過流量は減少する。処分坑道右側では、処分坑道 No.1 側および No.35 側の通過流量は、中央（No.18）付近に比べ若干減少する傾向にある。処分坑道の通過流量は、主要坑道の通過流量に比較すると十分に小さいが、全体の傾向としては直交圧力勾配の場合よりは増加している。

図-4.18 に示すように、主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ の場合、主要坑道の通過流量は左右いずれも圧力勾配に対して下流側への流れの方向となっている。主要坑道の通過流量は直交圧力勾配の場合と同様、 $100 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$ 程度と減少する。通過流量は、処分坑道に粘土プラグを設置するケース（42P（緩衝材）、52P（緩衝材））と設置しないケース（62P（緩衝材）、72P（緩衝材））でほぼ同じ傾向かつ同じ値となっている。主要坑道左側では、処分坑道 No.1 側と No.35 側で通過流量の減少が見られる。主要坑道右側では、処分坑道 No.35 側で通過流量の増加が見られる。それ以外の各評価点位置では通過流量は、各ケースにおいてほぼ同じ値となっている。

処分坑道の通過流量に関しても、処分坑道に粘土プラグを設置するケース（42P（緩衝材）、52P（緩衝材））と設置しないケース（62P（緩衝材）、72P（緩衝材））でほぼ同じ傾向かつ同じ値となっている。全てのケースにおいて、処分坑道左側では処分坑道から流れ出る方向、処分坑道右側では処分坑道に流れ出る方向である。処分坑道の左右とも、処分坑道 No.35 側で通過流量の減少が見られる。

図-4.19 に示すように、主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の場合、主要坑道の通過流量は、処分坑道に粘土プラグを設置するケース（43P（緩衝材）、53P（緩衝材））と設置しないケース（63P（緩衝材）、73P（緩衝材））でほぼ同じ傾向かつ同じ値となる。しかしながら、この場合、処分坑道の通過流量が主要坑道の通過流量より大きくなっている。

処分坑道の通過流量は、どのケースも処分坑道左側では処分坑道から流れ出る方向、処分坑道右側では処分坑道に流れ込む方向である。また、通過流量はほぼ同じ値であり、粘土プラグの設置位

置による差は小さい。

図-4.20 から図-4.23 は粘土プラグ設置を固定したときに、主要坑道の透水係数をそれぞれ $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$, $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$, $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ に変化させた場合を比較したものである。ここでも、処分坑道と主要坑道の各グラフにおける通過流量の軸は、坑道ごとに目盛りを合わせており、通過流量を直接比較することが出来る。

図-4.20 に示すように、粘土プラグを主要坑道と処分坑道の双方に設置した場合、主要坑道の通過流量は左右いずれも圧力勾配に対して下流側への流れの方向となっている。主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ のケース（41P（緩衝材））の場合、主要坑道左側では、処分坑道 No.35 側で通過流量の低下が見られる。主要坑道右側では、処分坑道 No.35 側に行くに従い通過流量は増加する。主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ になると通過流量は大きく減少し、ほぼ一定値となる。 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ ではさらに減少する。

処分坑道の通過流量は、ケース 41P（緩衝材）の処分坑道 No.34 および No.35 の左側を除き、処分坑道左側では処分坑道から流れ出る方向、処分坑道右側では処分坑道に流れ込む方向である。主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の場合は、他のケースと比較して処分坑道の通過流量が若干小さく、処分坑道左側の No.35 側や処分坑道右側の No.1 側や No.35 側で通過流量の減少が見られる。ケース 41P（緩衝材）では、処分坑道 No.34 および No.35 では流れは流入方向になっている。主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$, $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の場合は、処分坑道の通過流量はほぼ一定値である。

図-4.21 に示すように、粘土プラグを処分坑道のみに設置した場合は、主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ のケース（51P（緩衝材））における主要坑道左側および処分坑道左側の No.35 側の通過流量の減少の程度が若干少なくなること以外は、各坑道における通過流量は、粘土プラグを主要坑道と処分坑道の双方に設置した場合とほぼ同じ傾向、同じ値である。

図-4.22 に示すように、粘土プラグを主要坑道のみに設置する場合は、主要坑道における通過流量の傾向や値は、粘土プラグを主要坑道と処分坑道の双方に設置した場合（図-4.20）とほぼ同じである。

処分坑道における通過流量は、粘土プラグを主要坑道と処分坑道の双方に設置した場合とほぼ同じ傾向であるが、全体に流量は増加している。また、主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ のケース（61P（緩衝材））における処分坑道左側 No.32 から No.35 側の通過流量の減少傾向も大きく、通過流量の方向は流入方向となっている。

図-4.23 に示すように、粘土プラグを設置しない場合は、粘土プラグを処分坑道のみに設置する場合（図-4.21）と、主要坑道および処分坑道の通過流量の傾向や絶対値はほぼ同じである。

(2) 処分坑道の透水係数が 10^{-6}m/s （埋め戻し材相当）の場合

次に、処分坑道の透水係数が 10^{-6}m/s の場合の解析結果を示す。図-4.24 から図-4.37 に流量評価点における通過流量の図を示す。図は、処分坑道の透水係数が 10^{-6}m/s の場合と同様、4 枚のグラフでセットである。

図-4.24 から図-4.30 は直交圧力勾配下の結果、図-4.31 から図-4.37 は平行圧力勾配下の結果である。処分坑道の透水係数が大きくなることから、処分坑道における通過流量は全体的に増加している。傾向が大きく変化するのは、図-4.23 に示す平行圧力勾配下の主要坑道の透水係数が 10^{-7}m/s の場合であり、処分坑道の透水係数 (10^{-6}m/s) よりも主要坑道の透水係数 (10^{-7}m/s) の方が小さい場合の処分坑道に粘土プラグが設置されないケース (63P (埋戻し), 73P (埋戻し)) である。図-3.26 で示したように処分坑道の透水係数が 10^{-7}m/s の場合は、粘土プラグの設置位置に関わらず、主要坑道における流れの方向は全て圧力勾配に対して下流側であったが、このケース (63P (埋戻し), 73P (埋戻し)) では通過流量の方向が逆転し、圧力勾配に対して逆流する方向となっている。

これ以外の解析ケースでは、主要坑道における通過流量の傾向は、各ケースでほぼ同じである。また、処分坑道における通過流量の分布の傾向もほぼ同じである。これは、直交圧力勾配下と平行圧力勾配下の両結果に当てはまる。

(3) 考察

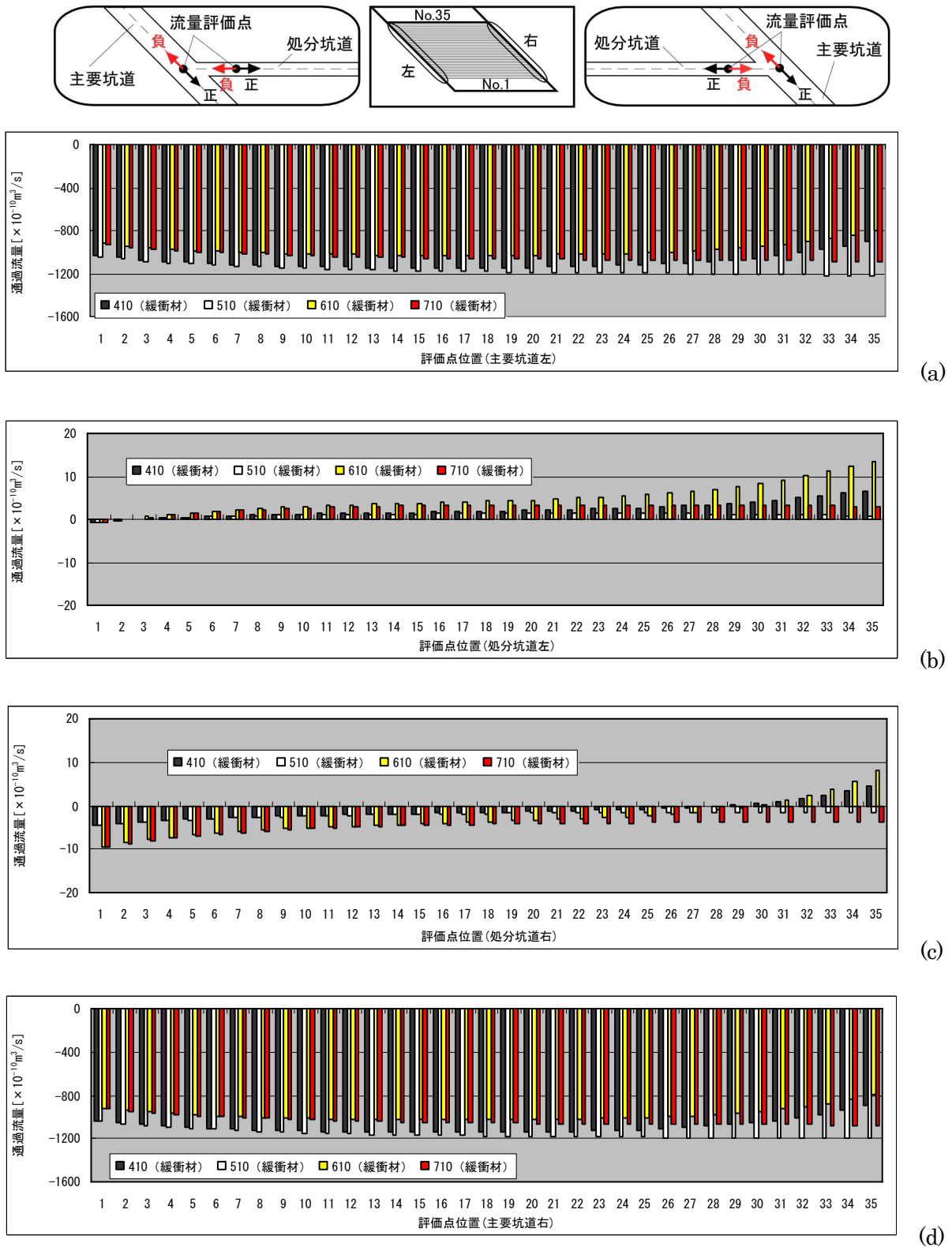
処分坑道を通過する流量に対する圧力勾配の影響に関しては、処分坑道の通過流量の差から明らかなように、処分坑道における通過流量を抑制するためには、処分坑道に対して圧力勾配は直交にすることが有利であることが確認された。これより、処分場のレイアウトを考える場合、処分場における地下水流動場を適切に把握し、圧力勾配に対して直交方向になるように処分坑道を配置することが重要であると考えられる。

主要坑道の透水係数は、 10^{-5}m/s 、 10^{-6}m/s 、 10^{-7}m/s と設定しており、処分坑道や岩盤の透水係数との相対比により、処分坑道の通過流量に対する影響の大きさが異なることが分かった。主要坑道の透水係数が 10^{-5}m/s の場合は、主要坑道の通過流量が大きくなる。これは、主要坑道との交差部となる処分坑道端部における通過流量の変化にも直接関係し、この場合、処分坑道に粘土プラグを設置することでその変化を低減できることが確認できた。しかしながら、主要坑道の透水係数を 10^{-6}m/s 以下にすることで、主要坑道の通過流量は大きく減少し、主要坑道との交差部となる処分坑道端部における通過流量の変化もほぼ見られなくなる。この結果、処分坑道に設置する粘土プラグの効果はほとんど見られなくなる。つまり、このことは、主要坑道の透水性を抑制することで、処分坑道における粘土プラグ設置が不要となる可能性を示すものである。

粘土プラグの設置の効果に関しては、上記の理由により主要坑道の透水係数が 10^{-5}m/s の場合で考察する。処分坑道に粘土プラグが設置されることで主要坑道との交差部となる処分坑道端部における通過流量の変化を抑制することが可能となる。一方、主要坑道のみ粘土プラグを設置した場合、主要坑道の流れは流れに対する下流側をせき止められる形となり、行き場を失った主要坑道の流れは逆流し、主要坑道に接続している処分坑道に流れ込むこととなる。この対策としては、処分坑道への流れ込みが考えられる処分坑道端部に粘土プラグを設置することが考えられる。

処分坑道の透水係数が埋め戻し材相当の場合は、処分坑道における通過流量が増加するものの、その傾向は処分坑道の透水係数が緩衝材相当の場合とほぼ同じ傾向であった。唯一、その傾向が異なったのは、主要坑道の透水係数が 10^{-7}m/s の場合で、そのほかの条件として処分坑道に粘土プラグが設置されない場合の主要坑道における通過流量であった。しかしながら、この解析条件は処分坑道の透水係数 (10^{-6}m/s) よりも主要坑道の透水係数 (10^{-7}m/s) の方が小さい場合であり、人工バリアの設置される処分坑道よりも主要坑道の透水係数を低く設定することになるこの条件は、実

際の処分場の埋め戻し材にかなりの低透水性が要求される場合である。



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.10 流量評価点における通過流量 (主要坑道の透水係数 10^{-5}m/s , 粘土プラグ設置の効果)
(直交圧力勾配)

粘土プラグ設置位置 : 410 (処分坑道, 主要坑道), 510 (処分坑道),
610 (主要坑道), 710 (粘土プラグ無し)

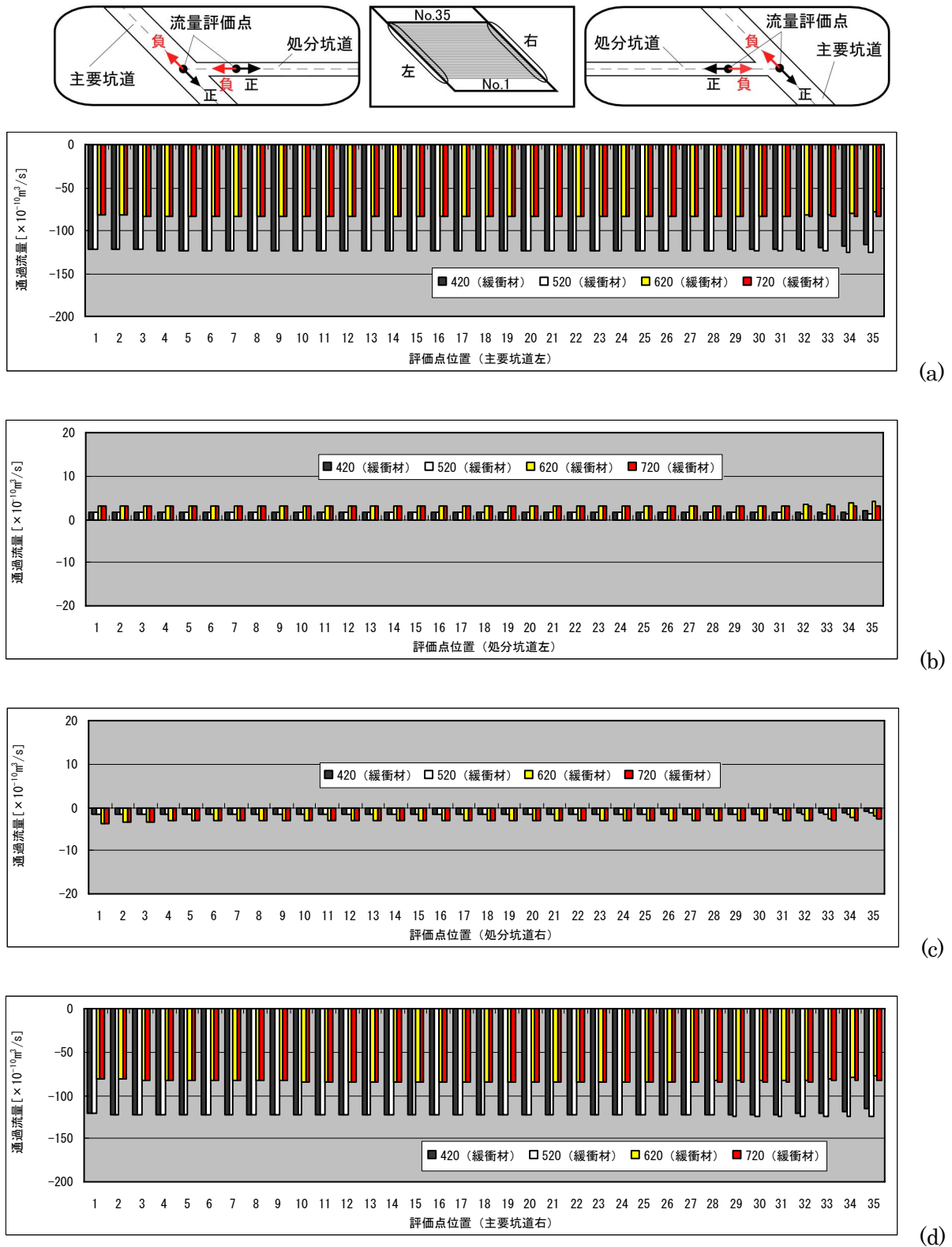
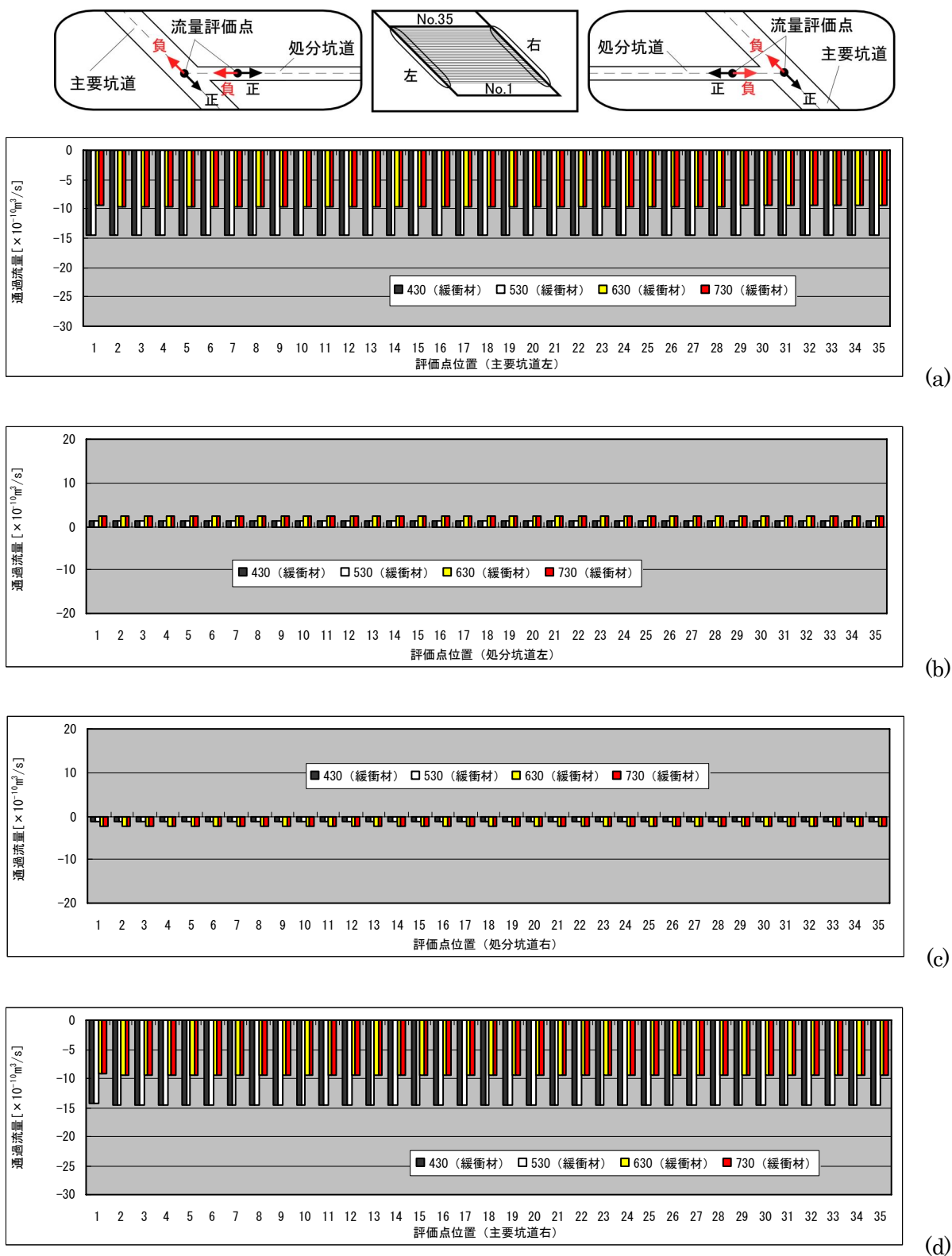


図-4.11 流量評価点における通過流量（主要坑道の透水係数 10^{-6}m/s ，粘土プラグ設置の効果）
（直交圧力勾配）

粘土プラグ設置位置：420（処分坑道，主要坑道），520（処分坑道），
620（主要坑道），720（粘土プラグ無し）



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.12 流量評価点における通過流量 (主要坑道の透水係数 10^{-7}m/s , 粘土プラグ設置の効果)
(直交圧力勾配)

粘土プラグ設置位置: 430 (処分坑道, 主要坑道), 530 (処分坑道),
630 (主要坑道), 730 (粘土プラグ無し)

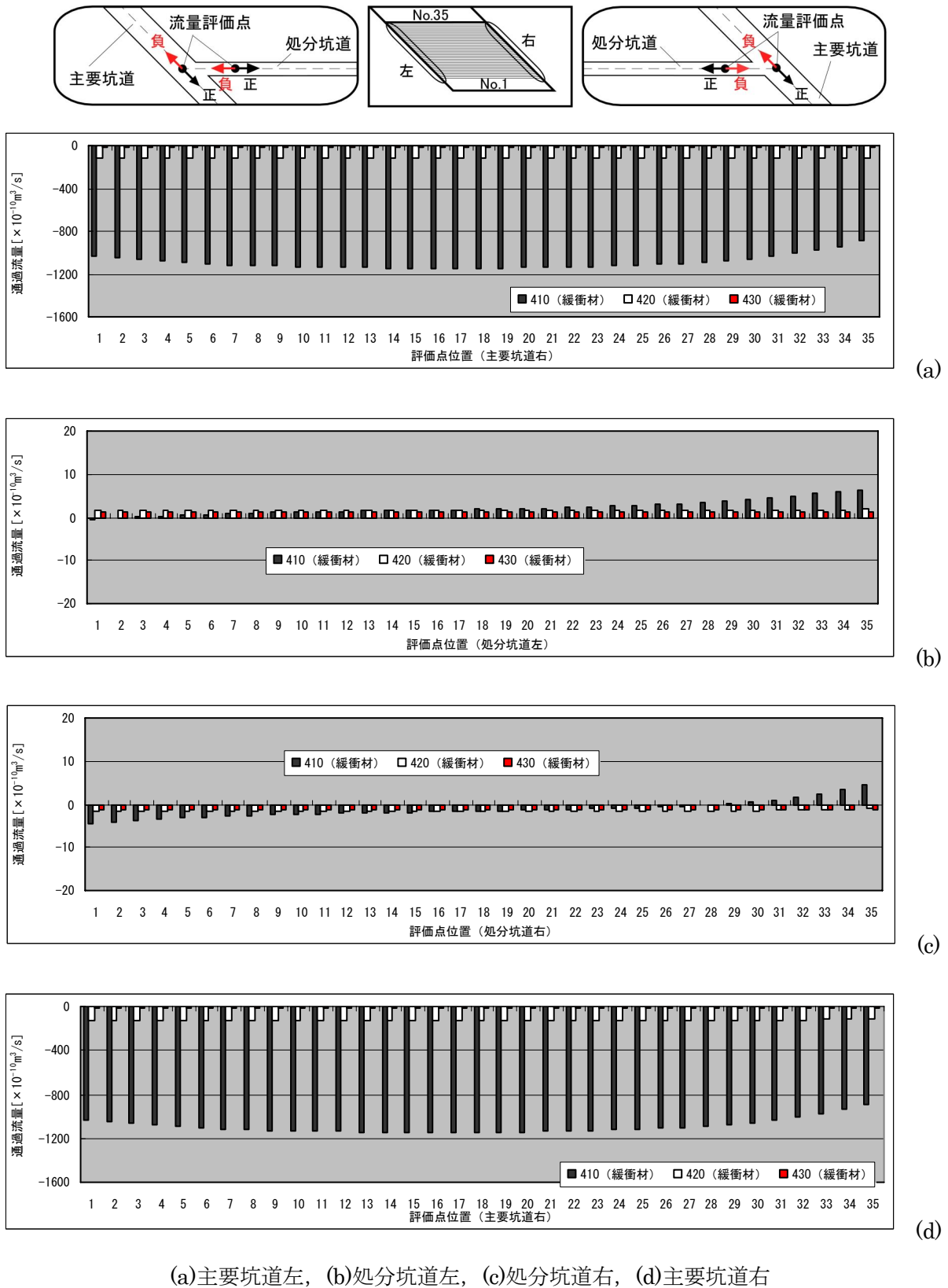
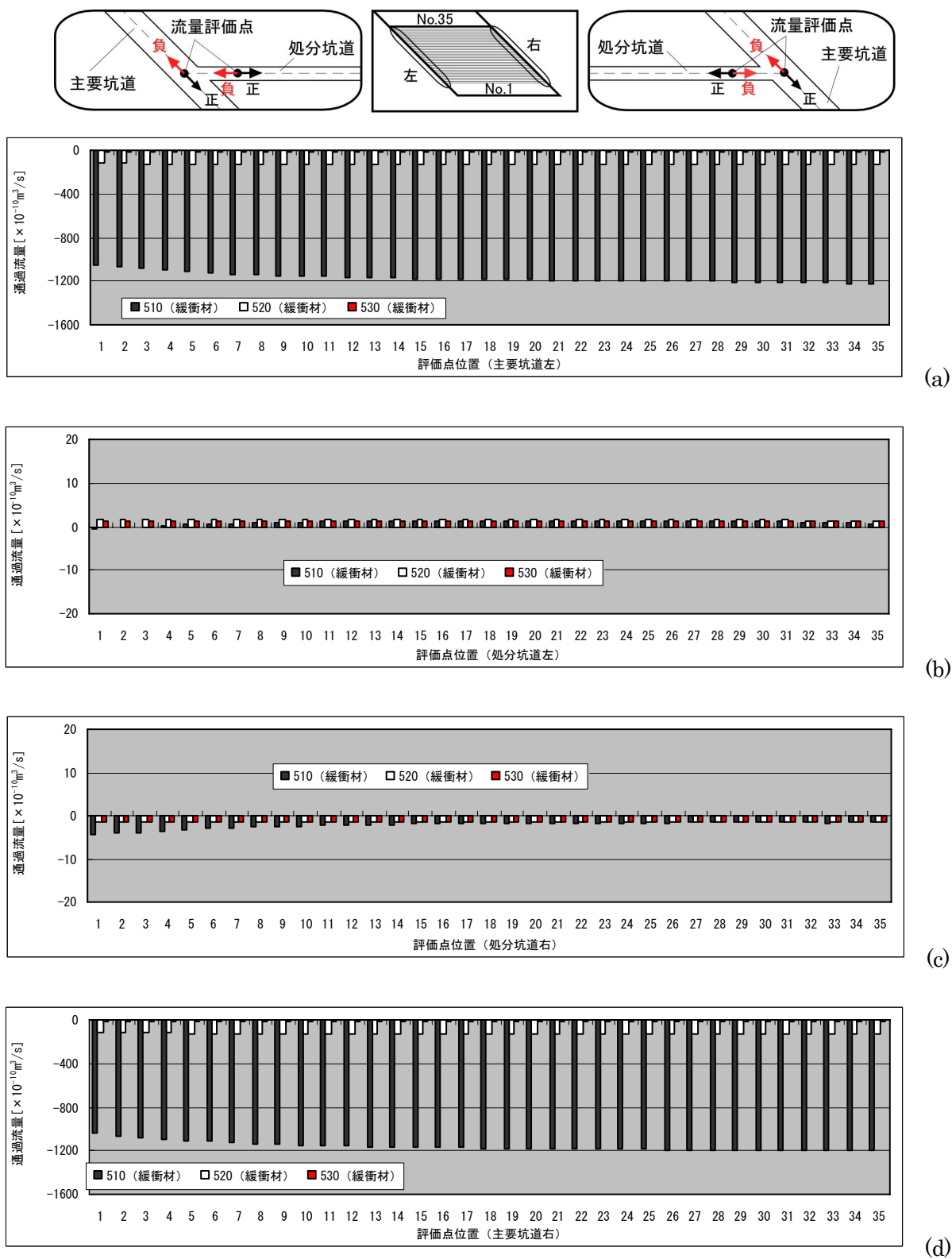


図-4.13 流量評価点における通過流量（粘土プラグを処分坑道、主要坑道に設置、主要坑道の透水係数の影響）

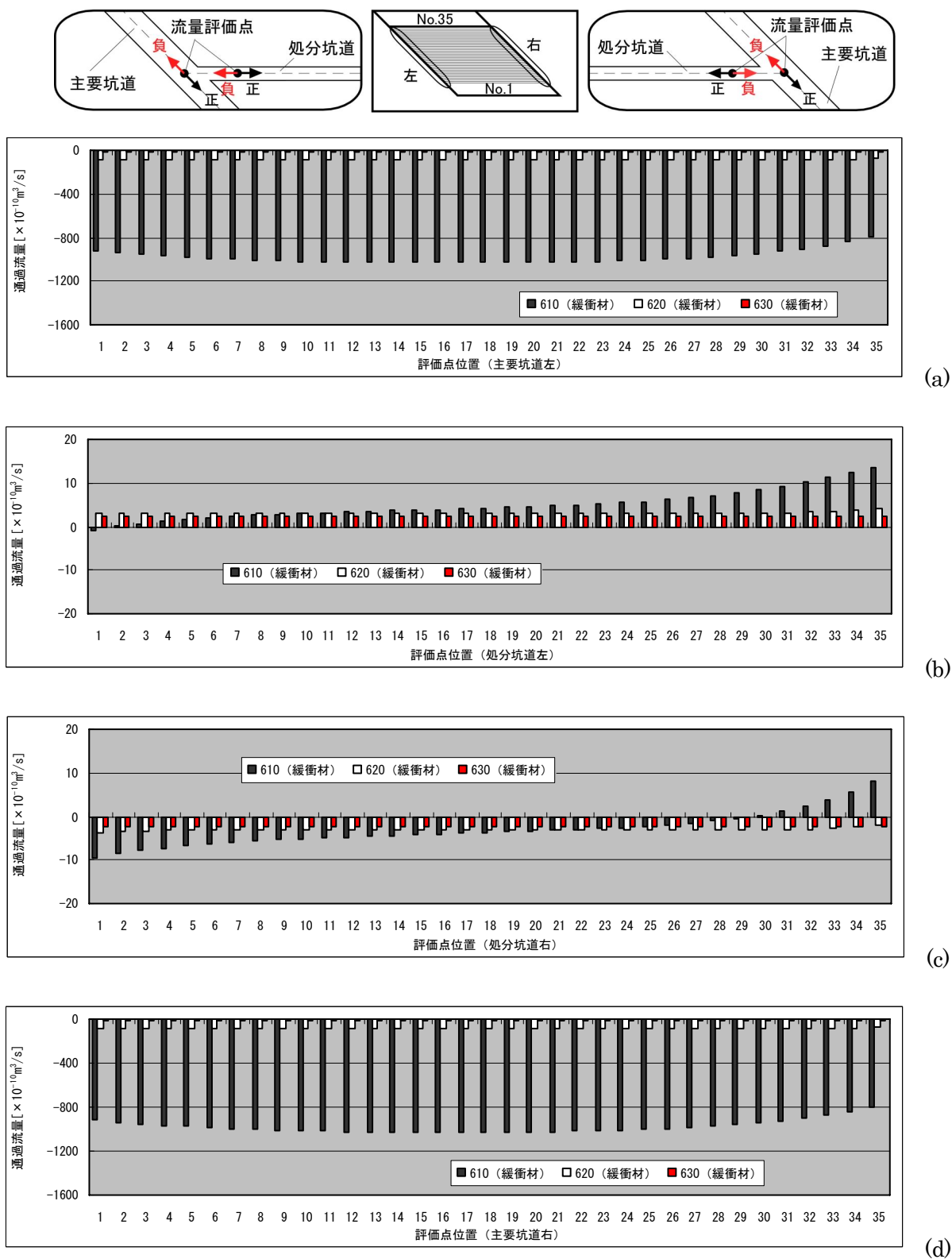
（直交圧力勾配）

主要坑道の透水係数：410（ 10^{-5}m/s ），420（ 10^{-6}m/s ），430（ 10^{-7}m/s ）



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

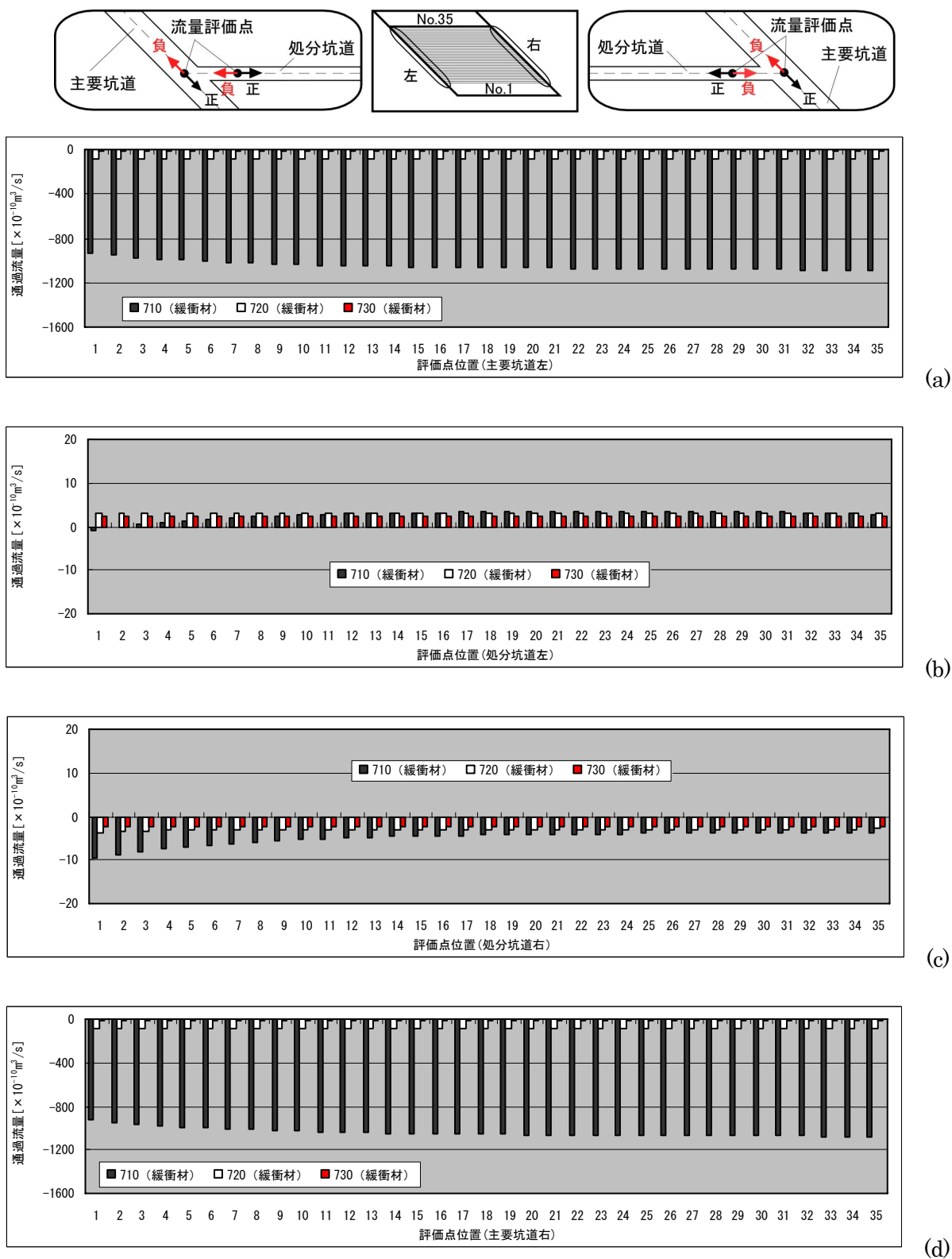
図-4.14 流量評価点における通過流量(粘土プラグを処分坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)
(直交圧力勾配)主要坑道の透水係数 : 51O (10^{-5} m/s), 52O (10^{-6} m/s), 53O (10^{-7} m/s)



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.15 流量評価点における通過流量(粘土プラグを主要坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)
(直交圧力勾配)

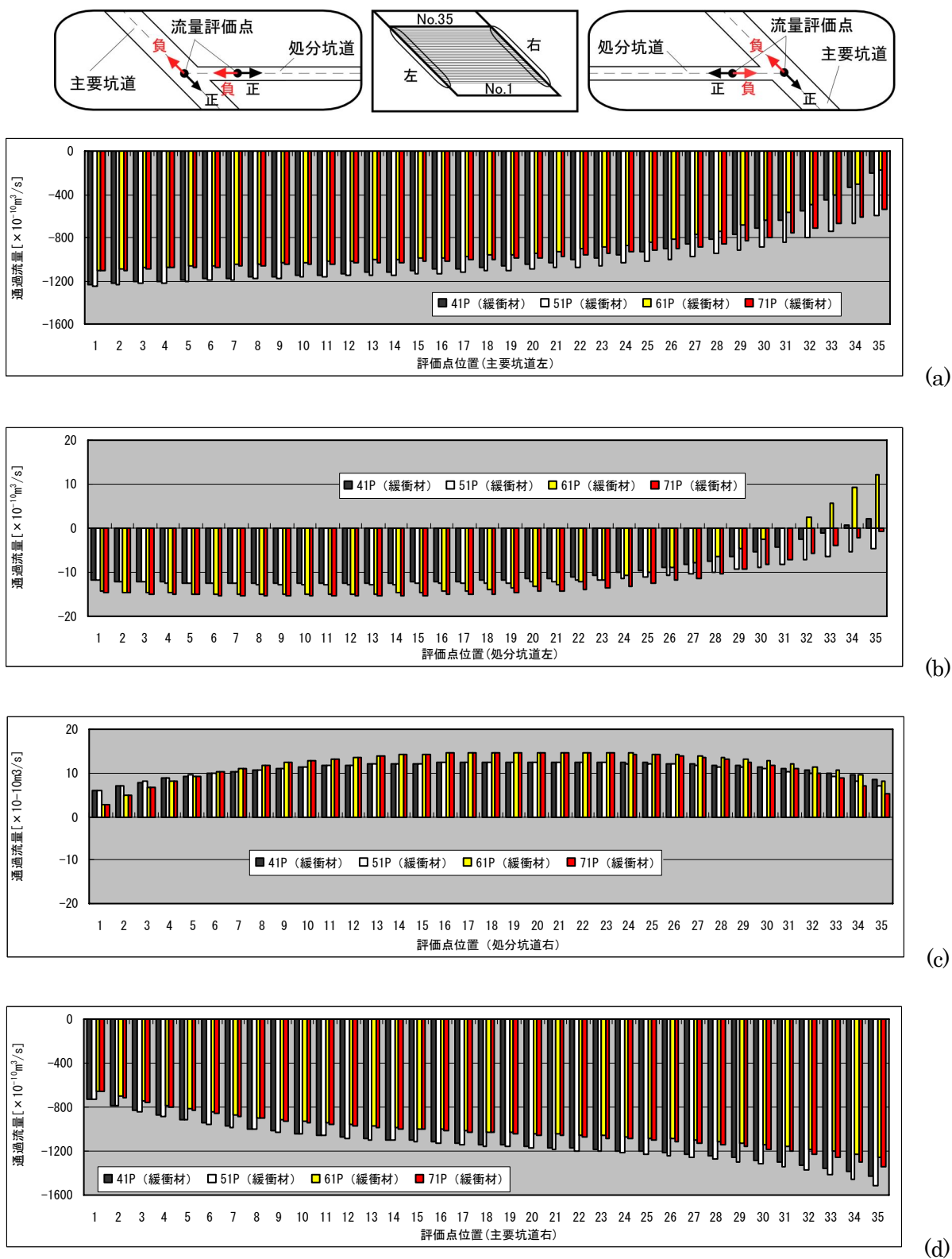
主要坑道の透水係数 : 610 (10^{-5}m/s), 620 (10^{-6}m/s), 630 (10^{-7}m/s)



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.16 流量評価点における通過流量 (粘土プラグの設置なし, 主要坑道の透水係数の影響)
(直交圧力勾配)

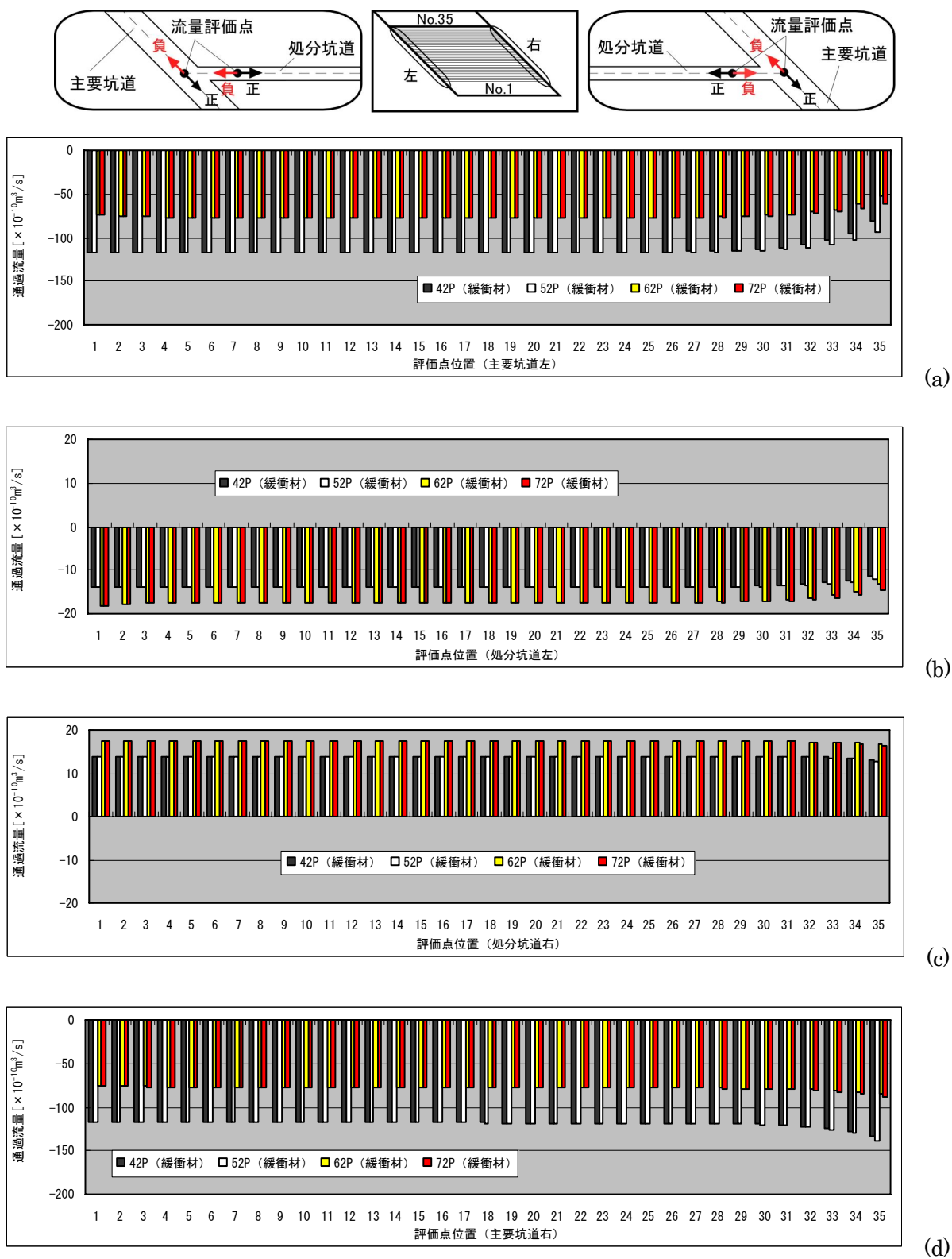
主要坑道の透水係数 : 710 (10^{-5}m/s), 720 (10^{-6}m/s), 730 (10^{-7}m/s)



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.17 流量評価点における通過流量 (主要坑道の透水係数 10^{-5}m/s , 粘土プラグ設置の効果)
(平行圧力勾配)

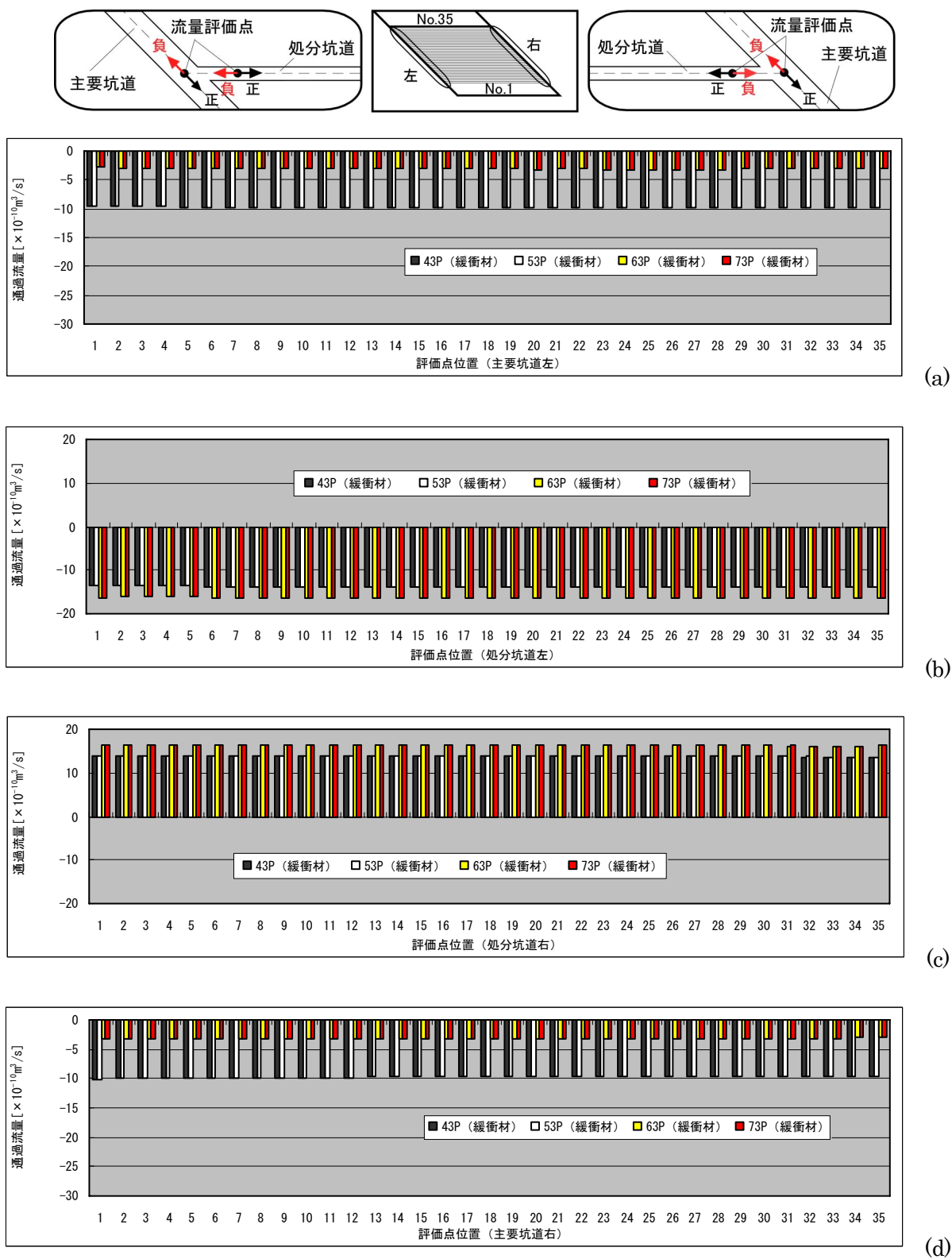
粘土プラグ設置位置: 41P (処分坑道, 主要坑道), 51P (処分坑道),
61P (主要坑道), 71P (粘土プラグ無し)



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.18 流量評価点における通過流量 (主要坑道の透水係数 10^{-6}m/s , 粘土プラグ設置の効果)
(平行圧力勾配)

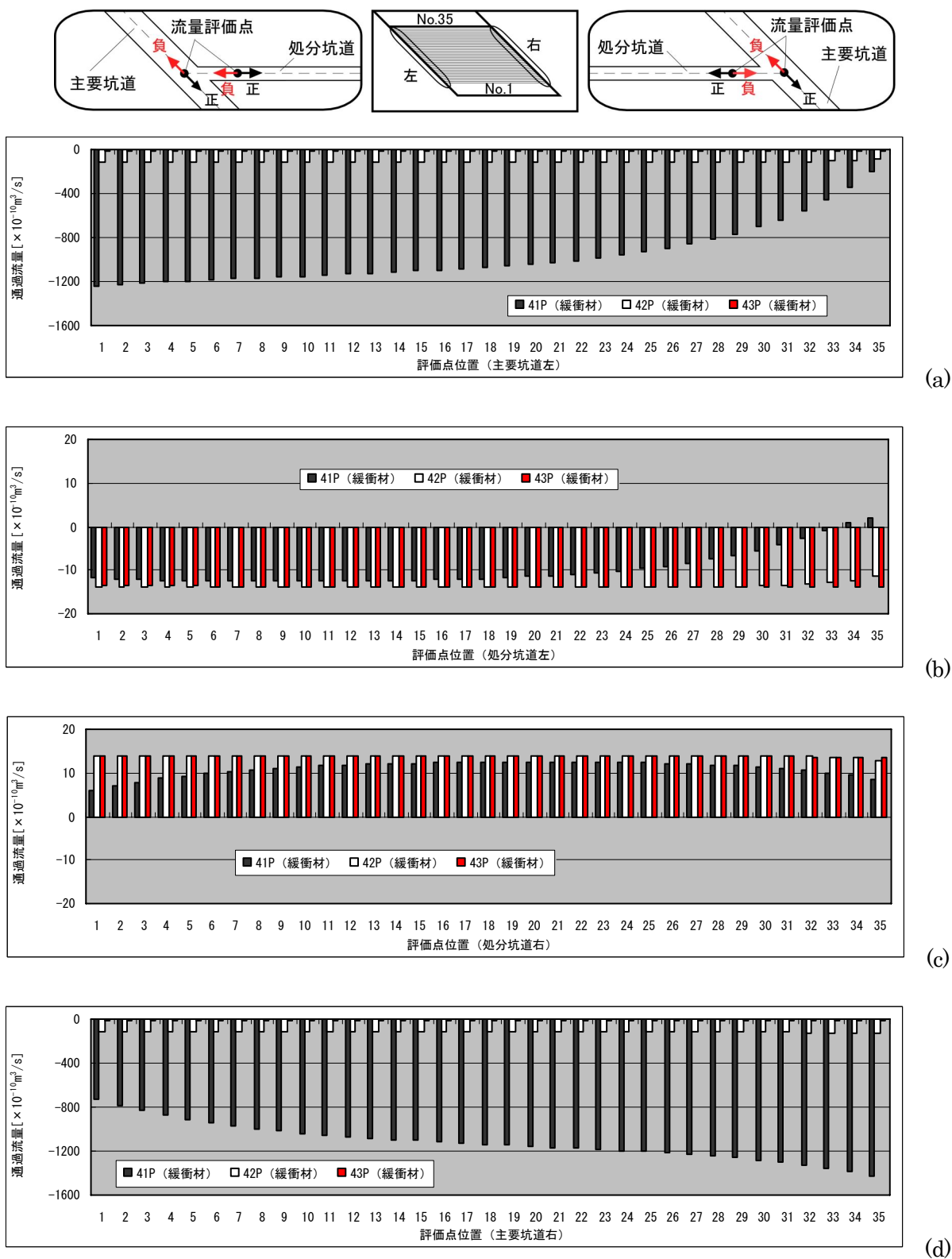
粘土プラグ設置位置: 42P (処分坑道, 主要坑道), 52P (処分坑道),
62P (主要坑道), 72P (粘土プラグ無し)



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.19 流量評価点における通過流量 (主要坑道の透水係数 10^{-7}m/s , 粘土プラグ設置の効果)
(平行圧力勾配)

粘土プラグ設置位置 : 43P (処分坑道, 主要坑道), 53P (処分坑道),
63P (主要坑道), 73P (粘土プラグ無し)

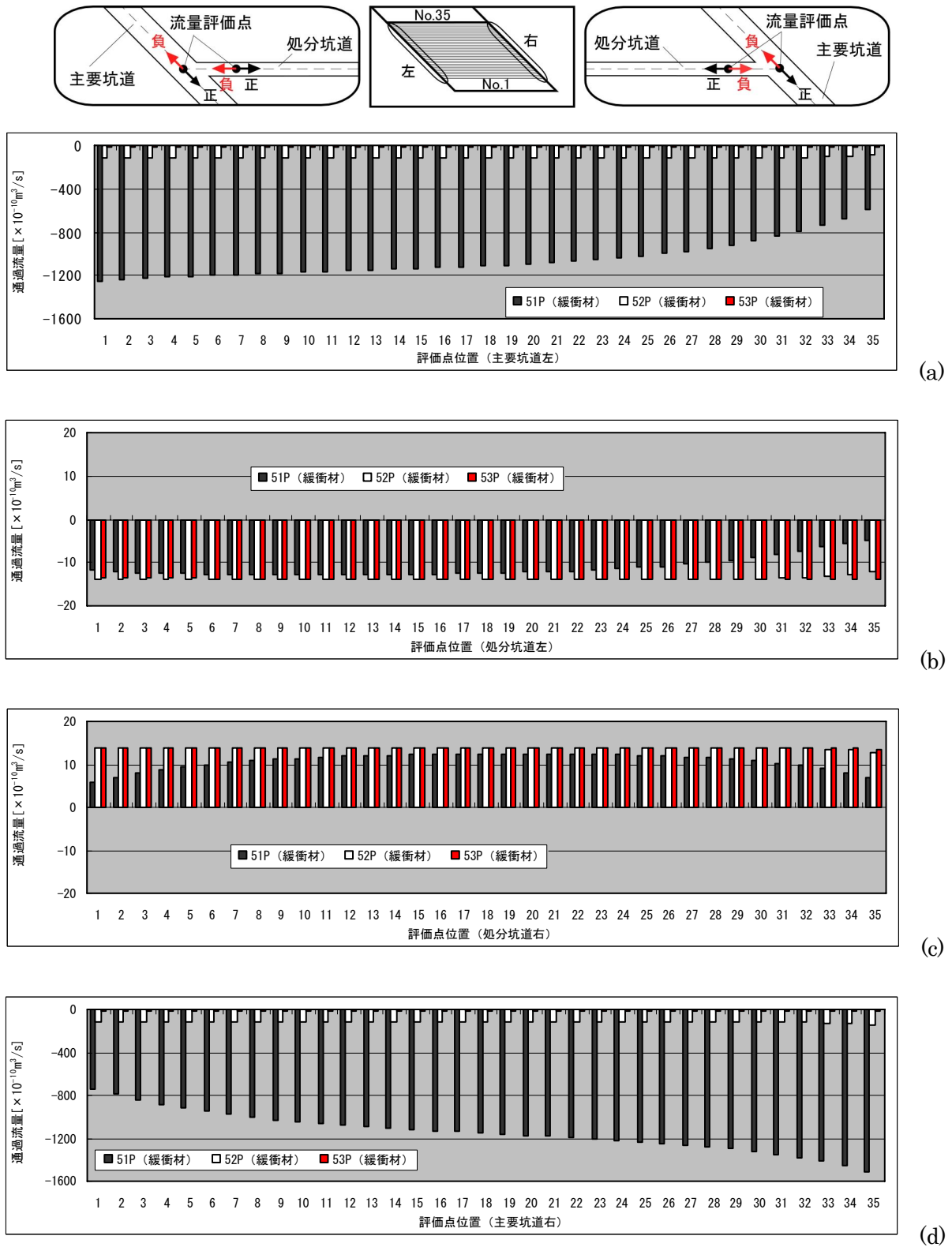


(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.20 流量評価点における通過流量 (粘土プラグを処分坑道, 主要坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)

(平行圧力勾配)

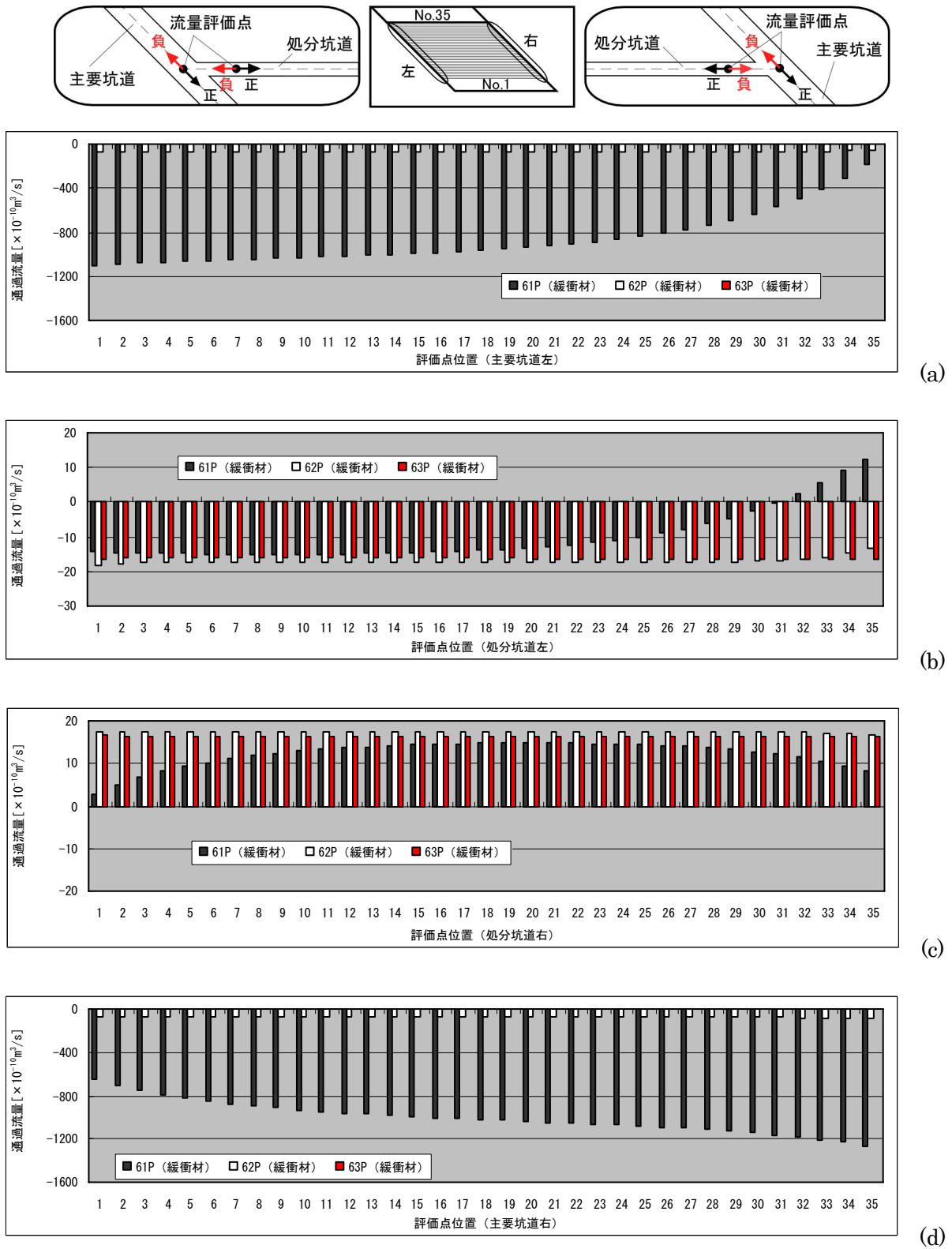
主要坑道の透水係数 : 41P (10^{-5}m/s), 42P (10^{-6}m/s), 43P (10^{-7}m/s)



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.21 流量評価点における通過流量(粘土プラグを処分坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)
(平行圧力勾配)

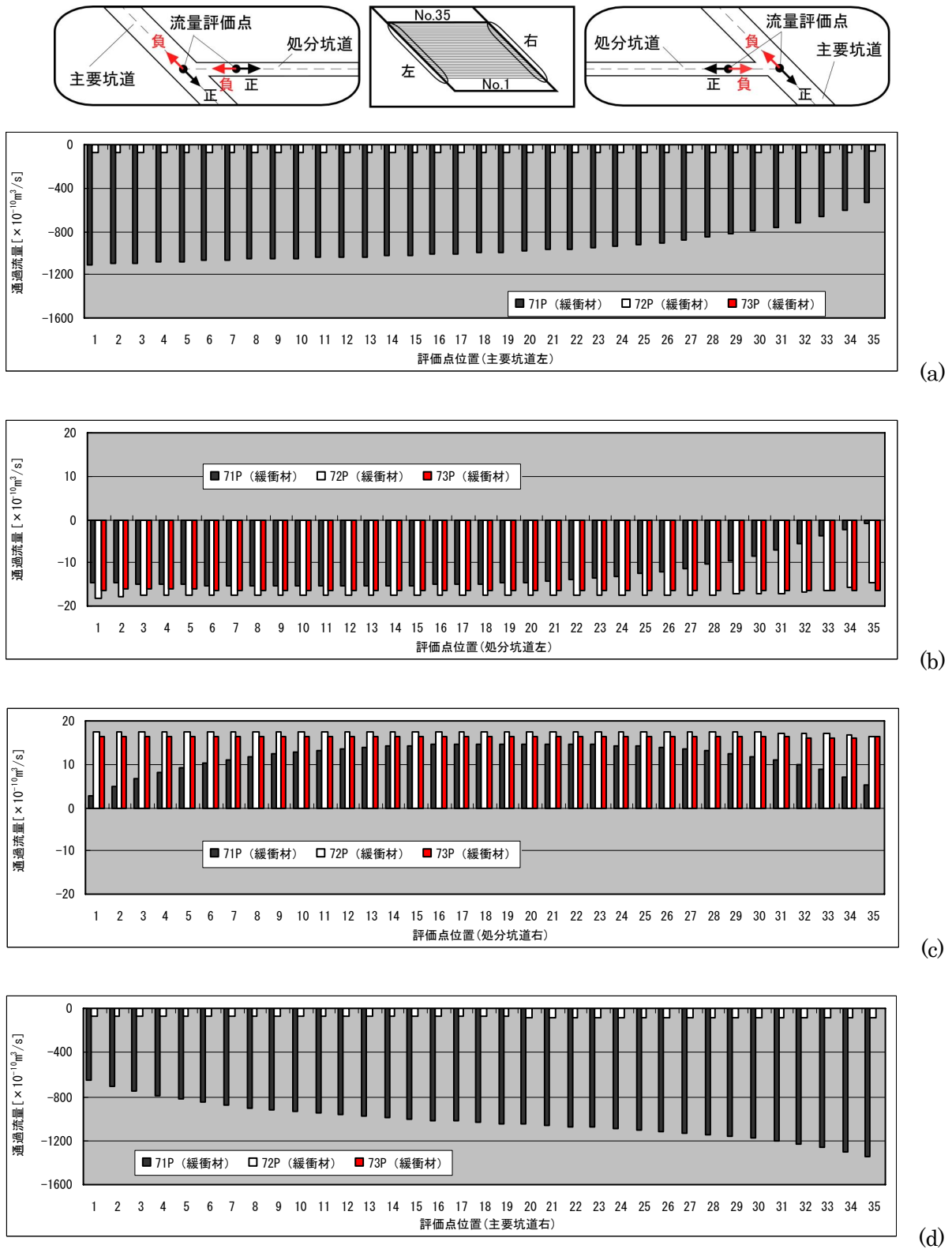
主要坑道の透水係数 : 51P (10^{-5}m/s), 52P (10^{-6}m/s), 53P (10^{-7}m/s)



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.22 流量評価点における通過流量(粘土プラグを主要坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)
(平行圧力勾配)

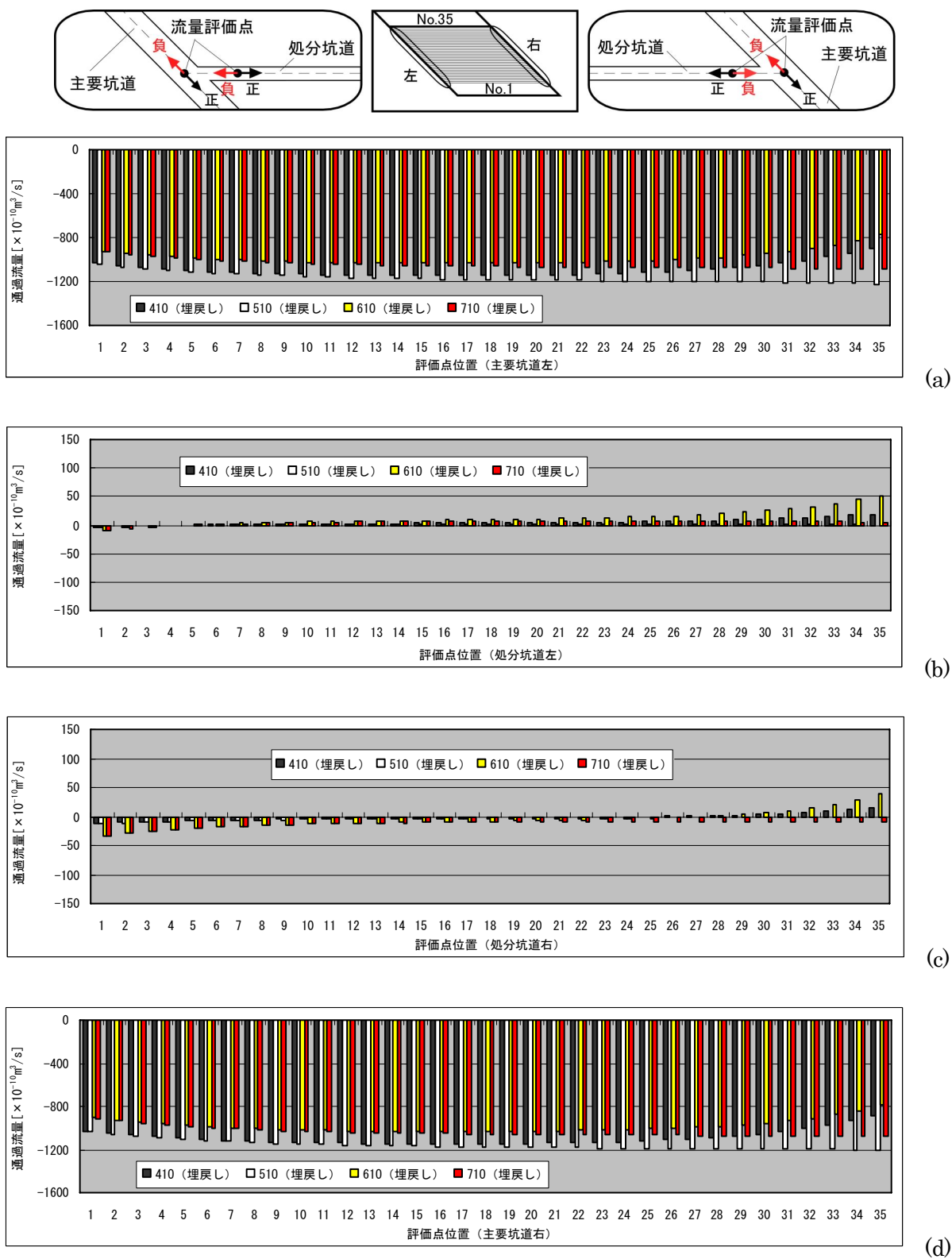
主要坑道の透水係数 : 61P (10^{-5} m/s), 62P (10^{-6} m/s), 63P (10^{-7} m/s)



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.23 流量評価点における通過流量 (粘土プラグの設置なし, 主要坑道の透水係数の影響)
(平行圧力勾配)

主要坑道の透水係数 : 71P (10^{-5}m/s), 72P (10^{-6}m/s), 73P (10^{-7}m/s)



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.24 流量評価点における通過流量 (主要坑道の透水係数 10^{-5}m/s , 粘土プラグ設置の効果)
(直交圧力勾配)

粘土プラグ設置位置 : 410 (処分坑道, 主要坑道), 510 (処分坑道),
610 (主要坑道), 710 (粘土プラグ無し)

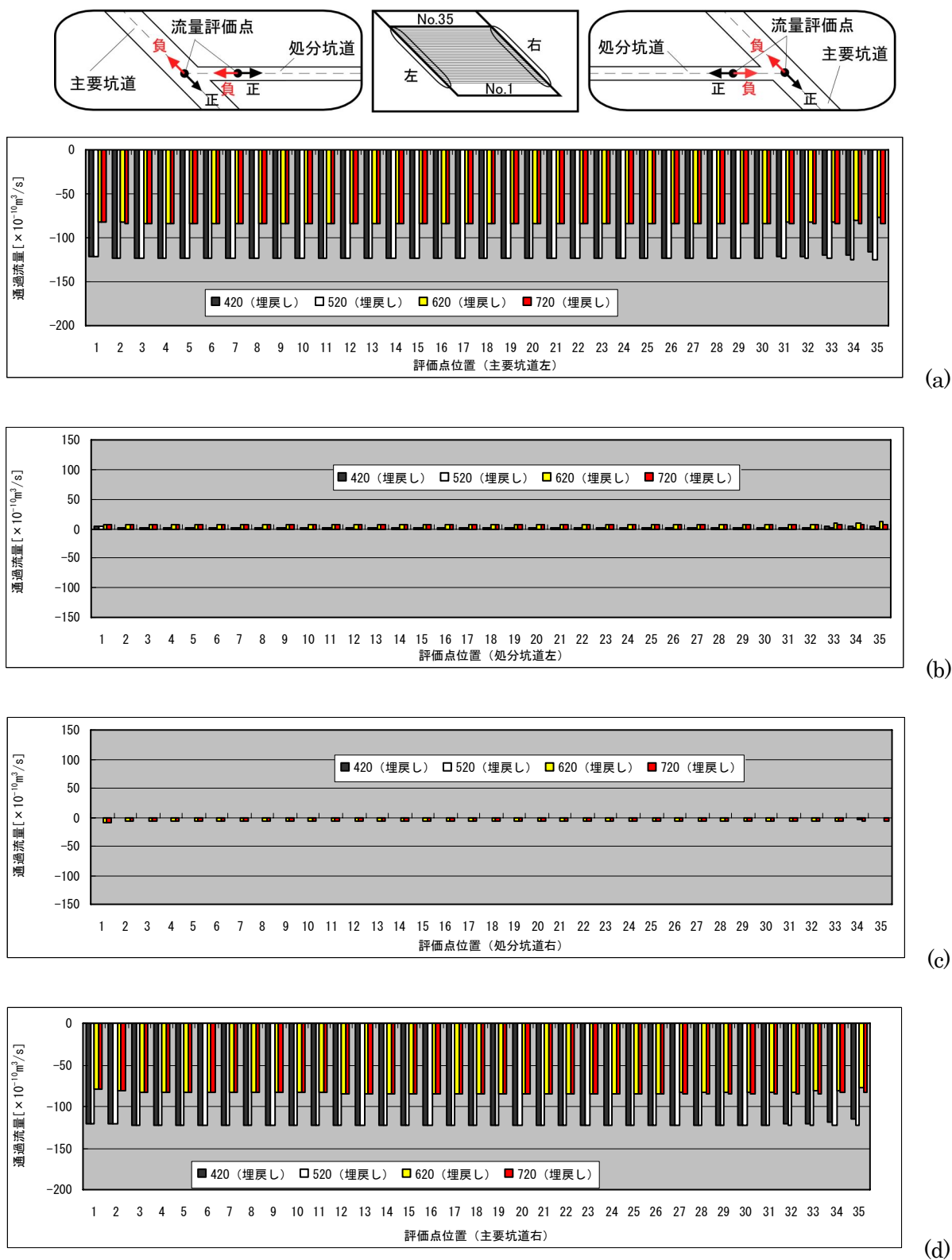
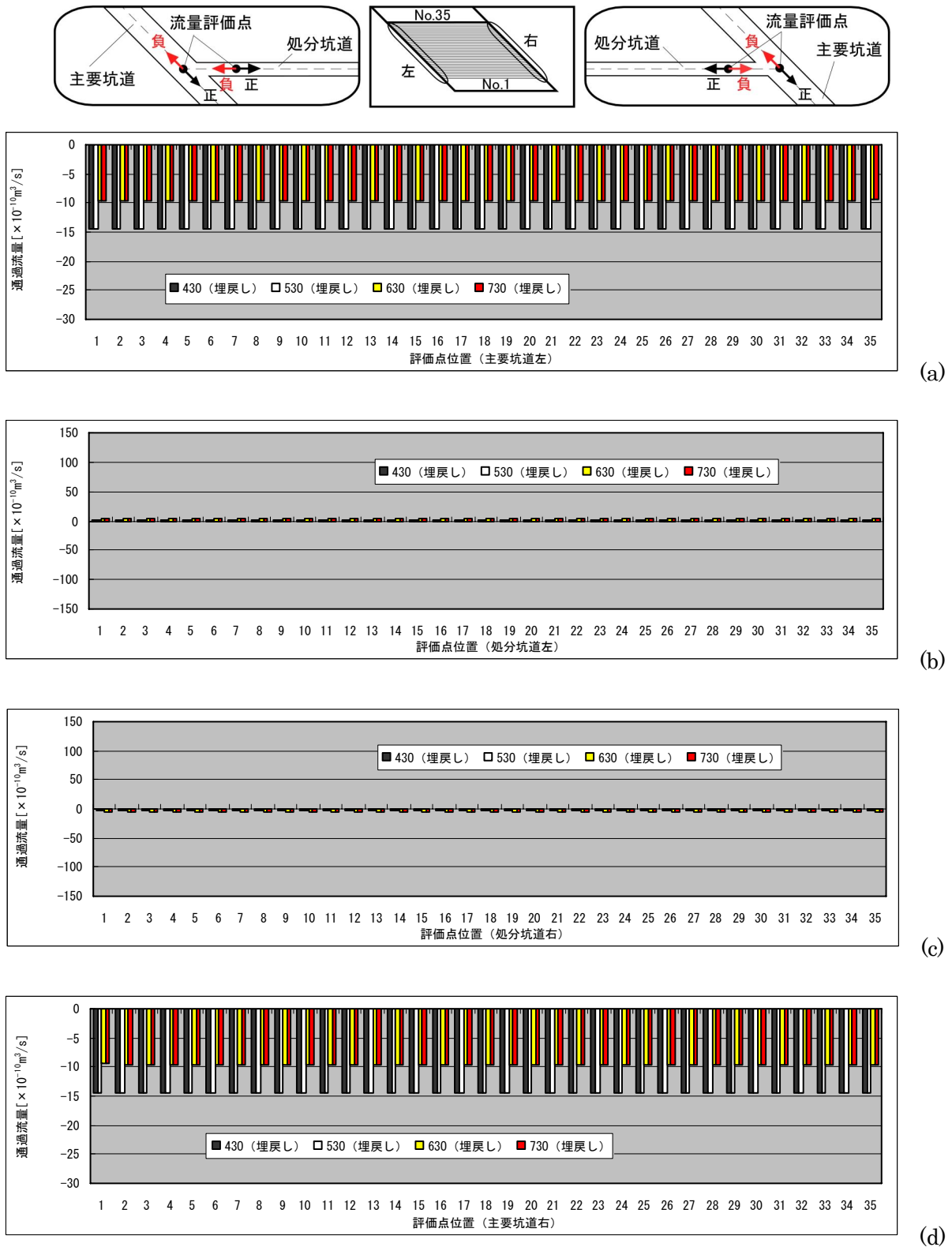


図-4.25 流量評価点における通過流量（主要坑道の透水係数 10^{-6}m/s ，粘土プラグ設置の効果）
（直交圧力勾配）

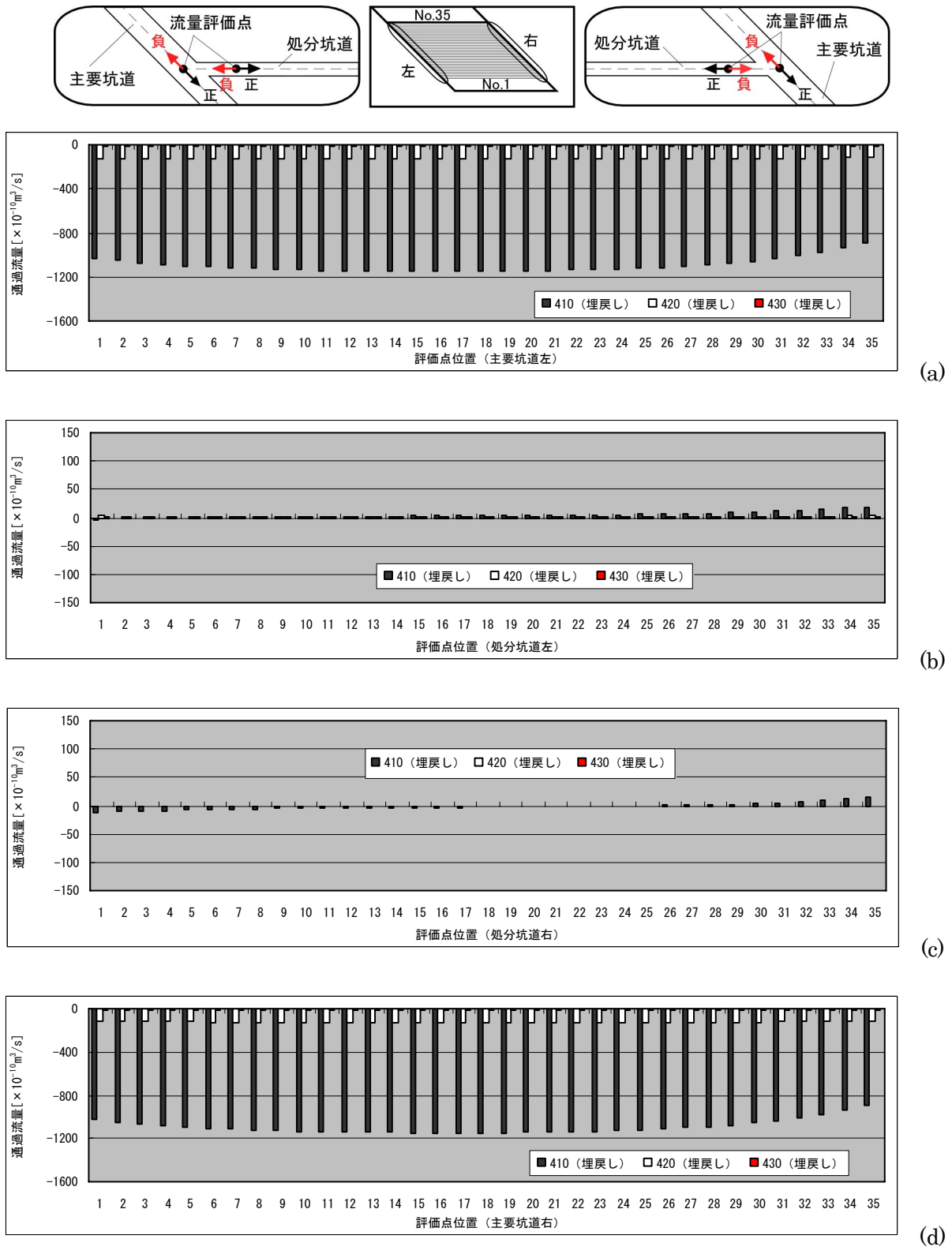
粘土プラグ設置位置：420（処分坑道，主要坑道），520（処分坑道），
620（主要坑道），720（粘土プラグ無し）



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.26 流量評価点における通過流量 (主要坑道の透水係数 10^{-7} m/s, 粘土プラグ設置の効果)
(直交圧力勾配)

粘土プラグ設置位置 : 430 (処分坑道, 主要坑道), 530 (処分坑道),
630 (主要坑道), 730 (粘土プラグ無し)

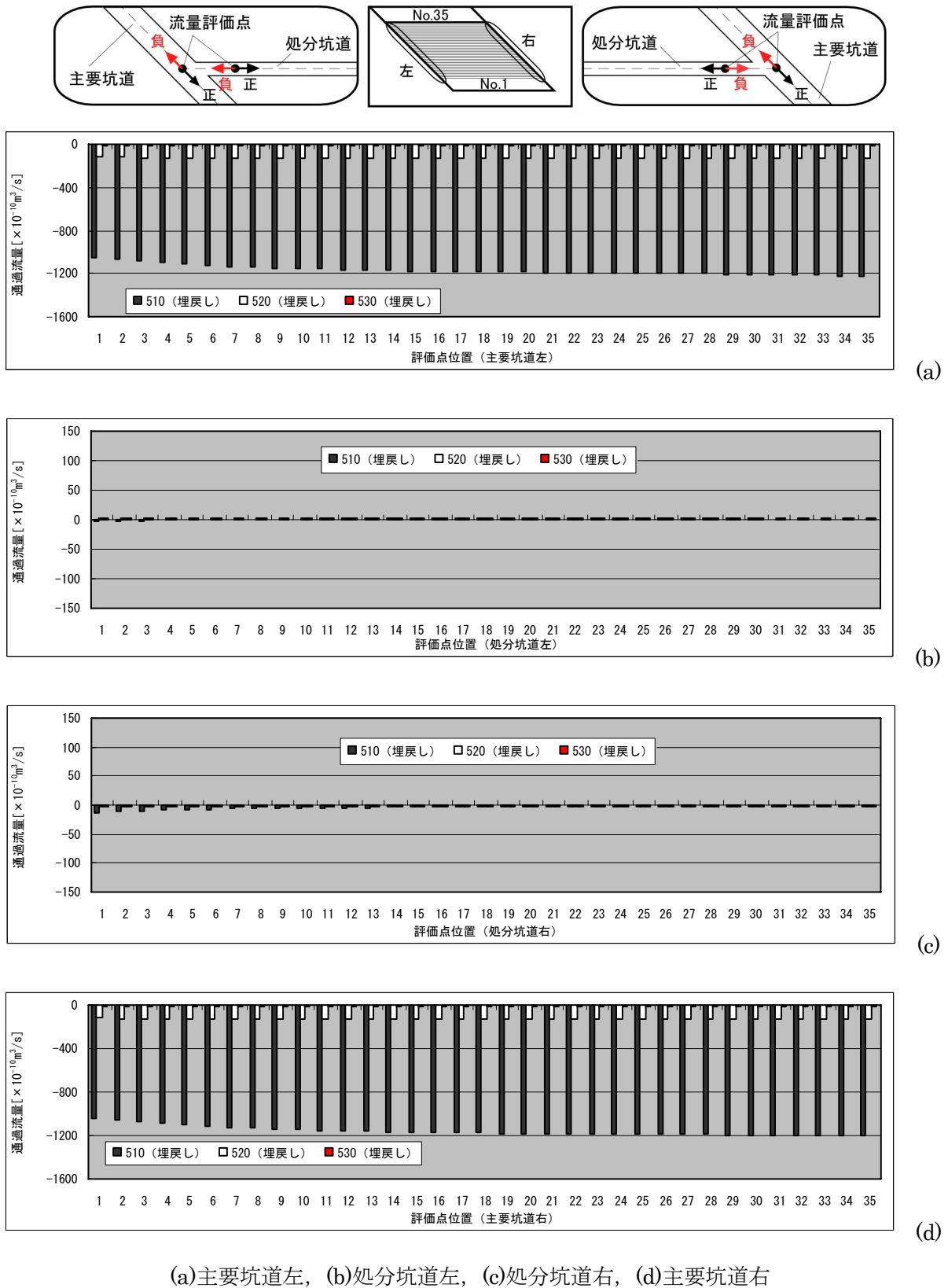


(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.27 流量評価点における通過流量 (粘土プラグを処分坑道, 主要坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)

(直交圧力勾配)

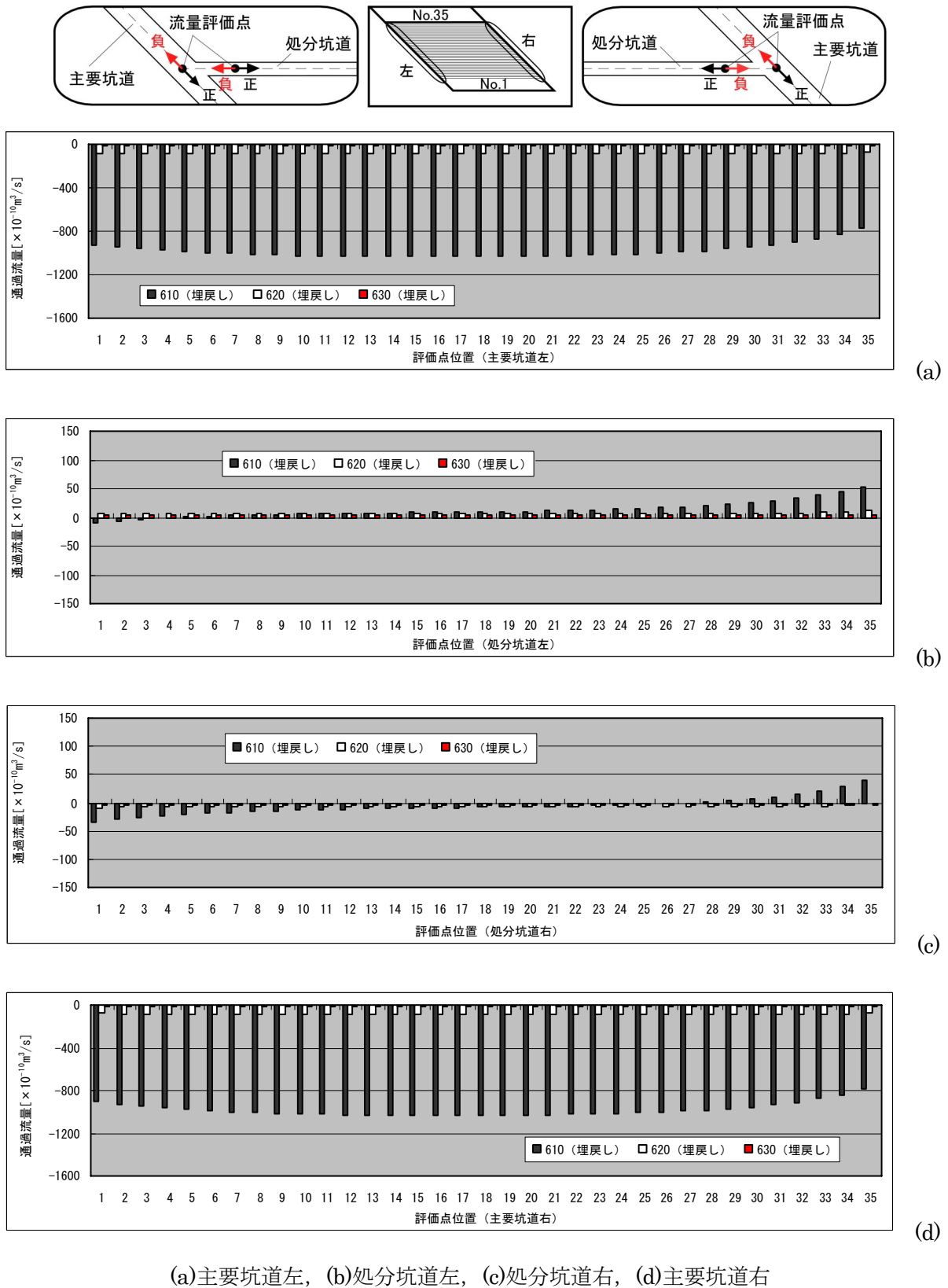
主要坑道の透水係数 : 41O (10^{-5} m/s), 42O (10^{-6} m/s), 43O (10^{-7} m/s)



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.28 流量評価点における通過流量(粘土プラグを処分坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)
(直交圧力勾配)

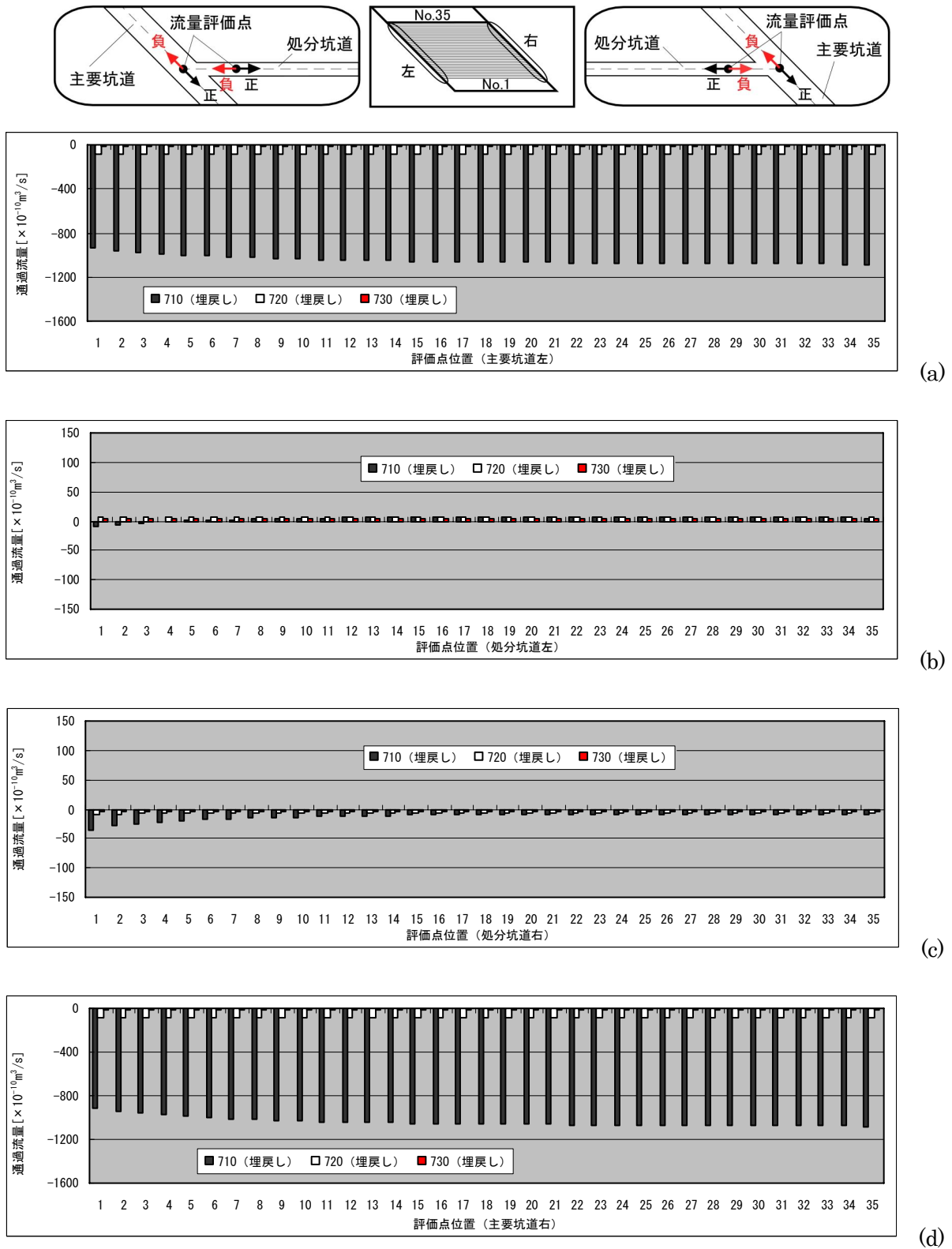
主要坑道の透水係数 : 51O (10^{-5} m/s), 52O (10^{-6} m/s), 53O (10^{-7} m/s)



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.29 流量評価点における通過流量(粘土プラグを主要坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)
(直交圧力勾配)

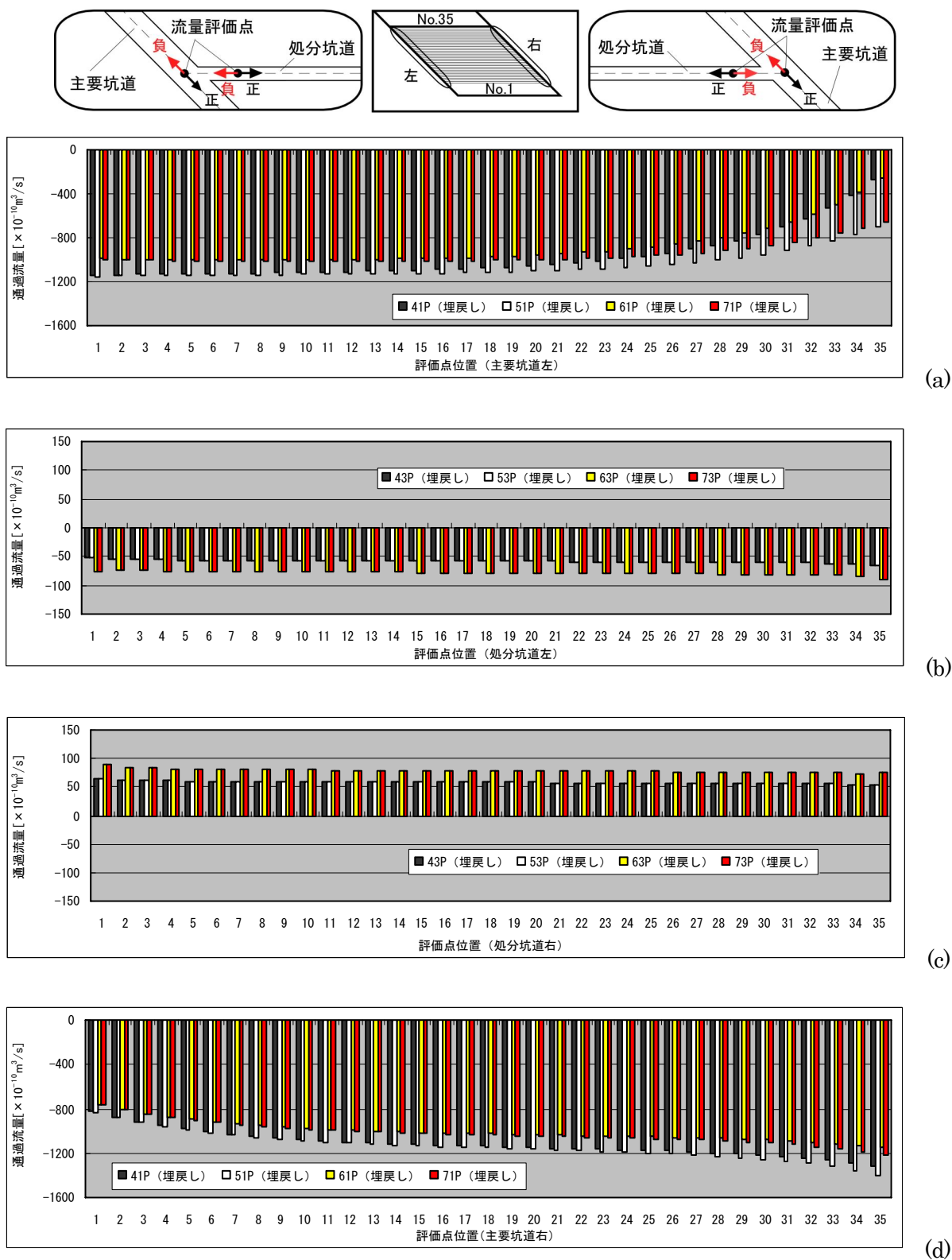
主要坑道の透水係数 : 610 (10^{-5} m/s), 620 (10^{-6} m/s), 630 (10^{-7} m/s)



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.30 流量評価点における通過流量 (粘土プラグの設置なし, 主要坑道の透水係数の影響)
(直交圧力勾配)

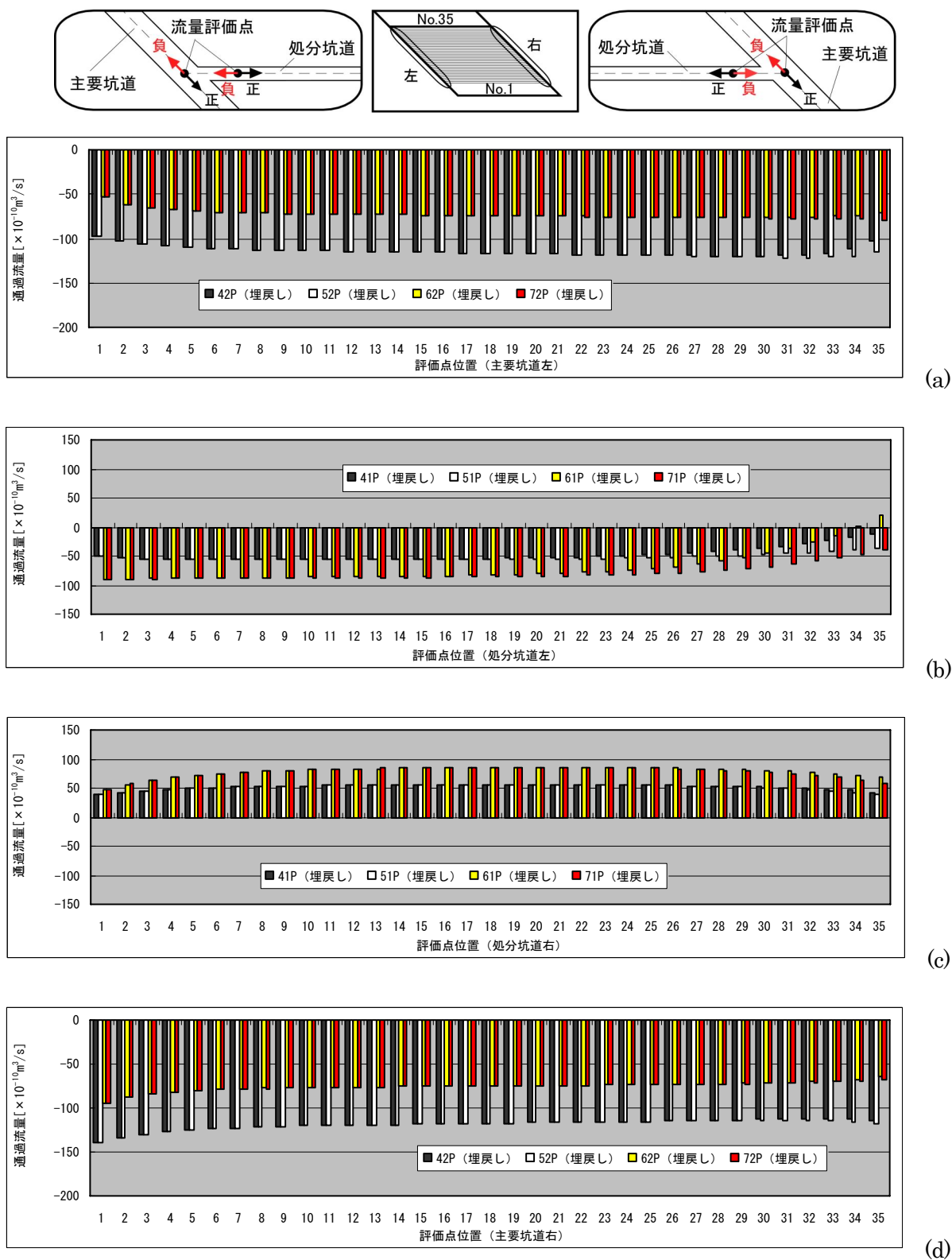
主要坑道の透水係数 : 710 (10^{-5} m/s), 720 (10^{-6} m/s), 730 (10^{-7} m/s)



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.31 流量評価点における通過流量 (主要坑道の透水係数 10^{-5}m/s , 粘土プラグ設置の効果)
(平行圧力勾配)

粘土プラグ設置位置 : 41P (処分坑道, 主要坑道), 51P (処分坑道),
61P (主要坑道), 71P (粘土プラグ無し)



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.32 流量評価点における通過流量 (主要坑道の透水係数 10^{-6}m/s , 粘土プラグ設置の効果)
(平行圧力勾配)

粘土プラグ設置位置: 42P (処分坑道, 主要坑道), 52P (処分坑道),
62P (主要坑道), 72P (粘土プラグ無し)

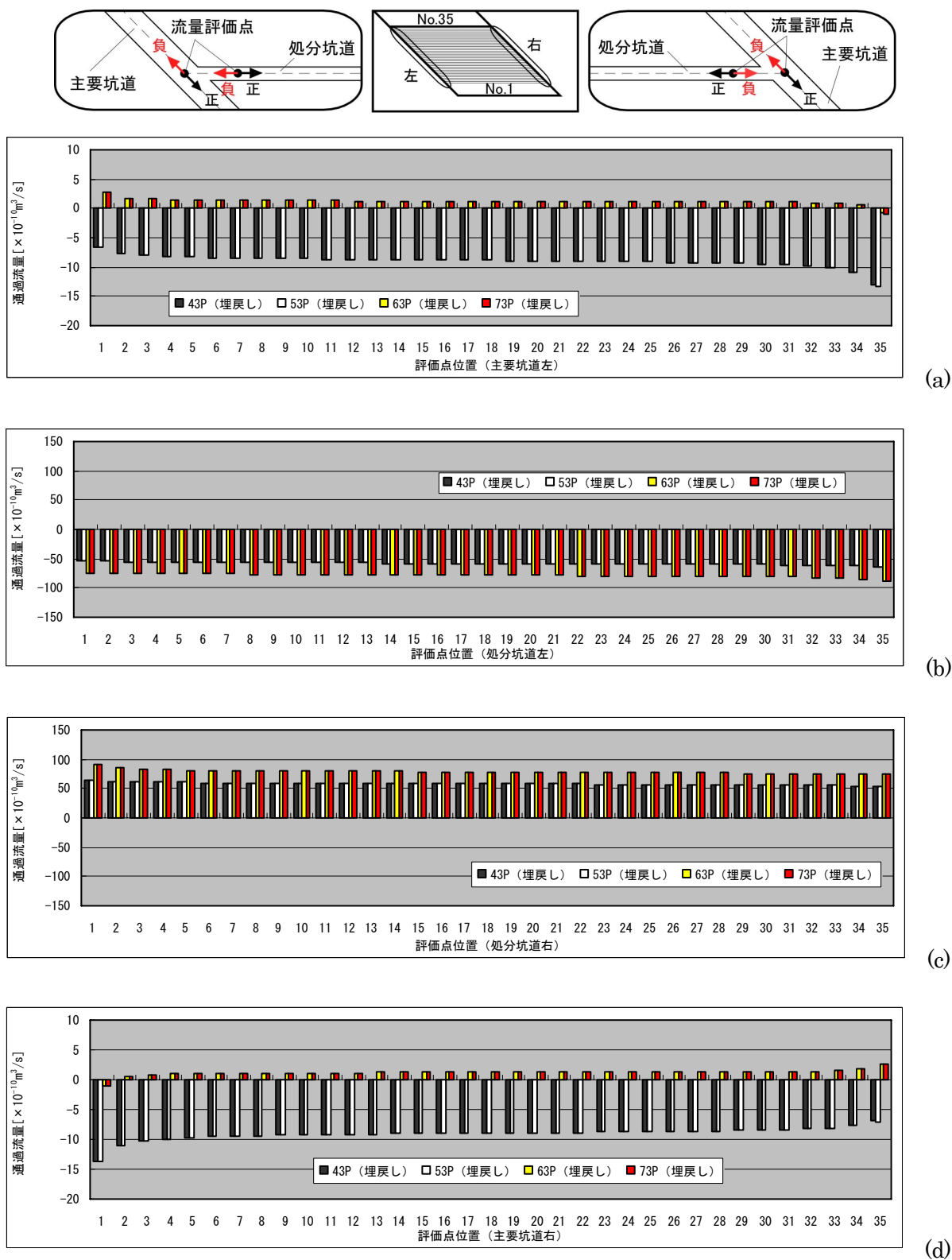
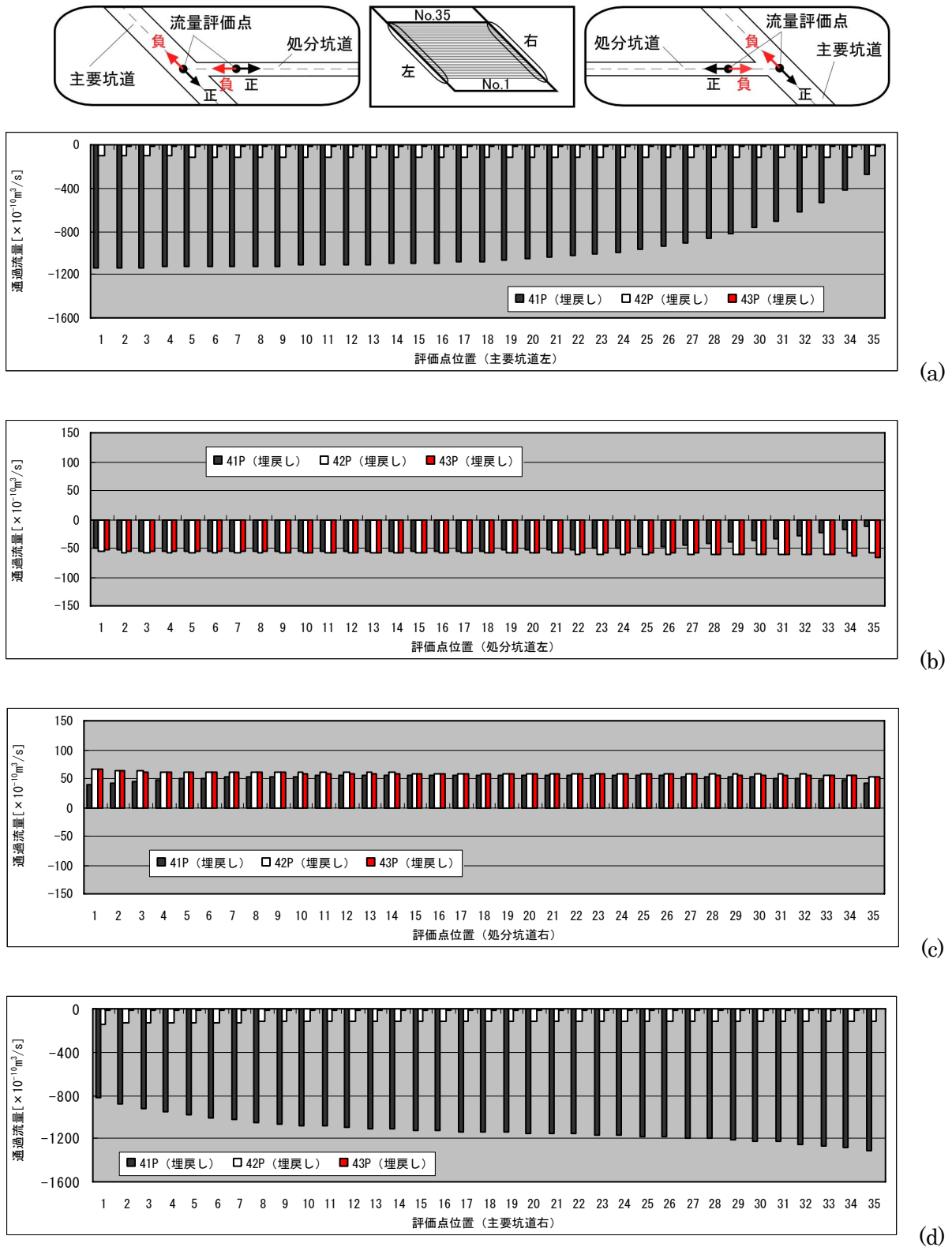


図-4.33 流量評価点における通過流量（主要坑道の透水係数 10^{-7}m/s ，粘土プラグ設置の効果）
（平行圧力勾配）

粘土プラグ設置位置：43P（処分坑道，主要坑道），53P（処分坑道），
63P（主要坑道），73P（粘土プラグ無し）



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.34 流量評価点における通過流量 (粘土プラグを処分坑道, 主要坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)

(平行圧力勾配)

主要坑道の透水係数 : 41P (10^{-5}m/s), 42P (10^{-6}m/s), 43P (10^{-7}m/s)

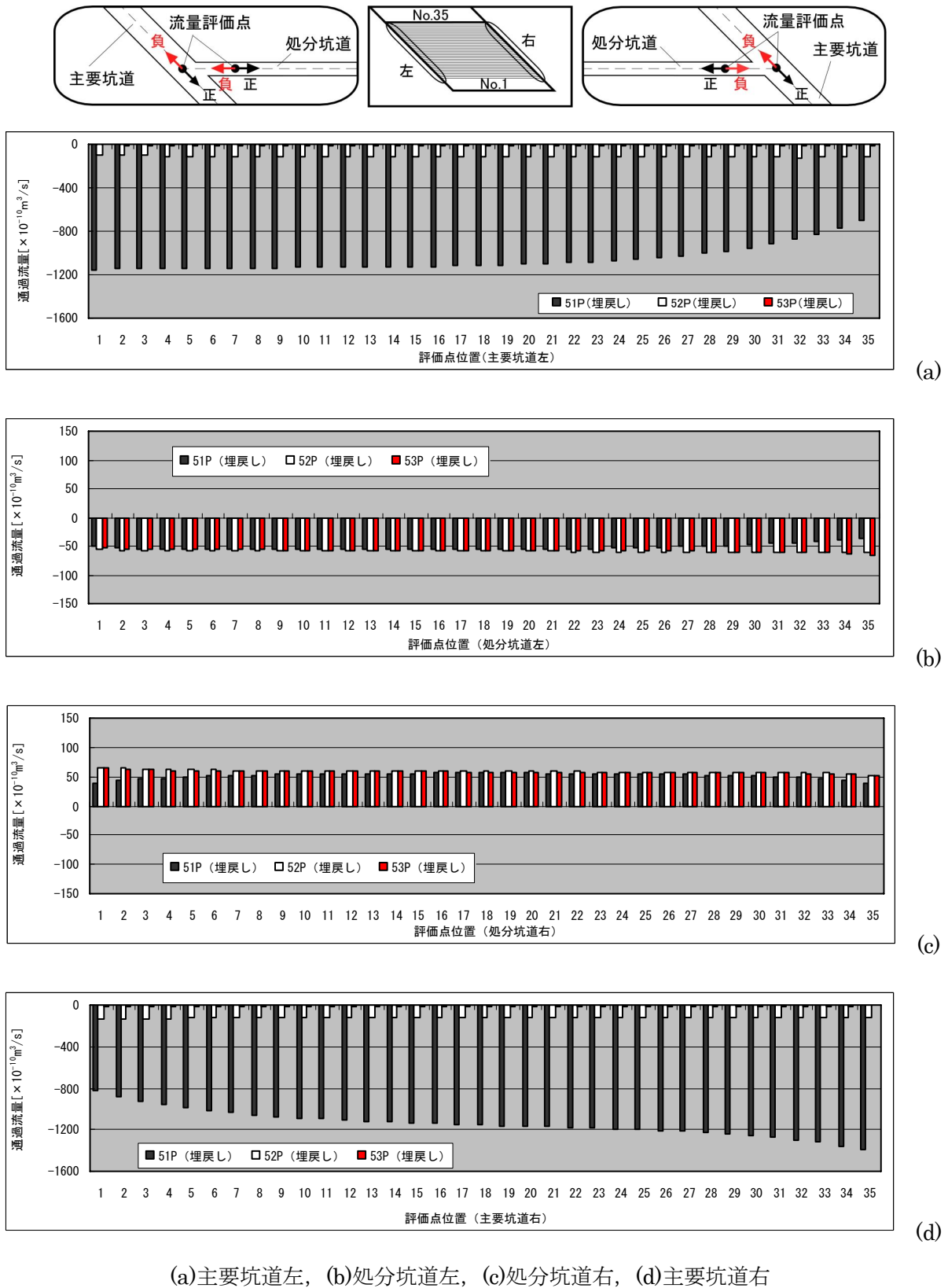
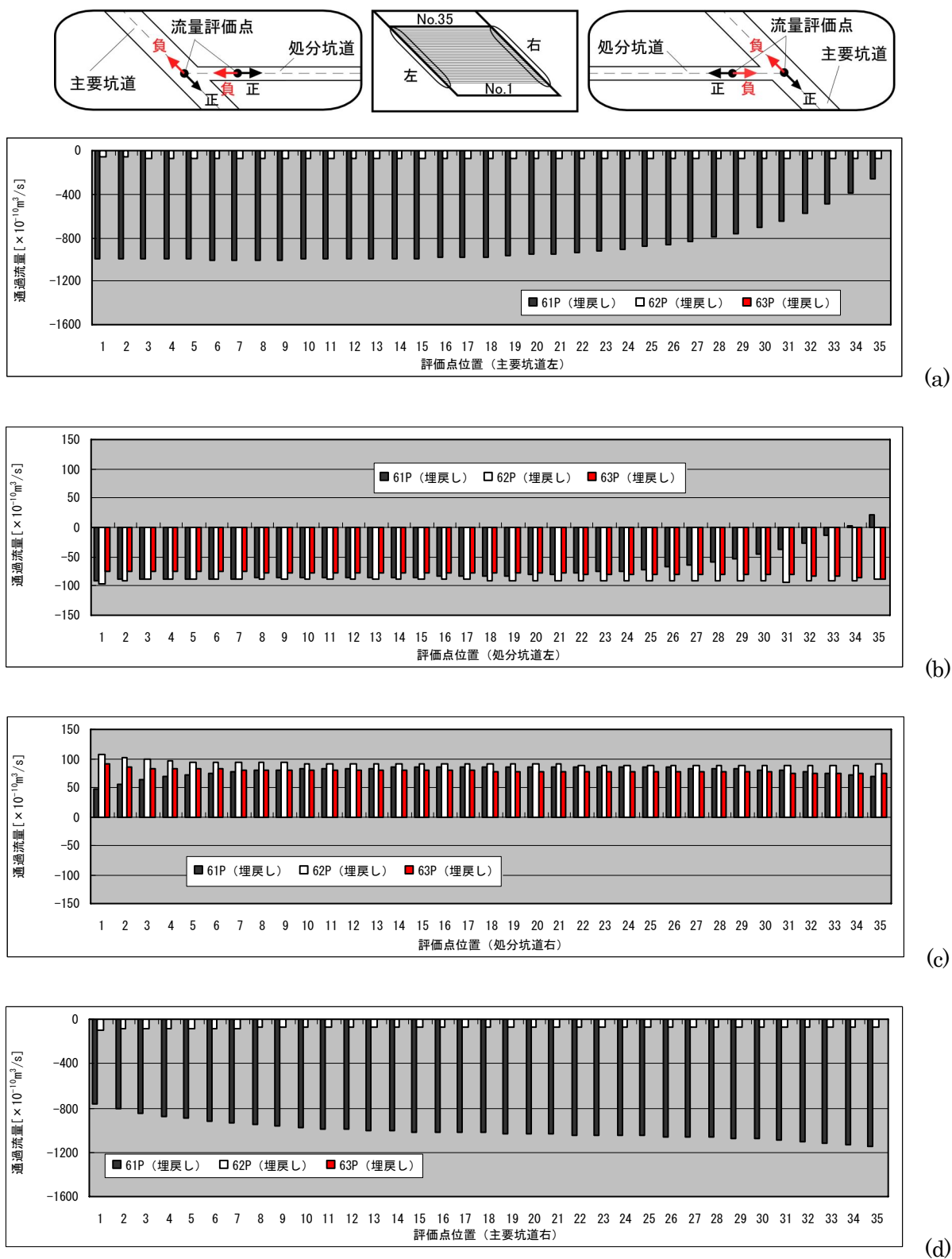


図-4.35 流量評価点における通過流量(粘土プラグを処分坑道に設置、主要坑道の透水係数の影響)
(平行圧力勾配)

主要坑道の透水係数 : 51P (10^{-5}m/s), 52P (10^{-6}m/s), 53P (10^{-7}m/s)



(a)主要坑道左, (b)処分坑道左, (c)処分坑道右, (d)主要坑道右

図-4.36 流量評価点における通過流量(粘土プラグを主要坑道に設置, 主要坑道の透水係数の影響)
(平行圧力勾配)

主要坑道の透水係数 : 61P (10⁻⁵m/s), 62P (10⁻⁶m/s), 63P (10⁻⁷m/s)

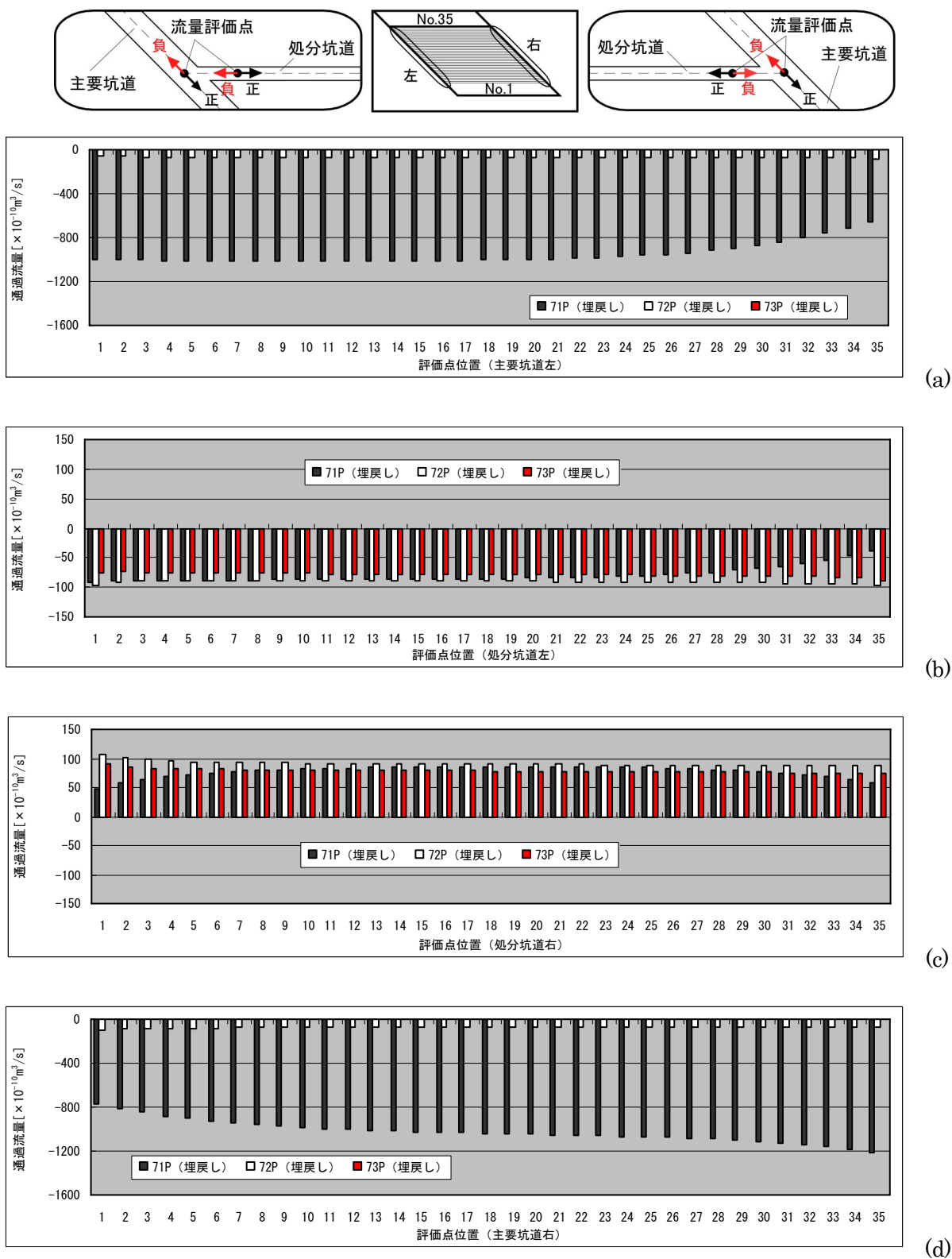


図-4.37 流量評価点における通過流量（粘土プラグの設置なし，主要坑道の透水係数の影響）
（平行圧力勾配）

主要坑道の透水係数：71P (10^{-5}m/s)，72P (10^{-6}m/s)，73P (10^{-7}m/s)

4.3 流量評価点の代表点における傾向

ここでは、第3段階の「流量評価点の代表点における傾向」の解析結果を示す。

前節の結果から、処分坑道及び主要坑道の通過流量の評価は、処分坑道 No.1 側、No.35 側に加え処分パネルの中心に位置する No.18 の三本分に相当する評価点位置での値が各ケースの結果を代表できることが分かった。また、4.1 節の坑道一本内の地下水流動の結果から、処分坑道に対して直交圧力勾配の場合は、処分坑道の通過流量は、処分坑道の中心部ではほとんど流れがなく、一本の処分坑道の端部に当たる通過流量評価点位置での通過流量が各処分坑道の通過流量の最大値を示すことが分かった。

ここでは、直交圧力勾配下における通過流量の傾向を上記で示した3点の流量評価点を代表させて主要坑道の透水係数の影響や粘土プラグ設置の効果を比較する。ここでの通過流量の比較は、通過流量の方向に関係なく、通過流量そのものがそこでの地下水の動きを表すものと捉え、絶対値で表現することとした。

(1) 主要坑道の透水係数の影響

図-4.38 に通過流量を示す。各粘土プラグの設置位置ごとに主要坑道の透水係数を横軸として図に示した。処分坑道の通過流量は、処分坑道の透水係数が埋戻し相当の場合は黒線、透水係数が緩衝材相当の場合は赤線で示した。主要坑道の通過流量は、処分坑道の透水係数が埋戻し相当の場合は青線、透水係数が緩衝材相当の場合は緑線で示した。

主要坑道の通過流量は、処分坑道の透水係数や粘土プラグの設置位置よりも、主要坑道の透水係数の大きさによって大きく変化する。主要坑道の透水係数が 10^{-5}m/s では通過流量は $1,000 \times 10^{-10}\text{m}^3/\text{s}$ 程度、主要坑道の透水係数が 10^{-6}m/s では通過流量は $100 \times 10^{-10}\text{m}^3/\text{s}$ 程度、そして、主要坑道の透水係数が 10^{-7}m/s では通過流量は $10 \times 10^{-10}\text{m}^3/\text{s}$ 程度となる。

処分坑道の通過流量は、主要坑道の通過流量に比較して小さい結果であるが、その範囲でばらつきが見られる。処分坑道の通過流量も主要坑道の透水係数が小さくなるにつれて減少する傾向が主要であるが、必ずしも全てがその傾向に当てはまるわけではない。主要坑道の透水係数が 10^{-5}m/s の場合、処分坑道における通過流量のばらつきが多く見られる。この主要坑道の透水係数では、通過流量が多くなるのは、主要坑道に粘土プラグが設置されると処分坑道 No.35 の左右において通過流量が大きくなる。主要坑道の透水係数が 10^{-7}m/s になると、処分坑道の通過流量は、粘土プラグの設置位置の条件下ではある一定値に収束する。このとき、処分坑道の通過流量は、処分坑道の透水係数が埋め戻し相当の場合の方が、緩衝材相当の場合よりも大きい。

(2) 粘土プラグ設置の効果

図-4.39 は主要坑道の透水係数を固定させた場合、粘土プラグの設置の効果を見るものである。粘土プラグの設置を横軸として図に示した。

主要坑道の透水係数が 10^{-5}m/s では、処分坑道の通過流量と主要坑道の通過流量は2桁程度の大きな差がある。主要坑道の透水係数は粘土プラグの設置位置に関係なくほぼ一定値となっている。処分坑道の通過流量は粘土プラグの設置箇所が少なくなるにつれて増加する傾向がある。しかしながら、処分坑道 No.35 における通過流量は、粘土プラグの設置位置によって大きくばらつく傾向にある。特に、処分坑道 No.35 における処分坑道の通過流量は、粘土プラグの設置位置によって大きく変化し、粘土プラグの影響を大きく受ける。

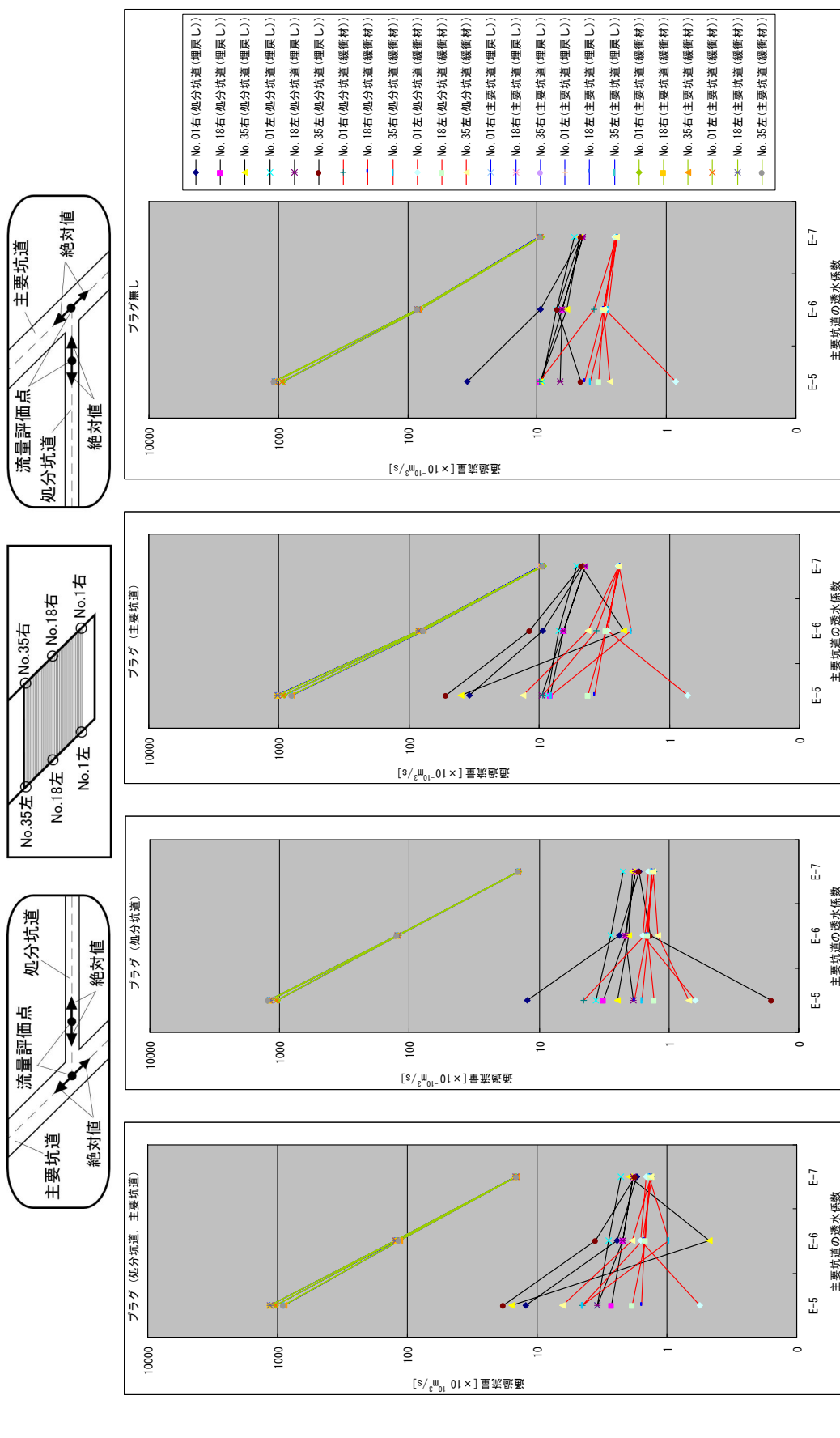
主要坑道の透水係数が 10^{-6}m/s では、主要坑道の通過流量が大きく減少するが、処分坑道の通過流量と比較すると 1 桁程度大きい。主要坑道の通過流量は粘土プラグの設置箇所が少なくなると減少する傾向にある。逆に、処分坑道の通過流量は、粘土プラグの設置箇所が少なくなると、増加する傾向にある。処分坑道 No.35 における通過流量は、粘土プラグの設置箇所によってまだばらつきが見られる。

次に、主要坑道の透水係数が 10^{-7}m/s では、粘土プラグの設置位置によっては、主要坑道の通過流量と処分坑道の通過流量は同じオーダーとなる。しかしながら、その大小関係は主要坑道の通過流量が大きいことは変わらない。主要坑道の通過流量は粘土プラグの設置位置が減少すると減少し、処分坑道の通過流量は粘土プラグの設置位置が減少すると増加する。処分坑道における通過流量のばらつきは見られなくなり、各粘土プラグの設置条件下で一様の値となる。処分坑道の通過流量は、処分坑道の透水係数が埋め戻し材相当の場合の方が緩衝材相当の場合よりも大きい。

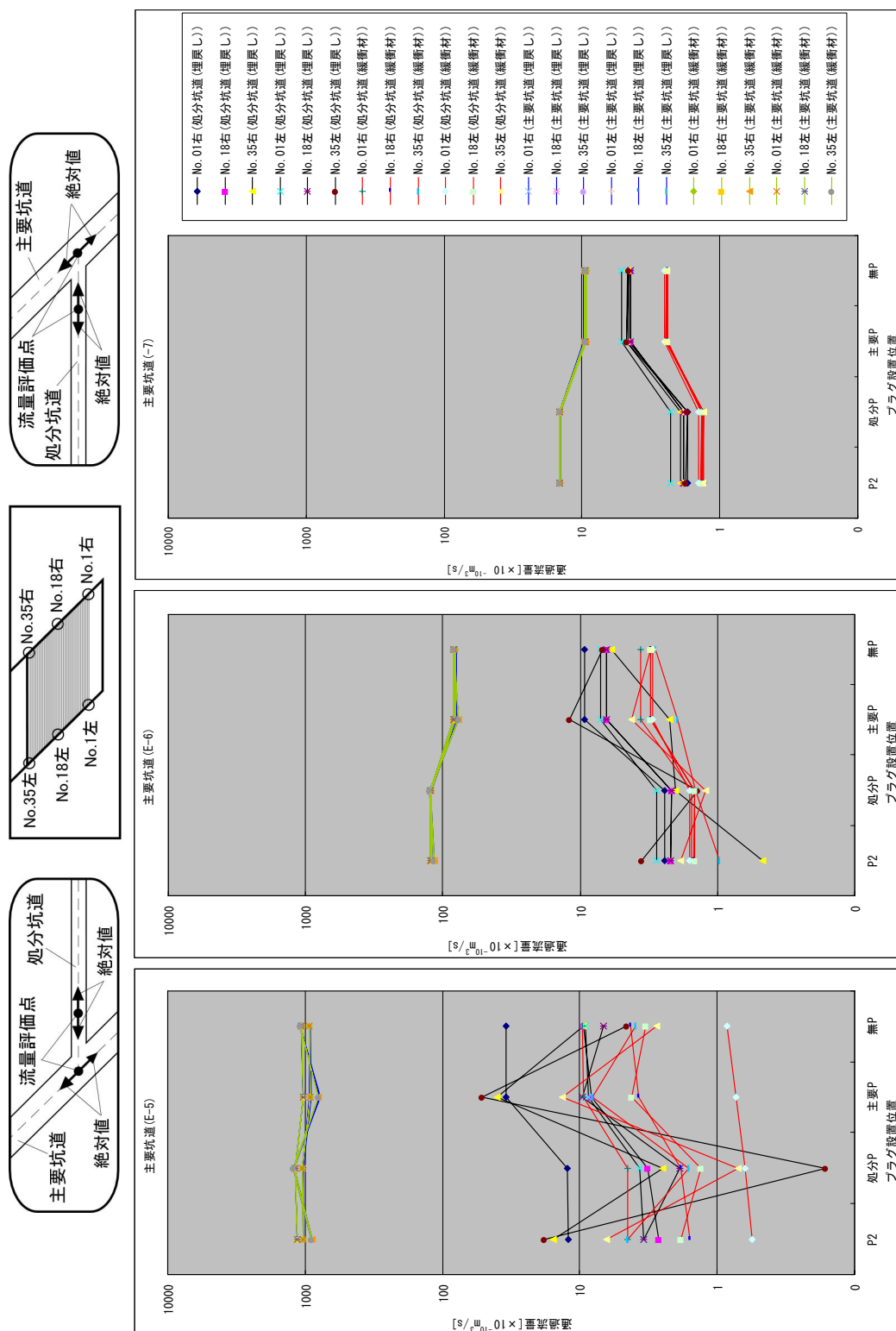
(3)考察

評価点位置における処分坑道の通過流量は、主要坑道の透水係数に大きく影響される。粘土プラグの設置位置を固定した場合、主要坑道の透水係数が大きいと処分坑道の通過流量も大きくなる。しかしながら、このときの主要坑道の通過流量は、処分坑道の通過流量に比べて十分に小さい。主要坑道の透水係数を大きくすることで、主要坑道を選択的な地下水の流動場にすることが考えられる。これは、処分場の周囲に高透水性ゾーンを構築するハイドロケージの考え方に近い効果である。主要坑道の透水係数が 10^{-5}m/s の場合、処分坑道のみ粘土プラグを設置することが処分坑道の通過流量を抑制するのに効果的である。

粘土プラグの設置位置に関しては、処分坑道の通過流量の評価では、主要坑道の透水係数が 10^{-6}m/s 、 10^{-7}m/s となると、処分坑道と主要坑道に粘土プラグを設置する場合と処分坑道のみを設置する場合とがほぼ同じであり、主要坑道のみ粘土プラグを設置する場合と粘土プラグを設置しない場合がほぼ同じであることから、それぞれの通過流量に対して、より粘土プラグの設置数を低減できる、処分坑道のみ粘土プラグを設置するケース、あるいは粘土プラグを設置しないケースが合理的となる。この時、主要坑道の通過流量も同様の類似性が見られる。通過流量の絶対値を見ると、それぞれのケースでの通過流量は同じオーダーであり、主要坑道の透水係数を固定させた場合は、粘土プラグを設置しないケースの通過流量が最も合理的と考えられる。しかしながら、主要坑道の透水係数を小さくすることは、処分坑道における通過流量を低下させると共に、そのばらつきも抑制することから、主要坑道の透水係数の設定に重点を置くことで、粘土プラグ設置の必要性を除外する可能性が示されていると考えられる。



(a) 粘土プラグ (処分坑道, 主要坑道) (b) 粘土プラグ (処分坑道) (c) 粘土プラグ (主要坑道) (d) 粘土プラグ (設置無し)
 図-4.38 流量評価点における通過流量 (主要坑道の透水係数の影響)
 (直交圧力勾配)



(a) 主要坑道の透水係数 10^{-5} m/s (b) 主要坑道の透水係数 10^{-6} m/s (c) 主要坑道の透水係数 10^{-7} m/s

4.4 最大値による評価

ここでは、第4段階の「最大値による評価」の解析結果を示す。

これまでの解析結果の整理から、各坑道の通過流量の評価に際しては、その評価点位置の通過流量の代表値でおおむね評価できることが分かった。ここでは、各坑道の通過流量の絶対値で通過流量を比較し、主要坑道の透水係数の影響、粘土プラグの設置の効果を比較する。

(1) 処分坑道の透水係数が 10^{-7}m/s (緩衝材相当の場合) の場合

圧力勾配が処分坑道に直交する場合について結果を示す。まず、各坑道における最大流量を求め、比較検討した図を図-4.40 に示す。主要坑道の透水係数が小さくなると（たとえば、ケース 410, 420, 430 での比較）、主要坑道および処分坑道の最大流量は減少する。主要坑道の透水係数が同じ場合、処分坑道の流量は処分坑道にプラグを設置しない場合に増加する（たとえば、ケース 410, 610 での比較）。主要坑道への粘土プラグの有無の影響では（たとえば、ケース 410, 510 あるいはケース 610, 710 での比較）、主要坑道に粘土プラグがない場合は処分坑道の流量がわずかに減少する。いずれの解析ケースも、主要坑道の流量が処分坑道の流量よりも大きく、主要坑道の透水性が高いほど主要坑道が主要な流れ場となっている。

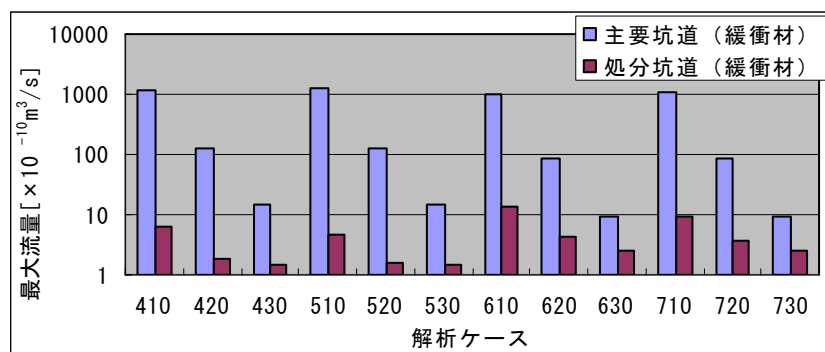


図-4.40 各ケースの最大流量の比較（直交圧力勾配）

粘土プラグ設置位置：40 シリーズ（処分坑道，主要坑道），50 シリーズ（処分坑道），

60 シリーズ（主要坑道），70 シリーズ（粘土プラグ無し）

主要坑道の透水係数：X10 シリーズ（ 10^{-5}m/s ），X20 シリーズ（ 10^{-6}m/s ），

X30 シリーズ（ 10^{-7}m/s ）

最大流量での比較における粘土プラグの設置位置の効果を理解しやすくするため、埋め戻し材の透水係数が同じ場合の解析ケースで比較したものを図-4.41 に示す。主要坑道の流量で比較すると、埋め戻し材がどの透水係数の場合でも、40 シリーズと 50 シリーズ（たとえば、ケース 410 と 510, あるいはケース 420 と 520 での比較）がほぼ同じ値、60 シリーズと 70 シリーズ（たとえば、ケース 610 と 710, あるいはケース 620 と 720 での比較）がほぼ同じ値であり、その大小関係では、60, 70 シリーズの方が流量が少ない傾向である。主要坑道の透水係数が小さい場合（ $1.0 \times 10^{-5}\text{m/s}$ や $1.0 \times 10^{-6}\text{m/s}$ ）は、処分坑道の流量は主要坑道の流量と比較すると、極僅かである。主要坑道の透水係数が小さくなると、処分坑道における流量が無視できなくなるが、その量は主要坑道の流量と比較するとまだ十分に小さい。

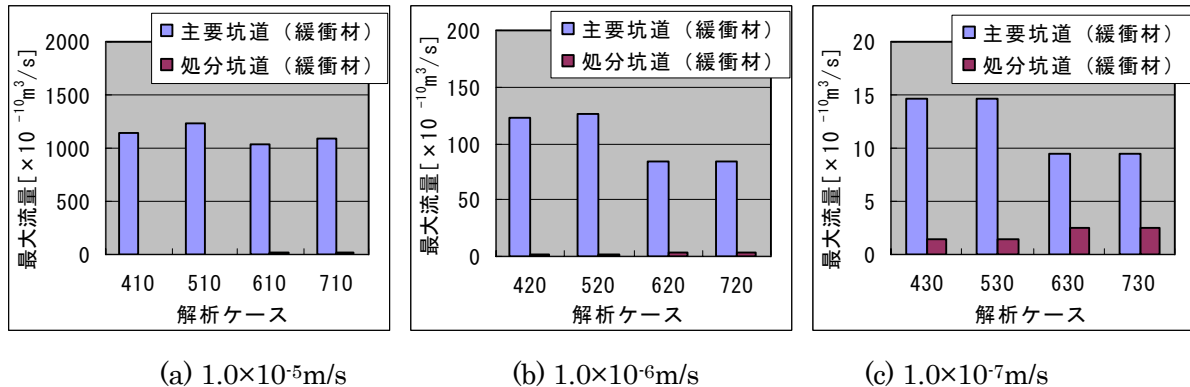


図-4.41 プラグ設置の効果 (直交圧力勾配)

粘土プラグ設置位置：40 シリーズ (処分坑道, 主要坑道), 50 シリーズ (処分坑道),
60 シリーズ (主要坑道), 70 シリーズ (粘土プラグ無し)

次に、圧力勾配が処分坑道に平行な場合について結果を示す。まず、各坑道における最大流量を求め、比較検討した図を図-4.42 に示す。主要坑道の流量は、直交圧力勾配の結果と同様に、主要坑道の透水係数が小さくなると減少する。しかし、処分坑道の流量は主要坑道の透水係数の値に関係なく、ほぼ一定値となり、直交圧力勾配の各ケース (図-4.40) と比較して増加している。主要坑道の透水係数が処分坑道の透水係数より 2 桁大きいケース (ケース 41P, 51P, 61P, 71P) は、主要坑道が主要な流れ場となっており、直交圧力勾配の場合と同じ傾向である。

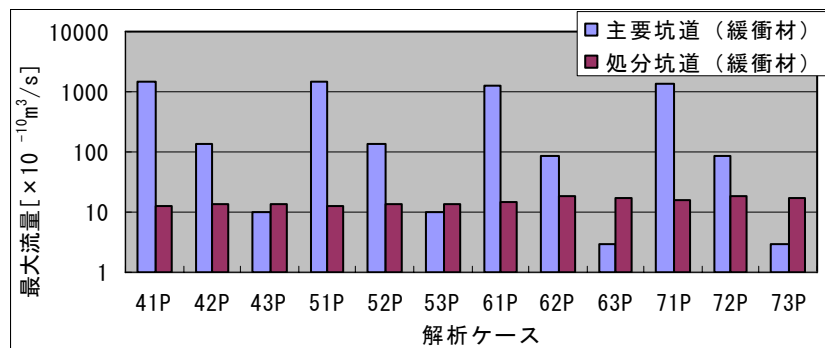


図-4.42 各ケースの最大流量の比較 (平行圧力勾配)

粘土プラグ設置位置：40 シリーズ (処分坑道, 主要坑道), 50 シリーズ (処分坑道),
60 シリーズ (主要坑道), 70 シリーズ (粘土プラグ無し)
主要坑道の透水係数：X1P シリーズ (10^{-5} m/s), X2P シリーズ (10^{-6} m/s),
X3P シリーズ (10^{-7} m/s)

最大流量での比較における粘土プラグの設置位置の効果を理解しやすくするため、埋め戻し材の透水係数が同じ場合の解析ケースで比較したものを図-4.43 に示す。主要坑道の流量で比較すると、埋め戻し材がどの透水係数の場合でも、40 シリーズと 50 シリーズがほぼ同じ値、60 シリーズと 70 シリーズがほぼ同じ値であり、その大小関係では、60, 70 シリーズの方が流量が少ない傾向である。主要坑道の透水係数が小さい場合 ($1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ や $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$) は、処分坑道の流量は主要

坑道の流量と比較すると、極僅かあるいは十分に小さい。しかし、主要坑道の透水係数が小さくなると、処分坑道における流量は主要坑道の最大流量と逆転し、主要坑道の最大流量が大きくなる。処分坑道に粘土プラグを設置しない 60、70 シリーズでは、その差は大きくなる。

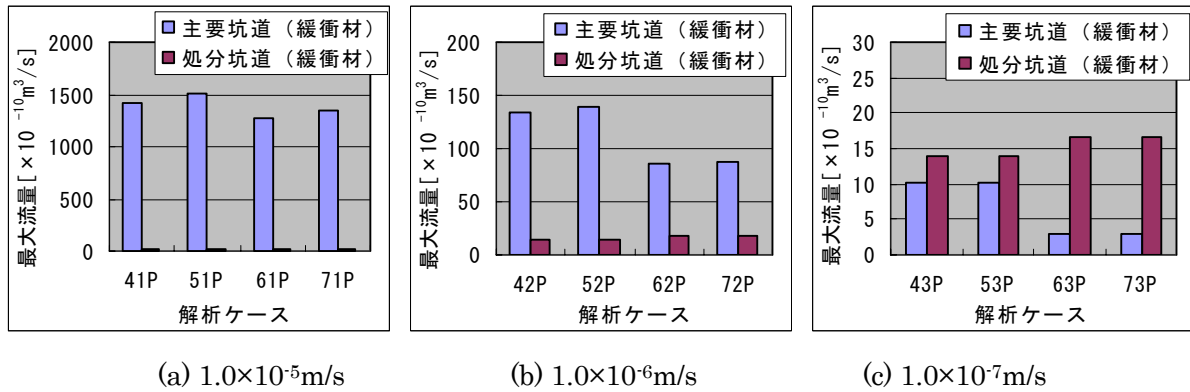


図-4.43 プラグ設置の効果 (平行圧力勾配)

粘土プラグ設置位置：40 シリーズ (処分坑道，主要坑道)，50 シリーズ (処分坑道)，
60 シリーズ (主要坑道)，70 シリーズ (粘土プラグ無し)

(2) 処分坑道の透水係数が 10^{-6}m/s (埋め戻し材相当の場合) の場合

圧力勾配が処分坑道に直交する場合について結果を図-4.44 に示す。全体の傾向としては、処分坑道の透水係数が大きくなったことによる処分坑道における通過流量の増加はあるものの、処分坑道の透水係数が緩衝材相当の図-4.40 と同様の傾向である。

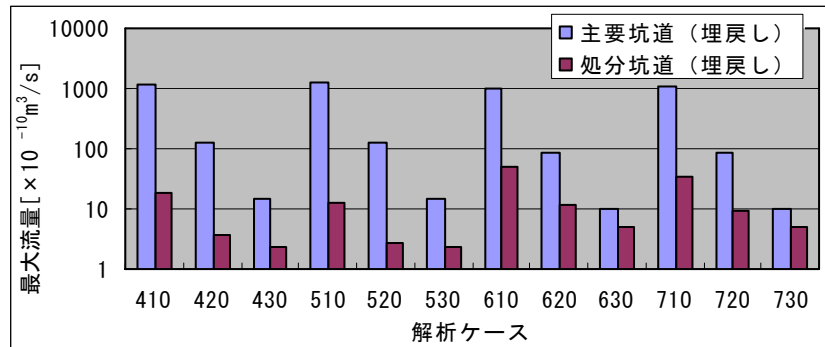


図-4.44 各ケースの最大流量の比較 (直交圧力勾配)

粘土プラグ設置位置：40 シリーズ (処分坑道, 主要坑道), 50 シリーズ (処分坑道),
60 シリーズ (主要坑道), 70 シリーズ (粘土プラグ無し)
主要坑道の透水係数：X10 シリーズ (10^{-5}m/s), X20 シリーズ (10^{-6}m/s),
X30 シリーズ (10^{-7}m/s)

最大流量での比較における粘土プラグの設置位置の効果を理解しやすくするため、埋め戻し材の透水係数が同じ場合の解析ケースで比較したものを図-4.45 に示す。主要坑道の流量で比較すると、埋め戻し材がどの透水係数の場合でも、40 シリーズと 50 シリーズがほぼ同じ値、60 シリーズと 70 シリーズがほぼ同じ値であり、その大小関係では、60, 70 シリーズの方が流量が少ない傾向である。

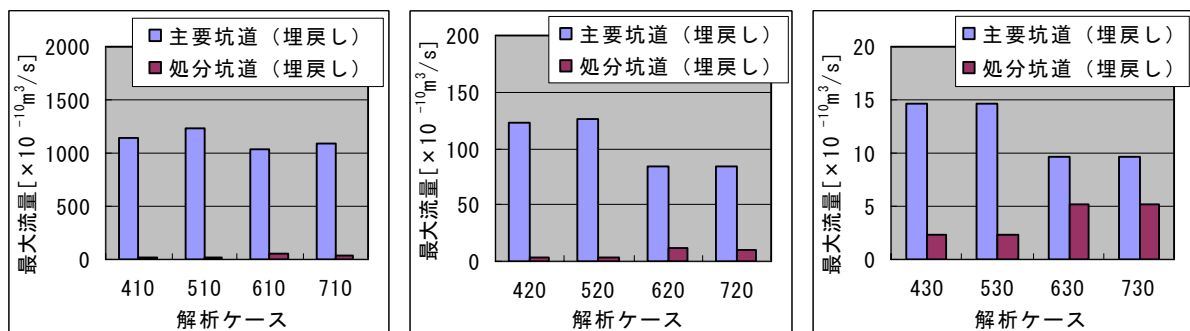
(a) $1.0 \times 10^{-5}\text{m/s}$ (b) $1.0 \times 10^{-6}\text{m/s}$ (c) $1.0 \times 10^{-7}\text{m/s}$

図-4.45 プラグ設置の効果 (直交圧力勾配)

粘土プラグ設置位置：40 シリーズ (処分坑道, 主要坑道), 50 シリーズ (処分坑道),
60 シリーズ (主要坑道), 70 シリーズ (粘土プラグ無し)

主要坑道の透水係数が小さい場合 ($1.0 \times 10^{-5}\text{m/s}$ や $1.0 \times 10^{-6}\text{m/s}$) は、処分坑道の流量は主要坑道

の流量と比較すると、極僅かである。主要坑道の透水係数が小さくなると、処分坑道における流量が無視できなくなるが、その量は主要坑道の流量と比較するとまだ十分に小さい。これを、処分坑道の透水係数が緩衝材相当の場合の図-4.41 に比較すると、処分坑道の最大流量が増加していることから、処分坑道の透水係数が増加していることの影響が現れていることが分かる。

次に、圧力勾配が処分坑道に平行な場合について結果を示す。まず、各坑道における最大流量を求め、比較検討した図を図-4.46 に示す。主要坑道の流量は、直交圧力勾配の結果と同様に、主要坑道の透水係数が小さくなると減少する。しかし、処分坑道の流量は主要坑道の透水係数の値に関係なく、ほぼ一定値となり、直交圧力勾配の各ケース（図-4.44）と比較して増加している。主要坑道の透水係数が処分坑道の透水係数より 1 桁大きいケース（ケース 41P, 51P, 61P, 71P）は、主要坑道が主要な流れ場となっており、直交圧力勾配の場合と同じ傾向である。しかしながら、主要坑道の透水係数が 10^{-6}m/s になると、処分坑道の通過流量は主要坑道の通過流量とほぼ同じとなる。さらに、処分坑道の透水係数よりも主要坑道の透水係数が小さい場合は、処分坑道の通過流量が主要坑道の通過流量よりも大きくなる。この傾向は、処分坑道に粘土プラグが設置されないケース 63P, 73P で特に顕著である。

これを、処分坑道の透水係数が緩衝材相当の場合の図-4.423.49 と比較すると、処分坑道の最大流量が増加していることから、処分坑道の透水係数が増加していることの影響が現れていることが分かる。

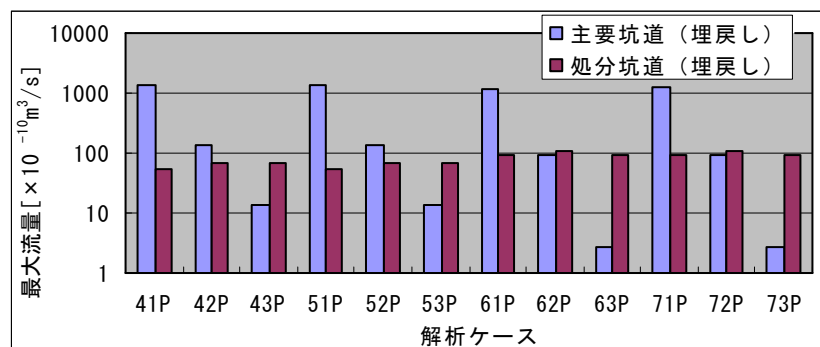


図-4.46 各ケースの最大流量の比較（平行圧力勾配）

粘土プラグ設置位置：40 シリーズ（処分坑道，主要坑道），50 シリーズ（処分坑道），

60 シリーズ（主要坑道），70 シリーズ（粘土プラグ無し）

主要坑道の透水係数：X1P シリーズ (10^{-5}m/s)，X2P シリーズ (10^{-6}m/s)，

X3P シリーズ (10^{-7}m/s)

最大流量での比較における粘土プラグの設置位置の効果を理解しやすくするため、埋め戻し材の透水係数が同じ場合の解析ケースで比較したものを図-4.47 に示す。この場合、主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-6}\text{m/s}$ では、処分坑道に粘土プラグが設置されないケース 62P, 72P で処分坑道の通過流量が主要坑道の通過流量よりも多くなっている。主要坑道の透水係数が $1.0 \times 10^{-7}\text{m/s}$ になると、粘土プラグの設置位置に関係なく、全てのケースで処分坑道の通過流量が主要坑道の通過流量よりも多くなっている。

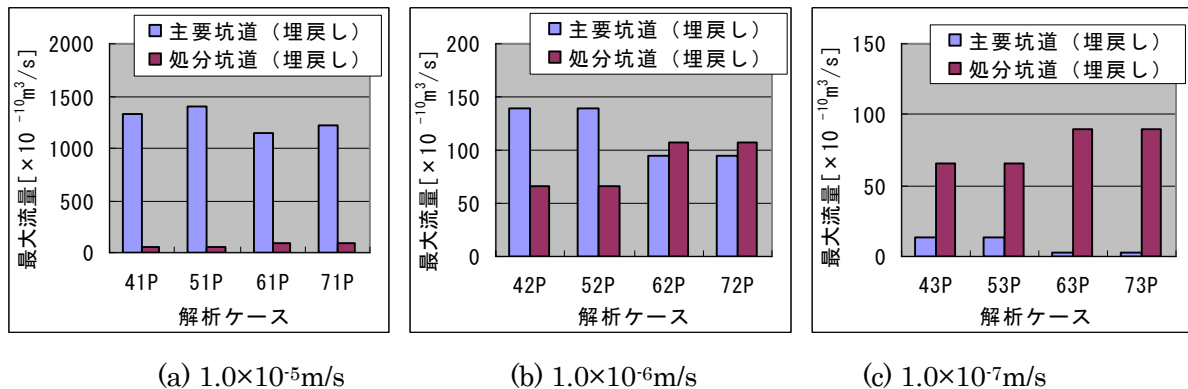


図-4.47 プラグ設置の効果 (平行圧力勾配)

粘土プラグ設置位置：40 シリーズ (処分坑道, 主要坑道), 50 シリーズ (処分坑道),
60 シリーズ (主要坑道), 70 シリーズ (粘土プラグ無し)

(3) 考察

主要坑道の最大流量は, 処分坑道の透水係数が変化しても, また, 圧力勾配の方向が変化しても, 主要坑道の透水係数の値に応じて変化する, その値は主要坑道の透水係数に対応した値となっており, 処分坑道の透水係数や圧力勾配の影響をあまり受けない。また, 粘土プラグの設置位置の影響もあまり受けていない。これは, 主要坑道が処分場の周囲を囲む形でつながっていることから, 岩盤からはじめに処分パネルに接する部分の透水係数に応じて流量がほぼ固定されてしまうものと考えられる。

これに対して, 処分坑道の最大流量は, 圧力勾配の方向や粘土プラグの設置位置の影響を顕著に受ける。たとえば, 処分坑道の方向が圧力勾配に対して直交する場合, 処分坑道の流量は主要坑道の透水係数に応じて変化する。つまり, 主要坑道の透水係数が大きいと処分坑道の流量も大きくなり, 主要坑道の透水係数が小さくなると, 処分坑道の流量も小さくなる。しかしながら, 圧力勾配に対して処分坑道が平行な場合, 処分坑道の流量はほぼ一定となる。しかも, 処分坑道の流量は, 圧力勾配に対して直交する場合よりも大きくなる。主要坑道の流量と比較しても, 処分坑道の流量が主要坑道の流量よりも大きくなる場合もある。特に, 粘土プラグなしで主要坑道の透水係数が 10^{-7} m/s と小さい場合は, いずれの解析ケースでも処分坑道の流量が主要坑道のそれよりも大きくなっている。これは, 処分坑道の流量は圧力勾配の方向に大きく依存することを示している。

5. 考察

パネル規模解析結果に基づく、地下水流動の模式図を図-5.1、図-5.2 に示す。パネル規模の解析では、パネルの一部をモデル化した解析結果とは傾向が大きく異なる。処分坑道を取り囲む透水係数の大きい主要坑道の存在は、処分坑道における水の流れに大きく影響している。直交圧力勾配の場合、パネル周囲の主要坑道を主な水の流れ場としている。主要坑道に粘土プラグが設置されない場合は、主要坑道の流れはそのまま下流側へと流れていく。これに対して、主要坑道に粘土プラグが設置される場合は、粘土プラグで遮られた水の流れが奥側の主要坑道に流れ込む形となっている。処分坑道に粘土プラグを設置する影響よりは、主要坑道に粘土プラグを設置するか否かの影響のほうが大きく、処分坑道への粘土プラグ設置の有無は影響が少ない。このため、全体の流れの模式は、図に示すようにケース 41O と 61O はほぼ同じ傾向であり、ケース 51O と 71O も同じ傾向である。

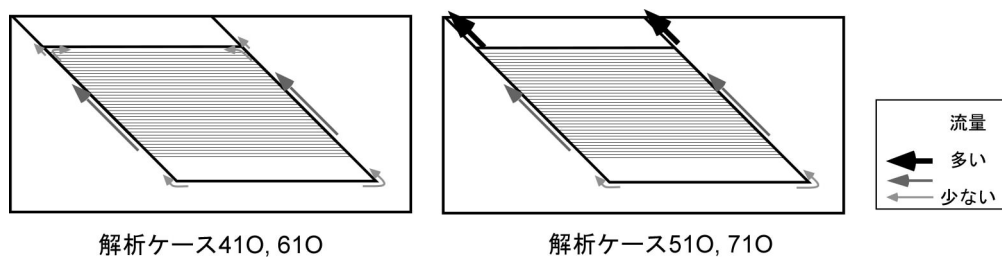


図-5.1 地下水流動の模式図（直交圧力勾配）

平行圧力勾配の場合も、処分坑道の周囲を取り囲む主要坑道の影響は大きく、水の流れは主要坑道を主なところとする。処分坑道に並行する主要坑道に優先的に流れが生じるため、処分坑道内の水の流れは、直交圧力勾配のときより間流量が多いものの、主要坑道の流量と比較すると、極僅かである。主要坑道に粘土プラグが設置されない場合は、主要坑道の流れはそのまま下流側へと流れていく。これに対して、主要坑道に粘土プラグが設置される場合は、粘土プラグで流れが遮られるため、流量そのものが粘土プラグ近傍で減少する。直交圧力勾配の場合と同様に、処分坑道に粘土プラグを設置する影響よりは、主要坑道に粘土プラグを設置するか否かの影響のほうが大きく、処分坑道への粘土プラグ設置の有無は影響が少ない。このため、全体の流れの模式は、図に示すようにケース 41P と 61P はほぼ同じ傾向であり、ケース 51P と 71P も同じ傾向である。

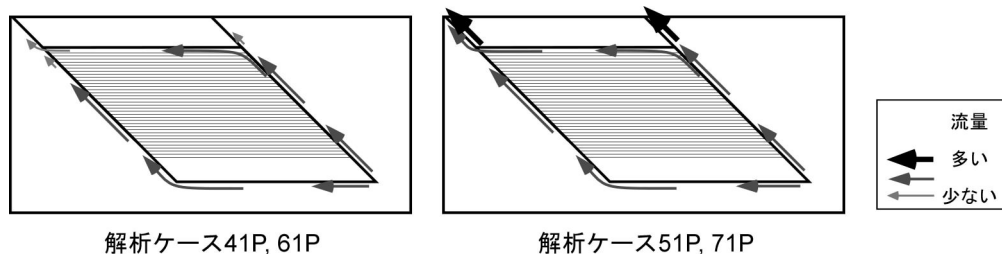


図-5.2 地下水流動の模式図(平行圧力勾配)

6. おわりに

2004年度に開始した処分システムに求められる閉鎖性能の考え方の2年目として初年度の坑道交差部における水理解析の次段階として、処分場パネル規模の水理解析を行った。

パネル規模の解析では、解析モデルの大きさを考慮して、構成要素の透水係数の設定において、等価透水係数の考え方を導入した。解析では、粘土プラグの設置位置、埋め戻し材の透水係数、処分坑道の透水係数、動水勾配の方向をパラメータとし、解析結果への影響について概略評価することとした。

今回の解析の結果、全体の地下水流動および通過流量等に対して、粘土プラグの設置位置、埋め戻し材の透水係数、処分坑道の透水係数、動水勾配の方向が大きく影響することが分かった。

具体的には、①処分坑道を動水勾配に対して垂直に配置すること、②主要坑道の透水係数を小さくすること、③処分坑道に粘土プラグを設置することにより、処分坑道の流量の抑制に有効であることが明らかになった。

今後の展開として、これらの解析結果を考慮して、解析モデル、境界条件の見直しを行い、地下水流動を詳細に評価する。その後、地下水流動を詳細に評価した水理解析結果を考慮した核種移行解析を実施するとともに、核種移行解析結果を元に、閉鎖シナリオの設定を行う。

謝 辞

本検討における水理解析の実施では、検査開発株式会社の酒井裕一氏に多大なご協力をいただいた。日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門（現在、石川島播磨重工業）の川上進氏には、本検討を進める上で、貴重なご助言を頂いた。また、D-transu3D-EL のソースコードに関して、開発者の一人である株式会社ダイヤコンサルタントの菱谷智幸氏には貴重なご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 総論レポート”，JNC TN1400 99-020 (1999).
- 2) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 分冊 2 地層処分の工学技術”，JNC TN1400 99-022 (1999).
- 3) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 分冊 3 地層処分システムの安全評価”，JNC TN1400 99-023 (1999).
- 4) Chandler, N. Cournut, A., Dixon, D., Fairhurst, C., Hansen, F., Gray, M., Hara, K., Ishijima, Y., Kozak, E., Martino, J., Masumoto, K., McCrank, G., Sugita, Y., Thompson, P., Tillerson, J. and Vignal, B.:“The five years report of the Tunnel Sealing Experiment: an international project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP”, Atomic Energy of Canada Limited Report AECL-12727 (2002).
- 5) 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成 13 年度報告－”，JNC TN1400 2002-003 (2002).
- 6) 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成 14 年度報告－”，JNC TN1400 2003-004 (2003).
- 7) 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成 15 年度報告－”，JNC TN1400 2004-007 (2004).
- 8) 杉田裕，川上進，油井三和，牧野仁史，澤田淳，三原守弘，栗原雄二：“断層に至るまでの核種移行に着目した処分場の閉鎖性能についての検討”，原子力バックエンド研究 10, No.1-2, pp.103-112 (2004).
- 9) 杉田裕，高橋美昭，浦上学，北山一美，藤田朝雄，川上進，梅木博之，油井三和，宮本陽一：“処分システムに求められる閉鎖性能の考え方ー坑道交差部における水理解析ー”，JNC TN8400 2005-016, NUMO-TR-05-02 (2005).
- 10) Nishigaki, M, Hishiya, T. and Hashimoto, N.:“Density Dependent Groundwater Flow with Mass Transport in Saturated-Unsaturated Porous Media”, Proceedings of the First Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics, pp.1375-1380 (2001).
- 11) Saotome, A., Hara, K. and Okamoto, J.:“Study of the performance of sealing systems for access shafts in a high-level waste repository”, MRS Symposium Proc. Vol.294, pp.475-479 (1993).
- 12) 原子力発電環境整備機構：“高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性ー「処分場の概要」の説明資料”，NUMO-TR-04-01 (2004).

原子力発電環境整備機構

(略称: 原環機構)

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)