

7 地下水

7-1 薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針について

薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針

[昭和 49 年 7 月 10 日建設省官技発第 160 号]

第 1 章 総則

1-1 目的

この指針は、薬液注入工法による人の健康被害の発生と地下水等の汚染を防止するために必要な工法の選定、設計、施工及び水質の監視についての暫定的な指針を定めることを目的とする。

1-2 適用範囲

この指針は、薬液注入工法による建設工事に適用する。

ただし、工事施工中緊急事態が発生し、応急措置として行うものについては、適用しない。

1-3 用語の定義

この指針において、次に掲げる用語の意義は、それぞれ当該各号に定めるところによる。

(1) 薬液注入工法

薬液を地盤に注入し、地盤の透水性を減少させ、又は地盤の強度を増加させる工法をいう。

(2) 薬液

次に掲げる物質の一以上をその成分の一部に含有する液体をいう。

イ けい酸ナトリウム

ロ リグニン又はその誘導体

ハ ポリイソシアネート

ニ 尿素・ホルムアルデヒド初期縮合物

ホ アクリルアミド

第2章 薬液注入工法の選定

2-1 薬液注入工法の採用

薬液注入工法の採用は、あらかじめ2-2に掲げる調査を行い、地盤の改良を行う必要がある箇所について他の工法の採用の適否を検討した結果、薬液注入工法によらなければ、工事現場の保安、地下埋設物の保護、周辺の家屋その他の工作物の保全及び周辺の地下水位の低下の防止が著しく困難であると認められる場合に限るものとする。

2-2 調査

薬液注入工法の採用の決定にあたって行う調査は、次のとおりとする。

(1) 土質調査

土質調査は、次に定めるところに従って行うものとする。

イ 原則として、施工面積1,000平方メートルにつき1箇所、各箇所間の距離100メートルを超えない範囲でボーリングを行い、各層の資料を採取して土の透水性、強さ等に関する物理的試験及び力学的試験による調査を行わなければならない。

ロ 河川の付近、旧河床等局部的に土質の変化が予測される箇所については、イに定める基準によりも密にボーリングを行わなければならない。

ハ イ、又はロによりボーリングを行った各地点の間は、必要に応じサウンディング等によって補足調査を行い、その間の変化を把握するように努めなければならない。

ニ イからハマでにかかわらず、岩盤については、別途必要な調査を行うものとする。

(2) 地下埋設物調査

地下埋設物調査は、工事現場及びその周辺の地下埋設物の位置、規格、構造及び老朽度について、関係諸機関から資料を収集し、必要に応じつぼ掘により確認して行うものとする。

(3) 地下水位調査

地下水位調査は、工事現場及びその周辺の井戸等について、次の調査を行うものとする。

イ 井戸の位置、深さ、構造、使用目的及び使用状況

ロ 河川、湖沼、海域等の公共用水域及び飲用のための貯水池並びに養魚施設（以下「公共用水域等」という。）の位置、深さ、形状、構造、利用目的及び利用状況

2-3 使用できる薬液

薬液注入工法に使用する薬液は、当分の間水ガラス系の薬液（主剤がけい酸ナトリウムである薬液をいう。以下同じ。）で劇物又は弗素化合物を含まないものに限るものとする。

第3章 設計及び施工

3-1 設計及び施工に関する基本的事項

薬液注入工法による工事の設計及び施工については、薬液注入箇所周辺の地下水及び公共用水域等において、別表-1の水質基準が維持されるよう、当該地域の地盤の性質、地下水の状況及び公共用水域等の状況に応じ適切なものとしなければならない。

3-2 現場注入試験

薬液注入工事の施工にあたっては、あらかじめ、注入計画地盤又はこれと同等の地盤において設計どおりの薬液の注入が行われるか否かについて、調査を行うものとする。

3-3 注入にあたっての措置

- (1) 薬液の注入にあたっては、薬液が十分混合するように必要な措置を講じなければならない。
- (2) 薬液の注入作業中は注入圧力と注入量を常時監視し、異常な変化を生じた場合は、直ちに注入を中止し、その原因を調査して、適切な措置を講じなければならない。
- (3) 地下埋設物に近接して薬液の注入を行う場合においては、当該地下埋設物に沿って薬液が流出する事態を防止するよう必要な措置を講じなければならない。

3-4 労働災害の発生の防止

薬液注入工事及び薬液注入箇所の掘削工事の施工にあたっては、労働安全衛生法その他の法令の定めるところに従い、安全教育の徹底、保護具の着用の励行、換気の徹底等労働災害の発生の防止に努めなければならない。

3-5 薬液の保管

薬液の保管は、薬液の流出、盗難等の事態が生じないように厳正に行わなければならない。

3-6 排水等の処理

- (1) 注入機器の洗浄水、薬液注入箇所からの漏水等の排水を公共用水域へ排出する場合には、その水質は、別表-2の基準に適合するものでなければならない。
- (2) (1)の排水の排出に伴い排水施設に発生した泥土は、廃棄物の処理及び清掃に関する法律その他の法令の定めるところに従い、適切に処分しなければならない。

3-7 残土及び残材の処分方法

- (1) 薬液を注入した地盤から発生する掘削残土の処分にあっては、地下水及び公共用水域等を汚染することのないよう必要な措置を講じなければならない。
- (2) 残材の処分にあっては、人の健康被害が発生することのないよう措置しなければならない。

第4章 地下水等の水質の監視

4-1 地下水等の水質の監視

- (1) 事業主体は、薬液の注入による地下水及び公共用水域等の水質の汚濁を防止するため、薬液注入箇所周辺の地下水及び公共用水域等の水質の汚濁の状況を監視しなければならない。
- (2) 水質の監視は、4-2に掲げる地点で採水し、別表-1に掲げる検査項目について同表に掲げる検査方法により検査を行い、その測定値が同表に掲げる水質基準に適合しているか否かを判定することにより行うものとする。
- (3) (2)の検査は、公的機関又はこれと同等の能力及び信用を有する機関において行うものとする。

4-2 採水地点

採水地点は、次の各号に掲げるところにより選定するものとする。

- (1) 地下水については、薬液注入箇所及びその周辺の地域の地形及び地盤の状況、地下水の流向等に応じ、監視の目的を達成するため必要な箇所について選定するものとする。この場合において、注入箇所からおおむね10メートル以内に少なくとも数箇所の採水地点を設けなければならない。
なお、採水は、観測井を設けて行うものとし、状況に応じ既存の井戸を利用しても差し支えない。
- (2) 公共用水域等については、当該水域の状況に応じ、監視の目的を達成するため必要な箇所について選定するものとする。

4-3 採水回数

採水回数は、次の各号に定めるところによるものとする。

- (1) 工事着手前 1回
- (2) 工事中 毎日1回以上
- (3) 工事終了後
イ 2週間を経過するまで毎日1回以上（当該地域における地下水の状況に著しい変化がないと認められる場合で、調査回数を減じても監視の目的が十分に達成されると判断されるときは、週1回以上）
ロ 2週間経過後半年を経過するまでの間にあっては、月2回以上

4-4 監視の結果講ずべき措置

監視の結果、水質の測定値が別表-1 に掲げる水質基準に適合していない場合又は、そのおそれのある場合には、直ちに工事を中止し、必要な措置をとらなければならない。

別表 1 水質基準

薬液の種類		検査項目	検査方法	水質基準
水ガラス系	有機物を含まないもの	水素イオン濃度	水質基準に関する省令（昭和 41 年厚生省令第 11 号。以下「厚生省令」という。）又は日本工業規格 K0102 の 8 に定める方法	pH 値 8.6 以下（工事直前の測定値が 8.6 を超えるときは、当該測定値以下）であること
	有機物を含むもの	水素イオン濃度	同上	同上
		過マンガン酸カリウム消費量	厚生省令に定める方法	10ppm 以下（工事直前の測定値が 10ppm を超えるときは、当該測定値以下）であること。

別表 2 排水基準

薬液の種類		検査項目	検査方法	水質基準
水ガラス系	有機物を含まないもの	水素イオン濃度	日本工業規格K0102の8に定める方法	排水基準を定める省令（昭和 46 年総理府令第 35 号）に定める一般基準に適合すること。
	有機物を含むもの	水素イオン濃度	同上	同上
		生物化学的酸素要求量又は化学的酸素要求量	日本工業規格K0102の16又は13に定める方法	排水基準を定める省令に定める一般基準に適合すること。

7-2 三次元浸透流解析について

7-2-1 不飽和-飽和三次元地下水流動モデルの概要

計画地周辺における地下水への影響の予測は、不飽和-飽和三次元地下水流動モデルによって行なわれた。プログラムは、UNSAF を用いた（「河川砂防技術基準、調査編」国土交通省水管理・国土保全局、平成 24 年 6 月版、第 3 章第 3 節-8）。

不飽和-飽和三次元地下水流動モデルに関する基本方程式を以下に示す。

この基本方程式を数値解法（有限要素法）により離散化することにより、地下水の流れを模擬することができる。

(1) 基本方程式

地下水流動モデル UNSAF では、以下の方程式を解く。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_r \left(K_{ij}^s \frac{\partial \psi}{\partial x_i} + K_{i3}^s \right) \right) - q = (\beta S_s + C) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1)$$

$$i, j = 1, 2, 3, (1:x, 2:y, 3:z)$$

ここで、 x, y, z は座標、 K_{ij}^s は飽和透水係数、 K_r は比透水係数（透水係数 K は飽和透水係数(地盤依存) K^s と相対透水係数(飽和度依存) K_r の積で表す）、 q は単位体積当たりのシンク/ソース流量、 S_s は比貯留係数、 $C(\psi) \equiv d\theta/d\psi$ は比水分容量、 t は時間である。定常計算では、 $t = \infty$ となるため右項は 0 である。また、 β は以下の定義である。

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

(2) 有限要素法

基本方程式（微分方程式）を解くために、一般に、数値解析が用いられる。UNSAF では、Galerkin 有限要素法を用いている。

(1)式はあくまでも一つの微小要素内での釣り合いを考慮したものであるため、微小とは言えない大きさの要素にわたっての釣り合い関係を評価するためには、要素内での水頭分布を近似する必要がある。有限要素法では、この水頭近似に内挿関数が用いられ、任意の座標 (x, y, z) における内挿近似水頭は次のように表される。

$$\psi^N(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) \psi_i(t) \quad (2)$$

ここで、 ψ_i は多角形頂点(節点)上の水頭、 N_i は各節点に対応した要素内の内挿関数、 ψ^N は内挿近似水頭をそれぞれ示す。

このような内挿関数の特徴は以下である。

$$\cdot \text{任意点での関数値の総和は 1 である} : \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) = 1 \quad (3)$$

・節点 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。

このように、水頭分布を内挿関数で近似したことで、実際の水頭分布と幾ばくかの差違が生じる。つまり、支配方程式(2-1)に内挿近似水頭 ψ^N を導入すると、残差があることから以下のように式値は 0 にならない。

$$L(\psi^N(x, y, z, t)) \equiv \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_r \left(K_{ij}^s \frac{\partial \psi^N}{\partial x_i} + K_{i3}^s \right) \right) - q - (\beta S_s + C) \frac{\partial \psi^N}{\partial t} \neq 0 \quad (4)$$

UNSAF では、全体領域 V での全体的な残差を 0 にするために、残差方程式に重みを掛けたものを領域全体にわたって平均化(積分)する重み付き残差法(WRM)を用いている。

$$\int_V L(\psi^N(x, y, z, t)) W(x, y, z) dV = 0 \quad (5)$$

そして、ここで重み関数 W に内挿関数 N を適用する Galerkin 法を用いて定式化を行っている。

UNSAF の 3 次元有限要素式は次の通りである。

$$[A_{ij}] \{\psi_j\} + [F_{ij}] \left\{ \frac{d\psi_j}{dt} \right\} = \{Q_j\} - \{B_j\} - \{D_j\} \quad (6)$$

ここで、

$$[A_{ij}] = \sum_{e=1}^{\text{Num.Elements}} [A_{ij}]^e = \sum_{e=1}^{\text{Num.Elements}} \int_{V^e} \left[\begin{array}{l} \frac{\partial W_i^e}{\partial x} \left(K_r K_{xx}^s \frac{\partial N_j^e}{\partial x} \right) + \frac{\partial W_i^e}{\partial x} \left(K_r K_{xy}^s \frac{\partial N_j^e}{\partial y} \right) + \frac{\partial W_i^e}{\partial x} \left(K_r K_{xz}^s \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) \\ + \frac{\partial W_i^e}{\partial y} \left(K_r K_{yx}^s \frac{\partial N_j^e}{\partial x} \right) + \frac{\partial W_i^e}{\partial y} \left(K_r K_{yy}^s \frac{\partial N_j^e}{\partial y} \right) + \frac{\partial W_i^e}{\partial y} \left(K_r K_{yz}^s \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) \\ + \frac{\partial W_i^e}{\partial z} \left(K_r K_{zx}^s \frac{\partial N_j^e}{\partial x} \right) + \frac{\partial W_i^e}{\partial z} \left(K_r K_{zy}^s \frac{\partial N_j^e}{\partial y} \right) + \frac{\partial W_i^e}{\partial z} \left(K_r K_{zz}^s \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) \end{array} \right] dV^e \quad (7)$$

$$\{B_j\} = \sum_{e=1}^{\text{Num.Elements}} \{B_j\}^e = \sum_{e=1}^{\text{Num.Elements}} \int_{V^e} K_r K_{xz}^s \frac{\partial W_i^e}{\partial x} + K_r K_{yz}^s \frac{\partial W_i^e}{\partial y} + K_r K_{zz}^s \frac{\partial W_i^e}{\partial z} dV^e \quad (8)$$

$$\{Q_j\} = - \sum_{e=1}^{\text{Num.Elements}} \{Q_j\}^e = - \sum_{e=1}^{\text{Num.Elements}} \int_{R^e} W_i^e N_j^e (V_{xj} + V_{yj} + V_{zj}) dR^e \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \{D_j\} &= \sum_{e=1}^{Num.Elements} \{D_j\}^e \\ &= \sum_{e=1}^{Num.Elements} \int_{V^e} q W_i^e dV^e \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} [F_{ij}] &= \sum_{e=1}^{Num.Elements} [F_{ij}]^e \\ &= \sum_{e=1}^{Num.Elements} \int_{V^e} (\beta S_s + c) N_j^e W_i^e dV^e \end{aligned} \tag{11}$$

(3) 要素形状

解析に当たり、UNSAF では、対象範囲を五面体（三角柱）の要素に区分する（図 7-2-1）。節点には地形や地層の高さを、要素には地盤の性状を入力して、地下水位を計算する。

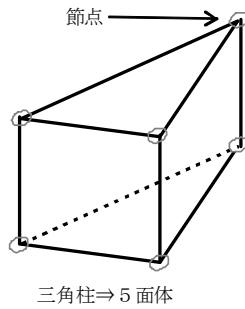


図 7-2-1 要素形状

7-2-2 解析条件

不飽和-飽和三次元地下水流動モデルに関わる基本項目について表 7-2-1 に示す。

表 7-2-1 解析条件

項目	内容
解析手法	モデル : 三次元飽和・不飽和浸透流解析 解析コード : UNSAF 計算条件 : 定常計算
解析範囲	[区部] 東西 : 14.4km、南北 : 14.8km、面積 : 131.1km ² 、深度 : -120m 格子数 : 382,500 (空間分解能 : 10~300m, 平面 19,125 個×深度方向 20 層) [町田地区] 東西 : 17.7km、南北 : 10.2km、面積 : 104.4km ² 、深度 : -40m 格子数 : 326,340 (空間分解能 : 10~300m, 平面 23,310 個×深度方向 14 層)
境界条件	表層 : 降雨浸透境界 (既知流量境界) 表層 : 浸出面境界 水域 : 河川、ダム (既知水頭境界) [区部] 多摩川、鶴見川、矢上川、古川、京浜運河 [町田地区] 相模川、境川、本沢ダム、城山ダム : 内部河川 (浸出境界) [区部] 多摩川、呑川、立会川、目黒川 [町田地区] 鳩川、鶴見川、大栗川、乞田川 陸域 : 既往文献・調査に基づく地下水位 (既知水頭境界) 浅層地下水位分布、深層地下水位分布 尾根部 : 流域界に基づく地形の尾根部 (閉鎖境界)
地形・地質条件	地表面標高 : メッシュ標高 (国土地理院) 地質構造 : 地質調査結果に基づく
気象条件	降水量、蒸発散量
水理定数	地質調査結果に基づく

(1) 区部

1) 解析範囲

地下水解析範囲は、事業実施区域を包括し、河川等の地形に沿った範囲とし、浅層地下水の水理的な分水界とみなせる京浜運河、多摩川、鶴見川、矢上川、矢上川上流域の流域界、呑川・立会川・蛇崩川・目黒川流域の流域界、古川等を主な境界部とした。解析範囲を図 7-2-2 に示す。

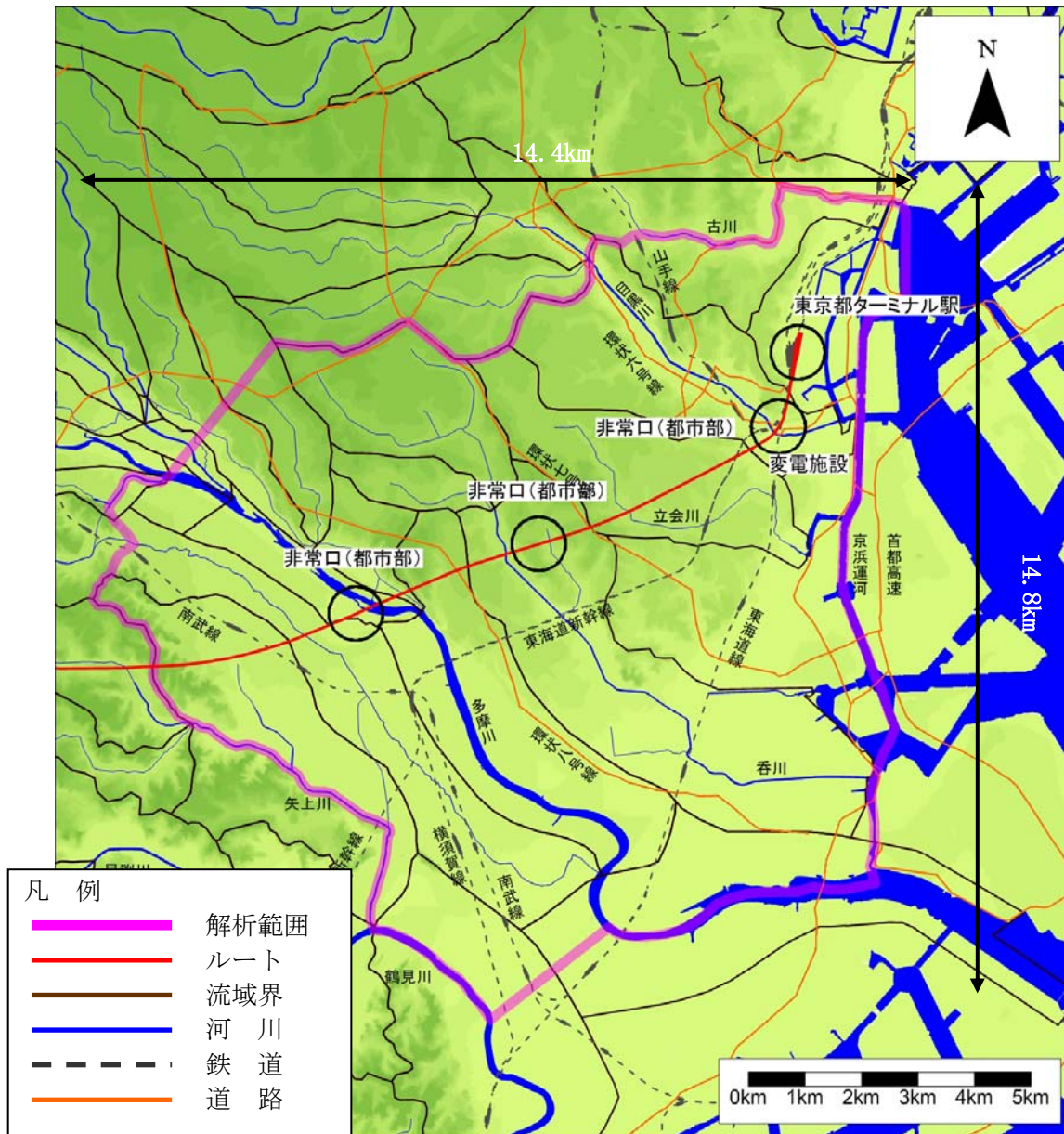


図 7-2-2 解析範囲

2) 要素区分

計算要素は、構造物及び地形をもとに設定した。要素区分を図 7-2-3 に示す。

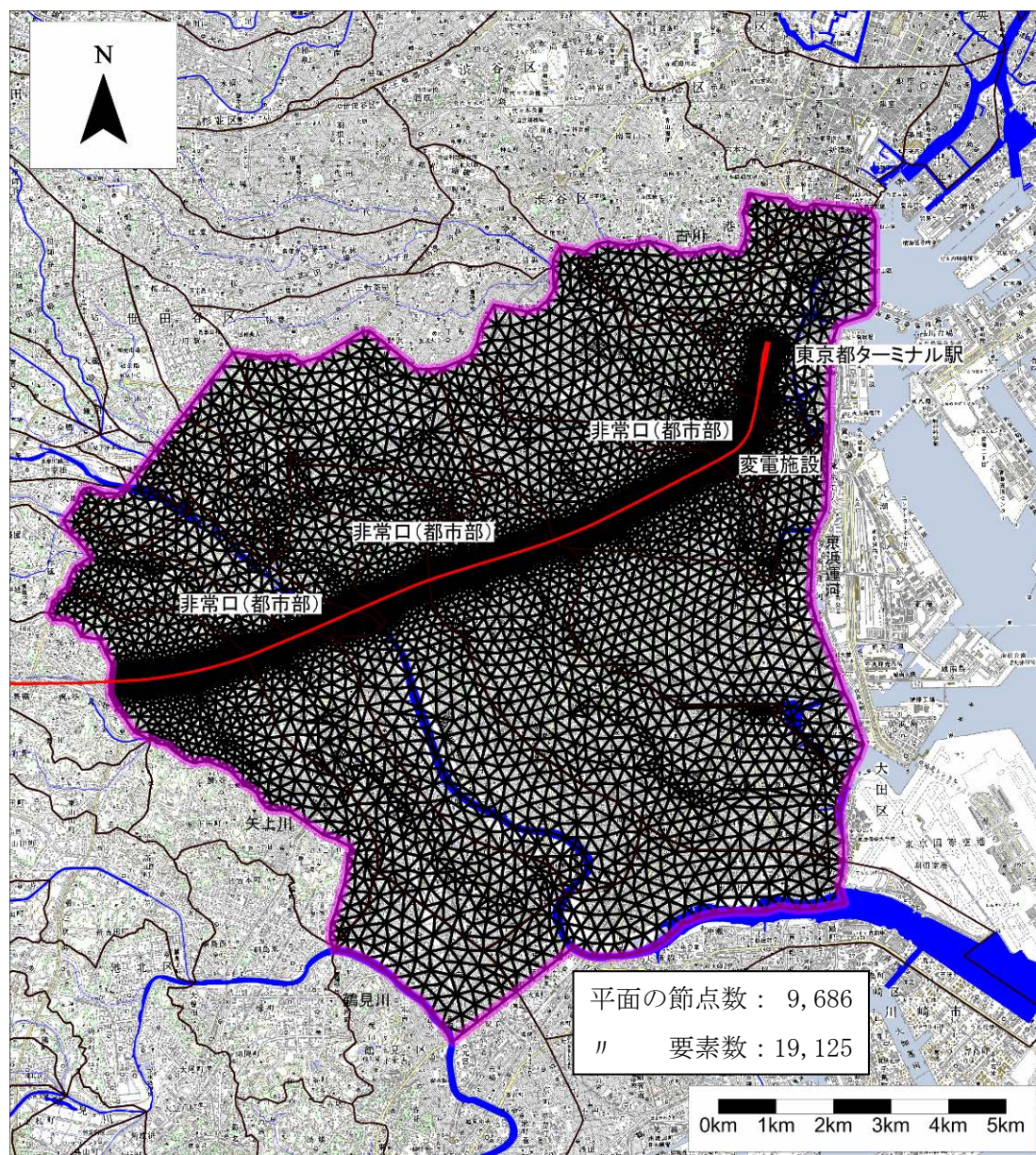


図 7-2-3 要素区分

3) 地下地質及び透水係数

解析に用いた地質は、「資料編 環 9 地盤沈下」に示す地質縦断図を基に、沖積層、東京層及び東京礫層よりも深い部分の深層における地層を上総層群として単一化し、図 7-2-4 に示すとおりモデル化をした。解析深度は、解析精度を確保するため、トンネル下端から十分な離隔を取って、トンネル径の約 2 倍以上の深さとし、標高-120m とした。

各層の透水係数は、ボーリング調査の結果及び文献を基に、地下水位の実測水位と解析によりシミュレートされた計算水位との相関関係が約 0.7 以上確保するよう三次元地下水流動モデルを繰り返し実行し、表 7-2-2 に示すとおり設定した。またボーリング調査で得られた透水係数の分布を図 7-2-5 に示す。

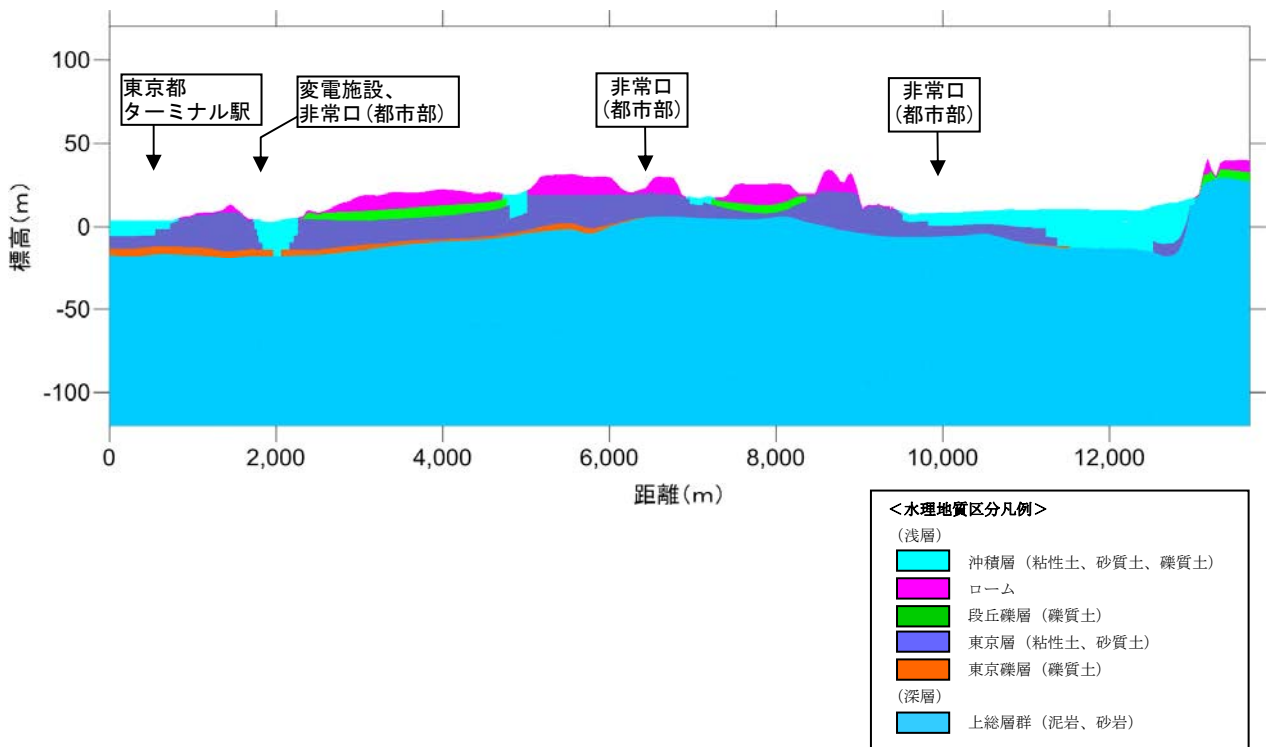


図 7-2-4 モデル縦断図

表 7-2-2 各層の透水係数

地質時代	地層名		最大値 k(m/s)	最小値 k(m/s)	平均値 k(m/s)	モデルに 用いた値 k(m/s)	備考
完新世	沖積層	粘性土、砂質土 礫質土	/	/	/	5.00×10^{-5}	文献
更新世	ローム	火山灰	/	/	/	5.00×10^{-5}	文献
	段丘礫層	礫質土	7.84×10^{-5}	3.12×10^{-5}	6.02×10^{-5}	6.02×10^{-5}	ボーリング 調査
	東京層	粘性土 砂質土	8.29×10^{-5}	1.88×10^{-8}	1.05×10^{-5}	5.25×10^{-6}	ボーリング 調査
	東京礫層	礫質土	7.32×10^{-4}	1.95×10^{-6}	1.36×10^{-4}	1.36×10^{-4}	ボーリング 調査
	上総層群	泥岩、砂岩	1.01×10^{-3}	1.08×10^{-9}	2.94×10^{-5}	1.41×10^{-5}	ボーリング 調査
構造物 (鉄道施設 (駅、変電施設、トンネル))			/	/	/	1.00×10^{-10}	文献

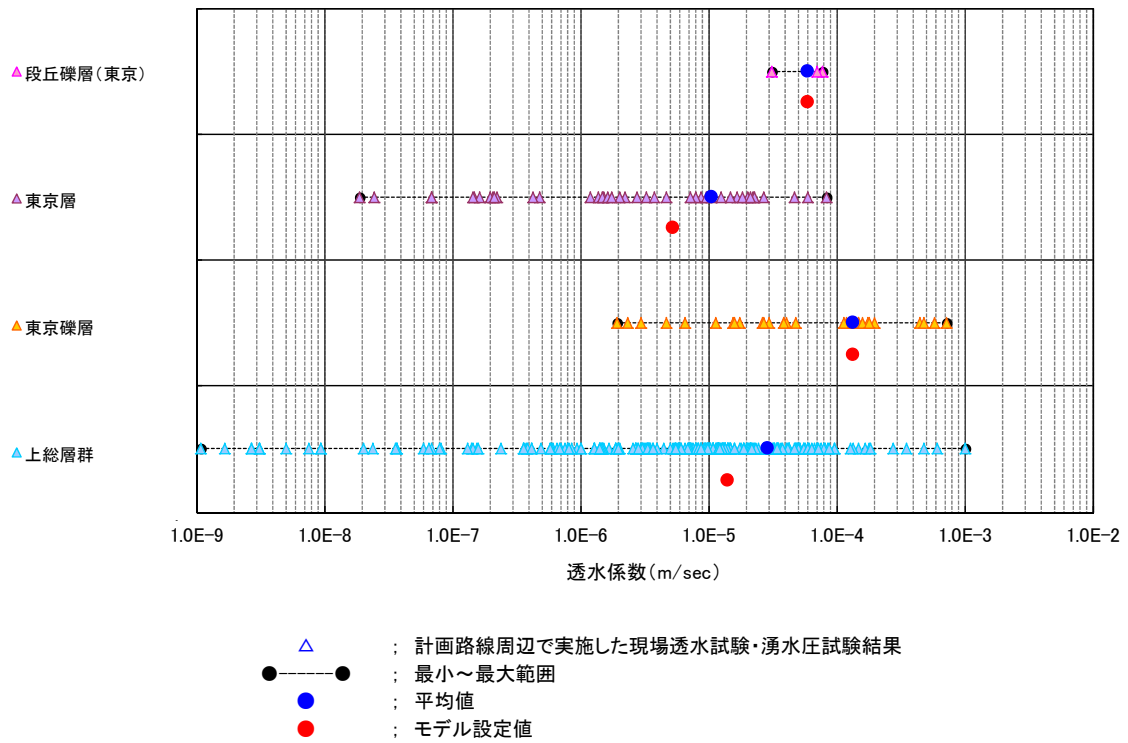


図 7-2-5 透水係数の分布

(2) 町田地区

1) 解析範囲

地下水解析範囲は、事業実施区域を包括し、河川等の地形に沿った範囲とし、浅層地下水の水理的な分水界とみなせる相模川、城山ダム、境川流域の流域界、大栗川流域の流域界、乞田川流域の流域界、鶴見川上流域の流域界、鶴見川等を地下水解析範囲の主な境界部とした。水理的な分水界を得難い地下水解析範囲の南側（相模原台地面）は、駅部躯体底面のおおよその深さを踏まえ設定した。解析範囲を図 7-2-6 に示す。

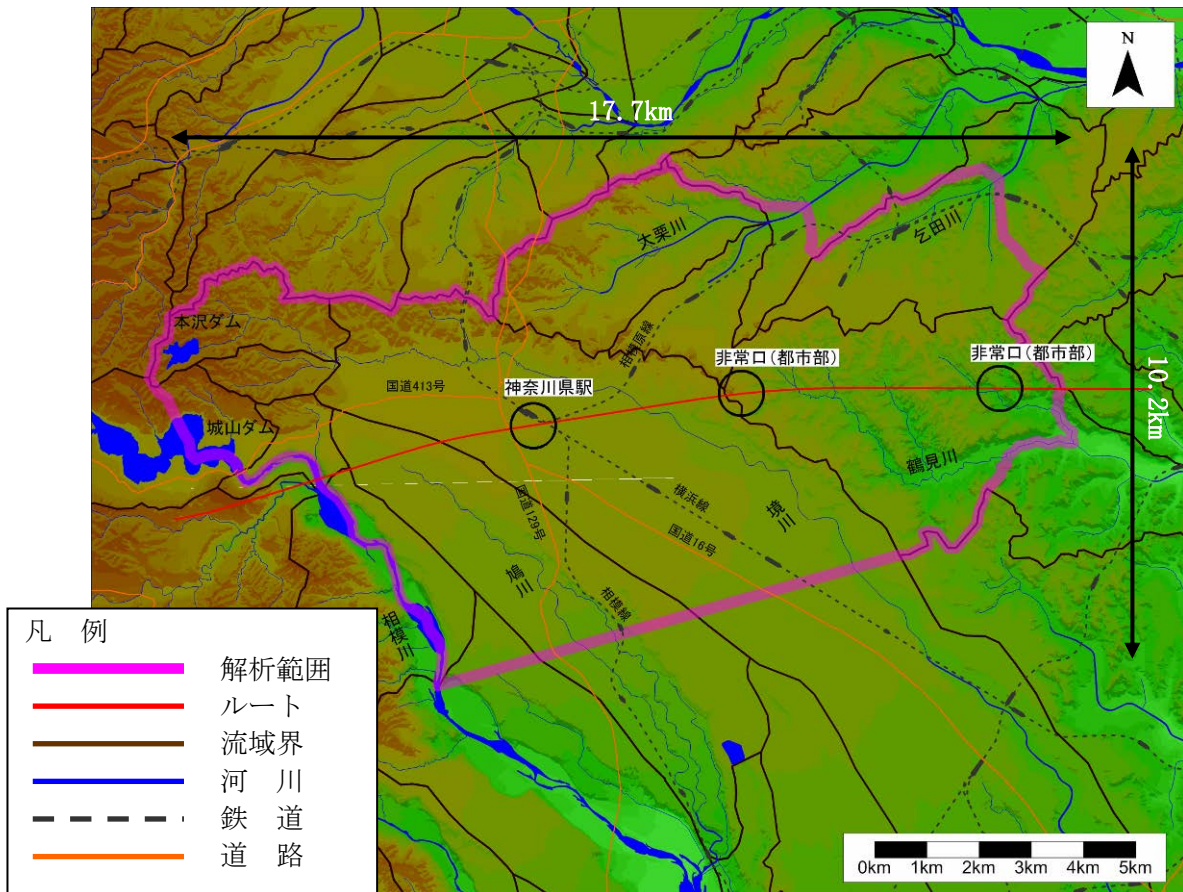


図 7-2-6 解析範囲

2) 要素区分

計算要素は、構造物及び地形をもとに設定した。要素区分を図 7-2-7 に示す。

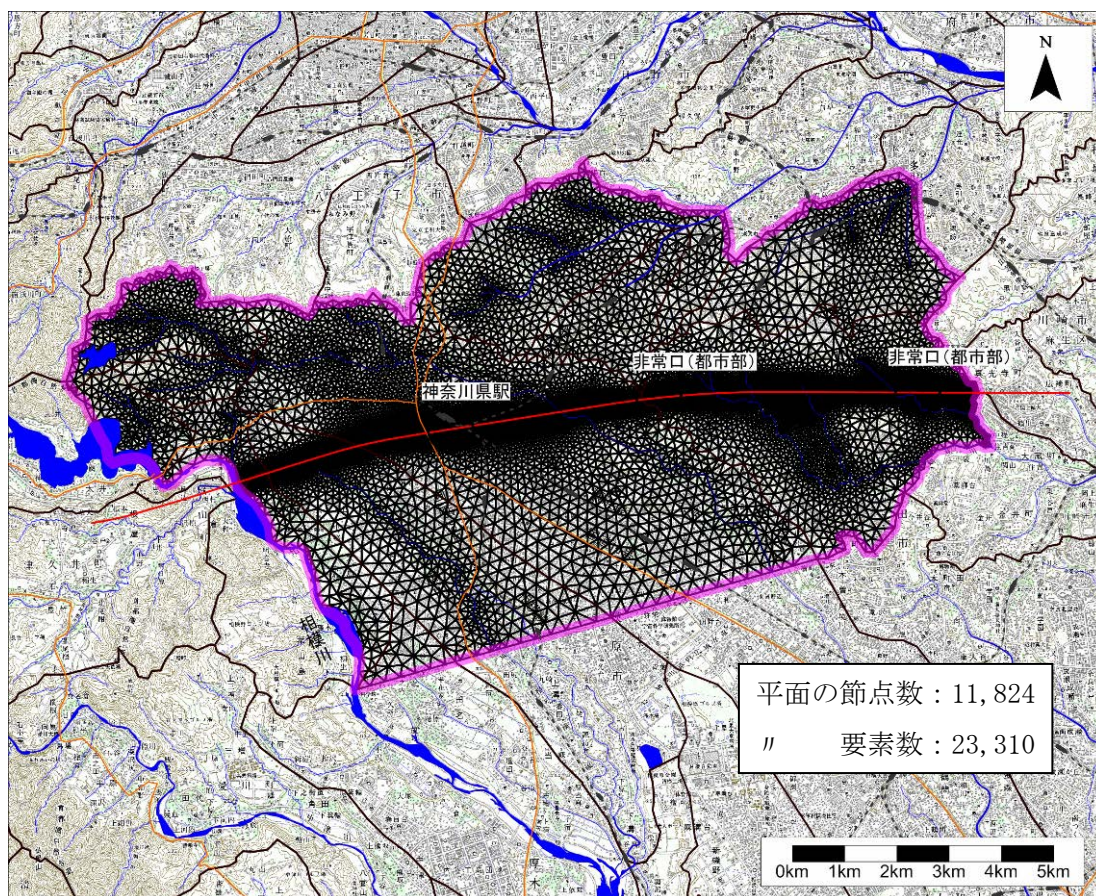


図 7-2-7 要素区分

3) 地下地質及び透水係数

解析に用いた地質は、「資料編 環 9 地盤沈下」に示す地質縦断図を基に、ローム、段丘礫層及び相模層群よりも深い部分の深層における地層を上総層群、中津層群及び小仏層群として単一化し、図 7-2-8 に示すとおりモデル化をした。解析深度は、解析精度を確保するため、トンネル下端から十分な離隔を取って、トンネル径の約 2 倍以上の深さとし、標高-40m とした。

各層の透水係数は、ボーリング調査の結果及び文献を基に、地下水位の実測水位と解析によりシミュレートされた計算水位との相関関係が約 0.7 以上確保するよう三次元地下水流動モデルを繰り返し実行し、表 7-2-3 に示すとおり設定した。またボーリング調査で得られた透水係数の分布を図 7-2-9 に示す。

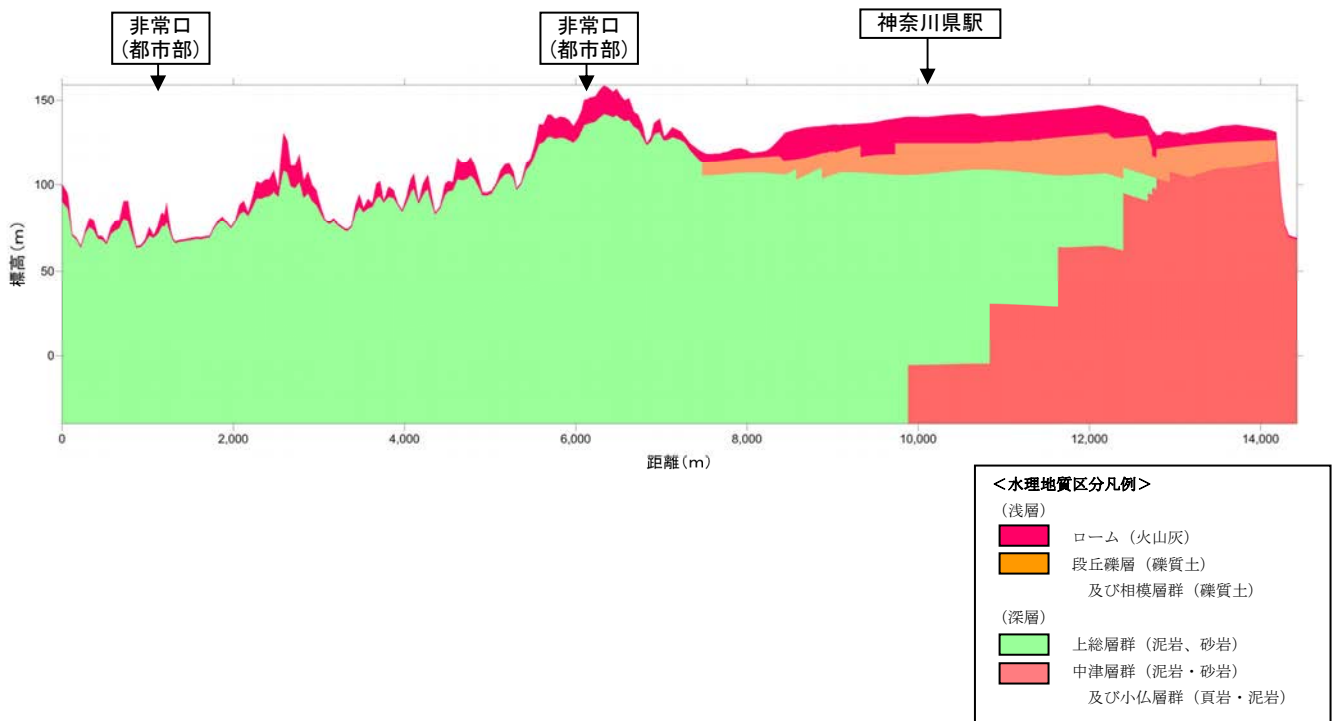


図 7-2-8 モデル縦断図

表 7-2-3 各層の透水係数

地質時代	地層名		最大値 k(m/s)	最小値 k(m/s)	平均値 k(m/s)	モデルに用いた値 k(m/s)	備考
更新世	ローム	火山灰	/	/	/	5.00×10^{-5}	文献
	段丘礫層	礫質土	9.40×10^{-4}	1.58×10^{-8}	6.18×10^{-5}	5.91×10^{-5}	ボーリング調査
	相模層群	礫質土	7.19×10^{-4}	3.36×10^{-8}	5.70×10^{-5}	5.91×10^{-5}	ボーリング調査
	上総層群	泥岩、砂岩	2.71×10^{-3}	5.40×10^{-9}	4.40×10^{-5}	4.40×10^{-5}	ボーリング調査
新第三紀	中津層群	泥岩、砂岩	5.81×10^{-6}	3.53×10^{-8}	1.73×10^{-6}	1.15×10^{-6}	ボーリング調査
古第三紀 ～白亜紀	小仏層群	頁岩、砂岩	1.31×10^{-6}	7.71×10^{-8}	5.31×10^{-7}	1.15×10^{-6}	ボーリング調査
構造物 (鉄道施設(駅、変電施設、トンネル))			/	/	/	1.00×10^{-10}	文献

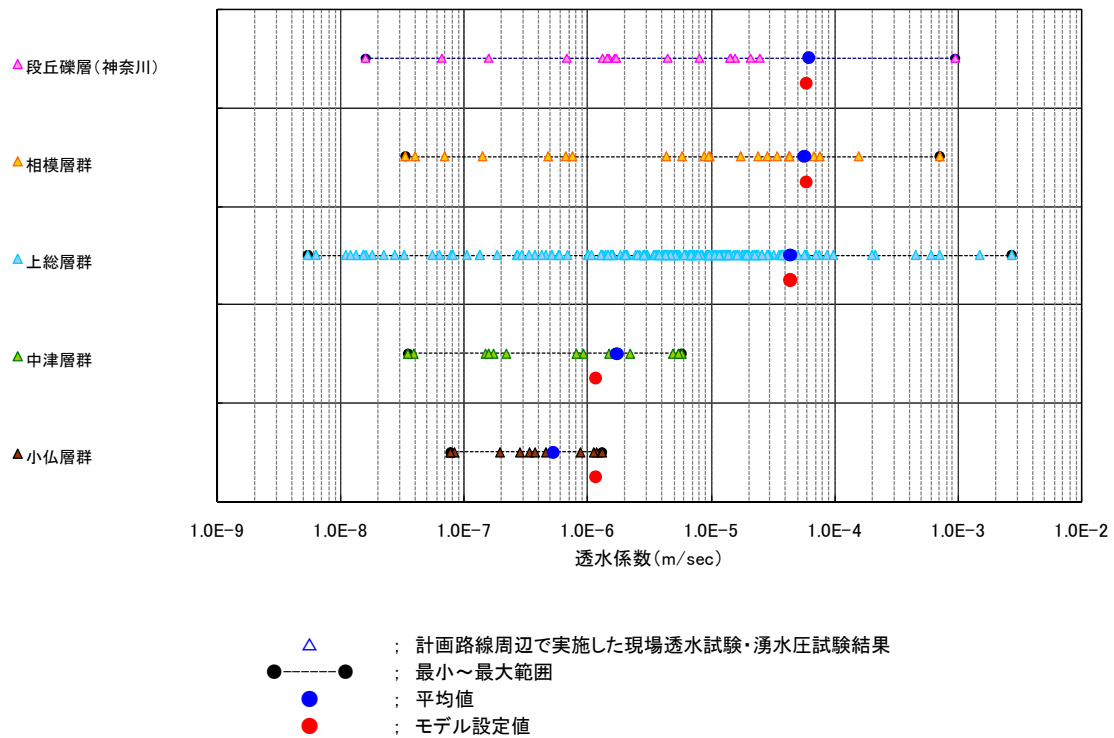


図 7-2-9 透水係数の分布