

# 地下水流動阻害対策工の設計方法に関する研究

西垣 誠<sup>1</sup>・木佐貫 徹<sup>2</sup>・山下 知之<sup>3</sup>・渡邊 雄二<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 岡山大学教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)  
n\_makoto@cc.okayama-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 工修 鹿島建設(株) (〒107-8477 東京都港区元赤坂 1-3-8)  
kisanuki@kajima.com

<sup>3</sup>正会員 工修 日本道路公団 東京建設局千葉工事事務所(〒261-0014 千葉市美浜区若葉 2-9-3)  
Tomoyuki.Yamashita@jhnet.go.jp

<sup>4</sup>正会員 日本道路公団 中部支社 (前(財)高速道路技術センター) (〒460-0003 名古屋市中区錦 2-18-19)  
Yuji.Watanabe@jhnet.go.jp

大規模な線状地下構造物を建設する場合、地下構造物によって地下水流動が阻害され、数々の周辺環境への影響が重要な課題となり、これまで数々の地下水流動阻害対策工が実施されてきた。本報告ではこの対策工の合理的な設計方法提案するため、既往の対策検討や設置後の計測結果等の事例を基に、対策工を基本的工法原理で分類し、適用上の留意事項について検討し、この留意事項を踏まえた開削工法での集復水井形式を用いた対策工の設計方法を提案し考察したものである。

*Key Words: underground linear structure, preservation of groundwater flow, design method, environmental impact assessment*

## 1. はじめに

地下空間は、各種の社会資本整備のための空間として、電力や上下水道などのライフラインのような小規模なものから、共同溝、地下鉄、道路、地下河川、地下街などの大規模のものまで多様に利用されている。構造規模や地盤環境条件にもよるが、このような線状地下構造物(以下、地下構造物と称す)を建設する場合、地下水流動が阻害され、上流側では地下水位を上昇させ、下流側では地下水位を低下させる場合がある。地下構造物が少量であった頃には地下水流動阻害が課題として取り上げられることは少なかった。しかし、現在のように建設数が増加するに従い、地盤沈下をはじめとする数々の周辺地盤環境に与える影響が様々な課題として現れてきた。このため、地下構造物が、地下水流動を阻害する形状で建設される場合、地盤および周辺環境を保全することを目的とした地下水流動阻害対策工(以下、対策工と称す)が各方面で検討されてきている。

この対策工の検討に際しては、現状の地盤環境の中で、特に地下水流動状況や地下水位の特性を的確に評価する必要がある。著者らは、地下水位変動に

及ぼす外的要因の中で、地下水位と降雨量の相関関係に着目し、東京周辺地盤をモデルとして、降雨量と公共地下水位観測結果を基に、地下水位の特性と性能照査型設計方法に対応する「設計地下水位の設定方法」について提案した<sup>1)</sup>。

また、すべての地下構造物に対して、無条件に対策工を設けることは、経済性を度外視したものになる。このため、著者らは、地盤環境、生活環境、自然環境に着目し、地下水位観測をはじめとする数々の調査や現況地下水流動状況の再現解析を基に、地下水流動阻害対策の必要性を工学的に評価する指標「許容地下水位変動量」について提案した<sup>2)</sup>。

一方、開削工法での対策工の検討方法や設置後の観測結果等の事例は、土木学会論文集等に発表されたもので15例ほどある<sup>3)~14)</sup>。各事例を調査するとこの対策工には様々な工法があるが、基本的工法原理でまとめると数種類に分類され、適用上の留意事項がわかる。本報告では、既往の対策工の事例調査を基に、開削工法を用いた地下構造物の建設で、対策工を設置する際の留意事項と、集復水井形式を用いた対策工で、この留意事項を踏まえた合理的な設計方法について提案し考察したものである。

## 2. 既往の対策工の調査

### (1) 対策工の定義と調査項目

図-1に示す様に、地下構造物（開削および非開削構造）や山留め壁が帯水層を遮断した場合、対策工は、何らかの方法によって地下水を流動させ、地盤および周辺環境に影響がない地下水流動状況にするものである。

我国で開削工法を用いた地下構造物での対策工の施工事例は、土木学会論文集等に発表されたもので総数15件である<sup>3)~14)</sup>。図-2に、この対策工が設置された構造物の用途を示す。この施工事例には数々の対策工が用いられている。各対策工は、地下構造物の施工方法や地盤水理条件等によって、効果が左右されると考えられる。このため、本報告では、これらの要因と各対策工の現状技術を把握するために、既往の施工事例報告等<sup>3)~14)</sup>から以下の事項について調査した。

- ①対策工の形式と深度区分
- ②対策工と山留め壁の種類
- ③対象帯水層の透水係数
- ④地下水流動解析方法と予測地下水位差
- ⑤対策工の設計方法
- ⑥対策工設置後の回復率(対策工施工後の地下水位差/山留め壁施工直後の地下水位差(対策前))

### (2) 対策工の分類

この対策工は、遮断された帯水層の上流側で地下水を集水する集水部と、遮断した構造物内を通過させる通水部、および下流側で帯水層に涵養させる復水部に分類される。各対策工には、数々の特徴があるが、工法の特徴を設置深度と工法原理で分類すると、以下の様になる。また、以下に示す各方式を組み合わせると表-1の様になる。

#### a) 対象帯水層と地下構造物の深度による分類

対象としている帯水層と地下構造物の関係を以下の様に分類する。

- ① 帯水層が地下構造物より浅い場合（浅層部）
- ② 帯水層が地下構造物内にある場合（躯体部）
- ③ 帯水層が地下構造物より深い場合（深層部）

#### b) 集水部と復水部の工法原理による分類

集水部と復水部（以下、集復水工と称す）は、工法原理から大別すると以下の様に分類される。

##### ①山留め壁横穴形式

山留め壁設置後、地下構造物構築時に山留め壁に穴を開けて地盤を削孔し、ストレーナー付の集復水パイプを対象帯水層に設置し、地下水流動機能を回復させる形式。

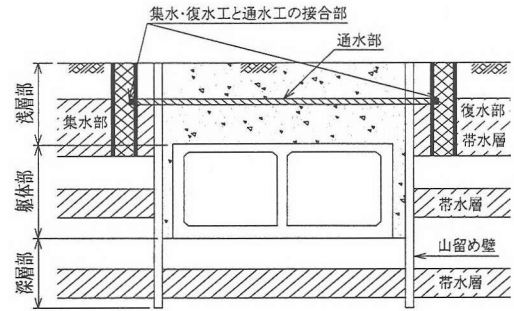


図-1 対策工概念図

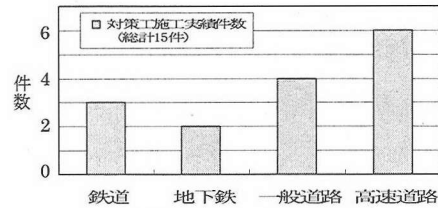


図-2 調査対象施工実績

##### ②山留め壁破砕撤去形式

地下構造物構築完了後、山留め壁を引き抜くか、あるいは山留め壁を破砕撤去置換し、地下水流動機能を回復させる形式。

##### ③集復水井形式

山留め壁あるいは地下構造物の外側に井戸あるいはドレーン付井戸を設置して集復水し、地下水流動機能を回復させる形式。

#### c) 通水部の工法原理による分類

通水部（以下、通水工と称す）は、工法原理から大別すると以下の様に分類される。

##### ①通水管形式

上流側で集水した地下水を、パイプを通して下流側へ通水する形式。

##### ②通水盤形式

集水した地下水を、地下構造物の周囲に原地盤あるいは透水性の高いフィルター材を設置し、透水させ下流側へ通水する形式。

## (3) 調査結果

調査結果を図-3から図-9に示す。

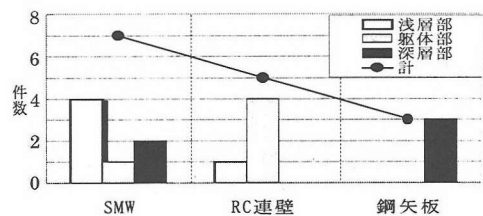


図-3 対策工と山留め壁の種類

表-1 対策工の組合せ形式

		通水管形式	通水盤形式
山留め壁横穴形式	概要図		
	概要	<p>躯体構築後、山留め壁を削孔し横穴を設け、躯体周囲に通水管を設置して通水性を確保。</p>	<p>躯体構築後、山留め壁を削孔し横穴を設け、躯体周囲を透水性材料で埋戻して通水性を確保。</p>
山留め壁破砕撤去形式	概要図		
	概要	<p>躯体構築時、躯体周囲に通水管を設置し、構築後山留め壁を破砕し通水性を確保。</p>	<p>躯体構築後、山留め壁を引抜いて原地盤で通水性を確保。</p>
集復水井形式	概要図		
	概要	<p>山留め壁構築後、背面に井戸を設置し、躯体構築時、躯体周囲に通水管を設置し通水性を確保。</p>	<p>山留め壁構築後、背面に井戸を設置し、躯体構築時、周囲を透水性材料で埋戻して通水性を確保。</p>

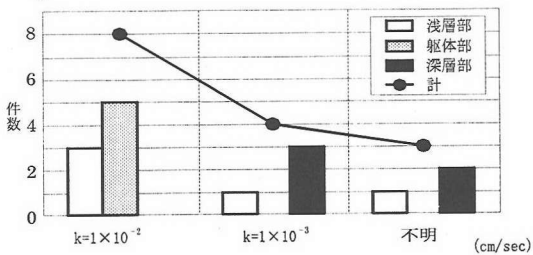


図-4 帯水層の透水係数と施工実績数

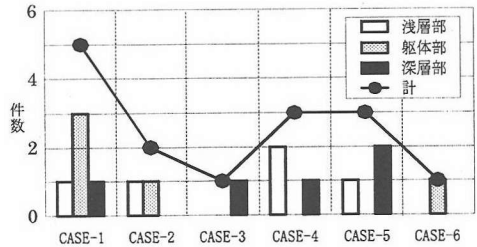


図-5 対策工の組合せと施工実績数

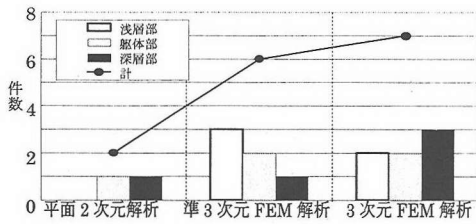


図-6 地下水水位予測解析手法

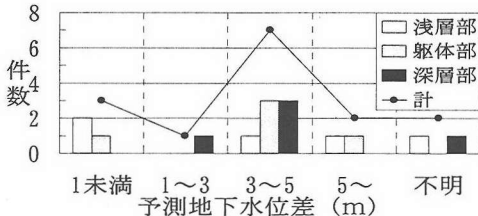


図-7 予測水位差

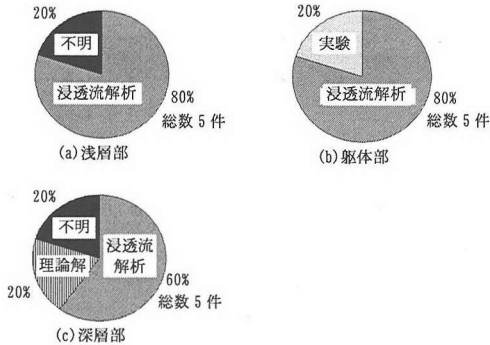


図-8 対策工の設計方法

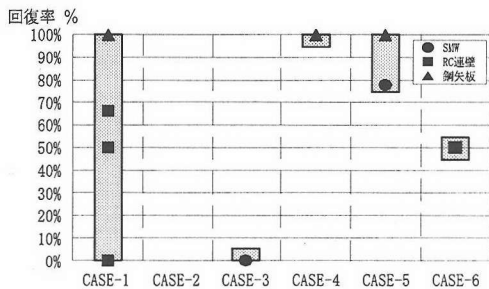


図-9 対策工と水位回復率

既往の対策工施工事例には、上記調査結果から以下の特徴があることがわかる。

- ①山留め壁の種類は、構造物の規模、既設構造物との近接度合にもよるが、帯水層の透水係数が高いため、遮水性が良好な場所打ち山留め壁（SMW や RC 連壁）が多く用いられている。
- ②対象としている帯水層の透水係数は、 $1 \times 10^{-2} \sim 10^{-3} \text{cm/sec}$  である。また、浅層部および躯体部では、深層部より透水係数が高い傾向を示し、かつ

CASE-1, -4 が比較的多く用いられている。

③大部分の地下水水位予測解析手法は、帯水層の高低差を考慮でき、かつ平面的な地下水流動の影響を把握できる3次元あるいは準3次元浸透流解析モデルを用いている。また、地下構造物による地下水流動障害量（予測地下水水位差）は、浅層部よりも躯体部および深層部が大きい傾向を示し、かつ3m以上が大半を占め、地下構造物が地下水流動を大きく障害していることがわかる。さらに、対策工の設計方法は、地下水水位予測と同一の浸透流解析を用いて設計している。

④各形式の回復率を見ると、ばらつきはあるがCASE-4, -5 が比較的回復率が高い。また、最も多く用いられているCASE-1のように、山留め壁の種類によって回復率が大きく異なるケースもある。

### 3. 対策工の留意事項

2. の調査結果による各形式の対策工は、各事例の地盤および水理条件が厳密には異なるため、単純に比較することや、各形式の対策工施工事例が少ないため、各対策工の評価を明確にすることはできない。しかし、この結果から、全体的な傾向として各形式の対策工には、以下の事項を留意する必要があることがわかる。

#### (1) 山留め壁の種類による留意事項

対策工が用いられた山留め壁は、図-3 に示す様に大別すると、既製山留め壁（鋼矢板）と場所打ち山留め壁（SMW, RC 連壁）である。表-2 に示す施工事例 A, B は、ほぼ同一な透水係数、同一な集復水工および通水工で、山留め壁の種類と回復率に着目し比較したものである。この結果から、既製山留め壁の回復率が高いことがわかる。この要因として既製山留め壁は、打撃もしくは圧入工法で施工するため、帯水層の透水性への影響が少ない。これに対し場所打ち山留め壁は、削孔時に泥水等により孔壁を安定させた後、セメントで砕石あるいは原地盤を混合して固化させる。図-10 に示すが、この泥水やセメントミルク

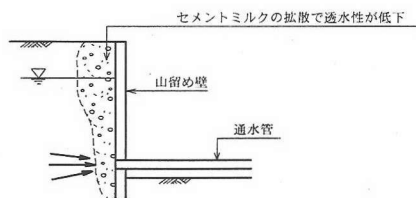


図-10 場所打ち山留め壁設置後の地盤

表-2 山留め壁の種類と水位回復効果

		事例 A	事例 B	
概念図				
概要	透水係数	$4 \times 10^{-3} \text{cm/sec.}$	$5 \times 10^{-3} \text{cm/sec.}$	
	山留め壁	鋼矢板	SMW	R C連壁
	集復水工	山留め壁横穴形式		
	通水工	通水管形式		
回復率		ほぼ回復している.	ほとんど回復していない.	

等が、帯水層の土粒子内に浸透し透水性を低下させているものと考えられる。このため、場所打ち山留め壁を用いる場合には、拡散範囲を検討し、集復水工と山留め壁間に十分な離隔を設けることや、山留め壁近傍の帯水層を良質な地盤に改良する等の対策が必要であると考えられる。

(2) 集復水工の留意事項

a) 山留め壁横穴形式

杉本は、場所打ち山留め壁で関東ローム層直下の被圧帯水層(N値50の洪積砂レキ層、透水係数 $5 \times 10^{-3} \text{cm/sec.}$ )内に横穴管(φ150mm, 平均10m間隔)のストレーナ長を変化させ、地下水位変動の現地施工調査を行なっている<sup>3)</sup>。この調査結果を用いて回復率を比較したものを図-11に示す。この結果から横穴管は、集水面積が小さいため、ストレーナ長を極めて長くし、集復水面積を多く取らなければ効果が得られないことがわかる。尚、図-11に示す回復率とストレーナ長の関係は、対策工検討地区での地盤水理条件や地下構造物の施工方法等によって変化することが考えられる。このため、本形式を用いる場合には、図-11を参考として、現地試験等で回復率とストレーナ長の関係を確認する必要がある。

また、図-12に示すが、掘削面内から被圧された帯水層を削孔し、横穴管を挿入するため、地山と横穴管の間にフィルター材を完全に充填することができない。図-9に示した様に、回復率にばらつきがある一つの要因として、このことによるストレーナの目詰まりや、山留め壁の施工に伴う背面地盤の透水性の低下が考えられ、これらの対策を留意する必要がある。また、この充填が十分にできないため、将

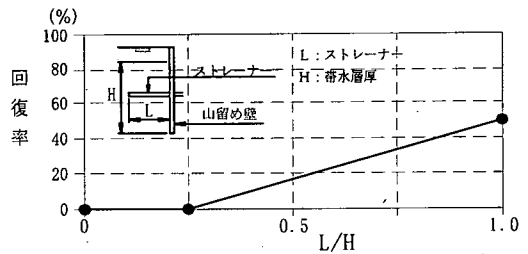


図-11 ストレーナ長と地下水位回復率<sup>3)</sup>

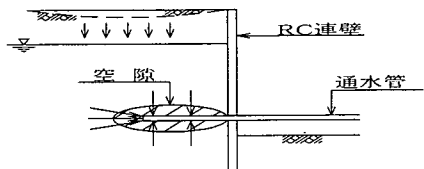


図-12 山留め壁横穴形式の課題概要図

来の地表面沈下対策等を留意する必要がある。

b) 山留め壁砕破撤去形式

山留め壁撤去形式は、東名阪自動車道で透水性が良い地盤で、既製山留め壁を引抜き撤去し、良好な回復率を得た経験を有している。また、破碎形式では、良質な地盤に置換するため、近接構造物があり狭隘な場所でも施工することが可能である。ただし図-9に示した様に、場所打ち山留め壁では、十分な回復率が得られていない。この要因として、(1)に示した事項が考えられる。このため、山留め壁の種類によっては、山留め壁周辺地盤を透水性の良い地盤に置換する等の対策が必要であると考えられる。この形式を用いる場合には、破碎部に構造耐力部材がないため、掘削時の山留め壁の耐力を照査し場合によっては、山留め壁破碎部に補強対策が必要

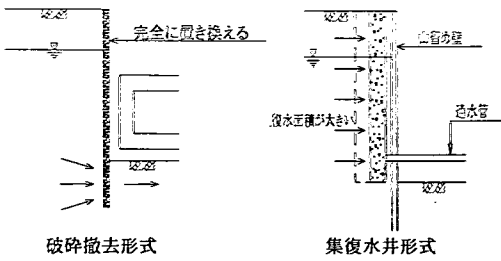


図-13 破碎撤去および集復水井方式概念図

となる。この両形式の地下水流動量は、山留め壁の破碎撤去幅に大きく左右される。さらに、対策工の地下水流動量は、原地盤に期待しているため、集復水面積を多くとる必要があり、かつ原地盤の透水性が比較的良い地盤に適していると考えられる。また破碎撤去箇所では、地下水流による地盤の目詰まりに留意し、破碎撤去範囲を検討する必要がある。

c) 集復水井形式

集復水井形式は、阪和道境地区で透水性が良くかつ地下水流動量が多い地盤で使用され、良好な回復率を得ている<sup>8)</sup>。本形式は、大口径井戸を用いるため、集水および復水性能が高く、地下水流動量が多い地盤に適していると考えられる。ただし、地盤の透水性によっては、機械的な工法（例えばウエルポイント）しか適用できない場合がある。この場合も含め、将来のメンテナンスについては、十分留意する必要がある。また、復水効率については、現在研究途上の課題であり、数例設定方法はあるが、現地復水試験等で確認する必要がある。さらに、本形式でも、地下水流による井戸と周辺地盤の目詰まりに留意し、井戸径および配置を検討する必要がある。

(3) 通水工の留意事項

表-3に示す施工事例C、Dは、山留め壁、帯水層の透水性および集復水形式がほぼ同一で、通水工（通水管形式と通水盤形式）と回復率を比較したもので、両者とも良好な回復効果を得ている。通水工は、通水面積を多く取ることで両形式ともに大きな差は見られない。通水盤を用いる場合には、地下水流による地盤の目詰まりが生じない粒度分布と、ある程度の厚さが必要である。一方、集復水工の形式によっては、通水管と集復水工との接合部は、山留め壁横穴形式と同様の課題があり、十分留意する必要がある。さらに、両工法とも、将来のメンテナンス方法について留意する必要がある。

(4) 設計方法の留意事項

2. および上記(1)から(3)を踏まえると対策工の設計では、以下の事項について留意する必要がある。

- ①山留め壁の種類によっては、施工により周辺地盤の透水性を変化させる可能性がある。このため、対策工の設計では、この周辺地盤への透水性低下に対し留意する必要があると考えられる。
- ②集復水工形式は、原地盤の透水性、帯水層の粒度、地下水流動量等を考慮し、各工法の特徴および将来のメンテナンス方法等を踏まえ選定する必要がある。この際、集復水面積を大きく取る必要がある。また、通水工は、通水管形式と通水盤形式ともに回復効果に差異は見られないと考えられる。
- ③各対策形式の設計では、対策工付近の地下水流によって、地盤が目詰まりし透水性の低下をもたらす。対策工の設計では、この点を留意する必要があると

表-3 通水方式と水位回復効果

		事例C	事例D
概念図			
概要	透水係数	$1 \times 10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm/sec.}$	
	山留め壁	SMW	RC連壁
	集復水工	集復水井形式	
	通水工	通水管形式	通水盤形式
回復率	ほぼ1.0 (実績Dを1とした場合)		1.0 (実績Dを1とした場合)

考えられる。

④2. に示した施工事例調査の結果、地下構造物完成時の地下水流動予測には、3次元浸透流解析等の平面流動状況を考慮できる解析手法が用いられている。一方、対策形式選定後の対策工最適仕様検討は、この解析手法を用いて細部構造および形状の検討が行われている。浸透流解析は、地下水流動状況を定量的に把握する上では信頼性は高いが、時間と費用を要する。このため、対象としている領域にもよるが、対策工の設計では、地下水位変動に伴う地盤および周辺環境に及ぼす影響を定量的に評価し経済的で合理的な設計方法が必要である。

#### 4. 対策工の設計方法

著者らは、新設地下構造物による地下水流動阻害による地下水位変動に伴う地盤および周辺環境に及ぼす影響を述べ、対策工の必要性を定量的に評価できる「許容地下水位変動量」について提案した<sup>2)</sup>。ここでは、この「許容地下水位変動量」と3.の留意事項を踏まえた対策工の合理的な設計方法について述べる。尚、対策工の形式は、一例として2.で比較的回復効果が高いCASE-5(集復水井と通水管)を対象とし、概要を図-14に示す。

##### (1) 設計方針

設計フローを図-15に示すが、大別すると対策工の必要性評価設計と対策工設計に分けられる。

##### a) 対策工の必要性評価設計

対策工の必要性は、地盤および環境条件と地下水流動状況を基に、土地利用状況毎に許容地下水位変動量を設定し、地下構造物による地下水流動阻害量と対比することで対策の必要性を評価し、対策範囲を設定することを基本とする。

##### b) 対策工設計

群井理論は、帯水層の流動場や流向を評価することができないが、解析が簡易で基本的な事項の検討には適している。一方、平面浸透流解析は、広域的な帯水層の流動場や流向を評価することができるが時間と費用を要する。このため、対策工の設計は、設

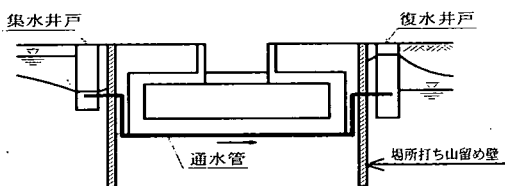


図-14 対策工概要図

計の合理化を目的として、対策工を選定した後(形式の選定)、群井理論を用いて基本形状を設計(基本設計)し、浸透流解析を用いて照査(照査設計)することを基本とする。

##### (2) 対策工の必要性評価設計

対策工の必要性は、以下の事項を調査および解析し、対策工の必要性評価および対策範囲を設定する。

##### a) 地盤および環境状況の把握

地盤構造は、地下水の流動性を考慮し評価することが重要である。このため、各帯水層の広がりとその連続性等について、地盤構造(地層構成、連続性)および特性(強度、変形、圧密)と地下水条件(地下水位、透水性、粒度)を十分に把握する。的確な調査深度や地層の広がりやを評価するためには、地盤図等の既往の地盤資料を活用するのが有効である。

また、航空写真と現地踏査および環境アセスメント報告書や地方公共団体の保健所にある井戸台帳

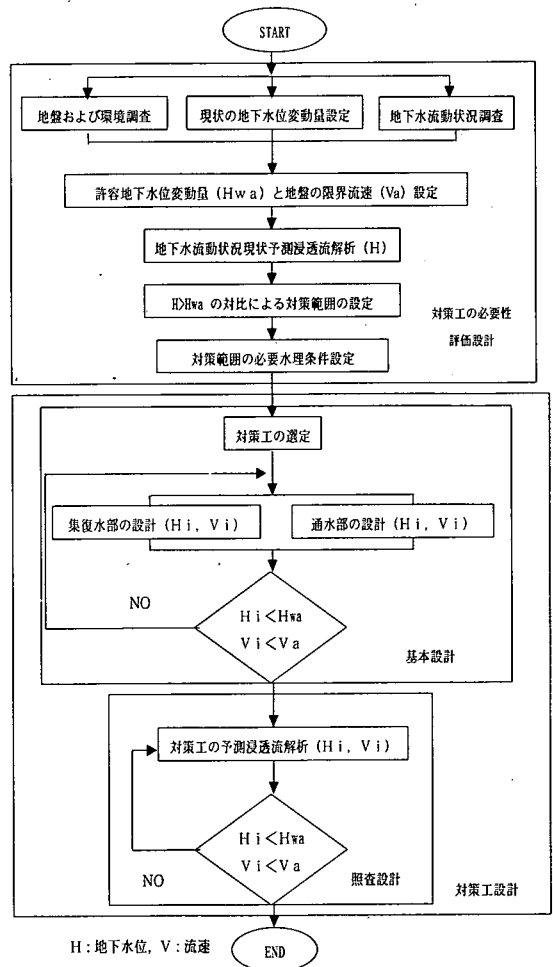


図-15 対策工の設計フロー

等を用いて、既設構造物、植生分布、湧水、井戸、泉池等の現状を調査する。この調査結果を基に、地形や環境および既設構造物の状況等で検討地区を区分し、許容地下水位変動量設定範囲(以下、設定範囲と称す)を設定する。

b) 現状の地下水位変動量と流動状況の設定<sup>2)</sup>

地下構造物建設による直接的な現象は、図-16に示す様に、地下水流動阻害による地下水位変動である。まず、この地下水位変動による影響を把握するためには、現状の地下水位を把握する必要がある。地下水位は、数々の要因により変化している。このため、地下水流動阻害による影響を評価するためには、建設地域周辺で長期間地下水位(最低1年以上)を観測し、地下水位変動要因を調査する必要がある。著者らは、この地下水位変動要因の内、降雨量と地下水位の変動特性を明確にしている<sup>1)</sup>。この観測および調査結果を基に、設定範囲の帯水層毎に、図-16に示す現状の地下水位変動量(平均地下水位、最高および最低値)を設定する。さらに地形を考慮し、帯水層毎に、同層の平均地下水位から等ポテンシャル線を描き地下水流動状況を設定する。

c) 許容地下水位変動量の設定<sup>2)</sup>

地下構造物が地下水流動を遮断する状態で建設されると、地下水位変動による地盤および周辺環境等には、図-17に示す様な影響が懸念される。この影響が許容できる地下水位は、示方書等に明確な基準値が無く、地盤および周辺環境毎に変動基準値(以下、許容地下水位変動量上下限値と称す)を設定しなければならない。a)に示した設定範囲毎の地盤および周辺環境が許容できる地下水位変動量は、b)に示した現状の地下水位変動量(最高もしくは最低値)から、各影響事項の中で地下水位変動量が最も小さい許容地下水位変動量上下限値までの変動量である。これが図-16に示す「許容地下水位変動量」である。ここで、図-17の影響事項を工学的に整理すると、既設構造物への影響、液状化、井戸枯れ、湧水および池枯れ、植生の5事項となる。この5事項に対して、以下に示す許容地下水位変動量上下限値設定方法を用いて、設定範囲毎に許容地下水位変動量を設定する。

①既設構造物への影響

地下水位が上昇した場合、既設構造物の安定(浮き上がり)および不等傾斜角等の許容値を満足できる地下水位が、許容地下水位変動量上限値となる。

地下水位が低下した場合、粘性土層の圧密沈下が懸念される。図-18は、帯水層の地下水位低下量( $\Delta h$ )と粘性土層の過剰間隙水圧減少量( $\Delta ABA'$ ,  $\Delta ABB'$ ,  $\square ABB'A'$ )の関係である。この関係を用いて、許容地

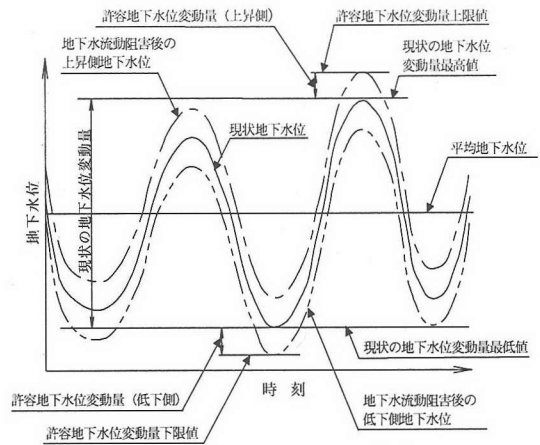


図-16 許容地下水位変動量の概念図

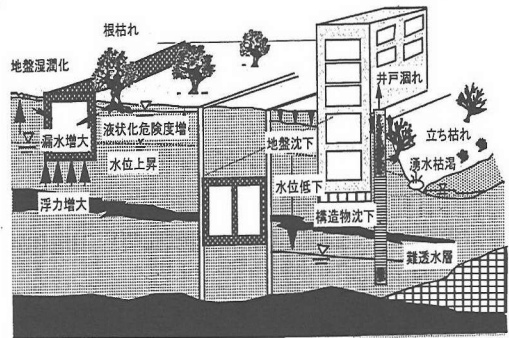
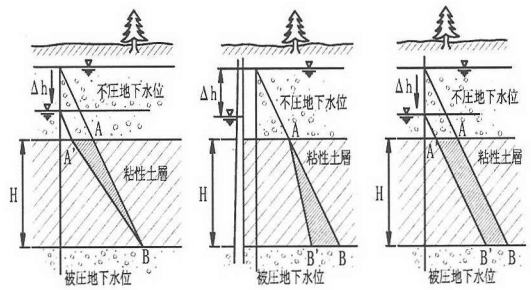


図-17 地下水流動阻害による影響概念図



(a) 不圧地下水水位が低下 (b) 被圧地下水水位が低下 (c) 両地下水水位が低下  
図-18 地下水位低下と過剰間隙水圧の概念図

下水位変動量下限値は、既設構造物の沈下および不等傾斜角等の許容値を満足できる許容沈下量に対して、式(1)を満足できる地下水位となる。

$$S = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log_{10} \frac{P_0 + \Delta U_a \cdot F_s}{P_c} \quad (1)$$

ここに、 $S$ :許容沈下量、 $C_c$ :圧縮指数、 $P_c$ :圧密降伏応力、 $H$ :粘性土層厚、 $e_0$ :初期間隙比、 $P_0$ :有効土被応力、 $\Delta U_a$ :過剰間隙水圧、 $F_s$ :安全率である。また、著者ら



は、地盤の不均一性及び既設構造物の重要度を考慮し  $F_s=2$  を提案している。尚、既設構造物の許容値は、(社)トンネル技術協会地中送電線土木工事における構造物近接部設計施工指針<sup>15)</sup>等に示す各構造物の許容値等を参考として設定する。

## ②液状化

液状化の判定は、液状化抵抗率( $F_L$ )を用い、地下水位の上昇により、現状での液状化範囲が拡大しない地下水位を許容地下水位変動量上限値とする。

## ③井戸漏れ

浅井戸(真空ポンプ式井戸)は、地下水位が地表面から 5m 以上になると、一般に真空ポンプの揚水が困難になるため、この値を許容地下水位変動量下限値とする。井戸と水中ポンプから構成される深井戸(重力式)は、井戸の集水可能流量と水中ポンプ揚水量の最小値が揚水可能流量である。このため、深井戸の許容地下水位変動量下限値は、この最小値を下回らない地下水位とする。

## ④湧水および池漏れ

湧水あるいは池では、供給源となっている帯水層の水位が、湧水高あるいは池底面より低くならない地下水位を許容地下水位変動量下限値とする。

## ⑤植生

植生への影響は、根深さ位置で植物が利用できる含水比量の指標である pF 値を用いて評価する。許容地下水位変動量上下限値は、湿潤による根腐れ点である pF 値が 1.5 以下にならない地下水位を上限値とし、乾燥による根枯れ点である pF 値が 3.0 以上にならない地下水位を下限値とする。

著者らは、この許容地下水位変動量を用いて江戸川左岸部(市川市)で、地下水流動阻害の特徴を検討した。この結果、許容地下水位変動量の設定では、帯水層の地下水位変動経緯および地下水位変動幅と粘性土層の圧密特性に留意する必要があることを指摘している。

## d) 現状予測解析と必要性の評価

対策工を検討する上で、現状の地下水流動状況を解析にて的確に再現し(現状解析)特徴を把握することが最も重要である。解析手法は、地下構造物の規模、地下水位、地形状況、解析の経済性を十分に考慮し設定する。特に、帯水層が複数に存在したり、複雑な境界条件などに対しては、3次元あるいは準3次元平面浸透流解析を用いる。現状解析の妥当性評価は、土地利用状況や降雨量等を基に水理特性を検討し検証する。この解析を用いて、地下構造物が、地下水流動状況にどのような影響を及ぼすのか把握し(予測解析)、この解析結果と許容地下水位変動量を対比させ、対策工の必要性および範囲を評価する。

## (3) 基本設計

### a) 必要水理条件

基本設計に用いる水理条件は、地下構造物完成時の水理特性値(無対策時の予測解析結果)を用いるものとする。

### b) 対策工の選定

対策工は、地盤環境、水理特性値、3. に示した対策形式の留意事項と以下の事項を留意し、総合的な観点から選定する必要がある。

#### ①帯水層の粒度分布

対策工は、人工的に帯水層から集復水するものである。地盤は、常に一様ではなく、粒度分布によっては集復水効率や目詰まり対策工が異なる。対策工が必要な範囲では、十分に帯水層の粒度分布を把握し考慮する必要がある。

#### ②山留め壁と周辺環境への影響

山留め壁の種類によっては、背面地盤の透水性を著しく低下させる。このため、山留め壁と十分な隔離あるいは置換等を考慮する必要がある。また、対策工によっては、山留め壁の補強が必要となる場合もある。このため、これらの対策工が、施工時周辺環境に影響を及ぼさないようにする必要がある。

#### ③メンテナンス

対策工は、長期間にわたり使用されるため、必ずメンテナンスが必要となる。対策工の洗浄、追加対策、取替えやランニングコストを考慮し選定する必要がある。

### c) 検討事項

対策工は、3. に示した対策形式の留意事項を踏まえ、以下に示す事項を満足するように検討する。

- ① 許容地下水位変動量の確保
- ② 集復水工と帯水層の目詰まり防止
- ③ 通水部の許容流量確保

### d) 照査地点と安全率

地下水位の照査地点を図-19に示すが、群井理論の特徴として広域的な流動場を評価できないため井戸間中心地点とし、流速は最速となる集復水井の外縁とする。また、c)に示した検討事項に対して以下に示す方法で求められる各部材の許容値は、適切な安全率を考慮する必要がある。地盤工学ハンド

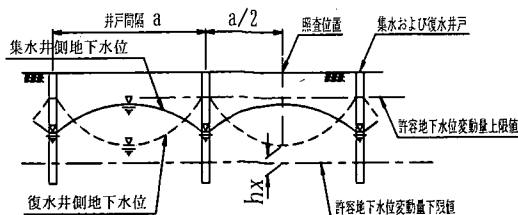


図-19 照査地点

ブック<sup>16)</sup>によると、地盤構造物に用いる標準的な割増係数は、既設構造物の重要度(0.2)、地層構成調査の信頼性(0.2)、現況地下水位や分布等の調査の信頼性(0.2)、粒度や透水係数等の地盤水理条件の信頼性(0.2)、地盤物理特性の信頼性(0.15)である。例えば、これらを考慮すると、約2.0倍程度の安全率を考慮する必要があると考えられる。

#### e) 許容地下水位変動量の確保の検討方法

集復水井を用いる場合、群井理論から周辺地盤の地下水位と集復水井の流量算定は、式(2)から(5)となる<sup>17)</sup>。

$$q_i = \frac{2\pi k D a h_0}{\sum_{i=1}^n R^n / r_i} \quad (2)$$

$$h_x = \frac{1}{2\pi k D} \sum_{i=1}^n q_i \cdot \ln(R^n / x_i) \quad (3)$$

$$q_c = 130 \cdot a \cdot l_w \cdot r_w \cdot \sqrt[3]{k} \quad (4)$$

$$q_c > F_s \cdot q_i \quad (5)$$

ここに、 $q_i$ :集復水井一本当たりの流量、 $h_x$ :任意の地点  $x$  における地下水位変動量、 $q_c$ :限界集水量・限界復水量、 $l_w$ :井戸のストレーナー長、 $k$ :帯水層の透水係数、 $D$ :帯水層の厚さ、 $a$ :井戸効率、 $h_0$ :集復水井内水位変動量、 $R$ :影響圏半径、 $r_w$ :集復水井の半径、 $x_i$ : $i$ 番目の井戸から  $x$  地点までの距離、 $r_i$ : $n$ 番目の井戸から  $i$ 番目の井戸までの距離、 $F_s$ :安全率(2.0程度)である。

ここで、集復水井では、水に含まれる鉄分や細粒分によるスクリーンの目詰まり、および帯水層中の細粒分の移動に伴う帯水層の目詰まりにより機能が低下する。 $a$  は、この低下率を示したものである。集水井では、数多くの施工実績を基に、一般に0.5が用いられているが<sup>17)</sup>、復水井では注入圧(復水井内水位上昇量)等が集水井と異なるため、現在研究途上の課題である。この復水効率については、現地復水試験で設定する必要があるが、試験ができない場合、図-20に示す大橋らが提案した透水係数と復水効率の関係を用いて設定する方法<sup>18)</sup>等がある。この算定方法を用いて、許容地下水位変動量を満足する集復水井の基本形状を検討する。

#### f) 集復水工と帯水層の目詰まり防止

集復水井と周辺の地盤は、揚水あるいは復水の影響で地盤の浸透流速が大きくなり、目詰まりを生じる可能性があり防止する必要がある。検討方法としては、式(6)に示すフィルダムの透水ゾーン等の検討に用いられるフィルター則と式(7)に示すKoslovaの許容限界流速<sup>19)</sup>を満足させる方法等を

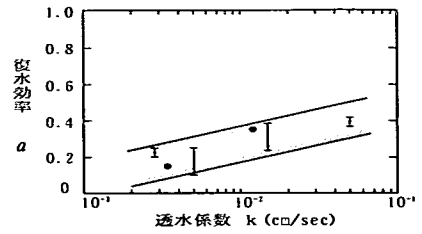


図-20 復水効率<sup>18)</sup>

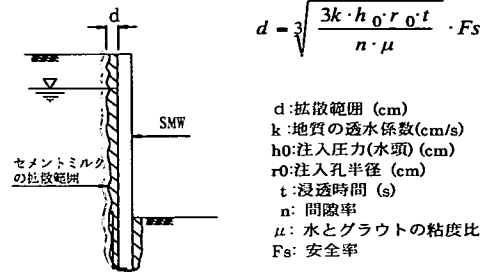


図-21 セメントミルク拡散算定方法<sup>20)</sup>の概念図

用い、集復水井のフィルター材を選定する。

$$D_{f15} / D_{85} < 5, D_{f15} / D_{15} > 5, D_{f15} / D < 5 \quad (6)$$

$$V_c = 0.26 D_{50}^2 \cdot (1 + 1000 D_{50}^2 / d_{50}^2) \cdot 1 / F_s \quad (7)$$

ここに、 $D_{f15}$ :フィルター材料の15%粒径、 $D_{85}$ :周辺地盤の85%粒径、 $D_{50}$ :周辺地盤の50%粒径、 $D_{15}$ :周辺地盤の15%粒径、 $D$ :スクリーンの間隔、 $d_{50}$ :集復水井のフィルター材の50%粒径、 $V_c$ :地盤の許容限界流速、 $F_s$ :安全率(2.0程度)である。

またSMW等の場所打ち山留め壁を用いた場合、セメントミルクの拡散による周辺帯水層の透水性低下(目詰まり)についても定説はないが、図-21に示すMaagの浸透式<sup>20)</sup>を用いて範囲を求める方法等がある。この対策として、この範囲の外に集復水井を設置する方法や式(6)、(7)を満足する良質な地盤に置換する方法等がある。

#### g) 通水管の許容流量確保の検討方法

通水管の通水能力は、通水管断面積や管内抵抗等を考慮し、式(8)に示す連続式と式(9)に示す Manning 式を満足させるものとする。

$$Q = A \cdot V / F_s \quad (8)$$

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (9)$$

ここに、 $Q$ :通水管流量、 $A$ :通水管断面積、 $V$ :通水管内流速、 $n$ :粗度係数、 $R$ :径深、 $I$ :動水勾配(集復水井間の水位差/集復水井の距離)、 $F_s$ :安全率(2.0程度)

である。さらに管径は、管内の洗浄等のメンテナンスを考慮した大きさにする必要がある。

#### (4) 照査設計

##### a) 基本条件

基本設計で設定された対策工の仕様（集復水井，通水管）を初期条件として用いる。また，各構造の許容値および許容地下水位変動量は，基本設計と同一とする。

##### b) 照査方法と安全率

照査設計は，地下水平面流動状況が照査できる浸透流解析方法に，基本設計で求めた仕様をモデル化し，この仕様を初期値として，許容地下水位変動量，式(7)に示す地盤の許容限界流速，および式(8)に示す通水管の許容流量を満足する最適仕様を求める。尚，地下水位の照査地点は，影響が及ぶ全ての対象平面で行うものとし，流速の照査地点は，流速が最大になる集復水井外縁とし，安全率は基本設計と同一とする。

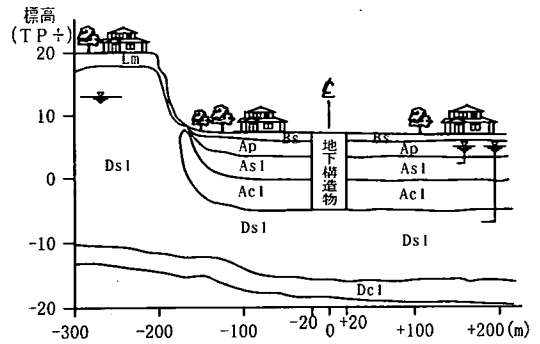


図-22 土層構成断面図

表-4 地盤および環境条件

		Ap層	As1層	Ac1層
地盤条件	N値	2	5	5
	Cc (KN/m <sup>2</sup> )	5.30	—	0.45
	P <sub>0</sub> (KN/m <sup>2</sup> )	30.00	—	57.90
	P <sub>c</sub> (KN/m <sup>2</sup> )	32.50	—	82.89
	OCR	1.08	—	1.43
環境条件	既設構造物	木造住宅密集地区		
	井戸	無し		
	湧水、池	無し		
	植生	保護植生無し		

表-5 現状と許容地下水位変動量の設定値(As1層)

		設定事項(G.L.)				変動量(a)
		既設構造物	液状化	井戸枯れ	植生	
現状の地下水位変動量	最高値	-1.5				1.1
	平均地下水位	-2.1				
	最低値	-2.6				
許容地下水位変動量	上昇側	解析値	0.0	0.0	-	1.5
		上限値	0.0			
	低下側	解析値	-2.3	-	-	0.2
		下限値	-2.3			

## 5. 対策工の適用例

ここでは，市街化された江戸川左岸部(市川市)の埋没波食台で，図-22 に示す様な地下構造物が不圧帯水層を遮断した場合について，4. で示した集復水井形式と通水管形式を用いた対策工の設計方法を適用し考察する。

### (1) 設定条件

#### a) 地盤および環境条件

適用地区は，図-22 に示す様に台地と平地の高低差が10m程度ある地形で，市街化された住宅地である。地盤および環境調査結果を基に設定した条件を表-4に示す。地盤構成は，N値30程度の締まった洪積層(Ds1層)上に，N値5程度の緩い沖積砂層(As1層)と沖積粘性土層(ApおよびAc1層)が互層に堆積され，各土層ともに水平方向に連続性が良い。また，沖積粘性土層は，過圧密比(OCR)が1.1から1.5程度で，正規圧密状態に近い粘性土である。

#### b) 地下水遮断と地下水位条件

地下構造物は，平地部に位置し，深さ15m，幅40mで，帯水層であるAs1層を半無限に遮断している。この地下構造物位置では，As1層が不圧帯水層，Ds1層が被圧帯水層で，両層の透水係数は， $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 程度である。また，表-5に，適用地区でのAs1層の地下水位観測結果(1998~2001)を基に設定した現状の地下水位変動量を示す。

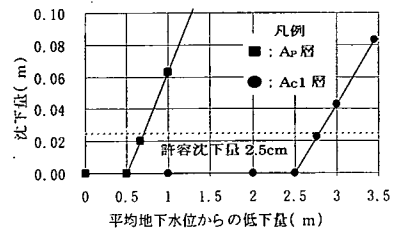


図-23 粘性土層の沈下解析結果

### (2) 許容地下水位変動量の設定

表-4より，許容地下水位変動量設定事項は，既設構造物への影響，液状化の2事項となる。

#### ① 既設構造物への影響

適用地区は，木造住宅を主体とする住宅地である。既設構造物調査の結果，木造建屋の構造物安定検討時(浮き上がり)の設計地下水位を地表面高としていたため，許容地下水位変動量上限値は，地表面高とする。また，許容地下水位変動量下限値設定のための既設構造物の許容沈下量は，2.5cmとした<sup>15)</sup>。図-23は，4. に示した方法を用いて，As1層の地下

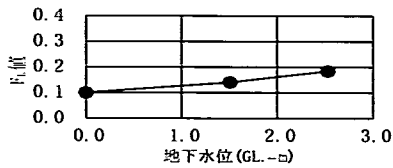


図-24 As1層の液状化抵抗率解析結果

水位変動量をパラメーターとした  $A_p$  および  $A_{c1}$  層の圧密沈下解析結果と各許容値を比較したものである。許容沈下量 2.5cm を満足するための  $A_{s1}$  層の地下水位変動量は、 $A_p$  層に支配され、許容地下水位変動量下限値は平均地下水位から 0.7m となる。

### ②液状化

液状化の判定基準は、液状化抵抗率 ( $F_L$ ) が 1 以下の場合、液状化するものとする<sup>21)</sup>。図-24 は、 $A_{s1}$  層の地下水位変動量をパラメーターとした  $A_{s1}$  層の液状化抵抗率 ( $F_L$ ) である。地表面まで地下水位が上昇しても、液状化抵抗率 ( $F_L$ ) が 1 以下であることから、液状化範囲は拡大しないことがわかる。

以上の結果より、 $A_{s1}$  層の許容地下水位変動量は表-5 のように設定される。

### (3) 対策工の必要性評価設計

地下水流動状況は、地下水の流向を平面的に解析できる準 3 次元浸透流解析を用いた。図-25 は、地下構造物完成時(線状軸直角方向)の  $A_{s1}$  層の予測地下水位変動量解析結果である。この結果から、 $A_{s1}$  層の地下水流動方向は、地形に沿う方向になっていることがわかる。また、地下水位変動量が最も大きいのは、新設地下構造物近傍である。さらに、対策工は、新設地下構造物近傍に井戸を設けるため、対策工の照査に用いる地点は、図-26 に示す線状軸方向の井戸間中心とする。この地点での予測地下水位変動量を表-5 に示す現状の地下水位変動量(最高および最低値)に加えた予測地下水位と、許容地下水位変動量を比較した結果を表-6 に示す。構造物完成時の  $A_{s1}$  層の予測地下水位は、許容地下水位変動量を超え、同層に対策工が必要であることがわかる。

### (4) 基本設計

集復水井形式と通水管形式を用いた対策工で、4. に示した方法を用いて検討した結果を表-7 に示す。ここで、井戸の集復水対象層を  $A_{s1}$  層とし、図-20 から井戸の復水効率を 0.2 とした。また、集復水井と地盤の目詰り防止方法としては、式(7)に示す Koslova の許容限界流速を満足する井戸のフィルター材とした。この結果から、径 2.0m で集復水対象層を  $A_{s1}$  層とした井戸を、線状軸方向に集水井で井

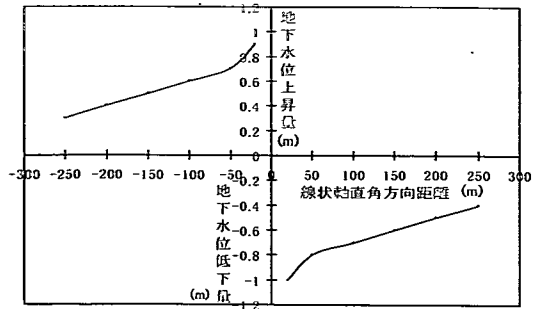
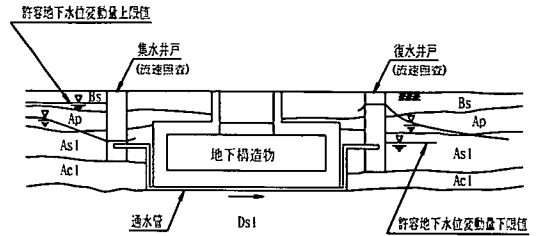
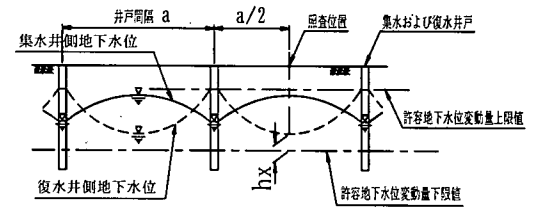


図-25 線状軸直角方向の  $A_{s1}$  層地下水位変動量



(a) 線状軸直角方向



(b) 線状軸方向

図-26 照査位置図

表-6 対策工の必要性評価

	予測地下水位 (構造物完成時)		許容地下水位変動量		対策工の要否
	最大値 (GL. m)	変動量 (m)	上下限界 (GL. m)	変動量 (m)	
上昇側	-0.6	0.9	0.0	1.5	否
低下側	-3.6	1.0	-2.8	0.2	要

戸間隔 60m 復水井で井戸間隔 30m、通水管は 30m 間隔で許容地下水位変動量および集復水工の許容流量を満足する最適値になった。

### (5) 照査設計と考察

(4) で選定された基本形状を準 3 次元浸透流解析にモデル化し、図-26 に示す照査地点での井戸間隔と各許容値(許容地下水位変動量、集復水井近傍地盤の許容限界流速等)を満足する最適値を求めた。この結果と基本設計を比較したものを表-7 に示すが、最適な集復水井間隔は、基本設計の 2 倍となり基本設計が安全側の評価になっていることがわかる。この要因として、群井理論は、地下水流動阻害量に伴う周辺地盤の地下水流速(動水勾配(地下水流動阻害量/阻害幅) 0.043)を考慮できないため、集

表-7 基本および照査設計結果

		基本設計		照査設計			
		集水井	復水井	集水井	復水井		
集復水井形式		井戸形状と井戸効率					
		井戸間隔 (m)		60	30	120	60
		地下水水位 (GL. m)		井戸径2.0m, 深さ6.0m 集水効率0.5, 復水効率0.2			
		上昇側	最高地下水水位解析値	-0.8	-1.6	-1.1	-1.6
			許容地下水水位変動量上限値	0.0			
		平均地下水水位解析値		-1.4	-2.2	-1.7	-2.2
		低下側	最低地下水水位解析値	-1.9	-2.7	-2.2	-2.7
			許容地下水水位変動量下限値	-2.8			
		地下水流量 (m <sup>3</sup> /min./本)		解析値	0.015	0.008	0.016
				許容値	0.017	0.019	0.017
		井戸周辺の流速 (cm/min.)		解析値	0.001	0.002	0.005
				許容限界流速	0.019		
		フィルター材材の粒径 (mm)		フィルター材 (D <sub>50</sub> )	2.000		
				現地盤 (D <sub>50</sub> )	0.150		
		最適井戸間隔 (m)		集水井120, 復水井60			
通水管形式		通水管形状 (mm)					
検討結果	通水管間隔 (m)		30		60		
	通水流量 (m <sup>3</sup> /min./本)		0.015		0.016		
	最適通水管間隔 (m)		1.030				
		管径150					
		60					

水能力を井戸の本数で補うのに対し、浸透流解析では、この影響を考慮できるため、井戸の本数を低下させることができるためである。また、この結果から対策工の設計では、地形や帯水層の傾き等による地下水流動方向と、地下水流動阻害量に伴う周辺地盤の流速に留意する必要があることがわかる。さらに「許容地下水水位変動量」と、理論解を用いた基本設計および浸透流解析を用いた照査設計を行なう本方法が、対策工の必要性および仕様を、工学的かつ定量的に評価および設定することができ、極めて合理的な手法であることがわかる。

## 6. まとめ

本報告では、開削工法を用いた地下構造物での地下水流動阻害対策で、対策工の施工事例調査に基づく留意事項と、対策工の合理的設計方法について述べた。この結果は、以下のとおりである。

(1) 山留め壁の種類によって、周辺地盤の透水性を変化させる可能性がある。このため、対策工の設計では、山留め壁の施工方法の特徴を踏まえ、対策工の位置あるいは対策工周辺地盤を良質な透水地盤への改良等、適切な対策を留意する必要があると考えられる。

(2) 集復水工形式は、原地盤の透水性、地下水流動量、帯水層の粒度等を考慮し、各工法の特徴および将来のメンテナンス方法等を踏まえ選定する必要がある。この際、集復水面積を大きく取る必要がある。また、通水工は、通水管形式と通水盤形式ともに回復効果に差異は見られないと考えられる。

(3) 各対策形式の設計では、対策工付近の地下水流によって地盤が目詰まりし、透水性の低下をもた

らす。対策工の設計では、この点を留意し、目詰まりが生じない材料等の適切な対策が必要であると考えられる。

(4) 対策工の必要性評価と範囲は、許容地下水水位変動量と地下水水位の予測解析結果を対比することで工学的かつ定量的に設定することができる。また対策工の設計は、許容地下水水位変動量と理論解を用いた基本設計および浸透流解析を用いた照査設計を行なうことで、合理的に設計することができる。

(5) 集復水井形式と通水管形式を用いた対策工で本提案方法を用いて、江戸川左岸部(市川市)の埋没波食台に適用し考察した。この結果、対策工の設計では、地形や帯水層の傾き等による周辺地盤の地下水流動方向と地下水流動阻害量に伴う周辺地盤の流速に留意する必要があることがわかった。

市街地の地下構造物の設計施工では、これまでは地下水が地下構造物に及ぼす影響が主に検討されてきたが、今後は地下構造物が地下水に及ぼす影響を検討し、適切な対策工を講じる必要がある。このため、本報告では、既往の施工事例を基に、この対策工の選定上の留意事項と、合理的で工学的かつ定量的に評価できる設計手法を提案した。対策工の検討では、現状の地下水水位および流動状況を的確に評価することが最も重要である。このことを考慮すると建設地点での長期にわたる地下水水位観測が、益々重要であると言える。

謝辞：本研究を行なうにあたり、施工事例と計測結果を快く提供して頂いた関係各位に感謝いたします。また、対策工の留意事項と設計方法については東京都土木技術研究所杉本隆男技術部長に御指導を賜った。既往の施工事例調査の整理では、大日本コンサルタント(株)中岡伸一氏に、適用例の浸透流解

析では、(株)ダイヤコンサルタント坂東聡氏に御協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1)木佐貫徹, 西垣誠, 野田誠司, 山下知之: 東京周辺地盤における地下構造物の設計地下水位設定方法, 土木学会論文集, No. 721/VI-57, pp.167-176, 2002.
- 2)西垣誠, 木佐貫徹, 野田誠司, 渡邊雄二: 地下水流動阻害対策のための許容地下水位変動量に関する研究, 土木学会論文集, No. 742/VI-60, pp.169-180, 2003.
- 3)杉本隆男: 環八井荻・開削トンネル工事における地下水復水対策, 構造物と地下水に関する事例講習会講習資料, pp.25-40, 地盤工学会, 1998.
- 4)生田雄康, 松本岸雄, 古山章一, 大野賢二: 仙石線地下工事における地下水保全対策, 土と基礎, pp.5-21-5-22, 1995.
- 5)河野祥弘, 山本泰幹: 高速大宮線と野大宮線区間の地下水対策, 技報第33号, pp.67-71, 首都高速道路公団, 2001.
- 6)出口博一, 福田雅友, 棕浦正人, 田中信幸, 橋本正, 有本弘孝: 京都市地下鉄烏丸線における通水工法を用いた地下水位変動低減対策, 地下水地盤環境に関するシンポジウム 1996 発表論文集, pp.123-134, 地下水地盤環境に関する研究協議会, 1996.
- 7)杉村孝雄, 山内英治, 橋本正, 有本弘孝: 神戸市営地下鉄山手線の三宮駅建設に伴う地下水流動保全対策, 地下水地盤環境に関するシンポジウム 1999 発表論文集, pp.135-154, 地下水地盤環境に関する研究協議会, 1999.
- 8)永井宏, 西垣誠, 宇野尚雄, 柳田三徳: 道路建設の切土区間における地下水環境保全のための復水工法の検討, 土木学会論文集, No.516/VI-27, pp. 21-33, 1995.
- 9)大東憲二, 植下協, 高木利則, 安江勝夫: 堀割道路建設における地下水状態への影響評価に関する研究, 土と基礎, pp.5-34-5-36, 1995.
- 10)大東憲二, 植下協, 市川悦男: 堀割構造物周辺の地下水流動状態保全に関する研究, 土木学会論文集, No.535/III-34, pp.13-21, 1996.
- 11)上田敏雄: 地下構造物の地下水復水対策工とその効果, 構造物と地下水に関する事例講習会講習資料, pp.41-52, 地盤工学会, 1998.
- 12)鈴木孝之, 古山章一, 奥石逸樹, 縄田晃樹: 埋め戻し材料の透水係数, 第28回土質工学研究発表会論文集, pp.832-833, 1993.
- 13)西垣誠: 地下水に関する環境評価手法, 基礎工, pp.25-31, 1992.11.
- 14)嘉指登志也: 高速道路の切土区間の地下水対策例(阪和道), 基礎工, pp.48-53, 1996.2.
- 15)日本トンネル技術協会: 地中送電線土木工事における構造物近接部設計施工指針, pp.120, 日本トンネル技術協会, 1985.
- 16)地盤工学会: 地盤工学ハンドブック, pp.446-465, 地盤工学会, 1999.
- 17)阿部裕, 鬼木剛一: 地下水低下工法, 基礎工, pp.11-18, 1988.6.
- 18)大橋哲夫, 清沢健一, 鬼木剛一, 笹倉剛, 天野光也, 平和男: 復水工法における地下水挙動に関する考察, 土木学会第45回年次学術講演会, pp.812-813, 1990.
- 19)土橋浩, 並川賢治, 佐藤常雄, 坂本桂一: 目詰まりを考慮した通水井の設計, 地下水地盤環境に関するシンポジウム 1999 発表論文集, pp.79-96, 地下水地盤環境に関する研究協議会, 1999.
- 20)米倉亮三, 島田俊介, 木下吉友: 恒久グラウト注入工法, pp.39-42, 山海堂, 2000.
- 21)日本道路協会: 道路橋示方書同解説V耐震設計編, pp.121-124, 日本道路協会, 2002.

(2003. 1. 30 受付)

## A STUDY ON DESIGN METHOD OF GROUNDWATER PRESERVATION SYSTEM

Makoto NISHIGAKI, Toru KISANUKI, Tomoyuki YAMASHITA  
and Yuji WATANABE

When a large-scale linear under ground structure is constructed, groundwater flow is blocked and it causes many bad influences to existing structures. To prevent that, many measures have been taken. In this study, many present systems have been studied to develop rational design procedure of the system. Based on the studies on present countermeasures and the measurement data, the countermeasures have been categorized by basic principles and the consideration matters on application are studied. In this study, a design method of countermeasure for preservation of groundwater flow using water collecting and recharging well method applied to open excavation has been proposed.