

地下水流动阻害対策のための 許容地下水位変動量に関する研究

西垣 誠¹・木佐貫 徹²・野田 誠司³・渡邊 雄二⁴

¹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

²正会員 工修 鹿島建設(株) (前(財)高速道路技術センター) (〒107-8477 東京都港区元赤坂1-3-8)

kisanuki@kajima.com

³正会員 M.S. 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)

Seiji.Noda@jhnet.go.jp

⁴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際には、地下構造物によって地下水流动が阻害され、地盤沈下をはじめとする数々の周辺環境等への影響が重要な課題となっている。このため、地下構造物の設計および施工においては、この地下水流动阻害量が現状の周辺環境等に及ぼす要因や影響を定量的に評価し、対策工の必要性を工学的に評価する指標が求められている。本論文は、地下水流动阻害対策の必要性を評価する指標として、地盤環境や周辺環境等を総合的かつ定量的に評価できる設計指標「許容地下水位変動量」を提案し、東京周辺地盤の特徴および地下水位特性を踏まえ適用し考察したものである。

Key Words : allowable fluctuation of groundwater level, underground linear structure, environmental impact assessment

1. はじめに

近年、地下空間がもつてゐる耐震性、恒温性、遮音性などといった利点を積極的に利用しようという観点から、電気通信施設、上下水道施設、鉄道、道路などの線状構造物が、地下化および半地下化されることが多くなってきた。これらの線状地下構造物（以下、地下構造物と称す）の建設では、地下水の処理が重要な課題である。

従来の地下水の処理に関する課題は、地盤掘削においては地下水位をどのように低下させるか、あるいは、山留め壁背面や根入れ先端に、どの程度の地下水が作用するかを予測することが主たる課題であった。しかし、近年では、地下構造物の建設に伴って地下水流动が遮断され（以下、地下水流动阻害と称す）、上流側では地下水位を上昇させ、さらに下流側では地下水位を低下させ、地盤沈下をはじめとする数々の地盤環境や周辺環境等への影響が重要な課題となってきた。さらに、社会は、この様な影

響に対して、工学的評価を基に、地盤環境や周辺環境等への影響を最小限にする対策を求めている。このため、計画段階から地下水流动阻害に対して、現状の地下水流动を把握し、地下構造物完成後の地下水流动を予測し、対策工を考慮した構造とする必要がある。しかし、いかなる条件下でも地盤環境や周辺環境等に対して現状と同一状態にすることは、経済性を度外視したものになる。このため、地下構造物の設計および施工では、地下構造物建設に伴う地下水位変化が、地盤環境や周辺環境等に及ぼす影響を定量的に評価し、かつ対策工の必要性を工学的に評価する指標が必要となってきている。

本論文では、地下構造物が多数建設されている東京周辺地盤をモデルとし、地盤構造と地下水位の特徴を踏まえ、新たな地下構造物建設に伴う地下水流动阻害対策の必要性を評価する指標として、地盤環境や周辺環境等を総合的かつ定量的に評価できる設計指標「許容地下水位変動量」について提案し、同地区に適用し考察したものである。

2. 東京周辺の地盤構造および地下水位

(1) 地盤構造の概要

東京周辺地盤は、図-1に示す洪積層（東京層）を基盤とする基底面上に堆積してきたものである¹⁾。この基底面は、波および古東京川等により、かつての台地を侵食したもので、侵食状況によって台地、埋没波食台、埋没河岸段丘、および埋没谷に分類される。また、図-2に東西方向の断面図を示すが、各堆積土層は、以下の特徴を持っている。

①火山灰質粘性土で台地に分布する関東ローム層は4~5mの層厚を有し、一般に水を透しにくく、かつ水を含むと軟弱になる。

②埋没谷、埋没波食台、埋没河岸段丘で、広い面積に分布し連続性が良い有楽町層は、上部砂層と上部泥層に分類される。上部砂層は、5~10mの層厚でN値5~10程度を持ち、砂層および、これを覆う粘性土からなる。上部泥層は、上部砂層下に厚く堆積した粘性土で、N値は一般に5以下である。この層が厚い埋没谷では、地盤沈下が生じやすい。

③七号地層は、有楽町層下に主として砂層と粘性土層からなる構造を持ち、両層の境は、GL.-25~-40m付近である。N値は、砂で10~30、粘性土で5~10程度である。この七号地層の下部には、段丘礫層や基底礫層が存在する。

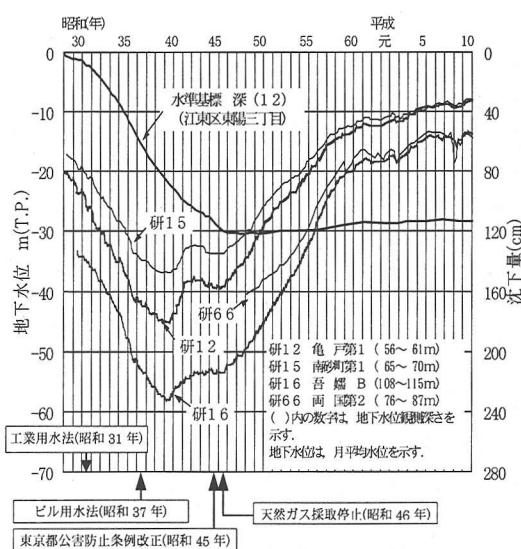
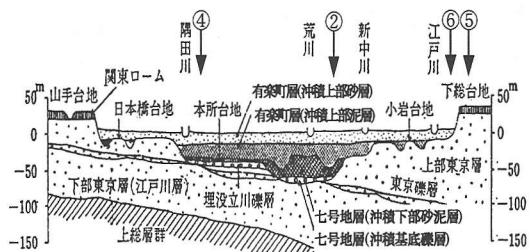
(2) 地下水位の変遷概要

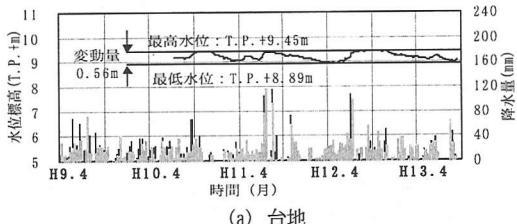
昭和30年頃から東京周辺の被圧地下水は、水需要の増大に伴い、工業用および生活用水道として、深井戸による大量の地下水採取が行われるようになった。このため、図-1に示す観測位置での被圧地下水位（東京層）は、図-3に示すように急激に低下し、かつ広範な地盤沈下が見られるようになった²⁾。この対策として、図-3に示すように、工業用水道への転換（工業用水法）と建築物用地下水採取規制（ビル用水法）、および地下水採取規制（東京都公害防止条例等）により、被圧地下水位の変動は、低下傾向が収束し、急激に上昇する傾向を示してきた。しかし、近年の被圧地下水位上昇傾向は、頭打ち状態にある。

また、図-4に示す東京周辺地盤の埋没波食台や台地等での不圧地下水位を見ると、不圧地下水位は、降雨量との相関性が高く、長期的に顕著な変動傾向が認められないことがわかる³⁾。

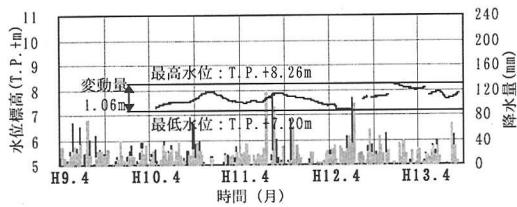
(3) 地下水位変動による地盤の特徴

尾崎らは、東京地区の地盤でTerzaghiの圧密理論を用いて有楽町層（沖積上部泥層）の沈下量を予測し、実測値と比較している。この結果によると、地盤





(a) 台地



(b) 埋没谷食台

図-4 不圧地下水位の推移³⁾

沈下の主要因は、地下水揚水等による地下水位低下が粘性土層の圧密沈下と洪積層の収縮沈下を引き起こしたと指摘している⁴⁾。また、中村らは、東京地区の埋没谷等で圧密状態を検討し、七号地層（沖積下部砂泥層）や有楽町層（沖積上部泥層）の深部では過圧密状態で、有楽町層（沖積上部泥層、沖積上部砂層）上部の粘性土層は、間隙水圧分布が静水圧分布に近く、かつ正規圧密状態に近いことを指摘している⁵⁾。

このような地盤の特徴と(2)に示した地下水位変動経緯を踏まえると、東京周辺地盤での地下水位と地盤特性には、以下の特徴があり、地下水流动阻害が生じ地下水位が変動した場合、圧密沈下を検討することが重要である。

①東京層に代表される被圧地下水位は、場所にもよるが、過去に最大30m程度低下している。このことから、埋没谷や埋没波食台の東京層上部に存在する七号地層（沖積下部砂泥層）や有楽町層（沖積上部泥層）深部では、過去の地下水位の変動による先行圧密応力を受けていることが考えられる。

②有楽町層（沖積上部砂層）に代表される不圧地下水位は、長期的に、顕著な変動傾向は認められない。さらに、中村らの指摘⁵⁾をふまえると、有楽町層（沖積上部泥層、沖積上部砂層）上部の粘性土層は、正規圧密状態に近いことから、地下水位の低下によって圧密沈下が生じやすいと考えられる。

3. 地下水流動阻害が及ぼす影響事項

都市化が進行し、かつ環境保全に対する認識が向上してきている社会で、2.に示したような地盤に新たな地下構造物が地下水流动を遮断する状態で建設

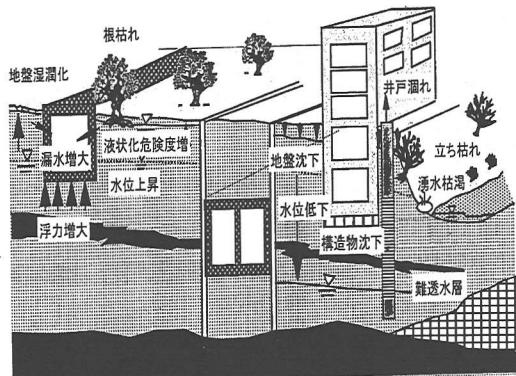


図-5 地下水流動阻害による地盤環境変化

されると、図-5に示すように、地盤環境および周辺環境等へ影響を及ぼすことが予想される。ここでは、この影響事項を社会への影響観点から生活環境と自然環境に区分し、懸念される影響現象について述べる。

(1) 生活環境

新設地下構造物によって地下水流动が阻害された場合、生活環境には、以下の事項が影響すると考えられる。

a) 地下水位低下に伴う影響

①圧密沈下が引き起こす既設構造物の損傷

新設地下構造物の下流側では、地下水位低下が原因で圧密沈下を生じ、周辺地盤に広域な地盤沈下が生じる。圧密沈下は、地下水位低下量が大きい新設地下構造物の近傍で大きく、離れるに従って減少する。このため、新設地下構造物に直交する方向に構造物の軸線を持つ直接基礎構造物では、不等沈下が懸念される。また、圧密沈下は、既設構造物を支持している杭にネガティブフリクション（負の周面摩擦力）を発生させるため、杭の耐力不足が懸念される。

②井戸涸れ

地下水位低下に伴い、周辺井戸の井戸能力低下や井戸涸れが生じる。この影響が生じる範囲は、地下水位が低下する全域となるが、新設地下構造物に近いほど影響が大きい。

b) 地下水位上昇に伴う影響

①揚圧力増加に伴う既設構造物の損傷

新設地下構造物の上流側では、地下水位が上昇し既設構造物の底面に揚圧力として作用し、浮き上がりや傾斜変形を発生させることが懸念される。近年上野駅等では、地下水位の回復に伴い、地下構造物の浮き上がり対策を実施しているように⁶⁾、直接基礎構造物では、大きな影響を受ける可能性が高い。また既設構造物の傾斜変形量によっては、漏水原因となる可能性がある。

②地盤の液状化

新設地下構造物の上流側では、地下水位の上昇に伴い、地震時に地盤の液状化が発生することが懸念される。対象となる地盤は、地下水位以下で飽和状態あり、締り具合が緩い砂質土層である。液状化が生じると、既設構造物の浮き上がり、沈下、転倒および側方流動等が生じる。液状化は、地下水位が上昇しやすい新設地下構造物近傍ほど生じやすい。

(2) 自然環境

新設地下構造物によって地下水流动が阻害された場合、自然環境には、以下の事項が影響すると考えられる。

a) 地下水位低下に伴う影響

①植生の根枯れ

新設地下構造物の下流側では、急激な地下水位の低下が生じると、植生の根枯れが生じることが懸念される。植生が根枯れるかは、地下構造物が建設される地点の気候や土の状態、地下水位変化量に左右されるが、湿地に適している植生がある場合、地下水位低下が大きい新設地下構造物近傍ほど生じやすい。また、緩慢な地下水位低下の場合、自然治癒力が働く場合もある。

②湧水および池涸れ

新設地下構造物の近傍に湧水および池がある場合、地下水位の低下に伴い枯渇が懸念される。地下水流动向が、構造物と直交している場合、影響が生じやすい。

b) 地下水位上昇に伴う影響

急激な地下水位上昇に伴い、地盤の湿潤化による植生の根腐れが生じることが懸念される。根腐れは根枯れと同様に気候等に左右されるが、乾燥に適した植生がある場合、影響が生じやすい。また、緩慢な地下水位上昇の場合についても、根枯れと同様に自然治癒力が働く場合もある。

4. 許容地下水位変動量の設定方法

新設地下構造物を建設する場合には、常に地下水流动阻害対策が必要となるのではなく、3.に示した事項等に対し影響が無ければ、地下水流动阻害対策が必要でなくなり、影響がある場合は、適切な対策が必要となる。本章では、この評価指標「許容地下水位変動量」の考え方と設定方法および地下水流动阻害対策の必要性評価への適用について述べる。

(1) 許容地下水位変動量の考え方

新設構造物の建設による直接的な現象は、図-6に

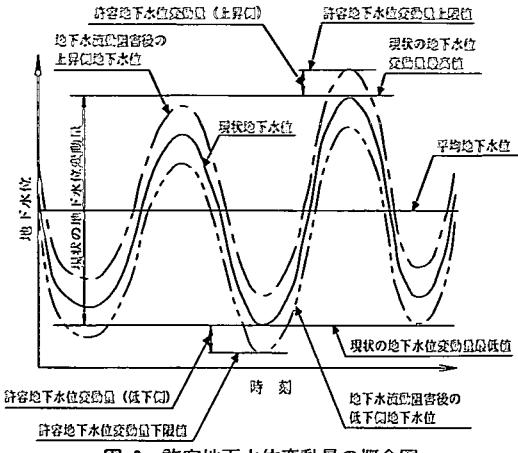


図-6 許容地下水位変動量の概念図

示すように、地下水流动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、降雨量、河川水位等の外的要因により時刻毎に変化している。また、図-3に示したように、地下水位は、揚水等の人工的な要因により地域毎に変化している。このため、地下水流动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を観測し、地下水位変動要因を把握し、現状の地下水位変動量を設定する必要がある。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³⁾。

3.に示した影響事項は、地下水位変動に伴う2次的な影響である。この影響が許容できる地下水位は対象とする生活および自然環境毎に地下水位変動基準値(上限値および下限値)がある。しかし、示方書等では、これらの影響事項に対して、明確な地下水位変動基準値を示していない。例えば、既設構造物に及ぼす影響を検討する場合には、現状地盤の圧密特性を考慮し、地下水位が低下した時、圧密沈下が既設構造物に影響を及ぼさない範囲で地下水位下限値を設定しなければならない。このため、地下水位変動による影響を評価する場合、各々の影響事項が許容できる地下水位変動基準値を設定しなければならない。

図-6に示す地下水流动阻害後の地下水位は、3.に示したように、多岐に影響を及ぼすことが予想される。しかし、従来の示方書等では、これらの影響事項の中で限られた事項(例えば、道路土工仮設構造物指針では、地下水位低下に伴う既設構造物への影響⁷⁾)しか規定されていない。また、地下水流动阻害による地下水位変動量が、多岐の影響事項に対して許容できる地下水位変動量を、定量的かつ明確に評価できる指標がなかった。このため、地下水流动阻害によ

る地下水位変動の影響を評価するためには、各々の影響事項の中で、最も地下水位変動基準値が小さくなる支配的な影響事項を明確にし、現状の地下水位変動量から許容できる地下水位変動量を定量的に評価できる指標が必要である。これが、図-6 に示す「許容地下水位変動量」である。この許容地下水位変動量を用いて地下水流动阻害の影響と対策の必要性を定量的に評価することができる。

(2) 調査と現状の地下水位変動量の設定

まず、許容地下水位変動量を設定するためには、地盤構造、地下水、生活および自然環境を調査し、影響事項の実態を把握し、現状の地下水位変動量を設定する必要がある。以下に、これらの調査と現状の地下水位変動量の設定に関する留意事項について述べる。

a) 地盤構造の把握

地盤構造は、地下水の流动性を考慮し評価することが重要である。このため、各帶水層の広がりと上下の連続性等について、地盤構造(地層構成、連続性)と地下水(地下水位、透水性)を十分に把握する必要がある。的確な調査深度や地層の広がり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、地盤沈下を引き起こすような軟弱な粘性土層や、地震時に液状化を引き起こす砂層の分布等の地盤特性(物理、強度、変形、圧密)を十分に把握する必要がある。

b) 地下水位の長期連続観測

地下水位は、数々の要因によって変動している。地盤調査で確認した地下水位は、あくまでも調査した時点での地下水位であり、変化することが十分に考えられる。さらに、地盤沈下が収束している地域では地下水位が回復する傾向を示す。このため、公的機関等による観測井や、対象としている地域に観測井を設置し、連続的に最低 1 年以上観測する必要がある。また、この観測結果の地下水位変動要因を把握するためには、降雨量や周辺の河川水位等の観測結果が必要である。

c) 生活および自然環境の調査

新設地下構造物による既設構造物への影響を評価する際、周辺の既設構造物の現況を把握する。地下水位の変化による既設構造物への影響量を把握する場合、既設構造物の基礎形式、平面形状や根入れ形状を調査するとともに、既設構造物の応力度計算書が必要である。また、航空写真と現地踏査や環境アセスメント報告書等を用いて、植生分布、湧水、井戸、泉池等の現状を調査する。この際、井戸は、2. に示したように地下水位変動に影響を及ぼすため、地方公共団体の保険所にある井戸台帳等を参考に、揚水状況

等も調査する必要がある。さらに、既設構造物の許容値は、上記調査結果や表-1 に示す各構造物の許容値等³⁾を参考として設定する。

d) 現状の地下水位変動量の設定

まず、前記に示した調査結果を基に、地形や環境および既設構造物状況等で分類し、土地利用区分毎に許容地下水位変動量設定範囲(以下、設定範囲と称す)を区分する。この設定範囲毎に、b) に示した地下水位観測結果を基に、地下水位が、最大どこまで変動したのか、地下水位変動量が、どの程度であるのか把握する。この際、降雨量等の外的要因や揚水等の人工的要因の中で、地下水位変動に及ぼす支配的な要因を調査し、地下水位変動特性も把握する³⁾。この結果を基に、設定範囲毎の平均地下水位、最高および最低地下水位を設定し、現状の地下水位変動量を設定する。

表-1 近接構造物の許容値³⁾

既設構造物		項目	許容値
用途	構造物		
鉄道 (JR)	新幹線高架橋 新幹線高架橋	相対鉛直変位	5mm 3mm
	高架橋 高架橋 高架橋橋台 架道橋台・橋脚	水平変位 鉛直変位 柱沈下量 柱相対沈下量	3mm 3mm 2.3mm
	橋台・橋脚	水平変位 沈下 傾斜	10mm 3分20秒
	軌道 軌道 軌道 軌道 トンネル 架道(くい基礎)	鉛直変位 傾斜 沈下・隆起 沈下・隆起 鉛直 水平	±10mm
	すい道	沈下	10mm 10mm
	すい道		±5mm
	陸橋(くい基礎)	水平変位 鉛直変位 沈下 不等沈下	10mm 30mm 13mm 8.7mm
	アーチ橋台	鉛直変位 水平変位	±50mm ±37mm
	橋脚(くい基礎)	傾斜 沈下 変位	±160 秒 ±17mm ±25mm
建築物	鉄骨鉄筋コンクリート 5F	沈下	5mm
	RC べた基礎地上 9F 地下 3F	沈下	5mm
	RC 直接基礎 ビル RC3F・4F	フーチング部 材角	1/300 ~ 1/500
	貨物ビル RC・8F	傾斜 標準値	±160 秒 15mm
	家屋	最大値 絶対沈下量 変形角 相対沈下量	30mm 20~30mm 1~2 × 10~3rad 22.5mm
東京電力	放水路トンネル	鉛直変位	+20 ~ -40
		沈下	20mm

(3) 許容地下水位変動量の設定方法

3. 示した影響事項を数値解析項目毎に整理すると、地下水位変動による影響は、以下の5事項となる。

- ①既設構造物への影響、②液状化、③井戸潤れ、
④湧水および池潤れ、⑤植生。

(2) 示した設定範囲毎の許容地下水位変動量はこの5事項に対して、以下に示す検討方法で得られた最も小さい許容地下水位変動量の上下限値と、現状の地下水位変動量(最高および最低地下水位)間の変動量である。

a) 地下水位上昇に伴う既設構造物への影響

図-7に示すが、地下水位が上昇すると地下構造物に作用する揚圧力が増加し、構造物の安定が損なわれる。表-1等を参考に設定した構造物の安定(浮き上がり)および不等傾斜角等の許容値を満足する地下水位が、許容地下水位変動量の上限値となる。

b) 地下水位低下に伴う既設構造物への影響

地下水位が低下すると、粘性土層は、圧密沈下し地盤沈下を起こし、既設構造物に影響を及ぼすことが懸念される。図-8は、粘性土の上部に不圧帶水層があり、下部に被圧帶水層がある場合の地下水位低下と間隙水圧の関係である。また、過剰間隙水圧と沈下量の関係を式(1)に示す⁹⁾。当初の間隙水圧を静水圧分布(AB)とすると、地下水位の低下に伴い粘性土層には、△ABA'、△ABB'あるいは□AB'B'A'の過剰間隙水圧が作用する。この過剰間隙水圧(ΔU_a)と

各粘性土層の有効土被応力(P_e)の合計が、圧密降伏応力(P_c)を超えると圧密沈下を発生させることになる。このため、既設構造物に影響を及ぼさない許容地下水位変動量の下限値は、表-1等を参考にして各構造物の沈下量や傾斜角を基に設定した許容沈下量に対し、式(1)を満足できる過剰間隙水圧の地下水位となる。尚、式(1)を用いる際、粘性土層の中間での過剰間隙水圧(ΔU_a)は、図-8(a), (b)で $1/2 \gamma_v \cdot \Delta h$ (γ_v :地下水の単位体積重量)となり、図-8(c)で $\gamma_v \cdot \Delta h$ となる⁹⁾。また、地盤の不均一性や既設構造物の重要度等を考慮し、適切な安全率を見込む必要がある。稻田は、数々の計測結果を基に統計処理し、地盤の不均一性等により、実測沈下量が計算沈下量に対して最大1.6倍程度まで、ばらつくことを指摘している¹⁰⁾。さらに、既設構造物の重要度に対する安全率である構造物係数は、1.2である¹¹⁾。例えば、各々の係数を考慮すると、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。

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

ここで、 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、 ΔU_a :過剰間隙水圧、 F_s :安全率、 γ_v :地下水の単位体積重量である。

c) 液状化

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の上限値とする。液状化的判定は、日本道路協会道路橋示方書等に示されている動的せん断強度比と地震時せん断強度比を用いた液状化抵抗率(F_L)を用いる。尚、液状化的判定は、液状化抵抗率(F_L)が1.0以下の場合液状化すると判定する¹²⁾。

d) 井戸潤れ

地下水位の低下に伴い、井戸潤れが生じる地域では、各井戸の構造を十分に調査する必要がある。図-9に示すが、一般に、家庭用井戸に用いられている真空ポンプ式井戸は、孔内地下水位(L)が地表面から5m以上になると揚水が困難になる¹³⁾。このため、この値を許容地下水位変動量の下限値とする。

また、図-9に示すが、工場等で用いられている深井戸(重力式)は、井戸と井戸内の水中ポンプから構成されている。深井戸の揚水可能能力は、重力式井戸集水可能流量 Q と井戸内水中ポンプ揚水量 q の最小値である。深井戸の許容地下水位変動量の下限値は、式(2)に示す重力式井戸集水可能流量 Q が井戸内水中ポンプ揚水量 q を下回らない値となる。尚、井戸

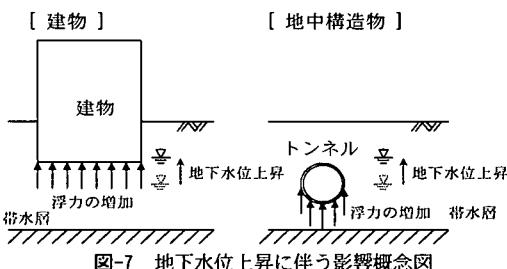


図-7 地下水位上昇に伴う影響概念図

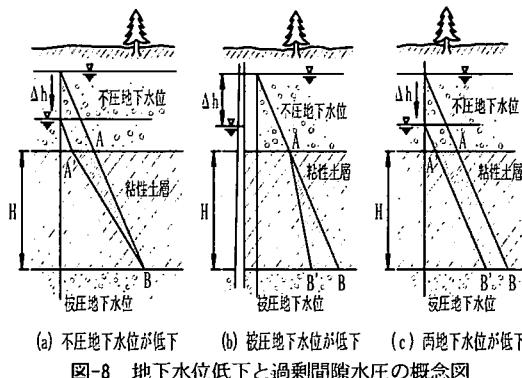


図-8 地下水位低下と過剰間隙水圧の概念図

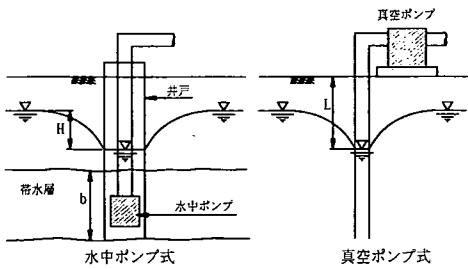


図-9 井戸構造の概念図

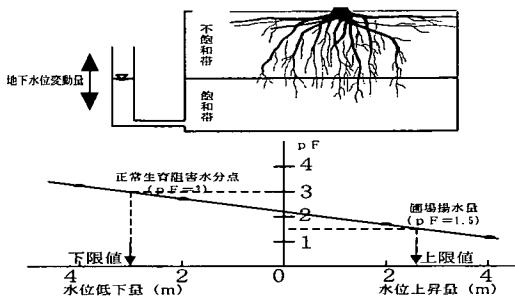


図-10 植生への影響評価方法概念図

内水中ポンプ揚水量 q については、井戸調査を実施し、改訂地下水ハンドブック等を基に水中ポンプ揚水量を設定する¹³⁾。この際、管路ロス ($f_s=2$) とポンプ目詰まりロス ($f_s=2$) を考慮する必要がある。また重力式井戸集水可能流量 Q では、井戸の目詰まりロス（井戸効率、 $f_s=2$ ）を考慮する必要がある¹³⁾。

$$Q = \frac{2 \pi k b H}{\ln(R/r_0) \cdot f_s} \quad (2)$$

ここで、 Q : 重力式井戸集水可能流量、 H : 井戸内水位差、 k : 透水係数、 R : 影響半径、 r_0 : 井戸半径、 b : 帯水層厚、 f_s : 井戸効率である。

e) 湧水および池涸れ

湧水あるいは池では、供給源となっている帶水層の水位が、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の下限値とする。

f) 植生

地下水位変動による植生への影響は、植物の種類、根の形状、根深さ等を調査し、土壤に対する湿乾の適応性および根の形状で分類し、根深さ位置での植物が利用できる含水比量の指標である pF 値によって評価する。この pF 値は、地下水位観測結果を基に、初期値として、図-10 に示す飽和帯と不飽和帯の境界を平均地下水位とし、地下水位変動量をパラメーターとした 2 次元非定常飽和-不飽和浸透流解析にて求められる。 pF 値は、不飽和帯の負の間隙水圧（サクション）の

常用対数である。この解析では、飽和帯を正の間隙水圧、不飽和帯を負の間隙水圧として求めることができることから、地下水位変動量に伴う不飽和帯の pF 値の変化を求めることができる¹⁴⁾。この解析結果を基に、許容地下水位変動量の上下限値は、根深さ位置での以下の示す pF 値を満足する地下水位となる¹⁵⁾。

① 許容地下水位変動量の上限値は、湿润による根腐れが生じない点を考え、根深さ位置での pF 値が 1.5 以下にならない地下水位とする。

② 許容地下水位変動量の下限値は、乾燥による根枯れ点を考え、根深さ位置での pF 値が 3.0 以上にならない地下水位とする。

(4) 地下水流動阻害対策工の必要性評価への適用

(2) に示した地下水位の調査結果を基に、新設地下構造物による地下水位変動量を解析にて求める。構造物の規模あるいは地形にもよるが、帶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、平面 2 次元、3 次元、準 3 次元浸透流解析の平面地下水流动状況が確認できる解析方法を用いる。この解析結果と設定範囲の許容地下水位変動量を比較し、地下水流动阻害対策の必要性を評価することができる。

5. 許容地下水位変動量の適用例と考察

図-1 に示す市街化された江戸川左岸部（市川市）の台地、埋没波食台および埋没谷の 3 地区で、著者らは 4. に示した調査の留意事項を踏まえ、地盤、地下水位観測および既設構造物等の調査を実施した。ここでは、この結果を基に、表-2 に示すような地下構造物が地下水流向と直交し、地下水流动阻害した場合について、4. に示した許容地下水位変動量を適用し、3 地区での支配的な影響事項と許容できる地下水位変動量を定量的に評価し考察する。

(1) 地盤条件

地盤調査結果を基に設定した各地域の地盤条件を表-2 に示す。地盤構成は、N 値 30 程度の締まった洪積層 ($D_{s1,2}$ 層) 上に、N 値 5 程度の緩い沖積砂層 (B_s および A_s 層) と沖積粘性土層 (A_p および A_c 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。特に、埋没波食台では、地層の堆積過程の特徴である腐植粘性土層 (A_p 層) が存在する。また、沖積粘性土層は、過圧密比 (OCR) が 1.1 から 1.5 程度で、中村らが指摘しているように¹⁶⁾ 正規圧密状態に近い粘性土である。一方、台地の洪積粘性土層 (D_c 層) は過圧密状態にある。

表-2 設定条件

		台地	埋没波食台	埋没谷
地盤構成				
平均地下水位	As層	—	GL-2.1m	GL-1.0m
	Ds ₁ 層	GL-10.2m	GL-0.3m	GL-2.1m
地盤条件	Ap層	—	C _c =5.3, P ₀ =30.0 P _c =32.5, OCR=1.08	—
	Ac層: P ₀ =151.8, P _c =546.4 OCR=3.60	Ac層: C _c =0.45, P ₀ =57.90 P _c =82.89, OCR=1.43	Ac層: C _c =0.36, P ₀ =100.70 P _c =115.70, OCR=1.15	—
環境条件	深井戸と桜	深井戸	深井戸	深井戸とケヤキ

注) P₀: 有効土被応力(kN/m²), P_c: 压密降伏応力(kN/m²), C_c: 圧縮指数, OCR: 過圧密比

表-3 地下水位観測結果

	台地	埋没波食台		埋没谷	
		Ds ₁ 層	As層	Ds ₁ 層	As, Bs層
観測最大最高地下水位(GL.m)	-9.9	-1.5	0.0	-0.4	-1.6
観測平均地下水位(GL.m)	-10.2	-2.1	-0.3	-1.0	-2.1
観測最大最低地下水位(GL.m)	-10.5	-2.6	-1.6	-1.3	-3.3
現状の地下水位変動量(m)	0.6	1.1	1.6	0.9	1.7

(2) 地下水条件と現状の地下水位変動量

a) 地下水条件

帶水層は、第一帶水層(台地 Ds₁層, 埋没波食台および埋没谷の Bs, As 層)が不圧地下水位で、第二帶水層(埋没波食台および埋没谷 Ds₁層)が被圧地下水位である。各帶水層の地下水位は高く、透水係数は 1×10^{-5} m/sec. 程度である。また、不圧地下水位は、2.に示したように降雨量との連動性が高い。

地盤調査の結果、各土層の間隙水圧は、ほぼ静水圧である。この結果は、2.に示した中村らが指摘している結果と同一である⁵⁾。このため、表-2に示す地下水流动阻害モデルによる圧密沈下解析では、各帶水層の地下水位低下に伴う各粘性土層の過剰間隙水圧分布を静水圧分布とする。さらに、この過剰間隙水圧分布形状は、台地の Ds₁層下部の Dc 層で図-8(a), As 層上部の Ap 層で図-8(b), 埋没波食台および埋没谷での As 層と Ds₁層間の Ac 層で図-8(c)となる。

b) 現状の地下水位変動量

本地区では、公的機関等による長期間の地下水位観測結果がないため、著者らが観測した図-4 および表-3に示す過去約4年間(1998~2001)の地下水位観測結果を基に、観測最大最高地下水位と観測最大最低地下水位間を現状の地下水位変動量とする。この変動量を表-3に示すが、不圧帯水層では約1.0m程度に対し、被圧帯水層では約1.6m程度と大きくなっている。さらに、観測平均地下水位(以下、平均地下水位と称す)と観測最大最低地下水位間の地下水位低下量も、不圧帯水層(約0.5m)に対して、被圧帯水層(約1.3m)が大きくなっている。この要因として、本地区の Ds₁層は、古くから深井戸による揚水対象層になっており、この影響と考えられる。

(3) 環境条件と許容値

検討した3地区は、いずれも市街化された住宅地で、既設構造物の主たる対象は木造建屋である。このため、既設構造物の許容沈下量は、表-2を参考に2.5cmとし、式(I)の安全率は2.0とする。また、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。

液状化の判定基準は、4.に示した液状化抵抗率(F_L)が1以下の場合、液状化するものとする。

また、井戸調査の結果、揚水対象土層は Ds₁層で、台地および埋没波食台で井戸径が80cm程度で、井戸の

ポンプ能力は $1.67 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{sec}$. 程度、埋没谷で井戸径が 100cm 程度で、井戸のポンプ能力は $3.33 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{sec}$. 程度である。

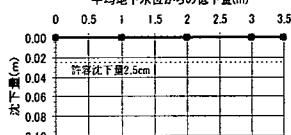
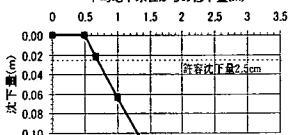
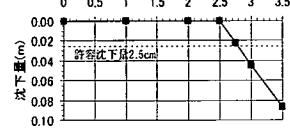
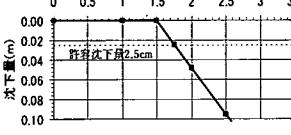
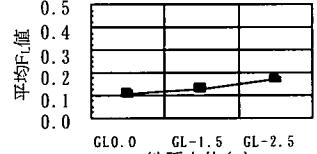
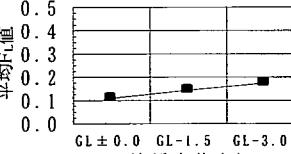
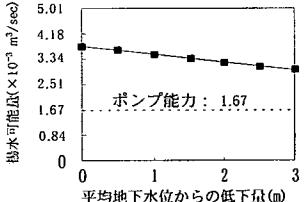
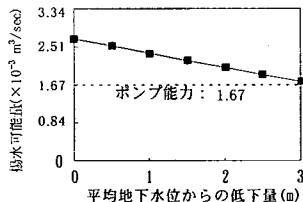
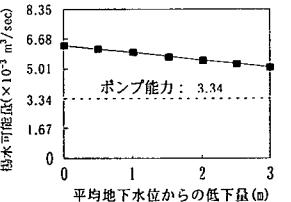
植生については、土壤の乾湿に適応性が高く、根深さが 2m 程度で幹径が 1m 程度の同一根形状の桜とケヤキがある。4. に示した解析方法での飽和および不飽和帯の境界は、表-3 に示す平均地下水位とする。また、地盤調査結果より、Bs および As 層の間隙率は 0.4、Ds₁ 層の間隙率を 0.35 とし、この値を基に、地下水水面の変動速度を表す比貯留量係数は、地下水ハ

ンドブックより $5 \times 10^{-5}/\text{m}$ とした¹⁰⁾。pF 値の照査位置は、根深さ位置 2m とし、植生の許容値は、4. に示した pF 値を用いる。

(4) 各事項の数値解析結果

(3) より数値解析が必要な事項は、地下水位低下に伴う既設構造物への影響、液状化、井戸涸れ、植生の 4 事項となる。表-4 は、これらの事項を 4. に示した方法を用いて、平均地下水位から地下水位変動量をパラメーターとした数値解析結果と各許容値を比較し

表-4 数値解析結果

		台地	埋没波食台	埋没谷
既設構造物への影響	不圧地下水位の低下	平均地下水位からの低下量(m) 	平均地下水位からの低下量(m) 	—
	地下水位低下層: Ds ₁ 層、圧密層: Dc 層	地下水位低下層: As 層、圧密層: Ap 層	—	—
液状化	不圧と被圧地下水位の低下	—	平均地下水位からの低下量(m) 	平均地下水位からの低下量(m) 
	—	地下水位低下層: As 層、Ds ₁ 層 圧密層: Ac 層	地下水位低下層: As 層 Bs 層、Ds ₁ 層 圧密層: Ac 層	—
井戸涸れ	—	平均 pF 値 	平均 pF 値 	—
	—	地下水位上昇層、液状化対象層: Bs, As 層	地下水位上昇層、液状化対象層: Bs, As 層	—
植生	深井戸	揚水可能量($\times 10^{-3} \text{m}^3/\text{sec}$) 	揚水可能量($\times 10^{-3} \text{m}^3/\text{sec}$) 	揚水可能量($\times 10^{-3} \text{m}^3/\text{sec}$) 
	地下水位低下層: Ds ₁ 層、揚水層: Ds ₁ 層	地下水位低下層: Ds ₁ 層、揚水層: Ds ₁ 層	地下水位低下層: Ds ₁ 層、揚水層: Ds ₁ 層	地下水位変動層、植生対象層: Bs, As 層
注) ■: 解析値		—	—	—

たものである。また、この結果から以下の事がわかる。

①地下水位低下に伴う既設構造物への影響

表-4 に示す平均地下水位からの地下水位低下量が圧密沈下量に及ぼす影響は、 D_{s_1} 層上部の Ac 層に比べ、As 層上部の Ap 層が大きいことがわかる。2. で示したように、不圧帶水層の地下水位は、長期的に顕著な変動傾向が認められない。このため、As 層上部の Ap 層には、過去に大きな地下水位低下に伴う先行圧密応力が作用していないためと考えられる。また、(2) に示したように、埋没波食台や埋没谷での平均地下水位からの観測最大最低地下水位間の地下水位低下量は、As 層に比べ D_{s_1} 層が深井戸の揚水対象層となっているため、 D_{s_1} 層の方が大きい。さらに、2. で示したように、場所にもよるが被圧帶水層は、過去に地下水位変動履歴を受けている。このため、 D_{s_1} 層上部の Ac 層には、揚水等による過去の地下水位低下に伴う先行圧密応力が作用していることが考えられる。互層の粘性土層を遮断する埋没波食台の場合、許容沈下量 2.5cm を満足するための平均地下水位からの地下水位低下量は、Ac 層の圧密沈下量に影響を及ぼす As および D_{s_1} 層では 2.7m であるのに対し、Ap 層の圧密沈下量に影響を及ぼす As 層では 0.7m となる。このため、As 層の平均地下水位からの許容地下水位変動量の下限値は、Ap 層に支配され 0.7m となる。また、平均地下水位からの D_{s_1} 層の許容地下水位変動量の下限値は、Ac 層の先行圧密応力に見合う地下水位低下量 2.5m となることがわかる。

②液状化

液状化対象層は、Bs および As 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、液状化対象土層の範囲は拡大しないことがわかる。

③井戸涸れ

井戸については、地下水位が 3m 程度低下しても影響が少ないことがわかる。

④植生

表-4 の植生は、非定常解析のため解析結果を直線近似したものである。土壤の乾湿に適応性が高い桜とケヤキでは、不圧帶水層の地下水位が 2m 程度上下に変動しても、植生に影響が少ないことがわかる。

(5) 許容地下水位変動量の設定と考察

表-2 に示すモデルの場合、表-3 と表-4 の結果より各帶水層毎の許容地下水位変動量の上下限地下水位は、表-5 のように設定される。また、表-6 に許容地下水変動量の設定値を示す。この結果から、以下のことがわかる。

①帶水層付近に沖積粘性土層がある場合、許容地下

表-5 許容地下水位変動量上下限値の設定値

	台地		埋没波食台		埋没谷	
	D_{s_1} 層	As 層	D_{s_1} 層	As, Bs 層	D_{s_1} 層	
現状の地下水位変動量	観測最大最高地下水位	-9.9	-1.5	0.0	-0.4	-1.6
	観測平均地下水位	-10.2	-2.1	-0.3	-1.0	-2.1
	観測最大最低地下水位	-10.5	-2.6	-1.6	-1.3	-3.3
地下水位上昇	既設構造物	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	液状化	—	0.0	—	0.0	—
	井戸涸れ	—	—	—	—	—
	植生	-7.9	—	—	0.0	—
許容地下水位変動量上限値	許容地下水位変動量上限値	-7.9	0.0	0.0	0.0	0.0
地下水位低下	既設構造物	過圧密のため影響なし	-2.8	-2.8	-2.7	-3.8
	液状化	—	—	—	—	—
	井戸涸れ	-16.2	—	-3.3	—	-8.1
	植生	-13.2	—	—	-5.0	—
許容地下水位変動量下限値	許容地下水位変動量下限値	-13.2	-2.8	-2.8	-2.7	-3.8

注) 単位 : GL.m

表-6 許容地下水位変動量の設定値

	台地		埋没波食台		埋没谷	
	D_{s_1} 層	As 層	D_{s_1} 層	As, Bs 層	D_{s_1} 層	
許容地下水位変動量(上昇側)	2.0	1.5	0.0	0.4	1.6	
許容地下水位変動量(低下側)	2.7	0.2	1.2	1.4	0.5	

注) 単位 : m

水位変動量下限値は、地下水位低下伴う圧密沈下による既設構造物への影響が支配的要因となっている。さらに、台地と埋没谷の不圧帶水層 (D_{s_1} 層、Bs および As 層) の許容地下水位変動量(低下側)を比較すると、表-5 に示すように、変動量は、粘性土の圧密特性に大きく影響を受けていることがわかる。

②平地である埋没波食台や埋没谷では、許容地下水位変動量上限値は、既設構造物の安定(浮き上がり)が支配的要因となっている。このため、現況の地下水位にもよるが、許容地下水位変動量(上昇側)の設定では、既設構造物の安定条件が重要であることがわかる。

③粘性土層が互層に構成されている埋没波食台の場合、不圧帶水層(As 層)の許容地下水位変動量下限値は、不圧帶水層(As 層)上部の粘性土層(Ap 層)の圧密状態に影響を受け、観測最大最低地下水位に近い値となっている。また、埋没波食台地区での被圧帶水層 (D_{s_1} 層) の許容地下水位変動量(低下側)は、不圧

帯水層(As 層)に対して変動量が大きい。この要因として、粘性土層の圧密状態にもよるが、2. に述べたように過去の地下水位変動経緯による先行圧密応力が大きく影響しているためと考えられる。

④植生や井戸涸れ等については、沖積粘性土の圧密特性や地盤と地下水位の関係にもよるが、本地区では、既設構造物への影響要因よりも影響が小さいことがわかった。

以上のことを考慮すると、許容地下水位変動量を用いて、新設地下構造物による地下水流动阻害の影響を評価する場合、構造物の深さと帯水層遮断量にもよるが、帯水層の地下水位変動経緯と地下水位変動量、粘性土の圧密特性および既設構造物の安定条件に最も留意する必要があることがわかる。また、許容地下水位変動量は、地下水流动阻害による地下水位変動に対して、地盤および周辺環境等に及ぼす支配的な影響事項を定量的かつ明確に評価できることもわかる。

6. まとめ

本論文では、まず東京周辺地盤構造と公共地下水位観測結果を基に、経時的な地下水位変動と地盤の特徴を示した。次に、このような地盤に地下構造物が、地下水流动阻害する場合の地盤および周辺環境に及ぼす影響事項を述べた。この結果を基に、新設地下構造物建設に伴う地下水流动阻害による地下水位変動量が、地盤および周辺環境等に及ぼす影響を定量的に評価できる指標、「許容地下水位変動量」について提案し、江戸川左岸部(市川市)に適用し考察した。この結果は、以下のとおりである。

(1) 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等に及ぼす影響事項を評価できる指標「許容地下水位変動量」を提案し、設定方法を示した。さらに、本指標が、支配的な影響事項を定量的かつ明確に評価できることを、江戸川左岸部(市川市)に適用し示した。また、本指標と新設構造物による地下水位変化の解析結果を比較することで、地下水流动阻害対策の必要性を定量的に評価することができる。

(2) 江戸川左岸部(市川市)で、本指標を用いて検討した結果、許容地下水位変動量は、既設構造物への影響が支配的要因として設定された。また、各帶水層の許容地下水位変動量下限値は、帯水層付近の粘性土層の圧密状態に影響を受けていることがわかった。さらに、植生や井戸への影響は、既設構造物への影響よりも影響が小さいことがわかった。

(3) 許容地下水位変動量を用いて、新設地下構造物による地下水流动阻害の影響を評価する場合、構造物の深さと帯水層遮断量にもよるが、帯水層の地下水位変動経緯と地下水位変動量、粘性土層の圧密特性および既設構造物の安定条件に最も留意する必要があることがわかった。

本評価手法は、建設地点で入念な調査(地盤の力学および圧密特性、自然環境、生活環境、経時の地下水位観測)を行って初めて可能となる。特に、許容地下水位変動量設定事項を的確に判断するためには、過去の地下水位変動経緯、現状の地下水位変動量を十分に把握する必要がある。このためには、建設地点での長期間にわたる地下水位観測が益々重要であることがわかる。

謝辞: 本研究を行うにあたり、観測結果や試験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、東京都、千葉県の地盤および水文特性については、東京都土木技術研究所杉本隆男技術部長および千葉大学理学部佐倉保教授に御指導を賜った。観測データの整理では、(株)ダイヤコンサルタント杉野康博氏に御協力頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)貝塚爽平: 東京の自然史, pp. 148-161, 紀伊国屋書店, 1979.
- 2)東京都土木技術研究所: 平成12年地盤沈下調査報告書, pp. 15, 東京都土木技術研究所, 2000.
- 3)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.
- 4)最新軟弱地盤ハンドブック編集委員会: 土木・建築技術者のための最新軟弱地盤ハンドブック, pp. 471-473, 建設産業調査会, 1982.
- 5)中村正明, 中山俊雄: 有楽町層と七号地層の土質工学特性, 平成10年都土木技研年報, pp. 223-234, 東京都土木技術研究所, 1998.
- 6)奥石逸樹: 新小平駅および上野駅の地下水上升に伴う変状および対策事例, 構造物と地下水に関する事例講習会講習資料, pp. 1-13, 地盤工学会, 1998.
- 7)日本道路協会: 道路土工仮設構造物工指針, pp. 58, 日本道路協会, 2000.
- 8)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.
- 9)河野伊一郎: 地下水工学, pp. 134-135, 鹿島出版会, 1990.

- 10) 稲田信穂: 軟弱地盤の土質工学・予測と実際, pp. 113-114, 鹿島出版会, 1994.
- 11) 地盤工学会: 地盤工学ハンドブック, pp. 465, 地盤工学会, 1999.
- 12) 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.
- 13) 地下水ハンドブック編集委員会: 改訂地下水ハンドブック, pp. 1428, 建設産業調査会, 1999.
- 14) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠: 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文集, No. 264, pp. 87-96, 1977.
- 15) 東山勇, 石田朋靖: pF の基本的意味 (その2), 土と基礎, pp. 346-347, 1986.
- 16) 地下水ハンドブック編集委員会: 地下水ハンドブック, pp. 76, 建設産業調査会, 1979.

(2003.1.10. 受付)

A STUDY OF ALLOWABLE FLUCTUATION FOR GROUNDWATER FLOW PRESERVATION SYSTEM

Makoto NISHIGAKI, Toru KISANUKI, Seiji NODA
and Yuji WATANABE

For large-scale underground linear structure construction projects, environmental impacts such as subsidence are major problems to be solved. So, when a project is planned and conducted, quantitative analysis method for the effects is inevitable. Also, an engineering assessment method for groundwater preservation system based on the analysis is required. In this paper, a systematic method to evaluate groundwater preservation system is proposed. This design method employs Allowable Fluctuation of Groundwater Level and allows comprehensive quantitative evaluation of impacts such as effect to existing structures and environmental impacts to underground and surface.