

総説 掘削地盤安定に関する諸問題

赤木 寛一*

1. まえがき

過日の新聞記事に、昨今はやりの「スキーム」やら「アカウンタビリティ」などの、お役所文書に多く見られる英語言葉の評判が、あまり芳しくないことが報じられていた。皆がその言葉を自分と同じように理解をしているものと考えて話を進めていたところ、実は他の人は全く違うことを考えていたというのはよくある話である。

本特集号では、掘削地盤の安定のうち特に開削工事に伴うボイリング，ヒービング，盤ぶくれの発生とその対策が取扱われている。これらの現象は、いずれも掘削工事の安全と、周辺環境に密接に関連する問題なので重要である。筆者に割当てられたこの特集号での役割は、これらの現象を表わす用語の定義を明らかにすることであった。ここでは、これら地盤の掘削にかかわる現象の発生メカニズムをもとに個々の現象の定義を述べ、それらの地盤工学的問題点について概説する。

2. ボイリング，ヒービング，盤ぶくれの定義

先頃、発刊された土木用語大辞典(土木学会，1999)によると、「ボイリング」，「ヒービング」，「盤ぶくれ」個々の用語は、それぞれ次のように定義されている¹⁾。

「ボイリング」(boiling)：水の上向き浸透力により、地盤が支持力を失って吹き上がり崩壊する現象。上向き浸透力が土の水中重量を上回ると、土は見かけ上無重力状態になる。このとき粘着力のない砂粒子が水中に浮遊することで生じる。

「ヒービング」(heaving)：粘性土地盤の開削において、土留め壁の背面の土が根切り底部から回り込んで掘削地盤底面が押し上げられる現象。土留め壁の倒壊や背面地盤の陥没が起き、事故につながる。掘削面の下方の被圧帯水層からの揚圧力が原因で掘削底面が膨れ上がる現象は盤ぶくれと呼んでいる。

「盤膨れ(ぶくれ)」(heaving)：トンネル掘削や開削工事において、応力開放、地盤の強度不足や膨張などにより坑道底盤や根切り底面地盤が膨れ上がる現象の総称。ヒービングという場合もある。主な原因には、掘削部の上載荷重の除去、降雨による地盤強度の低下、

土留め工の根入れ深さ不足、被圧地下水や浸透水圧の上向き揚圧力の作用、風化頁岩・蛇紋岩・温泉余土等の膨張地圧があり、過大変形や崩壊の発生をもたらすことがある。軟弱地盤上の盛土施工時に、すべり流動破壊によって起こる側方地盤の押し出し隆起をさすこともある。

これらを並べてみると、ボイリングは他の二つの現象とは明らかに区別されているが、ヒービングと盤ぶくれについては、同じ現象を違う用語を用いて表現している場合も見られる。

一方、土木学会トンネル標準示方書(開削工法編)・同解説(土木学会，1996)では、表-1に示すように、これら3種類の現象がパイピング現象と合わせて、概念図とともに明確に区別して定義されている²⁾。

土木用語辞典とトンネル標準示方書の定義を比較すると、用語辞典の「盤膨れ」の一部が山岳トンネルで古典的に用いられてきたトンネル底部地盤の流動破壊に基づいて定義されている点で、標準示方書の定義との混乱を生じているように見える。開削による掘削工事に伴う掘削底部の地盤破壊を考える場合には、トンネル標準示方書の定義に伴うのが適切と考えられる。

3. 掘削底面の安定計算に関する問題点

表-1に示されるような地盤工学的現象に関する概念図は、土質力学の教科書にも多く登場し、各種の示方書などの設計基準等にも頻繁に引用される。その結果として、これらの概念図に基づいて奥行き方向には同じ幾何学的形状、境界条件を仮定して二次元断面について安定計算を行うことになる。ところが、実際の掘削工事で奥行き方向に十分長い距離にわたって同一の形状、境界条件を有するような工事条件は、あまり多くないことに考えを致す必要がある。

たとえば、図-1は最近の地盤工学会誌『土と基礎』に報告された、ある橋梁の橋脚施工に当って計画された河川内の仮締切工の平面図と側面図である³⁾。仮締切工幅と奥行きはともに10m程度である。この現場で、設計上はボイリングに対する安全率を1.5以上確保していたにもかかわらず、ボイリングが発生して仮締切内部が水

*AKAGI Hirokazu 早稲田大学 理工学部 土木工学科 教授，工博 | 東京都新宿区大久保3-4-1

没した。

ボーリングに対する代表的な検討方法は、図-2²⁾に示すようなテルツァーギの方法が用いられることが多い。この方法のキーポイントは、掘削底部地盤に向かって流れる浸透流による過剰間隙水圧 U の評価である。過剰間隙水圧の大きさを決定するためには流線網を描く必要があるが、テルツァーギの方法では、便宜的に締切壁内外水位差の半分に相当する水圧を過剰水圧 U として用いている。

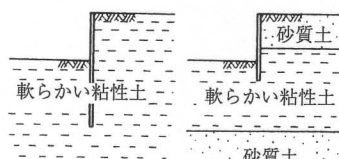
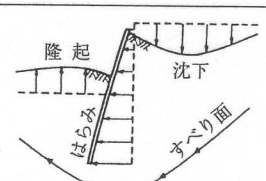
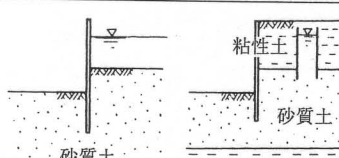
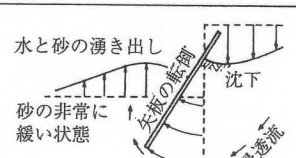
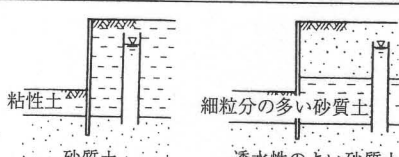
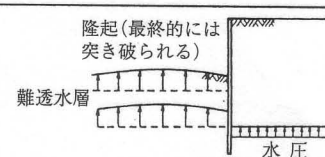
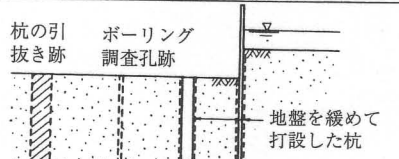
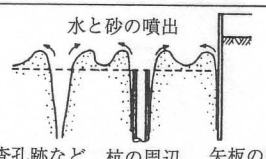
図-3(a), (b), (c), (d)は、この仮締切工のボーリング検討を行うために、有限要素法で求められた各種の幾何学的・水理学的境界条件における等ポテンシャル線の分布を示したものである。図-3の(a)は、図-2の概念図に相当する二次元平面条件、(b)は半径5.2mの円形仮締切を想定した軸対称条件、(c), (d)は実際の矩形状仮締切について三次元条件で計算されたものである。

図-3(a)は二次元条件での仮締切壁下端における等ポテンシャル線上の全水頭 $h=0.4H$ (H :水位差)であり、テルツァーギの方法の過剰水圧に対応しており、おおむね妥当でかつ安全側である。これに対して、図-3(b)の軸対称条件では $h=0.6H$ 、図-3(c), (d)の三次元条件では $h=0.7H$ であり、掘削底部地盤における等ポテンシャル線間隔は二次元の場合よりも小さく詰んでいて明らかに危険側である。

以上を要するに、地下水浸透に基づくボーリングによる掘削底面の安定計算を行う場合には、二次元計算では掘削底面に対する外力に相当する水圧分布が、安全側の値を与えないことに留意して、実際の幾何学形状、境界条件を十分考慮した軸対称、または三次元計算を行う必要がある。

これに対して、ヒービングで

表-1 掘削底面の破壊現象²⁾

分類	地盤の状態	現象
ヒービング	 <p>掘削底面付近に軟らかい粘性土がある場合、主として沖積粘性土地盤で、塑性・含水比の高い粘性土が厚く堆積する場合。</p>	 <p>土留め背面の土の重量や土留めに近接した地表面荷重などにより、すべり面が生じ、掘削底面の隆起、土留め壁のはらみ、周辺地盤の沈下が生じ、最終的には土留めの崩壊に至る。</p>
ボーリング	 <p>地下水位の高い砂質土の場合、土留め付近に河川、海など地下水の供給源がある場合。</p>	 <p>遮水性の土留め壁を用いた場合、水位差により上向き浸透流が生じる。この浸透圧が土の有効重量を超えると、沸騰したように湧き上がり、掘削底面の土がせん断抵抗を失い、土留めの安定性が損なわれる。</p>
盤ぶくれ	 <p>掘削底面付近が難透水層、水頭の高い透水層の順で構成されている場合、難透水層には粘性土だけでなく、細粒分の多い砂質土も含まれる。</p>	 <p>難透水層のため上向き浸透流は生じないが、難透水層下面に上向き水圧が作用し、これが上方の土の重さ以上となる場合は掘削底面が浮き上がり、最終的には難透水層が突き破られ、ボーリング状の破壊に至る。</p>
パイピング	 <p>ボーリング、盤ぶくれと同じ地盤で、水みちができやすい状態がある場合、人工的な水みちとして上図に示すものがある。</p>	 <p>地盤の弱い箇所細い土粒子が浸透液によって洗い流され、土中に水みちが形成され、それが順次上流側に及び、粗い粒子をも流し出し、水みちが拡大する。最終的にはボーリング状の破壊に至る。</p>

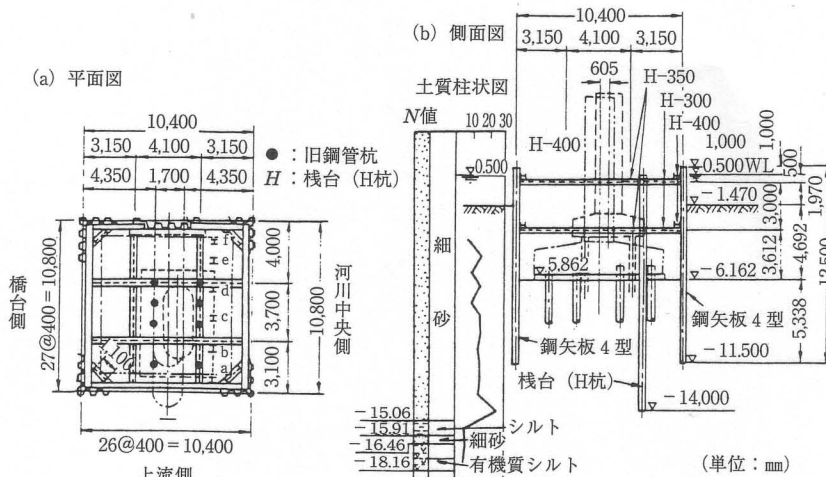
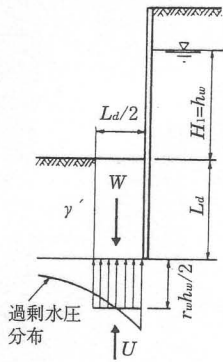


図-1 第一新川橋 P1 橋梁³⁾



$$F_s = \frac{W}{U} = \frac{2\gamma' \cdot L_d}{\gamma_w \cdot h_w} \geq 1.2 \sim 1.5$$

ここに、 F_s : 安全率
 W : 土の有効重量
 U : 平均過剰間隙水圧
 γ' : 土の水中単位体積重量
 γ_w : 水の単位体積重量
 L_d : 根入れ長
 h_w : 水位差

図-2 ボイリングの検討法 (テルツァーギの方法)²⁾

は三次元幾何学形状や境界条件を考慮すると、奥行き方向に存在する地盤土の支持効果があるので、地盤土の流動変形に伴って掘削底面に作用する外力は低減される。すなわち、二次元計算の方が安全側になるので、ボイリングのような心配は比較的少ない。また、盤ぶくれでは被圧地下水による揚圧力を測定することが可能なので、上記のボイリングのような水圧計算上の困難さを回避することができる。

4. まとめ

この総説では、ボイリング、ヒービング、盤ぶくれの用語を定義し、特にボイリング検討時には、問題の幾何学的形状、境界条件を考慮して、二次元浸透流解析では

不十分で、簡便な軸対称または三次元解析を行う必要があることを示した。

建築構造物については、昨年6月に改正された建築基準法に基づいて、性能規程型の設計法が実務に取入れられつつある。土木構造物についても、道路橋示方書をはじめとして性能規程化に向けて準備が進められている。

問：性能規程型設計の勘所は何か？

答：構造物の必要性能の把握と達成性能の照査である。

問：構造物の必要性能を説明・把握し、その達成性能を照査するための勘所は何か？

答：実際に構造物に起こるであろう現象の正しいシナリオを書き、そのシナリオに基づく適切なシミュレーションを行えることである。

これを実行するためには、地盤構造物に実際に起こるであろう現象が二次元で十分カバーできるのか、三次元性が大事な要因になるのかを正しく適切に把握することが、従来以上に要求される。これが土木工学、地盤工学の流れであり、生残りの必要条件である。

[参考文献]

- 1) 土木学会：土木用語大辞典，技報堂出版，1999年2月。
- 2) 土木学会トンネル工学委員会：トンネル標準示方書（開削工法編）・同解説，p.120，1996年7月。
- 3) 三浦均也，今福守，古川美典，長澤正明：仮締切り内における浸透流による地盤のボイリング破壊，土と基礎，Vol.47-4，No.495，pp.7-10，1999年4月。

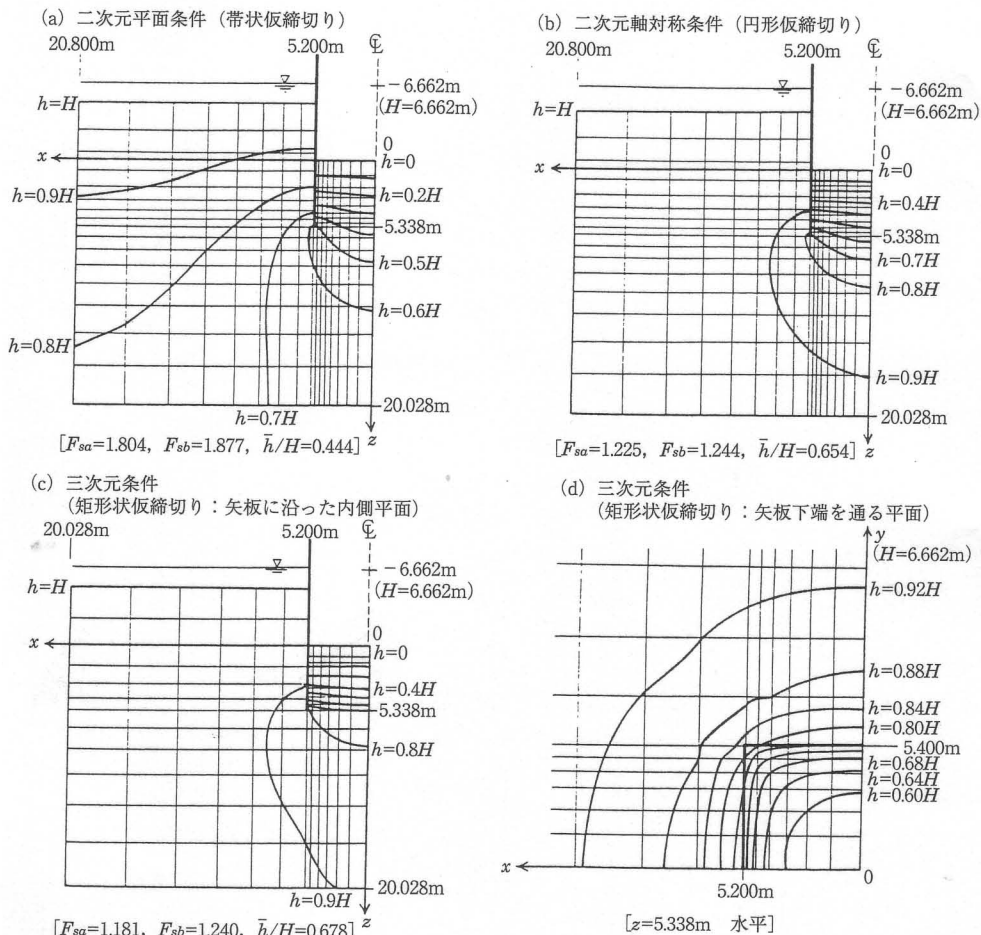


図-3 有限要素法によって得た第一新川橋P1橋脚仮締切りにおけるポテンシャルの分布³⁾