

(32) 軟岩の山留め掘削時における
ハイドロリックフラクチャリングに対する検討
A Study on a Hydraulic Fracturing Phenomenon of Softrocks during Earth Retaining Excavation

津田勝利・福浦尚之・山本 平
Katsutoshi TSUDA, Naoyuki FUKUURA and Taira YAMAMOTO

This paper describes the examination method of hydraulic fracturing of softrocks using stress-flow coupled analysis. In this method, safety factor of hydraulic fracturing is calculated from minimum principal stress and tensile strength of soft rocks.

This method is applied for earth retained excavation using cylindrical diaphragm wall. During excavation, some data such as pore pressure, displacement of wall, etc. are measured. And Young's modulus and permeability are calculated by the inverse problem approach after finishing the excavation. From this analysis, it is proved that softrocks is not disturbed by the excavation. Therefore, this method is considered to be efficient.

1.はじめに

ハイドロリックフラクチャリング（以下、H.F.とする）は、地盤の間隙水圧が最小主応力と引張強度の和以上に増大した部分において引張亀裂が発生する現象である¹⁾²⁾。従来より、石油・天然ガス等の採取の通路を広げるために岩盤に亀裂を作る方法、地盤の初期応力の測定方法などに利用されているが、これらは間隙水の流れにより発生する浸透力が小さい場合であり、全応力に基づく解析手法により検討が行なわれている。

山留め掘削の場合には、掘削により地盤の応力が解放され、山留め壁の内外の水位差により浸透流が生じることから、地盤の有効応力・間隙水圧分布が複雑に変化する。この際、間隙水圧が地盤の最小有効主応力と引張強度の和を越える場合には、間隙水圧による引張亀裂が生じることが懸念される。

山留めとしての円形の連続地中壁（以下、連壁とする）の施工においては、完成後も遮水壁としての機能を期待することがある。この場合、連壁は施工時にその機能を発揮すればよい仮設構造物とは異なり、本設構造物となるため、連壁の長期的な止水性の確保が必要となる。こうした連壁は一般には難透水層に根入れをするが、止水性確保のためには連壁だけでなく、難透水層自身の健全性も要求されることから、難透水層の健全性の評価が必要となる。

本稿では、軟岩地山での山留め掘削時の浸透破壊メカニズムの一つとして想定されるH.F.について、有効応力による安全性検討方法を示すと共に、実際の山留め掘削工事に対して、本手法を用いた事前検討にて安全性の確認を行った結果を示す。また、本手法の有効性を示すものとして、掘削時における各種計測結果から、逆解析により変形係数や透水係数を

* 正会員 大成建設（株）土木設計第二部地下タンク設計室

**正会員 大成建設（株）技術研究所土木構造研究室

同定し、難透水層の透水性が掘削により乱されることなく、かつ十分な遮水性をもつ連壁の施工を行なったことを確認した結果を示す。

2.H.F.に対する安全性検討方法³⁾

H.F.とは、ボーリング孔の中に水を入れて圧力をあげた際に、その圧力が土中の側方応力と土の引張強度の和より大きくなったときに生じる現象について付けられた名称である。その検討手法は、図-1に示す様に、ボーリング孔内に圧力をかけた際の水圧Pが地盤の初期最小主応力 σ_3 （全応力）と引張強度 t の和より大きくなったときに、H.F.が発生するというものである。従来のH.F.に対しては、こうした全応力による検討手法を用いているが、今回の山留め掘削のような定常浸透流が生じている問題に対しては、浸透力を考慮した有効応力解析を行ない、図-2に示すように、最小有効主応力 σ_3 による引張強度 t への接近度で安全率を算出し、安全性の検討を行なう方が、全応力状態での最小主応力に基づく方法よりも破壊に対する意味が明確となるため、より適切と考えられる。

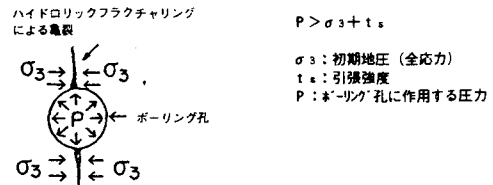


図-1 ボーリング孔内の水圧によるハイドロリックフラクチャリング¹⁾

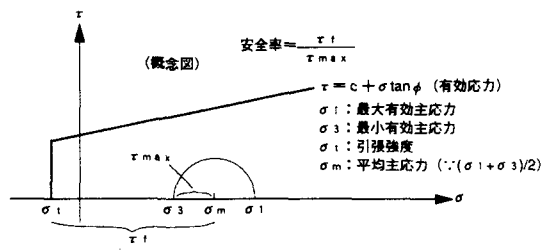


図-2 安全率概念図

これより、最小有効主応力の引張強度への接近度で安全率を求め、検討を行うものとする。

本検討手法による安全性評価基準としての所要安全率（S.F.）の設定においては、軟岩におけるクラックの存在の有無が、引張強度や透水係数のバラツキをもたらす為、それらを考慮する必要があるが、調査・試験からクラックの有無を明確にするのは困難なため、本検討においては以下に示す2通りの方法にて行なうものとした。

- 1) 軟岩健全部を想定し、引張強度 t を考慮する方法
- 2) 軟岩に潜在クラックがある場合を想定し、引張強度 t を0とする方法

この時、所要安全率としては、1)の場合には地下発電所や地下備蓄の実績²⁾に準じ、S.F.=1.5とし、2)の場合には引張強度を0とすることによりかなりの安全性が見込まれることから、S.F.=1.0を用いることとした。

こうした安全性検討手法を用いて、円形山留めに適用した結果を以下に示す。

3.検討条件

3.1 検討対象

検討は、連壁を用いた円形山留め掘削を対象とした。連壁構造概要を図-3に示す。本連壁は遮水壁としての機能が要求される本設構造物である。

対象地盤は地表面より埋土層、沖積層、洪積層であり、その下に軟岩層（土丹層）が続いている。掘削は半径24m、深さ約37m、連壁は壁厚1m、長さ約70mで、軟岩層へ10m根入れしている。

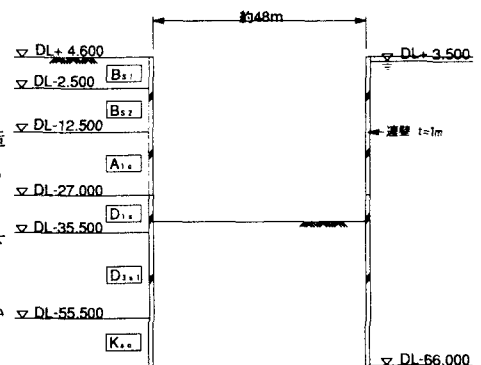


図-3 連壁構造概要

3.2 検討方法

検討は掘削床付け時について行なうものとし、掘削の速さに対して、非定常浸透流の影響が少ないと考えられることから、定常浸透流状態について行なう。解析方法は、有限要素法により、掘削土の有効重量の解放力と定常浸透流状態での浸透力を掘削による外力の変化と考えた軸対称有効応力-浸透流連成解析を行なうものとした。また、連壁と地盤の間にはジョイント要素を設け、摩擦による滑りを考慮するものとした。摩擦係数の値は、連壁と地盤間に介在する泥膜を考慮した実験により適切な値を設定するものとした。地盤の不飽和特性はvan-Genuchtenの式を用い、一般的な値を設定した。図-4に解析モデル図を、表-1に解析に用いる材料定数および摩擦係数を、表-2にvan-Genuchtenの不飽和特性を示す。また、解析ステップを表-3に示す。

表-1 解析に用いる材料定数

土層	単位体積重量 (tf/m ³)	変形係数 (Kg/cm ²)	ポアソン比	透水係数 (cm/sec)	連壁と地盤との摩擦係数	
B ₁	埋土層	1.95	40	0.3	7.0×10 ⁻⁶	0.25
B ₂	埋土層	1.80	30	0.3	9.0×10 ⁻⁷	
A ₁	沖積層(粘)	1.65	80	0.4	8.5×10 ⁻⁸	
D ₁	洪積層(砂)	1.90	400	0.3	4.0×10 ⁻⁶	
D ₁₁	洪積層(砂)	1.92	1000	0.3	2.2×10 ⁻⁶	
K ₁	軟岩層	1.75	4400	0.4	5.0×10 ⁻⁶	0.65
連壁		240	3.1×10 ⁵	0.2	5.0×10 ⁻⁶	—

表-2 van-Genuchtenによる不飽和特性

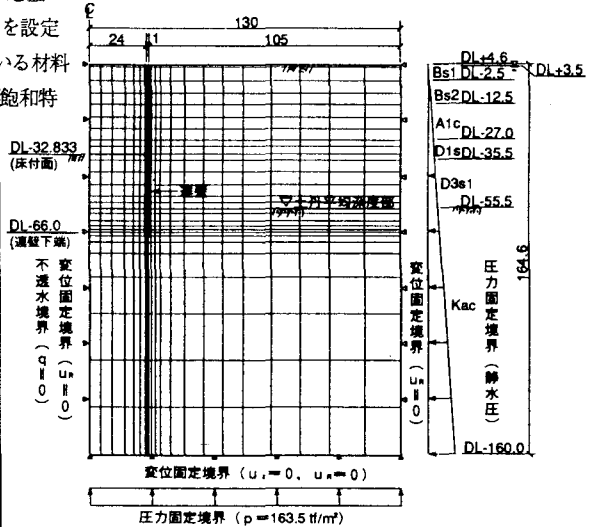
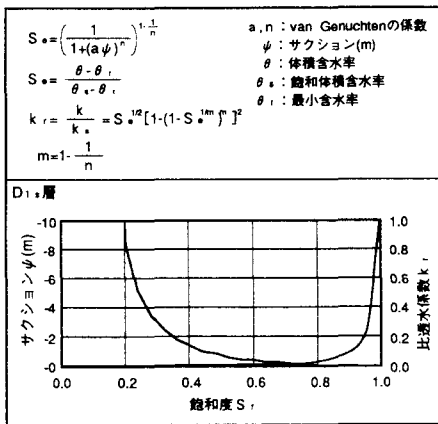


図-4 解析モデル

表-3 解析ステップ

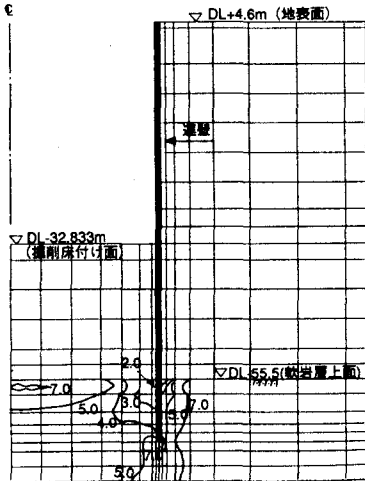
ステップ	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4
模式図				
解析内容	自重解析により地圧状態を定める。	連壁(連水壁)を構築	内部水位を低下	床付け位置まで掘削

4. 検討結果

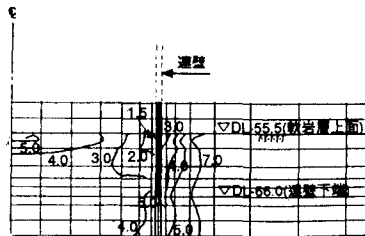
解析により得られた地盤の有効応力から、先述の方法により安全率を算出した。引張強度を考慮する方法では、 $\sigma_t = 15 \text{ tf/m}^2$ として検討を行った。安全率分布図を図-5に示す。これより、軟岩の引張強度を考慮した場合としない場合の両方共、安全率の最小値は軟岩層上面の連壁付近で現れたが、所要安全率を満足し、掘削時にはH.F.に対して安全性を有することがわかった。本検討結果を踏まえ、内部掘削を行なった。その際、間隙水圧や土圧、連壁の応力を計測し、その計測結果を用いて、床付け完了時点でのシミュレーションを行い、物性値の同定を行った結果を以下に示す。

5.掘前後シミュレーション結果

連壁の円周方向軸力、間隙水圧、ディーブウエル揚水量、および変位のシミュレーションを行ない、地盤物性値のうち変形係数と透水係数について、同定を行った。揚水量、および間隙水圧のシミュレーション結果を図-6, 7に、同定した地盤の変形係数および透水係数を表-4に示す。間隙水圧分布およびディーブウエル揚水量は計測結果とよく一致しており、粘性土層の間隙水圧および浸透力が解析によりうまく表現できたものと考えられる。また、同定された土丹および連壁の透水係数は、設計時に設定した最小クラス程度の透水係数であり、揚水量も非常に少なかった。このことから、土丹についてはH.F.が生じておらず、掘削前の透水性を乱すことなく掘削を終了したと考えられ、連壁についても設計時に設定した透水係数程度の止水性の高いものが施工できたと考えられる。



1) $\sigma_v = 15 \text{ tf/m}^2$ (F.S.=1.5)



2) $\sigma_v = 0 \text{ tf/m}^2$ (F.S.=1.0)

図-5 検討結果 (安全率分布)

表-4 地盤の変形係数及び透水係数同定結果

土層	変形係数 (kg/cm ²)		透水係数 (cm/sec)	
	設計値	同定結果	設計値	同定結果
B ₁	40	160	7.0×10^{-4}	7.0×10^{-4}
B ₂	30	320	8.7×10^{-7}	8.7×10^{-7}
A ₁	80	400	8.5×10^{-8}	8.5×10^{-8}
D ₁	400	1600	4.0×10^{-4}	1.6×10^{-3}
D ₂	1000	4000	2.2×10^{-4}	3.3×10^{-4}
K ₁	4400	18000	5.0×10^{-6}	1.0×10^{-5}
連壁	—	—	5.0×10^{-8}	3.0×10^{-8}

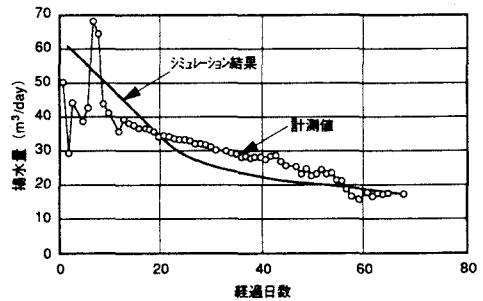


図-6 揚水量シミュレーション結果

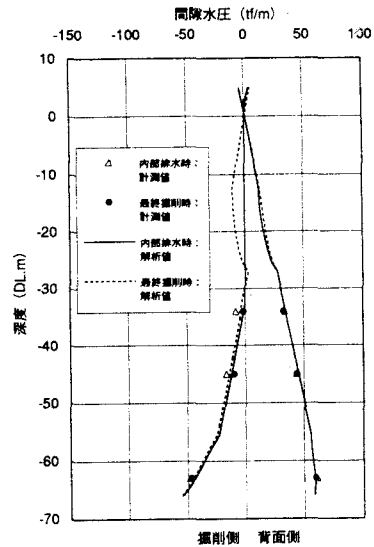


図-7 間隙水圧分布シミュレーション結果

6.まとめ

本稿では、山留め掘削時における軟岩のH.F.に対する検討手法として、有効応力解析を行ない、有効最小主応力の引張強度への接近度で検討を行う方法を示した。また、本手法を実際の山留め掘削工事の事前検討に適用し、安全性を確認の上掘削を行った。その際、各種計測データを収集し、掘削後にシミュレーション解析を行った結果、軟岩の健全性を保ち、かつ止水性の高い連壁を施工出来たことが確認された。このことから、本検討手法の有効性が示された。しかしながら、H.F.が発生しなかった事が本検討手法の妥当性を示すものとは言い切れず、今後更なるデータの蓄積を行ない、本検討手法の妥当性を示してゆくことが課題である。

7.参考文献

- 1)仲野良紀：ダム築造によるパットメント部における亀裂の発生について、第10回ダム技術講演討論会、日本ダム会議、pp23-31、1978
- 2)中川加明一郎：ハイトロックフラクチャリング、地質と調査、pp.49-52、1995年第一号
- 3)福浦尚之他：掘削時の軟岩におけるハイトロックフラクチャリングに関する検討方法について、土木学会第50回年次学術講演会
- 4)「岩盤タンクの安全性確保に関する調査報告書」、土木学会、危険物保安技術協会、昭和61年9月
- 5)樋口雄一他：地下連続壁と地盤間に介在する泥膜のせん断強度および附着強度特性、土木学会第50回年次学術講演会
- 6)「根切り工事と地下水」土質工学会