

(4) 土槽を用いたボルトの引き抜き試験

フジタ工業 (株) 技術研究所 正会員 望月 美登志 福島 伸二
同 上 同 上 香川 和夫

Pull-out Test of Bolt by Model Sand Box

Yoshitoshi Mochizuki, Shinji Fukushima, Fujita Corporation
Kazuo Kagawa, Fujita Corporation

Abstract

In order to investigate the way to evaluate reinforcement of bolt, pull-out tests of bolt which normal stress and shear stress on the face of bolt can be measured are performed. The results of pull-out test are given below.

- 1) Reinforcement of bolt is total frictional stress on the face of bolt.
- 2) As normal stress changes very much during test, special attention should be paid to determine the normal stress in design.

1. まえがき

これまで未固結な砂質地山に NATM 工法を適用する際に採用されるボルト系の補助工法の補強効果を模型試験によって調べてきた。その結果、ボルト系の補助工法の補強メカニズムがボルトと地山との間に発生する摩擦によるものであることがわかり、その摩擦による補強力を考慮にいられた設計法について提案を行ってきた。ここではトンネル掘削時に地山の伸び方向に打設したボルトの補強効果をボルトの引き抜き試験によって再現し、ボルトの補強力 T の算定法について検討した結果について報告する。

2. 試験方法

本研究に用いた試験装置はボルトを二次元化 (アクリルプレート) した (図-1) 土槽、大型三軸試験機 (図-2) およびねじり単純せん断試験機を利用した装置 (図-3) である。

土槽は長さ 1m、幅 20cm、高さ 60cm で、側壁がアクリルできており、砂中にマーカーやラインをいれることによって引き抜き中の砂の動きが読み取れるようになっている。ボルトは二

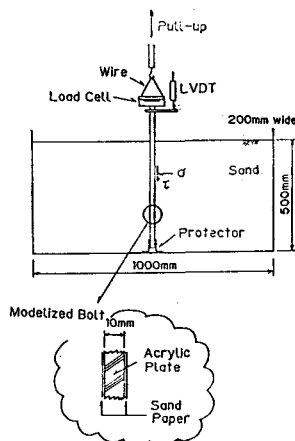


図-1 引き抜き試験装置

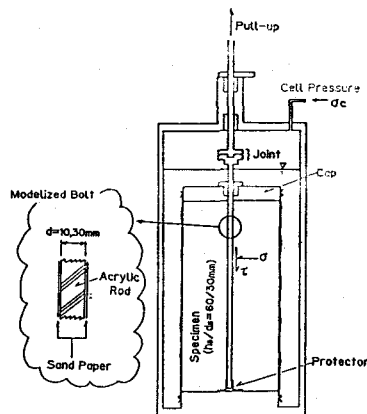


図-2 大型三軸試験機

次元的にモデル化したアクリルプレート（長さ65cm，幅20cm，厚さ1cm）で，その表面に摩擦を発揮させるため紙やすり（AA-44）をアルダイトで付着させた。また，土槽におけるボルトについてはボルトの引き抜き中にボルト表面での垂直応力およびせん断応力が変化する可能性が高いので，ボルトの内部に二成分ロードセルを組み込み（深さ10cm，25cm，40cmの位置），垂直応力およびせん断応力を測定した。なお，土槽および大型三軸試験機を用いた引き抜き試験の試験方法の詳細は参考文献¹⁾を参照してほしい。図-3の装置についてはねじり単純せん断装置のトルク載荷を利用している。同試験は外径6cm，高さ10cmのアクリル円柱と内径10cm，高さ10cmのアクリル円柱の間に豊浦標準砂を自由落打法で投入して供試体を作製した。アクリルと砂の間は摩擦除去のためシリコングリースを均等な厚さで薄塗りしたメンブレンをつけた。外側のアクリルにつけられたメンブレンには砂の変形を読み取れるようにマーキングを行っている。同試験はねじり単純せん断試験に用いる上部キャップのポーラストーンの部分に紙やすりで置き換え，これをねじることによって砂と紙やすりの摩擦を求めるものである。垂直応力 σ_v はおもりで加えている（ $\sigma_v = 0.2, 0.5, 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ ）。同試験は平面ひずみ状態で垂直応力 σ_v 。一定の条件でボルトを引き抜くことに相当する。

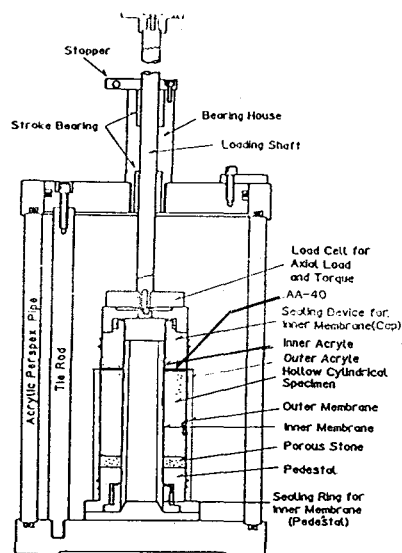


図-3

ねじり単純せん断試験機

3. 試験結果

これまでの研究においてはボルトの引き抜き力Pによって補強力Tが表現できるという仮定のもとでこの引き抜き力に影響を及ぼす諸要因（ボルトの挿入長，挿入間隔，表面の摩擦等）について調べてきた。

ここでは既報で提案した算定法の適用性を調べるため，2で述べたような二成分ロードセルを用いて引き抜き時のボルト表面での垂直応力およびせん断応力を測定した結果を中心に述べる。まず同試験の精度および信頼性を確認する意味で図-4に引き抜き前の試料準備完了時点での垂直応力から求めたK値（ $= \sigma_{n0} / \sigma_{v0}$ ）を示す。同図よりK値は0.3前後で落ち着いており，データは信頼性のあるものと考えられる。次に紙やすりAA-40を用いた場合のボルト表面での垂直応力 σ_n と引き抜き量 δ の関係とせん断応力 τ と引き抜き量 δ の関係を図-5，図-6に示す

（ $e=0.712$ ， $n=1$ ，ロードセルの設置位置：深さ $h=10, 25, 40 \text{ cm}$ ）。同図より $h=25$ および 40 cm の場合においては，引き抜き量 δ の増加にともない， σ_n ， τ ともに増加して， $\delta=2 \sim 3 \text{ mm}$ でピークをむかえ，これ以降 σ_n ， τ ともに急激に低下することが分かる。 $h=10 \text{ cm}$ の場合には上記の傾向は認められなかった。ボルトの表面での応力の変化の傾向をわかり易く示したのが図-7の応力経路（ τ ， σ_n ）である

（深さ $h=25 \text{ cm}$ ）。またボルトの表面での応力 τ および σ_n より求めた内部摩擦角 ϕ （ $\tan^{-1} (\tau / \sigma_n)$ ）と引き抜き量 δ の関係を図-8に示す。同図より $h=10$

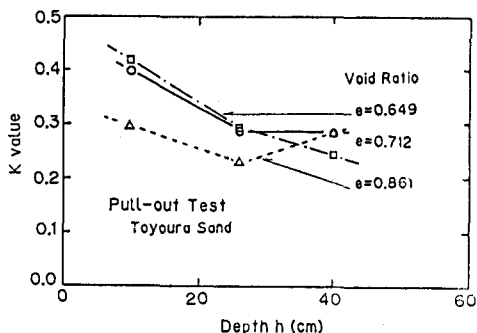


図-4

試料準備完了時点でのK値

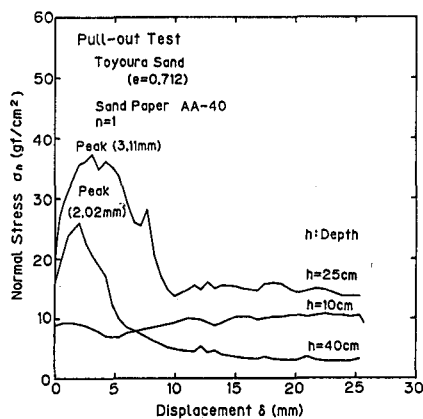


図-5

垂直応力の変化

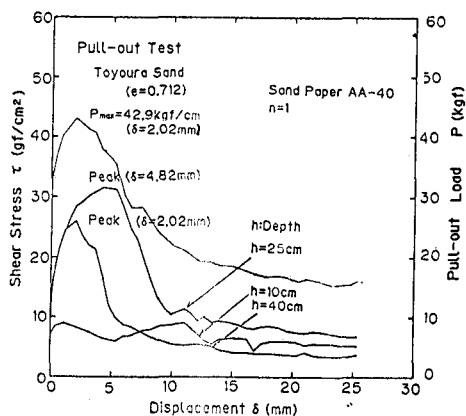


図-6

せん断応力の変化

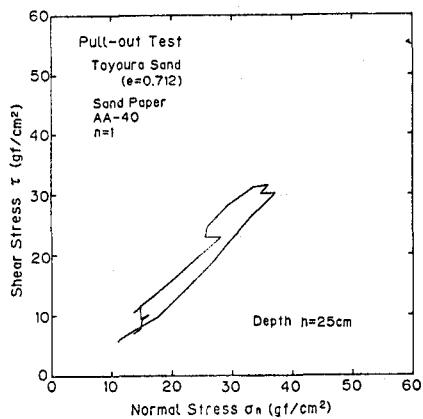


図-7

応力経路 (τ , σ_n)

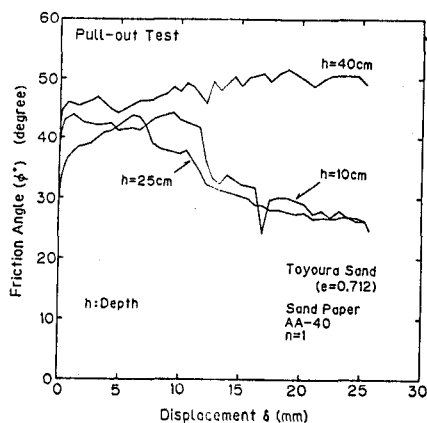


図-8

引き抜き中の内部摩擦角 ϕ

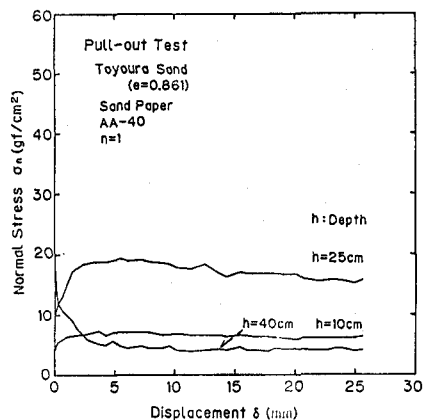


図-9

垂直応力の変化

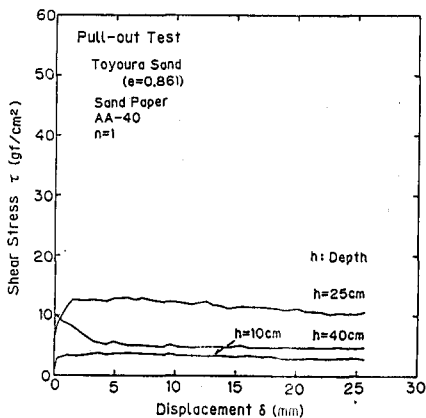


図-10

せん断応力の変化

、25cm においては内部摩擦角 ϕ は引き抜き量 δ の増加にともない上昇し、約43° 程度でピークをむかえ、減少する。 $h=40\text{cm}$ の場合、上昇の傾向がいったんストップしてからまた徐々に大きくなる傾向にあった。

内部摩擦角 ϕ に関しては引き抜き初期の段階で38°～46°、残留強度の状態では30° 程度と考えられる。ボルトの引き抜き中に垂直応力 σ_n がまず増加し、その後減少するという傾向はボルト表面における砂のダイレタンシーの影響であると考えられる。このことを顕著に示すのが図-9～図-12までの垂直応力-引き抜き量、せん断応力-引き抜き量の関係であろう。図-9、10は砂の密度が緩い場合、図-11、12は砂の密度が密な場合である。砂の密度が緩い場合においては σ_n 、 τ の初期の上昇が図-5、6の場合よりも小さく、 $h=25\text{cm}$ の場合においては逆に減少している。砂が密な場合には、 σ_n 、 τ の初期の上昇の傾向がはっきり表われている。砂の密度が緩い場合にはボルトから受けるせん断力によって負のダイレタンシーを生じ、これによって地盤の水平抵抗力が減少する。砂が密な場合には、正のダイレタンシーが生じ、水平抵抗力が増加するために上述のような結果になったものと考えられる。いずれにせよ砂質地山をNATM工法で掘削するような場合には極端に地山が緩いというケースは考えにくい。また σ_n が減少するような大変形のケースはトンネル掘削では考えられない（崩壊してしまう）ので、 σ_n は地山の初期の拘束圧の値から上昇の傾向をたどるものと考えられる。

4. ボルトの補強力算定方法への適用

本研究の目的は既報で仮定した補強力Tの式に対して、引き抜き試験の結果を適用し、補強力Tを具体的に算定できるようにすることである。本研究では図-13に示されるようなトンネル掘削において、土の伸び方向に打設された斜めボルトや鎮止めボルトの摩擦による補強効果を引き抜き試験によって再現できるものと仮定しているが、これが本当に成立するためには摩擦応力の合計であるTと引き抜き荷重Pが等しくなければならない。そこで図-6に示したボルトの表面でのせん断力の結果より、引き抜き荷重Pが最大の $P_{\max}$ の時のボルトの各位置でのせん断応力の分布を求め（図-14）、こ

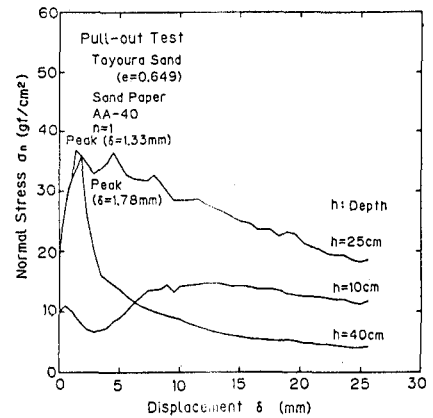


図-11
垂直応力の変化

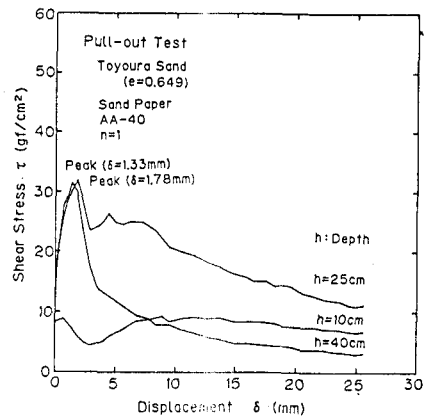


図-12
せん断応力の変化

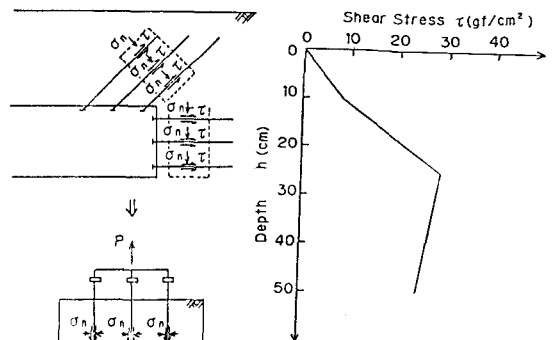


図-14
せん断応力の分布

図-13

モデル化したボルトの引き抜き試験

れから求めた $P(\tau)$ ($=2 \cdot w \cdot \int \tau dz$: w はボルトの幅)と引き抜き荷重 P_{max} を比較してみた。同試験において $P_{max} = 42.9 \text{ kgf}$ で、せん断応力より計算した荷重 $P(\tau) = 40.66 \text{ kgf}$ とほぼ等しい。実際の引き抜き状況を観察するとボルトを中心に左右12cm程の範囲で砂が1cm程盛り上がり砂自身のせん断が生じているようではあるが、上記の計算より $P=T$ としても問題はないと考えられる。次に算定式を適用する際に問題となるのが τ の変化 (σ_n , および ϕ の変化) である。3で述べた本試験結果よりボルトの表面に作用する垂直応力 σ_n はボルトの引き抜きに伴って変化することが分かった。また垂直応力 σ_n の変化と同じようにせん断応力 τ が変化するわけではなく、 ϕ も変化することが分かった。そこで垂直応力 σ_n , ボルトと地山との間の摩擦角 ϕ についても適用条件を考えてみる。まず垂直応力 σ_n について、図-15に各密度の場合における初期垂直応力 σ_{n0} と最大垂直応力 σ_{nmax} の比 $\sigma_{nmax}/\sigma_{n0}$ を求めてみた。同図より $\sigma_{nmax}/\sigma_{n0}$ は平均して2程度と考えられる。したがって垂直応力 σ_n は初期垂直応力 σ_{n0} を用いれば安全ではあるがより効率的な設計を行なうためには十分検討する必要がある。摩擦角 ϕ については σ_n 一定条件で τ をを求める必要がある。そこで前述の大型三軸試験機とねじりせん断試験機を用いて、 σ_n 一定条件引き抜き試験を行った結果を図-16に示す。二つの試験は応力条件の違いから結果に差が認められる。大型三軸試験については特に低拘束圧領域で τ が大きいようである。傾きについては大型三軸試験の結果がねじり試験の場合の約1.36倍である。土槽の引き抜き試験結果から求められる応力比は平均値で0.78~1.04 ($\phi=38 \sim 46^\circ$, $\delta=1 \sim 9 \text{ mm}$) で、上記の試験結果の範囲内にある。したがって図-16で得られた結果は使用上問題はないと考えられる。応力状態の再現性や低拘束圧での結果を考え、ねじり試験の結果を採用すると大型三軸試験を用いた場合においては、得られた結果(応力比)に係数をかけて使用することになる(今回の場合係数は0.7程度となる)。

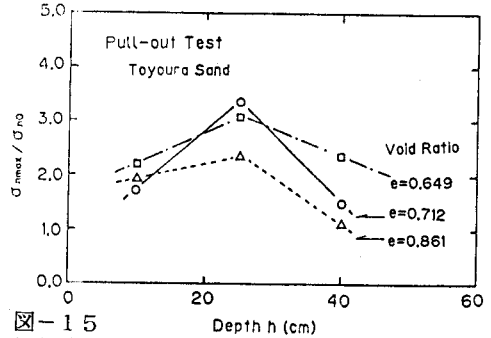


図-15 初期垂直応力 σ_{n0} と最大垂直応力 σ_{nmax} の比

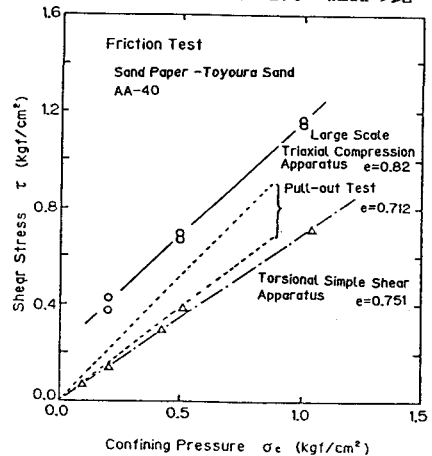


図-16 σ_n 一定条件引き抜き試験

5. 結論

ボルトの引き抜き試験の結果によりボルトの補強力の算定法について以下のようにまとめた。

- (1) ボルトによる補強力 T は、ボルト周辺に作用する摩擦応力の合計とする。
- (2) ボルトの摩擦力を求める際に必要となるパラメータのうち摩擦角 ϕ は従来の方法から求められる値を用いることが可能である。垂直応力 σ_n については変化率が大きいのでその適用については十分検討が必要であろう。

参考文献

- 1) 望月, 福島, 香川: 都市NATMにおけるボルトの地山補強効果, 第24回土質工学研究発表会, 1989.