

鋼管膨張型ロックボルトの力学的メカニズムに基づく 作用効果と適用性について

EFFECTS AND APPLICATIONS BASED ON MECHANICAL MECHANISM OF WATER-EXPANDED STEEL BOLTS

中川光雄*・太田英将**

Mitsuo NAKAGAWA and Hidemasa OHTA

Water-expanded steel bolts have been generally used in Europe and U.S.A. The only reason which has not been used in Japan lies in the problem of corrosion of bolts. This time, the plating of high corrosion resistance (ZAM) is newly developed. So, water-expanded steel bolts are available as permanent-structures and expansion of utilization is expected in future. In this paper, the pull-out tests are carried out so as to obtain the behavior of pulling-out. Moreover, numerical analyses which simulate the test are carried out so as to clarify any mechanical mechanism in the test and to consider effects and applications of the bolts. Expression of large deformation of rock masses is required in the numerical method which is used here. So, finite difference method, which is especially proposed by Cundall, is applied because it is well expressed plastic flow and large-strain.

Key Words: water-expanded steel bolt, pull-out test, pull-out strength, finite difference method, confining pressure

1. はじめに

鋼管膨張型ロックボルトは、欧米では一般的に使われてきた工法¹⁾である。国内では、トンネル施工時のロックボルトとして、主に湧水が多くグラウト注入の困難な箇所において少量使われていたにすぎない。国内であまり使われていなかった原因は腐食に対する問題と考えられる。この鋼管膨張型ロックボルトに対して、新しく開発された高耐食性メッキ ZAM (亜鉛-アルミニウム-マグネシウムメッキ) を用いて、長寿命化を実現させたため、いわゆる永久構造物としての利用が可能となり、今後の適用の拡大が期待される²⁾。鋼管膨張型ロックボルトは、図-1 に示すように、折り畳んだ鋼管製のチューブの状態 ($\phi 36.0\text{mm}$) で削孔 ($\phi 42\text{mm}$) 内に挿入後 (図-1 (a))、高圧水で拡張 (最大 $\phi 54.0\text{mm}$) する (図-1 (b)) ことでボルトの周囲の地盤に密着させる (図-1 (c)) 補強原理を有する工法である。ここで、

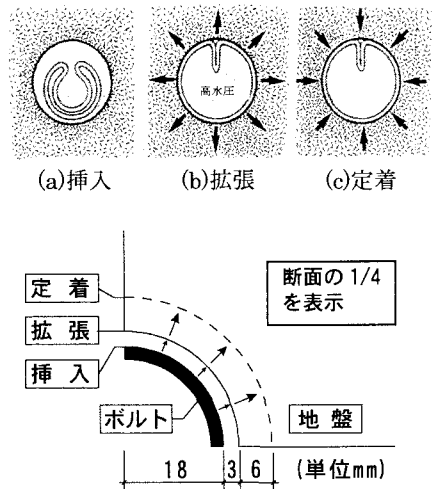
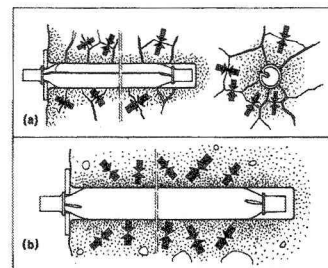


図-1 鋼管膨張型ロックボルト工の打設過程

*正会員 博士 (工学) 株式会社 地層科学研究所 取締役大阪事務所長

**正会員 有限会社 太田ジオリサーチ 代表取締役

図一2に示すように、対象となる地山が不連続性岩盤の場合（図一2 (a)）は、主にインターロッキングの増強効果が期待される。また、地山が軟岩など連続体とみなせる場合（図一2 (b)）は、外周部の締め固めによる強度増加の効果が期待される。この工法の大きな特徴としては、グラウトを使用することなく削孔→挿入→拡張の非常に短い工程でロックボルト工を完成させることができ、かつ、材料が低コストである点が挙げられる。



図一2 期待される作用効果

本研究では、鋼管膨張型ロックボルトの力学的メカニズムに基づいた作用効果と適用性を明らかにする目的で室内試験と数値解析を実施した。まず、地山強度の相違が引抜き耐力にどのように影響を与えるかを調べるために、室内引抜き試験を実施した。ここでは、一軸圧縮強度の異なる4種類の人工地盤を作成し、図一1に示す順序で鋼管膨張型ロックボルトを打設定着させた。その後、荷重張力と引抜き変位の関係を計測によって得た。次に、試験で得られた引抜きの傾向を力学的メカニズムの面から考察するために、数値解析により試験の再現シミュレーションを実施した。最後に、試験および数値解析から得られた情報に基づいて、地山強度に対する鋼管膨張型ロックボルトの適用性を考察した。

2. 引抜き試験

鋼管膨張型ロックボルトは、岩盤に対しては非常に強い摩擦力を持つことが知られている¹⁾。しかし、土砂に対しては摩擦力という観点から効果が小さいものと推察される。そこで、地盤強度の相違による引抜き挙動の相違を確認するために、室内にて引抜き試験を実施した。試験装置は全5基で、写真一1に示す直径1m、高さ1.2mの円柱型タンクに砂とセメントを混合した人工地盤材料を1mの高まで充填してこれを供試体とした。ここで、セメントの配合は1m³あたりのセメント量とする。セメント混合土よりテストピースを採取して一軸圧縮試験を行っており、セメント混合割合と一軸圧縮強度を表一1に示す。鋼管膨張型ロックボルトの注入スリーブが有する引張強度（120kN）を越えてしまうと摩擦力の測定が不能となるため、本試験用に80cmの有効長をもつボルトを製作し、図一1に示した手順で引抜き試験を実施した。

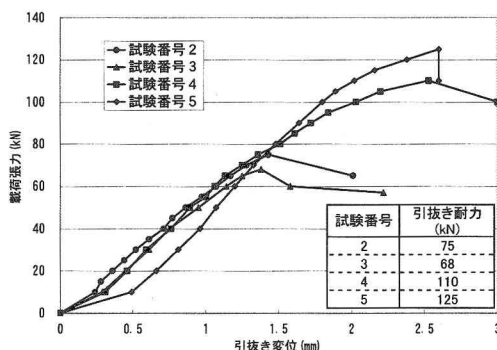


写真一1 試験装置

表一1 供試体の仕様

試験番号	セメント量 (kg/m ³)	一軸圧縮強度 (kN/m ²)
1	0	56
2	50	1273
3	75	1448
4	100	1607
5	150	2527

試験結果として、荷重張力ー引抜き変位の関係、および、引抜き耐力を図一3に示す。これより、引抜き挙動は概ね弾完全塑性的な傾向を示し、ピーク強度に到達してもその後の大きな強度低下は見られない。このことは、引抜き挙動がピークを越えても引抜き耐力が機能し続けていることを示唆しており、注入グラウトの破壊等により急激な強度低下が見られる一般のグラウト施工によるボルトに対して優位であると考えられる。



図一3 荷重張力ー引抜き変位の関係

3. 引抜き試験シミュレーション

試験からは、グラウト施工によるボルトに対して優位と思われる引抜き挙動が得られたが、この現象を力学的見地から考察したい。そこで、試験における削孔、挿入、拡張、引抜きの各過程を数値解析で再現することにより、発生している力学的メカニズムの把握を試みた。数値解析では、削孔径より小さいボルトを挿入した後、拡張の過程でボルト表面が削孔面に対して非接触な状態から接触状態に移行し、さらに地盤を押し出す大変形挙動³⁾を表現できることが要求される。また、引抜き耐力を明確に得るため耐力の限界後も载荷を続ける必要があり、ボルト表面と地山との間の接触面に発生する大きな相対変位、あるいは、ボルト周辺地盤のせん断降伏による塑性流動を再現することも要求される。これらの点を考慮すると、解析手法は降伏後の大変形挙動が安定的にシミュレートできる数値解析法の1つであるCundallらが開発した有限差分法 (FLAC3D コード)⁴⁾を適用することが妥当と判断した。

モデル化においては、供試体が円筒形であり拡張、引抜きの载荷方向を考えると軸対称体と見なすことができる。軸対称解析でも十分可能であるが、ここでは3次元挙動をよりビジュアルに再現するためあえて3次元解析を実施した。解析モデルは、図-4に示すように円柱供試体の1/4モデルとした。人工地盤材料は、Mohr-Coulomb 降伏条件式に基づく弾完全塑性体と仮定し、表-2に示す物性値を適用した。また、ボルト壁面と人工地盤との定着面は、図-5に示す接触時より有効となる不連続面の力学モデルを適用し、その物性値を表-3に示す。ここで、摩擦角は概略値として文献⁵⁾に基づき決定した。図-6に、初期応力状態を再現する自重解析の後の削孔から引抜き直前までのボルト打設のプロセスを示す。ボルトの挙動は、ボルトを構成する全節点に一樣な変位を逐次的に与えることにより表現したため、本解析ではボルト本体に発生する応力は表現していない。

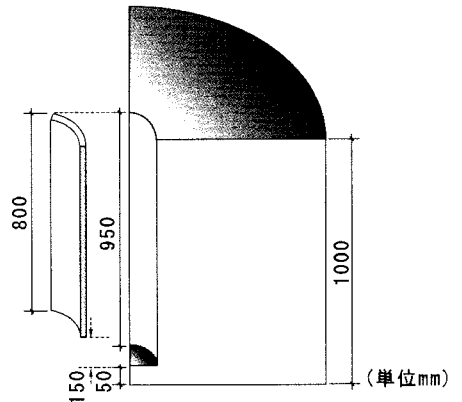


図-4 解析モデル(1/4 をモデル化)

表-2 供試体 (人工地盤) の物性値

試験番号	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	密度 ρ (kg/m ³)	粘着力 c (MPa)	内部摩擦角 φ (deg)
2	160.0	0.3	1680.0	0.346	30.0
3	200.0	0.3	1750.0	0.404	30.0
4	300.0	0.3	1760.0	0.462	30.0
5	550.0	0.3	1780.0	0.720	30.0

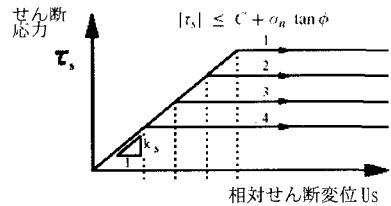


図-5 定着面の力学モデル

表-3 定着面の物性値

垂直剛性 kn (MPa/m)	せん断剛性 ks (MPa/m)	粘着力 c (MPa)	摩擦角 φ (deg)
1.0×10^5	1.0×10^5	0.0	10.0

(*)土とコンクリートの壁面摩擦角 φ/3 より概略値として適用した。

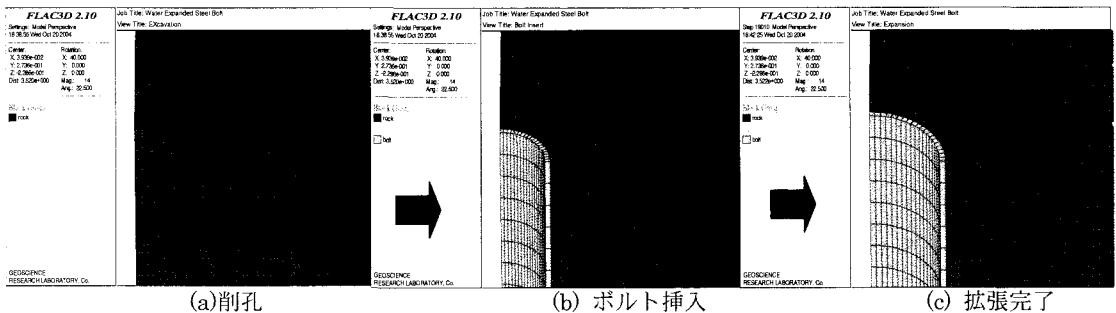
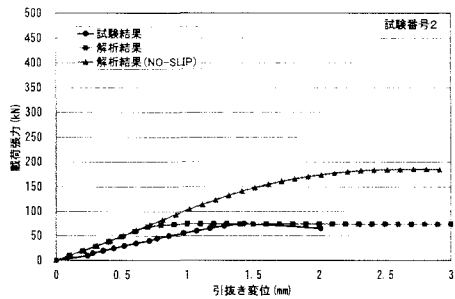
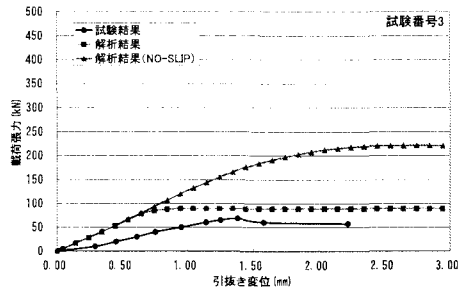


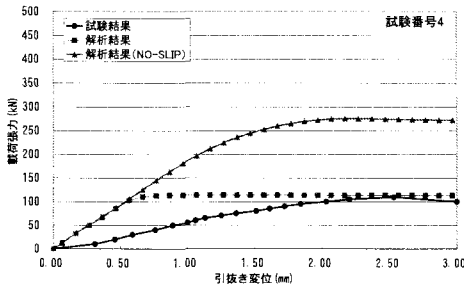
図-6 有限差分法モデルにおけるボルト打設のプロセス



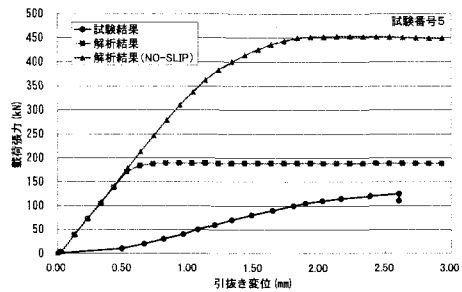
(a) 試験番号 2



(b) 試験番号 3



(c) 試験番号 4



(d) 試験番号 5

図一 7 載荷張力と引抜き変位の関係

表一 4 拡張完了時の定着面の垂直応力

試験番号	2	3	4	5
垂直応力(平均)	4.26	5.11	6.50	10.80

単位(MPa)

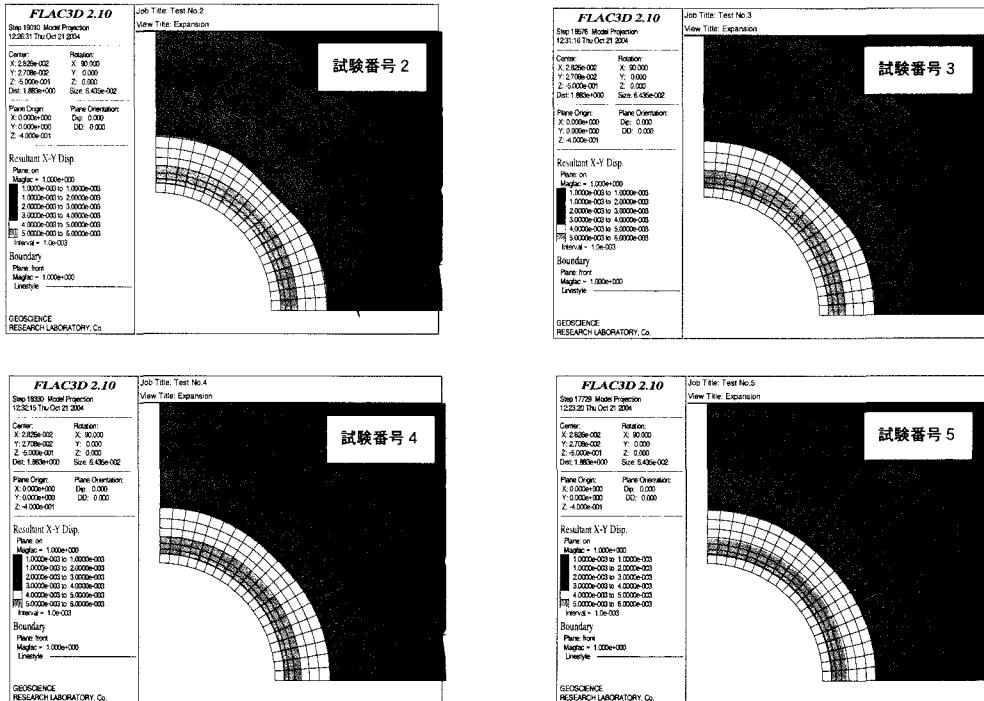
4. 解析結果と考察

(1) 載荷張力と引抜き変位の関係

試験結果との比較が直接可能である載荷張力と引抜き変位の関係を図一 7 に示す。この図には、図一 3 で示した試験結果、および、本章(3)で考察に用いるボルト定着面の滑りを完全に抑制した場合の解析結果(図中に NO-SLIP で表示)も合わせて示す。図一 7 より、試験番号 2～5 のいずれのケースの解析結果においても、載荷張力は載荷初期には線形的な勾配で増加して、ピークに到達した後に強度低下が見られない引抜き挙動が得られている。また、両者の引抜き耐力も良好に一致している結果が得られている。これより、数値解析によって引抜き試験における力学現象が概ねに再現されたと思われる。

(2) 地盤の剛性と拘束圧の関係

図一 7 より、数値解析では人工地盤の弾性係数が大きなケースほど載荷張力の勾配が大きく、引抜き耐力も大きい結果が得られている。そこで、拡張完了時に定着面に発生している垂直応力をボルトが受ける拘束圧と考えて、不連続要素に発生している垂直応力の平均値を求めた。これを、表一 4 に示す。また、ボルト中央断面における半径方向のひずみの分布を図一 8 に示す。これより、地盤の剛性が高いほど、膨張完了時にボルトが受ける拘束圧が大きく、ボルトの膨張により半径方向に押し出された地盤の変形がより局所的であることが分かる。



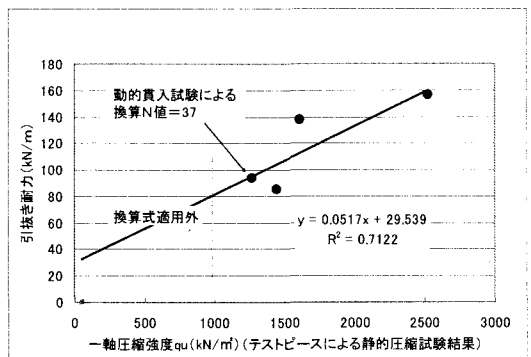
図一八 拡張完了時のひずみ分布

(3) 引抜き耐力の構成要因

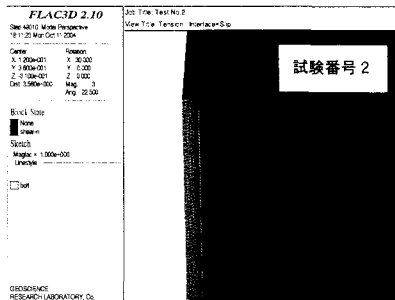
引抜き耐力を構成する要因は、定着面での摩擦力、あるいは、周辺地盤のせん断強度であると考えられる。ここで、張力载荷完了時の人工地盤の塑性域の分布を図一9に示す。これより、塑性域がほとんど見られないことから、引抜きによる負荷の大部分は定着面での摩擦力で抵抗したことが確認される。そこでもし、定着面での滑りを完全に抑制してしまえば、引抜きによる負荷は全て周辺地盤に伝達され、これを地盤のせん断強度で受け持つことになる。この条件を与えて解析を実施した結果を図一7に合わせて示す(図中にNO-SLIPで表示)。これより、塑性流動が発生していることを示す引抜き挙動が得られている。さらに、この場合の張力载荷完了時の人工地盤の塑性域の分布を図一10に示す。これより、いずれのケースでも引抜き挙動(NO-SLIP)に対応した逆円錐状の塑性域が人工地盤に発生していることが分かる。解析結果(NO-SLIP)では固い地盤であるほど引抜き耐力の増加が顕著であり、定着面の滑りを少しでも抑制することは、鋼管膨張型ボルトの今後の課題であると考えられる。

(4) 鋼管膨張型ボルトの地盤強度に対応した適用範囲

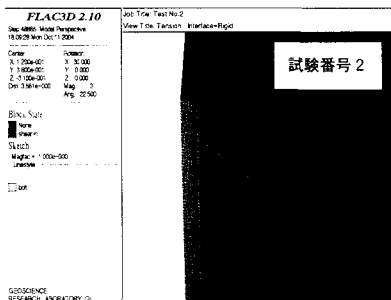
引抜き試験より得られた引抜き耐力の値と、テストピースから得られた一軸圧縮強度の関係は、図一11のように得られる。これより、概ね $qu \geq 1000 \text{ kN/m}^2$ の強度をもつ地盤(強風化岩～土丹)であれば、鋼管膨張型ロックボルトの機能が発揮されると評価できる。そして、その引抜き耐力は一軸圧縮強度に比例し、1m当たり $0.05qu + 30 \text{ (kN; } qu \geq 1000)$ と推定される。また、セメント混合料 50 kg/m^3 の試料では、実験タンク内で簡易動的コーン貫入試験を実施し、換算N値37を得たので、適用範囲はN値換算で概ね30程度以上の地盤と評価できる。この適用範囲



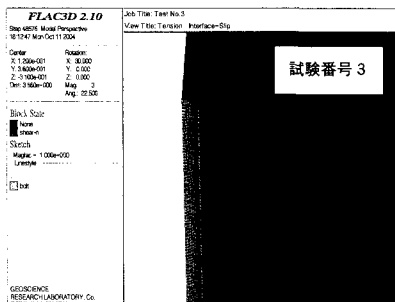
図一11 一軸圧縮強度と引抜き耐力の関係



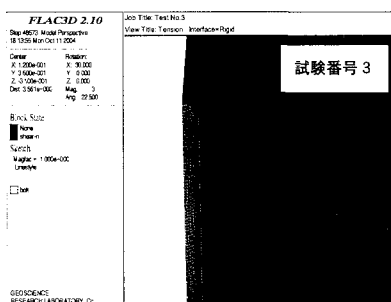
試験番号 2



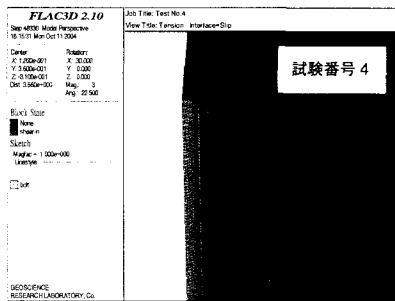
試験番号 2



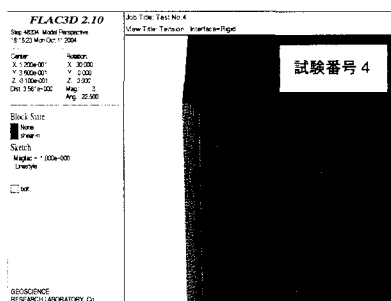
試験番号 3



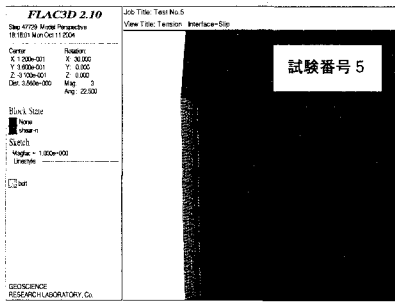
試験番号 3



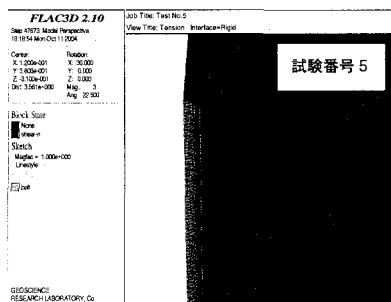
試験番号 4



試験番号 4



試験番号 5



試験番号 5

図-9 塑性域の分布

図-10 塑性域の分布 (定着面滑り抑制)

の地盤で 1~1.5m の定着部があれば、100kN を越える引抜き耐力が得られることになる。

4. まとめ

鋼管膨張型ロックボルトを対象として引抜き時の挙動特性、および、引抜き耐力を把握する目的で室内引抜き試験を実施した。その結果、注入グラウトの破壊等により急激な強度低下が見られる一般のグラウト施工によるボルトに対して優位であると考えられる引抜き挙動が得られた。次に、この現象を力学的見地から考察するために引抜き試験を忠実に再現できる有限差分法解析を実施した。その結果、地盤の剛性と引抜き耐力の関係や、定着面の滑りに対する今後の課題を把握することができた。鋼管膨張型ボルトの適用性に関する情報の精度をさらに高めるためにはさらなる試験や解析を実施する必要があると考える。

参考文献

- 1) S.D.Mckinnon(1990) ; Extending the traditional role of rock reinforcement, Constr Ind Int, VOL. 16, NO. 8, pp28-33.
- 2) 太田英将・柏熊誠治・橋高敏晴; 斜面对策の新工法一排水補強パイプ・鋼管膨張型ロックボルト一, 第 43 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.543-546, 2004.
- 3) 中川光雄・蔭 宇静・江崎哲郎; 大変形理論の岩盤挙動および安定性評価への適用, 土木学会論文集, No. 575/Ⅲ-40, pp. 93-104, 1997.
- 4) Cundall, P.A. and Board M.; A microcomputer program for modeling large-strain plasticity problems, Prepared for the 6th Int Conf on Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, Austria, pp.2101-2108, 1988.
- 5) (社) 日本道路協会; 道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 2002. 3, p43.