

グラウンドアンカーにおける急速載荷試験 の適用性を検討するための模型実験 LABORATORY TESTS TO INVESTIGATE APPLICABILITY OF RAPID LOAD TEST FOR GROUND ANCHOR

末吉達郎*・谷和夫**

Tatsuro SUEYOSHI and Kazuo TANI

The rapid load test was proposed as an effective measuring method for evaluation of pull-out resistance of ground anchors. This test has several advantages such that time for testing is very short compared to the static load test, and that analysis is simpler compared to the dynamic load test.

In this study, applicability of a new rapid loading device for ground anchors was examined by carrying out a series of laboratory model tests. The results demonstrated that; 1) New rapid loading device have high performance as a rapid load test of the ground anchor, and 2) Measurement could be done with simple devices, and 3) Damping constant and spring constant could be easily estimated by the analysis of the rapid load test.

Key Words: ground anchor, rapid load test, load test, dynamic resistance & static resistance

1. はじめに

グラウンドアンカーにおける引抜き試験や品質保証試験においては、繰り返しの静的載荷試験が用いられている。しかし、現在の試験法では時間とコストがかかり、最大試験荷重時にはアンカー体に損傷を与える虞もある。そのため、低コストで短時間に施工・解析が行え、アンカー体に与える損傷が少ない試験法の開発が急務である。一方、同様な問題を解決するために、杭においてはスタナミック試験に代表される急速載荷試験が実施され、成果を上げている。グラウンドアンカーにおける急速載荷試験の実行可能性は、実証的な現場試験¹⁾²⁾において明かにしたが、載荷装置、計測手法、解析手法等に関わる課題があることが判明した。これらを解決するために、さらばねを利用したグラウンドアンカー専用の急速載荷装置を考案し、模型実験装置を使用した研究を実施した。今回の研究における検討項目は次の3点である。

- ①急速載荷試験装置の性能確認
- ②急速載荷における計測手法
- ③解析モデルの妥当性

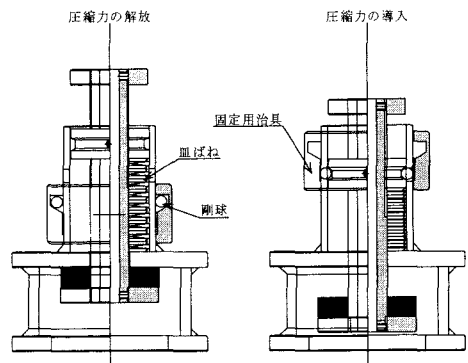


図-1 さらばねを利用した急速載荷装置

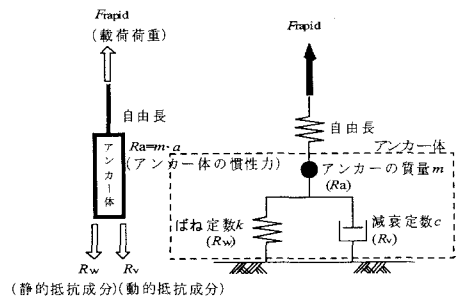


図-2 グラウンドアンカーにおける一質点系モデル

* 正会員 理学士 ライト工業株式会社 技術本部 法面防災部

** Ph.D. 横浜国立大学大学院 工学研究院

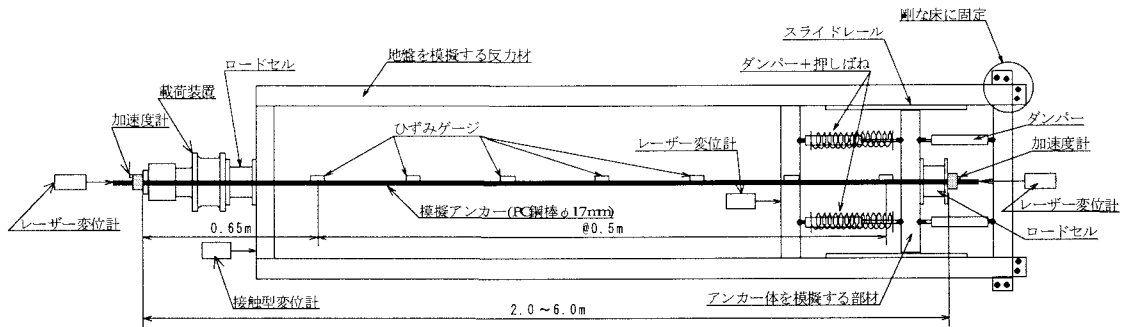


図-3 模型実験装置および計測器の配置

2. 急速载荷試験装置

油圧を使用した従来の载荷装置においては、急速载荷を実施することが困難であるため、さらばねを利用した専用の急速载荷装置を考案した。図-1にその構造を示す。この载荷装置は、さらばねに圧縮力を予め導入し、グラウンドアンカー頭部に設置した後、圧縮力を解放することでグラウンドアンカーに急速载荷を行う。専用の急速载荷装置は次のような特徴を有する。

- ①さらばねを利用する事で、载荷荷重の大きさや変形量を自由に調整する事ができる。
- ②荷重の解放に剛球のキーを使用することで、瞬時の荷重解放による载荷が可能となる。
- ③構造が簡単であるため、部品点数が少なく、軽量で安価に装置を製作できる。

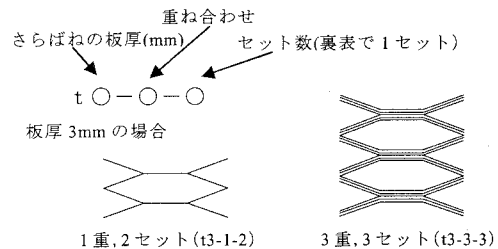


図-4 さらばねの組み合わせの呼称および表示方法

表-1 さらばねの組み合わせ一覧

NO.	case	板厚(t) (mm)	さらばね組合せ		変位量 (mm)	圧縮荷重 (kN)	ばね定数 (kN/mm)
			重ね	セット			
1	t3-1-9	3.0	1	9	28.2	10.0	0.355
2	t3-1-8	3.0	1	8	25.2	10.0	0.397
3	t3-1-7	3.0	1	7	22.3	10.1	0.453
4	t3-1-6	3.0	1	6	18.9	10.0	0.529
5	t3-1-5	3.0	1	5	16.2	10.3	0.636
6	t3-1-4	3.0	1	4	13.3	10.6	0.797
7	t3-1-3	3.0	1	3	10.6	11.3	1.066
8	t3-1-2	3.0	1	2	7.1	11.3	1.592
9	t3-2-5	3.0	2	5	17.0	21.7	1.276
10	t3-2-4	3.0	2	4	12.7	20.2	1.591
11	t3-2-3	3.0	2	3	11.3	24.0	2.124
12	t3-3-3	3.0	3	3	9.7	30.9	3.186
13	t3-3-2	3.0	3	2	6.5	31.1	4.785
14	t5-1-6	5.0	1	6	13.2	31.6	2.394
15	t5-1-5	5.0	1	5	11.0	31.6	2.873
16	t5-1-4	5.0	1	4	9.4	33.7	3.585
17	t5-1-3	5.0	1	3	6.7	32.0	4.776
18	t5-1-2	5.0	1	2	4.5	32.3	7.178

3. 模型実験の方法

(1) 模型実験装置

模型実験装置は、これまでの研究¹⁾²⁾により提案した図-2に示す一質点系モデルを具現化した構成とした。模型実験装置を図-3に示す。モデルにおける静的抵抗を押しばねに、減衰抵抗をダンパーに置き換え、载荷時にはスライドレールに沿って自由に移動可能とした。ダンパーは押しと引きの減衰力が異なるため、押し側と引き側が同じになるよう両方に取り付けた。

模型実験装置の寸法は、使用実績の多いアンカー（試験荷重 500kN 以下、アンカー長 50m 以下）の最大値を約 1/15 に縮小した。ばね定数および減衰定数は現場試験¹⁾²⁾により得られた地盤定数の平均値を基に選定した。

(2) 検討ケース

载荷装置に使用するさらばねは板厚、重ね合わせ、セット数を自由に変更することが可能である。ここで、

さらばねの組み合わせの表示方法は図-4 のようにする。さらばねは2種類の板厚を使用し、装置内で可能なすべての組み合わせについて実験を行った。さらばねの組合せを表-1 に示す。これらのすべての組み合わせについて载荷装置にセットした時の変位量および圧縮荷重を予め計測した。また、実験装置の押しばねについてはばね定数の異なる2種類、模擬アンカーの長さはアンカー長 $l_f=2.0\text{m}$, $l_f=4.0\text{m}$, $l_f=6.0\text{m}$ の3種類とした。検討ケースは合計108 ケースである。

(3) 計測項目

実際の現場計測の場合、アンカー頭部の計測しか行えず、地表面のデータからアンカー体部のデータを推測することになるため実験においては図-3 における左側にあたるアンカー頭部と右側にあたるアンカー体部に同様に計測器を配置した。計測には小型の動ひずみ測定器を使用し、変位、荷重、加速度を測定した。また、模擬アンカーには0.5m 間隔にひずみゲージを設置した。変位計測には高速な変位に対する追従性が高いレーザー変位計を用いた。

4. 急速载荷試験装置の性能評価

(1) さらばねの特性

図-5、図-6 にさらばねの組み合わせと変形量および剛性の関係を示す。実験結果より、さらばねは板厚、重ね合わせおよびセット数を変更することで変形量と剛性を自由に設定できることがわかる。これらの結果より、ばね定数(k)と重ね合わせ(n)、セット数(m)の関係は式-1 で表すことができる。

(2) さらばねの剛性と载荷荷重

载荷装置のさらばねに与えた変形量(x)とさらばねのばね定数(k)から求めた弾性エネルギー($E=1/2 \cdot k \cdot x^2$)とアンカー頭部で計測された最大荷重の関係を図-7 に示す。さらばねに大きな圧縮荷重を導入した方が、与えたエネルギー量に対し、得られる最大荷重が若干小さくなる傾向にあるが、それぞれはほぼ線形な関係を呈している。これらの関係を用いて大型の载荷装置における弾性エネルギーの算出が可能であるが、今回の実験結果だけでの弾性エネルギーと载荷荷重の関係を判断は困難であるため、数値解析を含めた検討が必要である。グラウンドアンカーにおける変形量はアンカー自由長の伸び量および地盤とアンカー体の変形量の合計であることから、载荷に必要な弾性エネルギーを算出する事で、大型の载荷装置を検討する場合においても使用するさらばねのばね定数や形状を容易に選定することが可能となる。

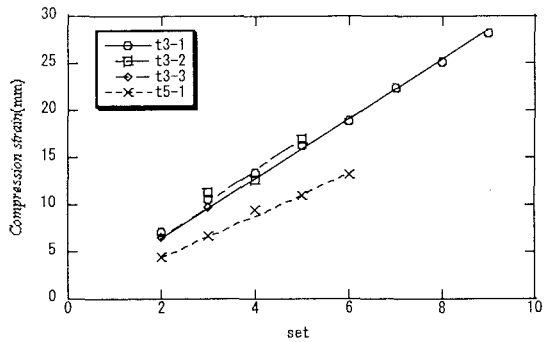


図-5 さらばねの組み合わせと変形量の関係

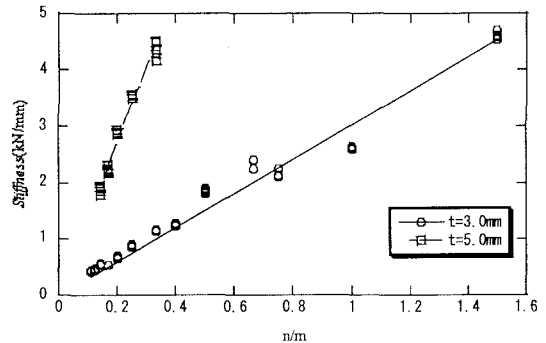


図-6 さらばねの組み合わせと剛性の関係

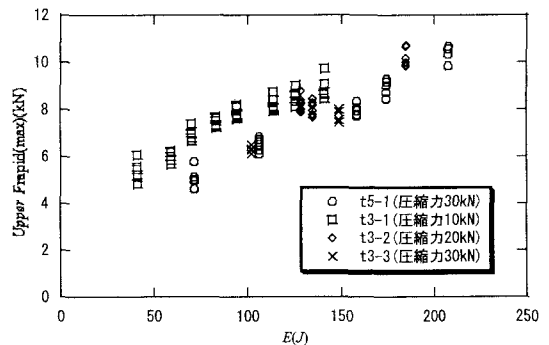


図-7 最大荷重と弾性エネルギーの関係

$$k(t=3\text{mm}) = \frac{3.185 \cdot n}{m}$$

$$k(t=5\text{mm}) = \frac{14.347 \cdot n}{m} \quad \text{式-1}$$

(3) 載荷時間および速度、加速度

載荷試験は載荷時間の長さにより衝撃載荷、急速載荷、静的載荷に分類される。急速載荷は、衝撃載荷に比べて載荷時間が長いことから波動現象を無視でき、さらに静的載荷に比べ載荷時間が短いことからアンカー体に与えるダメージが少ないと考えられる。地盤工学会基準³⁾においては波動現象を評価する指標として式-2に示す相対載荷時間 T_r を採用し、急速載荷における載荷時間の目安を $5 \leq T_r \leq 500$ 、 $T_r < 5$ を衝撃載荷、 $T_r > 500$ を静的載荷としている。グラウンドアンカーにおけるアンカー体は杭体と同様にセメント系グラウトと鋼材により構成され、荷重支持機構も類似していることから、この指標を参考とした。アンカー体長($l_a=3.0 \sim 10.0\text{m}$)において $5 \leq T_r \leq 500$ で満足する載荷時間はアンカー体の90%以上を占めるセメントミルクの縦波伝搬速度を $4000\text{m/s}^{1)}$ とすると $0.025 \sim 0.75\text{sec}$ であり、今回の実験における載荷時間はこれを十分満足している。ただし、グラウンドアンカーにおける波動現象は研究されておらず、現場試験および解析によりグラウンドアンカーにおける最適な急速載荷時間について検討する必要がある。

最大速度と弾性エネルギーの関係を図-8に、最大加速度と弾性エネルギーの関係を図-9に示す。実験結果においては、エネルギー増加に伴い速

度・加速度は増加する傾向にあるが、増加率は減少する傾向にある。速度および加速度の増加は載荷荷重における静的載荷の割合が小さくなることを意味している。そのため、解析の精度を向上させるには速度・加速度を抑制する必要がある。アンカー体の設計においては通常 $F_s=2.5$ (永久)の安全率⁴⁾を有していることから、急速載荷荷重がすべてアンカー体に有効に働いてもアンカー体がダメージを受ける事が無いように、急速載荷荷重における静的載荷の割合が40%以上となるように速度・加速度を調整するのが望ましいと考える。

5. 動的計測手法

図-10に計測した荷重、変位、加速度およびこれより算出した速度と時間の関係を示す。速度の算出手法には次の2つが考えられる。

- ・計測した加速度を微分して速度、変位を算出する方法
- ・計測した変位を積分して速度、加速度を算出する方法

加速度から速度を算出した結果と変位から速度を算出した結果(図-10-③)はどちらにおいても同様な結果が得られるはずであるが、波形がほぼ同じであるにも関わらず、数msのタイムラグが生じている。この原因としては、レーザー変位計のサンプリング周波数やレーザースポットにおける凹凸を平均化する内部演算、スキャニングの感度の設定によるものであると考えられる。このタイムラグは解析上大きな問題となるため、

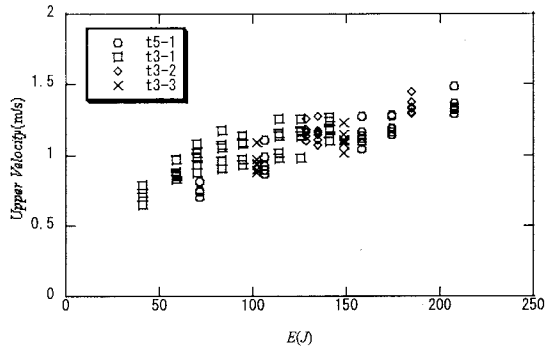


図-8 最大速度と弾性エネルギーの関係

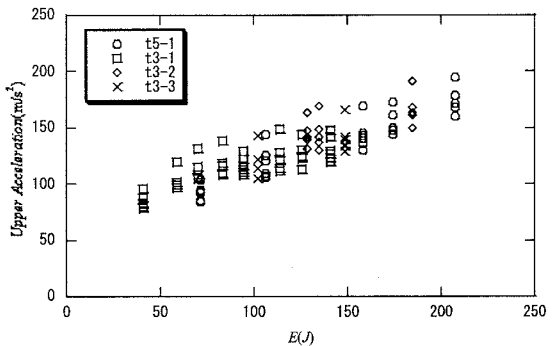


図-9 最大加速度と弾性エネルギーの関係

$$T_r = \frac{t_L}{2L/c} \begin{cases} t_L : \text{載荷時間} \\ L : \text{杭長} \\ c : \text{縦波伝搬速度} \end{cases} \quad \text{式-2}$$

荷重計，加速度計，レーザー変位計による反応速度を検証した結果，レーザー変位計のみ4msのタイムラグが発生する事が明らかになった。よって，今回と同様の計測装置を使用する場合4msの補正が必要となる。変位計測から算出した加速度（4msの補正後）と加速度計による結果を比較（図-10-④）すると，波形に大きな違いは無いとはいえないがより精度を求めるのであれば加速度計の使用が有効である。ただし，変位計測から算出した方が，計測項目が減り施工性が向上する事，変位・速度・加速度の関係にタイムラグが生じない等の利点もあり，解析も含めて検討する必要がある。荷重の計測に関してはロードセルにより問題なく計測を行う事ができた。全体のシステムとしては小型動ひずみ測定器を中心にレーザー変位計，ロードセルのみでも計測，解析は可能であり，現場においても十分対応可能である。

6. 実験結果の解析

(1) 減衰定数およびばね定数

図-2 の一質点系モデルにおいてアンカー体におけるつり合い式は式-3 で表される。

$$F_{rapid} = ma + cv + kx \quad \text{式-3}$$

図-10 で示すように変位最大時は速度 $v=0$ ，速度最大時は加速度 $a=0$ になることから減衰定数 c およびばね定数 k を算出することが可能となる。算出した減衰定数(c)およびばね定数(k)と載荷荷重の最大値との関係を図-11, 12 に示す。減衰定数は載荷荷重に従い増加する傾向にある。載荷荷重の増加は載荷速度の増加であることから，使用したダンパーの減

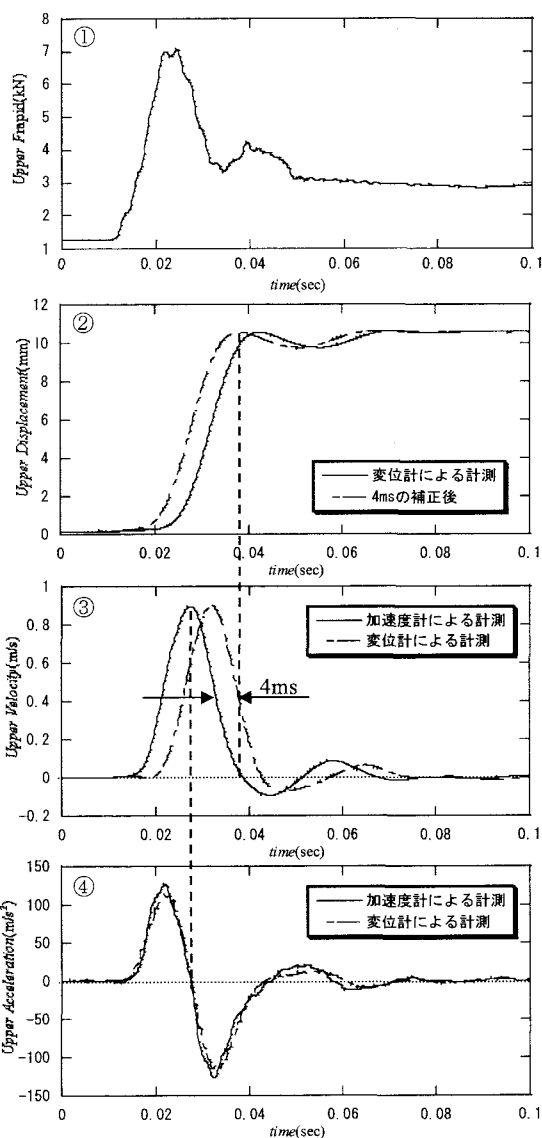


図-10 荷重，変位，速度，加速度と時間の関係 ($l=2.0\text{m}$, $t_3=1-4$)

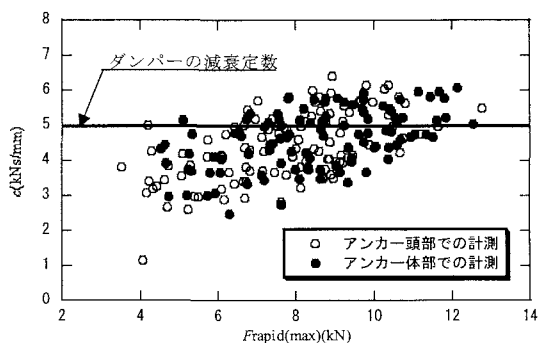


図-11 載荷荷重と減衰定数の関係

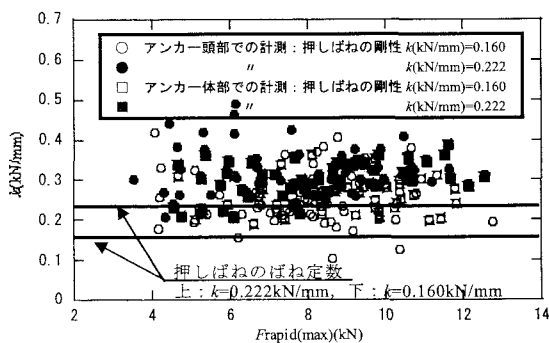


図-12 載荷荷重とばね定数の関係

減衰定数は速度に対して一定ではない可能性がある。これは実地盤における実験結果¹⁾²⁾においても同様の傾向が見られる。また、解析結果は平均的にはダンパーの減衰定数のカタログ値(5.0kN・s/mm)と近い値を示している。得られたばね定数はばね定数の異なる2種類の押しばねを使用したため解析値においても2つのグループに分かれる。しかし押しばねのばね定数(静的試験結果)と比べると大きめの値が得られている。これらの原因には、載荷装置から押しばねに伝達する過程での荷重のロスによる変位量(x)の過小評価やアンカー体の質量(m)を載荷装置の可動部分の質量のみとしたことから過小評価となった事が考えられる。実際の現場においてもシース等の摩擦による荷重の損出が考えられ、アンカー体の質量についても削孔径に比べ実際のアンカー体径の増大などが考えられる。そのため、現場試験を行う場合、載荷荷重の損失割合やアンカー体質量の評価手法を検討する必要がある。

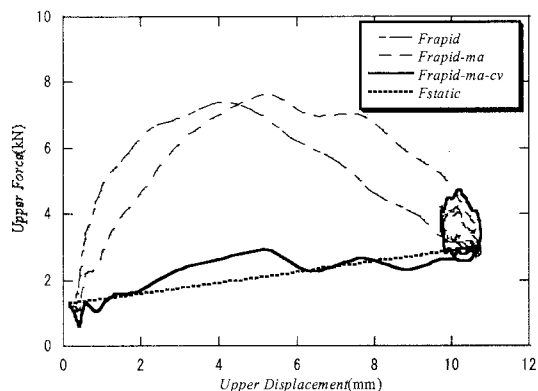


図-13 静的載荷と急速載荷による
荷重－変位関係 ($l=2.0\text{m}, t3-1-4$)

(2) 静的載荷との比較

急速載荷および静的載荷により得られたアンカー頭部の荷重－変位関係を図-13 に示す。解析による静的抵抗($F_{\text{rapid-ma-cv}}$)と静的載荷試験を行った結果(F_{static})を比べると低荷重域では静的載荷の値と誤差が生じるが、荷重がピークに近づくときほぼ近似する傾向にある。実際の現場試験においては設計荷重や最大試験荷重による性能判定となることから、低荷重時の誤差は大きな問題ではない。しかし、現在の装置では頭部が固定であるため載荷後のさらばねの振動により、円を描くような波形が残る。そのため、多くの現場実験を行い、評価する範囲を明確にする必要がある。

7. まとめおよび今後の課題

今回の室内実験において次の知見が得られた。

- ①さらばねを使用したグラウンドアンカー急速載荷装置は十分な性能を有している。
- ②簡易な計測システムにより十分な計測を行うことができる。ただし計測器によりタイムラグが生じる可能性があるため補正が必要な場合もある。
- ③減衰定数やばね定数は容易に算出でき、静的載荷と近似した値を推定することができる。ただし、反力となる装置や地盤の減衰定数やばね定数が大きい場合はこれらを含めた解析が必要である。

今後は実際の現場で使用できる載荷装置を作製し、実験データの蓄積を行う予定である。また、載荷装置を含めたモデル化を行い、解析の精度を向上させていく予定である。

参考文献

- 1) 末吉達郎, 谷和夫: グラウンドアンカーにおける急速載荷試験適用性を検討するための現場実験, 第48回地盤工学シンポジウム, 地盤工学会, pp.351-358, 2003.
- 2) 末吉達郎, 谷和夫: グラウンドアンカーにおける急速載荷試験適用性検討のための現場実験, 第39回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, pp.1603-1604, 2004.
- 3) 地盤工学会: 杭の急速載荷試験方法・同解説, 2002.
- 4) 地盤工学会: グラウンドアンカー設計・施工基準, 同解説, 2000.