

多様な荷重条件に対応可能な地耐力試験法

日大生産工(院) ○佐藤 元治 日大生産工 木田 哲量
大豊建設(株) 今村 秀雄・南 宜郎・長崎 正幸

1. はじめに

ニューマチックケーソン基礎では、施工時に平板載荷試験で支持地盤の強度特性を直接確認することが、大きな耐荷力の確保と高い信頼性を得る要因である。しかし、同試験は高気圧下、有人で行うことから短時間に完了する必要がある、現行の試験法では荷重保持時間を短く設定せざるを得ない。

遠隔操作地耐力試験法は、試験装置本体をケーソン掘削機に装着し、遠隔操作で平板載荷試験を行うものであり、高気圧下作業を伴わないことから載荷設定の時間的自由度が広がるため、基礎の荷重状態に応じた載荷設定ができ、多様な荷重条件に対応可能である。

本稿では、ニューマチックケーソン基礎における現行の平板載荷試験の課題と、遠隔操作地耐力試験法の概要およびその効果について述べる。

2. 現行試験法および遠隔操作地耐力試験法

現行のニューマチックケーソン基礎における平板載荷試験法は、作業室天井スラブを載荷反力体として反力柱と油圧ジャッキで地盤に載荷すると同時に、別に設置した不動梁と変位計で沈下量を計測するものであり、ジャッキ操作や載荷荷重の読み取りおよび沈下量測定を部分的に遠隔操作で行なった事例もあるが、通常、試験装置の設置から撤去に至る全工程を有人の高気圧下作業で行っている。これに対し、遠隔操作地耐力試験法は、作業室天井スラブを載荷反力体とする点は現行の試験法と同じであるが、反力柱を兼ねる試験装置本体に、油圧ジャッキおよび荷重計などの載荷装置と沈下計測用の変位計を装備し、これをケーソン掘削機に装着して平板載荷試験の全工程を遠隔操作で行うものである。なお、ケーソン掘削機への装着も、ケーソン底部に設置した掘削機メンテナンスロックで行うため、有人の高気圧下作業は発生しない。図1および図2に、ニュー

マチックケーソン作業室における現行の平板載荷試験法の概要、遠隔操作地耐力試験法の概要を示す。

3. 現行の平板載荷試験法の課題

ニューマチックケーソン作業室内での平板載荷試験は、高気圧下で行うために試験時間が厳しく制限されることが、一般の載荷試験実施環境と大きく異なる。そのため、道路橋示方書IV下部構造編・同解説（以下、道路橋示方書）¹⁾および鉄道構造物等設計標準・同解

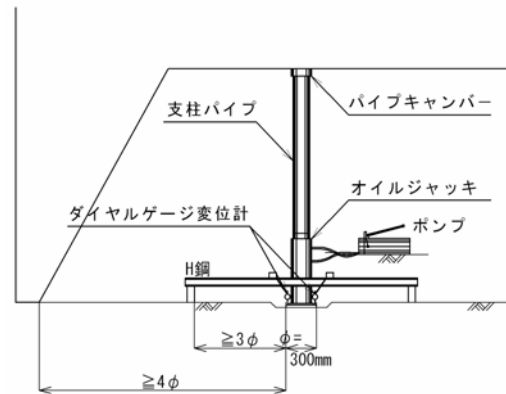


図1 現行の平板載荷試験法の概要

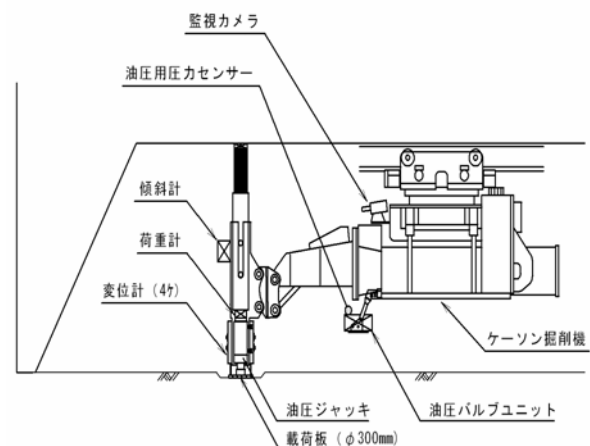


図2 遠隔操作地耐力試験法の概要

Bearing Capacity Test Method of Applicability for Various Loading Conditions

Motoharu SATO

Tetsukazu KIDA, Hideo IMAMURA, Yoshiro MINAMI, Tadayuki NAGASAKI

説一基礎構造物・抗土圧構造物（以下、鉄道基礎標準）²⁾中に試験方法が規定されており、これらは、標準的な構造物基礎の平板載荷試験への適用を前提に制定された地盤工学会基準JGS1521³⁾を基本に、高気圧下の特殊条件に配慮し、短い荷重保持時間で支持地盤強度特性の確認を可能としたものである。なお、道路橋示方書および鉄道基礎標準による試験法は、極限地盤支持力度が不明確な場合の判定方法に多少の差があるものの、同様の試験装置を使用し、いずれも短い荷重保持時間で試験を実施することから、試験法の差異はないと思われる。

道路橋示方書および鉄道基礎標準による試験法と地盤工学会基準の試験法との最大の違いは、繰返し載荷時の沈下曲線の割線勾配を基準に地盤反力係数を求める点にある。本来、地盤反力係数は、載荷荷重に応じて処女沈下曲線上の各点の割線勾配を採用しなければならないが、地盤の種類、載荷板の大きさ、試験方法の差異により係数がアトランダムに変化する。このため、地盤ごとに比較的安定し、荷重の大きさの影響によるばらつきが小さく、載荷速度への依存度の小さい繰返し載荷時の沈下曲線の割線勾配を基準に、これを修正して短期および長期荷重に対する地盤反力係数を間接的に求めることとしている⁴⁾。また、載荷速度への依存度が小さいため、荷重保持時間が短縮でき、短時間で試験実施が可能となる。図3に道路橋示方書法の地盤反力係数の求め方を示す。

実際の試験では、道路橋および鉄道橋基礎ケーソンとも荷重保持時間を5分程度に設定することが多い。これは、試験法上は荷重保持時間を設ける必要はないが、載荷荷重と沈下量を正確に読み取る上で、各載荷段階の沈下増加が緩速化する時間を確保する必要がある

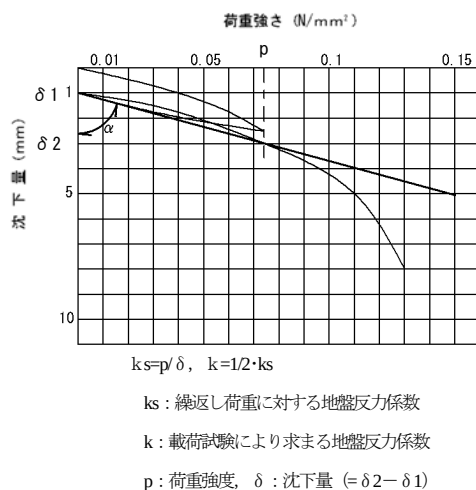


図3 道路橋示方書の地盤反力係数の求め方

ためである。しかし、荷重保持時間を5分としても、なお、高気圧下作業の時間制限が、載荷設定の制約条件となりえる。

仮に、2サイクル5分荷重保持の8段階載荷の試験ケースを想定すると、試験自体に要する時間は約90分である。これに作業室への入室のための加圧時間、移動時間、準備作業時間等を含めると試験全体では少なくとも150分程度の時間が必要である。高気圧作業安全衛生規則⁵⁾に示される高圧下作業の圧力と高圧下の時間（加圧開始から減圧開始までの時間）によれば、0.35MPa（圧力の表示は、大気圧を0とするゲージ圧力）を超える圧力区分では、高圧下の時間は150分以下であり、圧力が0.35MPaを超えるケースでは、高気圧下作業の時間制限を超過することになる。

近年は、最大作業気圧が0.4MPaを超える大深度のニューマチックケーソン基礎の施工も行なわれるようになり、時間制限がさらに厳しくなる。ニューマチックケーソン基礎においては、支持地盤の強度特性を直接確認することが、大きな耐荷力の確保とその信頼性の要因であり、今後もこの利点を変わらぬものとすべきであるが、高気圧下の時間的制約が確実な支持地盤確認の障害になりかねない。また、載荷設定における時間的制約がなければ、基礎の荷重条件と地盤条件により適合した載荷設定が可能となり、短期および長期荷重など基礎の荷重条件に応じた支持地盤の挙動を直接確認し得る。さらに、労働安全上も作業環境改善のために高気圧下作業を削減することは社会的要請ともいえ、安全かつ確実に支持地盤を確認でき、ニューマチックケーソンの利点を普遍化する支持地盤の確認方法、技術の開発が課題となっている。

4. 遠隔操作地耐力試験法

4.1 試験概要

遠隔操作地耐力試験法は、作業室直上のメンテナンスロックにケーソン掘削機を回収して試験装置本体を装着し、平板載荷試験を遠隔操作で行うものである。このメンテナンスロックとは、ケーソン掘削機の日常点検、修理等の作業を大気圧下で行うための場所打ちの鉄筋コンクリート製ロックであり、作業室天井スラブと、これと別に設置した上スラブでケーソン躯体下部を二重スラブとし、その空間内に設置している。図4に遠隔操作地耐力試験の実施イメージを示す。

4.2 遠隔操作地耐力試験装置概要

遠隔操作地耐力試験装置は、次の1)から5)に示す各装置から構成する。図5に試験装置

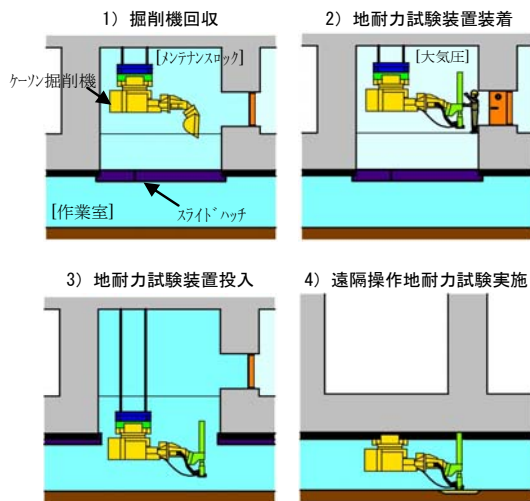


図4 遠隔操作地耐力試験の実施イメージ

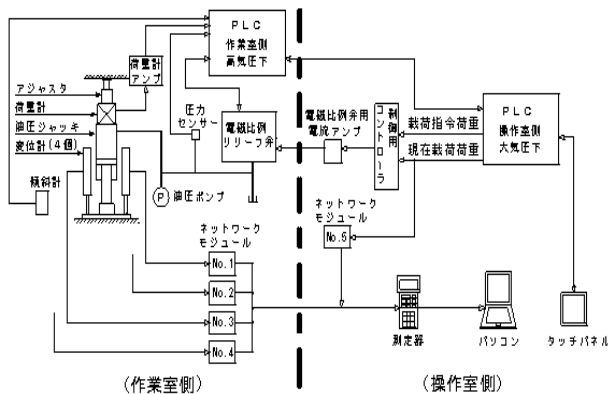


図5 遠隔操作地耐力試験装置のシステム構成

表1 地耐力試験装置の主な部品の仕様

機械的性能	装置名	仕様	性能
荷重能力	荷重ジャッキ	油圧駆動 揚力 1000kN ストローク 150mm	・荷重能力 500kN (油圧装置による) ・ストローク 150mm
	油圧装置	出力 3.7kW 圧力 31.5MPa 吐出量 4.1L/分	
	荷重計	ロードセル 容量 1000kN	
荷重精度	荷重制御装置	電磁比例リリーフ弁 シーケンサ(PLC) コントローラ	・設定荷重に対する 実載荷重のずれ ±0.5kN 以内 ・荷重変更後の 収束時間 10～20 秒
計測器 精 度	地盤沈下 計測用 変位計	自動変位計	・計測誤差 ±0.01mm 以内 ・測長 100mm 以内
	試験装置 本体の 傾斜計	自動傾斜計	・計測誤差 ±0.1° 以内
耐圧性能	試験装置 構成部品		・0.7MPa 以内
試験装置 設置性能	ケーソン 掘削機	遠隔無人 ケーソン掘削機	・傾斜角 0.1° 以内 ・設置時間 5～10 分

のシステム構成を示す。

1) 地耐力試験装置本体

地耐力装置本体は、固定用のアジャスタ、上胴・下胴、荷重計、荷重ジャッキ、荷重板、沈下量計測用の変位計、傾斜計等で構成する。

2) 油圧装置

油圧装置は、ケーソン掘削機用の油圧装置を改造し、出力3.7kW、圧力31.5MPa、吐出量4.1L/分とした。これにより固定用のアジャスタと荷重装置を駆動する。

3) 荷重制御装置

荷重制御装置は、電磁比例リリーフ弁、シーケンサ (PLC)、荷重制御用のコントローラで構成する。荷重制御は、任意に設定した目標荷重荷重に合わせて電磁比例リリーフ弁が開閉し、油圧が荷重装置に作用する。一方で、目標荷重荷重と実載荷重荷重の信号は、試験装置側と操作側に 1 台ずつ設置したシーケンサ (PLC) を介してコントローラに常に送信されており、油温の変化などによる両者のずれに対しては、コントローラから補正信号が返送されてリアルタイムに補正が行われる。

4) 計測装置

計測装置は、試験装置本体に装着した実載荷計測用の荷重計、本体の傾斜計、地盤の沈下量計測用の変位計と、パーソナルコンピュータから構成される。

5) 遠隔操作装置

地耐力試験装置の操作は、遠隔操作室に設置したタッチパネル式の操作盤で行う。ここからの操作信号を、通信ケーブルを介して試験装置が受信し、荷重と沈下量計測を行う。

また、地耐力試験装置本体の設置および撤去は、ケーソン掘削機を遠隔操作して行う。ケーソン掘削機は、通信ケーブルを介して受信した操作信号により、作業室天井スラブ上のレール移動と、掘削ブームの伸縮、上げ下げ、回転等を自在に行い、試験装置を所定の位置に正確に設置する。

地耐力試験装置の各部品は、現行の平板載荷試験と同等以上の荷重能力と計測精度を確保可能なこと、および、高気圧下での使用となるため耐圧性を確保することが必要である。特に、耐圧性については、ニューマチックケーソン基礎の大深度化に伴い、作業気圧の増加が今後も見込まれることから、圧力 0.7MPa での使用に耐え得る耐圧仕様品を選定するとともに、高気圧下において動作確認を行った。地耐力試験装置の主な部品の仕様は、表 1 に示すとおりである。

4.3 沈下量計測値の補正式

不動梁に変位計を設置する現行の試験法と異なり、遠隔操作地耐力試験法は、荷重反力柱を兼用する地耐力試験装置本体に変位計を

直接設置するため、次の 1) から 4) の要因により沈下量計測値が過大となることから、補正が必要である。

- 1) 地耐力試験装置本体の縮み量
- 2) 地耐力試験装置本体の傾斜影響
- 3) 作業室天井スラブの支圧変形量
- 4) 作業室天井スラブの曲げ変形量

これらの過算量に対する補正式は、工場および実際のケーソン作業室内で実験を行い、(1)式のとおり求めた。

$$S_r = S - y = S - (y_1 + y_2 + y_3 + y_4) \quad (1)$$

ここに、

S_r ：沈下量計測値の補正量

S ：地耐力試験装置の沈下量計測値

y ：補正量の総和

y_1 ：試験装置本体の縮み補正量

y_2 ：試験装置本体の傾斜影響補正量

y_3 ：作業室天井スラブの支圧変形補正量

y_4 ：作業室天井スラブの曲げ変形補正量

なお、補正量の単位は(mm)である。また、 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 については、表 2 に算定式を示す。

5. 遠隔操作地耐力試験法の効果

本遠隔操作地耐力試験法は、実際のニューマチックケーソン工事において採用され、平成 21 年 1 月に最終着底地盤の強度確認を行った。試験概要を、次の 1) から 7) に示す。

- 1) 工事名：横浜湘南道路立坑設置工事
- 2) 事業者：国土交通省関東地方整備局
- 3) ケーソン用途：シールド発進立坑
- 4) ケーソン形状：

平面 36.5m×23.8m（矩形）、高さ 41.85m

- 5) 試験時作業気圧：0.35MPa（ゲージ圧）
- 6) 試験地盤：固結砂質土（N 値≧50）
- 7) 载荷設定：2サイクル8段階载荷、

荷重保持時間30分 最大荷重80kN

本立坑ケーソンでは、常時荷重（長期）に対する地盤反力度の確認が設計上の要求であり、荷重条件との整合を考慮すれば、荷重保持時間をある程度長く確保することが望まれたが、試験実施時の作業気圧は0.35MPaであり、現行の試験法では荷重保持時間は5分以内とせざるを得ない。しかし、遠隔操作地耐力試験法の採用により、荷重保持時間を30分とした2サイクル8段階载荷に設定し、荷重条件に即した平板载荷試験を行った。

このように遠隔操作地耐力試験法は、高気圧下のニューマチックケーソンにおいても荷重条件に適合した平板载荷試験の実施を可能とする。また、高気圧下作業を伴わないため、試験箇所数の追加

表2 沈下量補正量算式一覧

	補正量算式	適用上の留意点
y_1	$y_1 = 2.005E-03P$ ここに、 P ：载荷荷重(kN)	・土砂地盤には、本式を適用する。 ・岩盤の場合は、载荷荷重を試験装置の上限付近（500kN 付近）に設定し、かつ沈下量数 mm の場合、沈下量計測値の割増しを適宜検討する。
y_2	$y_2 = S(1 - \cos \theta_{xy})$ ここに、 S ：地耐力試験装置の沈下量計測値(mm) θ_{xy} ：地耐力試験装置の最大傾斜角(°)	・最大沈下量が 10mm 以上、かつ不等沈下量が 5mm 以上の場合に適用し、これ未満の場合は 0 とする。
y_3	$y_3 = cP$ ここに、 c ：スラブの支圧変形量算出係数 P ：载荷荷重(kN)	・ c の算出は次式による。 $c = -2.21E-19t^4 + 2.67E-15t^3 - 1.24E-11t^2 + 2.75E-08t + 1.41E-04$
y_4	$y_4 = \alpha (P \cdot a^2 / D)$ ここに、 α ：たわみ係数 (b/a から決定) P ：载荷荷重(kN) a ：スラブの短辺長(mm) b ：スラブの長辺長(mm) D ：スラブの曲げ剛性	・スラブ中央 1/2 の範囲に载荷する場合に適用し、これより支点側の場合は 0 とする。 ・補正量は、支点から载荷点およびスラブ中央までの距離の比に応じて直線補正する。 ・ D の算出は次式による。 $D = Et^3 / 12(1 - \nu^2)$ E ：コンクリートのヤング係数 (kN/mm ²) t ：スラブ厚(mm) ν ：コンクリートのポアソン比

および複数の荷重条件に対する地盤強度特性の確認が可能であり、設計時の支持力に余裕が少ない場合や、長期・短期荷重の支持力要求が拮抗する場合には、さらに効果的であると考えられる。

6. まとめ

遠隔操作地耐力試験法は、実際の工事に採用されたことで、十分実用に供する技術であることが確認できた。しかし、次の1)から2)に示す事項については今後も改良・検討を行いたいと考える。

- 1) 試験装置の組立の簡素化
- 2) 岩盤などの硬質地盤および軟弱～中位の地盤に対する適用の検証

遠隔操作地耐力試験法は、試験装置の改良や地盤に対する適用の検討を今後も継続することで、より完成された技術となり、安全かつ確実な支持地盤確認技術として、ニューマチックケーソンの利点の普遍化と、さらなる信頼性の向上に資することが期待できる。

参考文献

- 1) 日本道路協会、道路橋示方書IV下部構造編・同解説、（2002）、pp.555～558
- 2) 鉄道総合技術研究所、鉄道構造物等設計標準・同解説—基礎構造物・抗土圧構造物、（2000）、pp.35～37、p.200
- 3) 地盤工学会、地盤調査の方法と解説、（2004）、pp.495～504
- 4) 土質工学会（現地盤工学会）、ケーソン工法の調査・設計から施工まで、（1980）、pp.12～13、p.197
- 5) 労働法制実務研究会、労働安全衛生法令図説便覧、pp.7043の11～7043の13