

助成番号

2024-02

## 埋設した蛇籠型受圧体による水平抵抗部材の設計手法の開発

香川大学創造工学部 准教授 荒木裕行

### 1. はじめに

水道管等の埋設管屈曲部には構造上、スラスト力と呼ばれる水平方向の力が作用する。スラスト力は屈曲部が離脱する原因となるため、スラスト力防護対策として屈曲部に防護コンクリートを巻き立てるのが一般的である(図1a)。しかし、コンクリートにより重量が増加すると地震時に管路に生じる慣性力も増大するため、周辺地盤が液状化した際に屈曲部が離脱する事例も報告されている。スラスト力に対する水平抵抗力を増大させる手法は防護コンクリートに限られていることから、地盤が液状化した際にも一定の水平抵抗力を期待でき、慣性力の増加に繋がることなく簡易に施工可能なスラスト力防護対策が必要といえる。

以上の背景より、申請者は防護コンクリートに代わる防護対策として合成高分子補強材のカゴに礫材を詰めた蛇籠型受圧体(以下、受圧体)を水平抵抗部材として地盤内に埋設する手法(図1b)を提案している。埋設した受圧体は周辺地盤が液状化したとしても過剰間隙水圧の消散を促しながら埋設管に対して変位抑制効果を発揮することは確認されているものの、水平抵抗力の評価手法は未確立である。本研究では、土の強度変形特性や受圧体の寸法等に基づき、受圧体の設置によって得られる水平抵抗力を推定する手法を確立し、受圧体を用いたスラスト力防護対策の設計法につなげることを目的とする。本研究は主として、地盤特性と受圧体をパラメータとした受圧体の模型実験、地盤材料の強度変形特性と受圧体の水平抵抗力-変位関係のモデル化、模型実験に基づいた検証からなる。

なお、本研究は、一般社団法人四国クリエイト協会の「2024年度建設事業に関する技術開発支援制度」による助成を受けて実施したものである。

### 2. 模型実験による水平抵抗力-変位関係の取得

#### 2.1 模型実験の概要

実施した水平载荷実験は、剛土槽内に構築した模型地盤内で埋設管模型に対して強制水平変位を与え、埋設管模型に作用する抵抗力を計測するものである。模型実験の模式図を図2に示す。受圧体模型は縦横目合い4mmのポリプロピレン製ネットで作製したカゴを用いた。カゴには埋設管

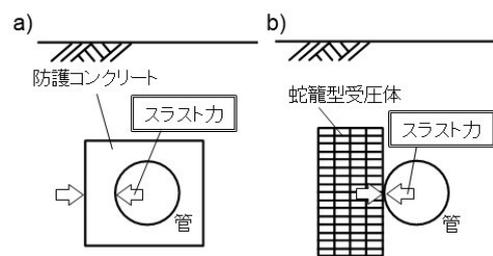


図1 埋設管屈曲部の模式断面図 (a)防護コンクリート, b)受圧体を用いた提案法) (土木学会論文集C, Vol. 74, No. 1, pp. 106-117, 2018)

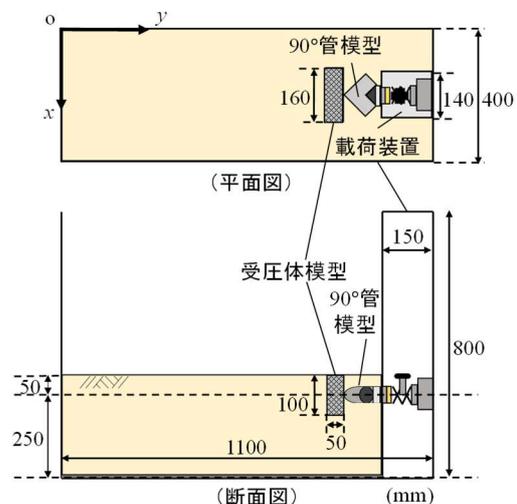


図2 模型実験の模式図

側および受働地盤側に3カ所ずつ、計6カ所において水平方向のストランドの両面にひずみゲージを貼り付け、水平方向に生じる張力を計測可能とした。受圧体模型は、寸法が幅50×高さ100×奥行き160 mmで中詰め材に礫材を用いた受圧体Aを基本とし、幅50×高さ100×奥行き160 mmで中詰め材をPOM樹脂とした受圧体B、寸法を幅50×高さ50×奥行き160 mmとして中詰め材に礫材を用いた受圧体C等を設定した。埋設管模型には表面をテフロン加工した塩ビ管を用い、屈曲部が受圧体の高さ・幅方向の中心に接するように配置した。

模型地盤には、強度変形特性を大きく変更しつつ再現性のある模型地盤を作製するため、地盤材料に珪砂5号を用いて地盤の相対密度を $D_r=85\%$ 、 $D_r=50\%$ 、 $D_r=95\%$ に変化させることとした。水平載荷実験は再現性の確認のため、各ケースにおいて3回ずつ実験を行った。

## 2.2 模型実験による水平抵抗力-変位関係

地盤密度を変化させた際の水平抵抗力-変位関係を図3に示す。 $D_r=50\%$ として受圧体Aを用いたL-A14では水平抵抗力は水平変位1 mmで約30 Nまで増加し、水平変位8 mmでは80 N程度まで緩やかに増加したのに対し、無対策のL-N15では水平抵抗力が小さく、水平変位8 mmで30 N程度であった。受圧体Aを用いて $D_r=85\%$ としたM-A9と $D_r=95\%$ としたH-A16では荷重開始直後に水平抵抗力が急増した後、水平変位8 mmではM-A9が140 N程度、H-A16が200 N程度となった。一方で、無対策で $D_r=85\%$ としたM-N2では水平変位4 mmにおいて50 N程度で頭打ちとなり、 $D_r=95\%$ としたH-N17では水平変位2 mmにおいて70 N程度でピークを示した後に低下した。受圧体Aを設置した時の水平抵抗力は、どの地盤密度においても無対策の水平抵抗力の2倍程度に増加しており、地盤密度の違いに起因する受働土圧が大きな影響を与えているとみられる。

受圧体Aのカゴ材に生じた張力について、地盤密度が $D_r=85\%$ のM-A9-aの結果を代表して図4に示す。No. 1-1~No. 1-3が受働地盤側、No. 2-1~No. 2-3が管模型側であり、No. 2-2は埋設管模型の頂点と接しているため張力を正確に計測できない可能性が高い。受働地盤側のカゴ材は荷重開始から張力が発生しているのに対し、埋設管側のカゴ材は圧縮力が発生した後に張力が発生している傾向が得られた。管模型からの作用力に対して、地盤内で受圧体は曲げ変形挙動を示しているといえる。また、地盤密度を $D_r=55\%$ にしたL-A14

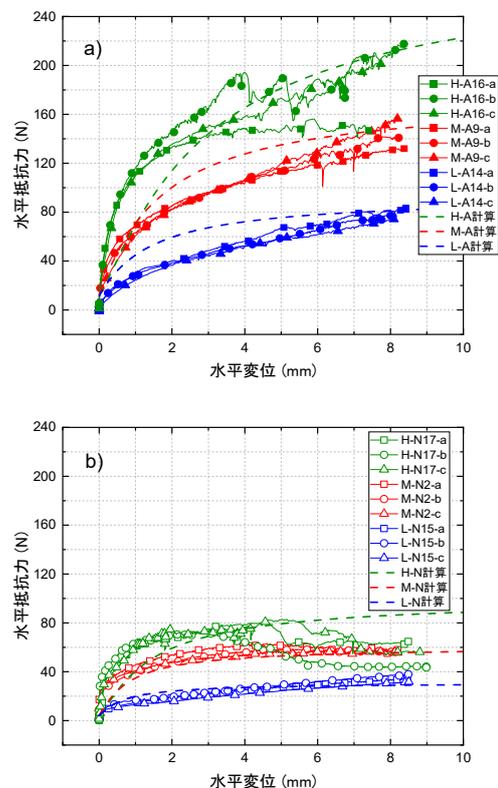


図3 異なる地盤密度における水平抵抗力-変位関係 (a) 受圧体A, (b) 無対策)

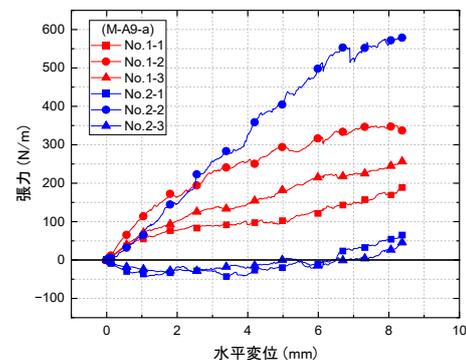


図4 M-A9-aの張力-変位関係

では変位に対する張力の増加傾向が緩やかであり，地盤密度を  $D_r=95\%$  にした H-A16 では水平変位 3 mm 付近で受働地盤側では張力が頭打ちになったほか，埋設管側では圧縮力が大きく生じた後に大きな張力が生じる傾向が得られた．地盤密度が大きいと地盤の剛性が大きくなり，受圧体のカゴに生じる張力が増大して拘束効果が高まるとみられる．

地盤密度を  $D_r=85\%$  として受圧体 A を用いた M-A9，受圧体 B を用いた M-B11，受圧体 C を用いた M-C12，無対策の M-N2 の結果を図 5 に示す．中詰め材を POM 樹脂にした受圧体 B を用いると水平抵抗力-変位関係の初期勾配が大きくなった．受圧体 B は载荷に伴う変形がほとんどないため，埋設管から荷重を受けると速やかに反力が発揮されたためと考えられる．一方で，水平変位が 5 mm 程度を超えると水平抵抗力が頭打ちとなり，8 mm に達すると水平抵抗力は受圧体 A と同程度になった．高さが半分の受圧体 C を用いた M-C12 は，载荷直後の初期勾配は受圧体 A の M-A9 と同程度であるものの，水平変位 4 mm 程度において約 90 N で頭打ちとなり，水平抵抗力のピーク値は無対策の約 1.5 倍であった．

地盤密度を  $D_r=85\%$  とし，受圧体 A を用いて埋設深度を深く (75 mm) した Md-A5 と無対策の Md-N6 の結果を図 6 に示す．M-A9，M-N2 よりも土被りが 1.5 倍になった結果，水平抵抗力は対策の有無によらず約 1.7 倍となった．

### 3. 地盤材料の強度変形特性と受圧体の水平抵抗力-変位関係のモデル化

模型実験で得られたとおり，埋設管の水平抵抗力-変位関係は地盤条件や蛇籠型受圧体条件によって変化する．設計での使用を考慮すれば，受圧体の設置による効果は水平抵抗力の増大だけでなく，変位量を予測可能な水平抵抗力-変位関係の増強として捉える必要がある．そこで，地盤材料の強度変形特性と受圧体の水平抵抗力-変位関係をモデル化することで，受圧体による抵抗力の増大効果を評価する手法の構築を行った．

まず，地盤材料の強度変形特性は圧密排水 (CD) 試験で得られた応力-ひずみ関係に基づいて，動員摩擦角-最大せん断ひずみ関係に変換し，さらに双曲線関数で近似することでモデル化を行った (図 7)．

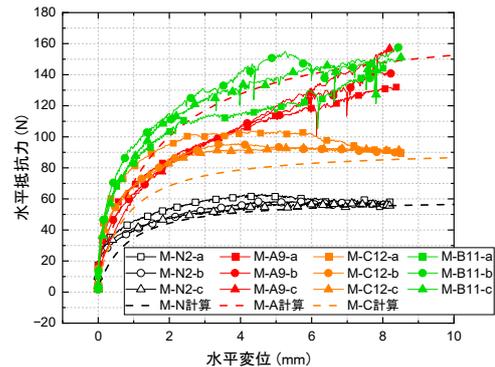


図 5 受圧体が異なる場合の水平抵抗力-変位関係

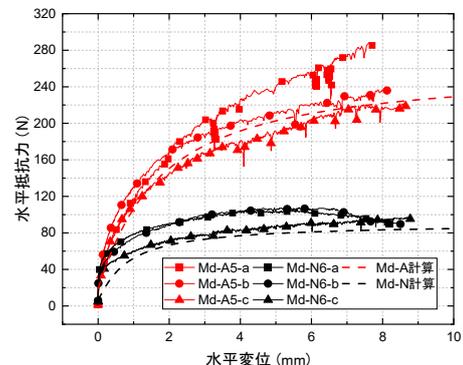


図 6 埋設深度を深くした場合の水平抵抗力-変位関係

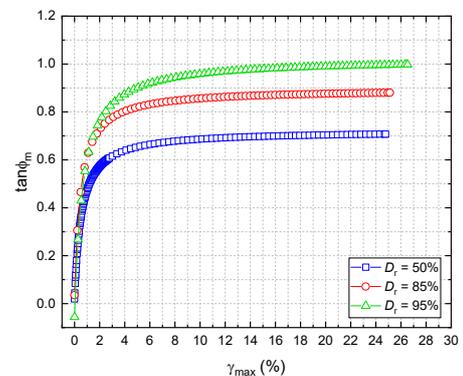


図 7 モデル化した地盤材料の強度変形特性

受圧体設置時の水平抵抗力 ( $R_g$ ) は、受圧体に作用する受働土圧合力 ( $P_p$ )、受圧体の上下面で生じる摩擦抵抗力 ( $F_t$ ,  $F_b$ ) と側面で生じる摩擦抵抗力 ( $F_s$ ) の合力であると仮定してモデル化した (図 8)。これらの計算において、土の強度として図 7 に示す動員摩擦角-最大せん断ひずみ関係を適用し、水平抵抗力-変位関係の推定を行った。

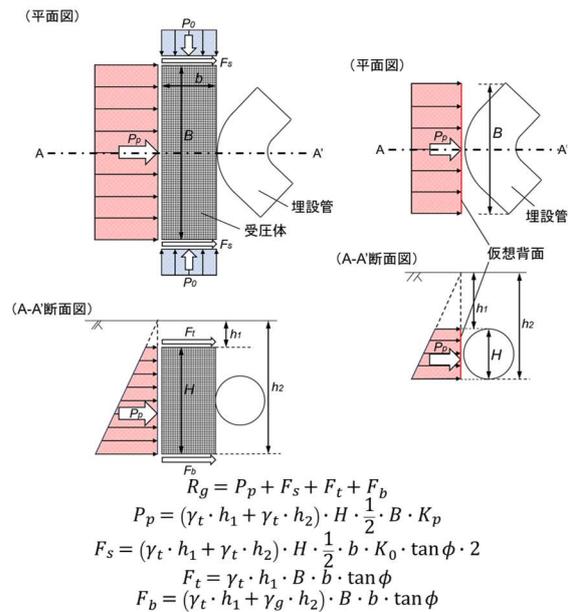
#### 4. 計算モデルの検証

計算で得られた水平抵抗力-変位関係を、図 3、図 5、図 6 に破線で示す。異なる地盤密度における計算結果は、無対策では実験結果と概ね一致したが、受圧体設置条件では  $D_r=95\%$  ではやや過小に、 $D_r=85\%$  と  $D_r=50\%$  ではやや過大の評価となった (図 3)。また、受圧体 C を用いた場合においても推定結果はやや過小であった (図 5)。一方で、作用力を受けても曲げ変形しない受圧体 B の水平抵抗力-変位関係は推定結果と概ね一致したことから (図 5)、計算による過大・過小評価の原因は受圧体 A や受圧体 C の変形に起因すると考えられる。図 3 や図 5 では受圧体を地表面付近に極端に浅く埋設しているために受圧体の変形が生じ易く、計算値との差を大きくしたとみられる。また、埋設深度を 75 mm とした図 6 では対策の有無によらず推定結果は実験結果とよく一致しており、図 3 や図 5 のように土被りが極端に薄い限り受圧体の変形は抑制され、変形の影響は小さいといえる。実際の施工を考えれば数百 mm の土被りがあることから受圧体の変形の影響を補正する必要はなく、受圧体の寸法および地盤材料の強度変形特性を取得すれば、提案する計算モデル (図 8) により良好な推定結果が得られるものと考えられる。

#### 5. まとめ

上水道管のスラスト力防護対策として、受圧体の設置により得られる水平抵抗力-変位関係の増強効果を明らかにするとともに、この対策効果を評価する計算モデルの構築を行った。

地盤内で埋設管模型に水平変位を与える模型実験を実施した結果、受圧体を設置することで水平抵抗力は増加し、その程度は地盤密度や埋設深度の影響を受けること、間隙水圧の消散促進を想定して礫材を中詰め材とした受圧体は地盤内で曲げ変形を示すことが明らかになった。これら結果を基に、受圧体の設置による水平抵抗力が受働土圧と摩擦抵抗に起因すると仮定し、地盤の強度変形特性を用いて水平抵抗力-変位関係の計算モデルを構築したところ、土被りが極端に薄い条件など受圧体の変形が大きくなる場合は計算結果と実験結果の乖離が大きくなったものの、土被りが存在する条件や受圧体が曲げ変形しない条件においては計算結果と実験結果はよく一致した。つまり、本計算モデルを用いれば受圧体を設置した時の水平抵抗力-変位関係を良好に評価でき、施工条件に応じて水平抵抗力と変位量を考慮した受圧体の設計が可能になる。



$\gamma_t$ : 裏込め土の湿潤単位体積重量( $\text{kN/m}^3$ ),  $\phi$ : 裏込め土の内部摩擦角,  $K_p$ : 受働土圧係数,  $K_0$ : 静止土圧係数,  $h_1$ : 地表面から受圧体上面の高さ(m),  $h_2$ : 地表面から受圧体下面の高さ(m),  $H$ : 受圧体高さ(m),  $B$ : 受圧体の奥行き長さ(m),  $b$ : 受圧体厚さ(m),  $\gamma_g$ : 受圧体の湿潤単位体積重量( $\text{kN/m}^3$ )

図 8 水平抵抗力のモデル化