

土のう型受圧体による既設上水管の地震時安定性の向上 Improvement of seismic stability for existing water pipe by using geogrid-gabion

18N3100011E 川崎 佑斗 (地盤工学研究室)
Yuto KAWASAKI / Geotechnical Engineering Lab.

Key Words : water pipe, thurst force, liquefaction, seismic stability

1. はじめに

内水圧が作用する上水管の屈曲部にはスラスト力が作用している。地盤の抵抗力が不足する場合、現状では防護コンクリートを打設して受働土圧を確保する対応が取られる。しかし、この対策では地震時に周辺地盤が液状化することは考慮されていない¹⁾。また、防護コンクリートの設置による管系の自重増加は地震時での水平慣性力の増加に結びつく結果、管系に生じる水平変位を増加させる恐れがある。このような問題点を踏まえ、周辺地盤が液状化した状態でも効果を発揮する対策方法として土のう型受圧体 (以下、受圧体) による方法が提案されている²⁾。本研究では、受圧体の設置による変位抑制効果を1G場での振動台実験によって検討した。

2. 対策工法と実験の概要

現在のスラスト力対策工である防護コンクリート工と、本研究で提案する受圧体による対策工法の概要を図-1に示す。受圧体は、ジオグリッドを籠状にして碎石を中詰めしたものである。透水性の良い碎石を用いたことで受圧体は高い透水性を有し、中詰め材の密度を周辺地盤と一致させることで受圧体自重による沈下も抑制できる。

防護コンクリート工(図-1a)は、受圧面積を増加させることで受働抵抗を保持するとともに、周辺摩擦でスラスト力に抵抗する。一方、受圧体を用いた対策工法(図-1b)では、事前に作成した受圧体を設置場所に持ち込むことができ、掘削領域も管屈曲部の受働側のみで済むために迅速に設置ができる。また、ジオグリッドの耐久性は一般的に高いため、長期的な耐用にも問題は生じない。

本研究では縮尺模型を用いた1G場での振動台実験を実施し、受圧体の設置による管系の水平変位抑制効果、およびそのメカニズムを調べた。図-2に実験概要を示す。長さ1,000×奥行400×高さ800 mmの土槽内に、高さ350 mmの模型地盤を作製した。均一性のある液状化地盤となるように、豊浦砂($\rho_s=2.649 \text{ g/cm}^3$, $e_{\max}=0.939$, $e_{\min}=0.586$)を用いて相対密度 $D_r=40\%$ ($\rho_r=1.473 \text{ g/cm}^3$)の地盤条件とした。土槽中央部、地表面から100 mmの位置に直径 $D=50 \text{ mm}$ ×長さ380 mmの管模型を配置した。本来は3次元的な埋設管屈曲部～蛇籠型受圧体の安定問題を、本研究では2次元として単純化している。管模型はステンレス製の直管を用い、内部を水で満たすことで管模型に浮力が生じないようにした。

受圧体模型の寸法は幅50 (=D) ×高さ100 (=2D) ×奥行380 mmである。外枠には縦横目合い4 mmのPP製ネットを、中詰め材にはM-30の規格粒度の安山岩碎石 ($\rho_s=2.795 \text{ g/cm}^3$) の粒径4.75~30 mmの礫分を用いた。中詰め材の密度は、模型地盤と同等な密度となるように調整した。

管屈曲部に発生するスラスト力を模擬した力は土槽内部に作製した载荷装置を介して加振軸方向と同じ軸方向に負荷させた。加振時には、所定のスラスト力を加振軸方向に負荷させて常時の安定性を確認した後に5.0 Hz、目標加速度 1.0 m/s^2 、正弦波を30波、土槽長手方向に与えている。この加振条件は、管に有意な水平慣性力が作用せず、模型地盤が全体的に液状化する条件として設定した。過剰間隙水圧 Δu の上昇過程で管模型に作用する水平慣性力は小さいため、管に生じる水平変位はスラスト力～抵抗成分のつり合い条件が原因となる。

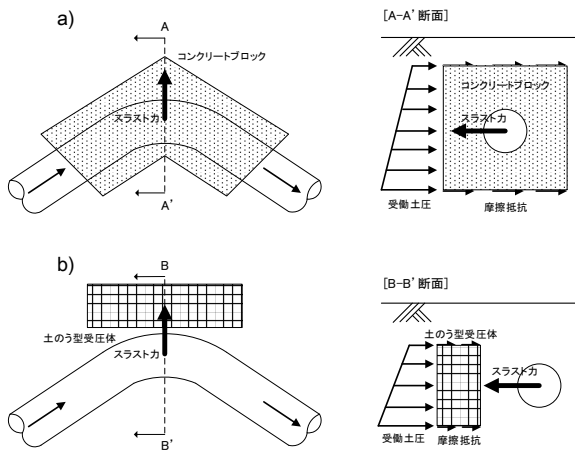


図-1 対策方法と抵抗要因；a)防護コンクリート工，b)土のう型受圧体を用いた対策工法

本研究で行った実験ケースを表-1に示す。実験ケースは、無対策の場合にどの程度の変位が生じるかという指標として管のみにスラスト力を負荷させるシリーズ(P)，受圧体単体の挙動を把握することを目的としたシリーズ(G)，受圧体を配置した場合の管の地震時安定性を検討するシリーズ(PG)である。なお、上記以外に、水平地盤のみ、および受圧体にスラスト力を負荷させないケース(Case G-0)も実施している。それぞれのシリーズごとで負荷させるスラスト力は最多で4段階とした(表-1)。本研究では、負荷した重錘の重量を管の射影面積で除した値を「管の射影面積あたりのスラスト力」とした。本研究で負荷した最大の重錘の重量は12.5 kgで、これはスラスト力としては6.1 kPaとなる。この値は今回作製した模型地盤において常時の安定性が保持できる限界の値であり、有効上載圧の7.0倍という非常に大きな値となる。以下、文中においては実験ケース名をCase P-2.5などと称することとし、シリーズの末尾に荷重レベルを添えることでケース名を表現する。

模型地盤内の過剰間隙水圧 Δu を把握するため、模型地盤内に間隙水圧計を配置した。以降に示す過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma_v$ は、測定された水圧値を加振前の設置位置での有効上載圧 σ_v で除した値である。

3. 液状化時での管の水平方向の安定性に及ぼす受圧体の効果

液状化時での管の水平方向の安定性に及ぼす受圧体の効果には、以下の2つがある；

- 1) 水圧消散効果：液状化に至る過程では過剰間隙水圧 Δu の上昇抑制，地震後では過剰間隙水圧 Δu の消散促進によって有効応力が早期に回復する
- 2) 受圧効果：管径よりも射影面積が大きい受圧体を介することで、大きな受働抵抗を発揮できる

1) 水圧消散効果に関して、図-3に水平地盤とCase G-0の過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。水平地盤においては、加振開始後($t=3.0$ s)直ちに過剰間隙水圧が上昇し、 $\Delta u/\sigma_v=1.0$ の状態が $t=15.0$ s程度まで継続する。これに対して、受圧体を配置したCase G-0では、水平地盤と同様に加振開始直後に過剰間隙水圧比が上昇するものの、 $\Delta u/\sigma_v=1.0$ の状態である時間は短くなり、さらに Δu が消散するのに要する時間も短くなるのが確認できる。このような水圧消散効果は、スラスト力が作用している状態でも生じる。最大のスラスト力を負荷させたケース(Case P-12.5, Case G-12.5, Case PG-12.5)の $\Delta u/\sigma_v$ および水平変位 d の時刻歴を図-4に示す。受圧体の変位しているために $\Delta u/\sigma_v$ の値は不明瞭になるが、受圧体を配置していないCase P-12.5では加振終了後($t=9.0$ s)でも水平変位が増大しているのに対し、受圧体を配置したCase

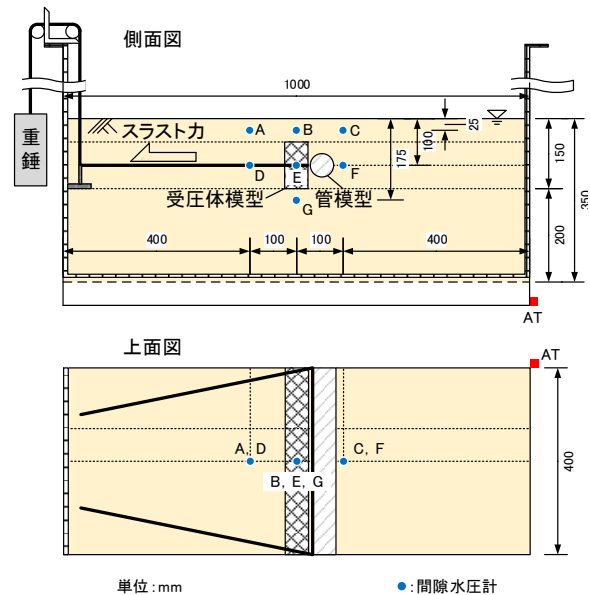


図-2 振動台実験における模型地盤の概要図

表-1 実験ケース

	水平地盤	管 (P)	土のう型受圧体 (G)	管+土のう型受圧体 (PG)
管	—	○	—	○
対策工 (受圧体)	—	—	○	○
スラスト力	—	—	0	—
	—	2.5	2.5	—
	—	5.0	5.0	5.0
	—	—	10.0	—
	—	12.5	12.5	12.5
管の射影面積あたりのスラスト力 [kPa]	—	—	0	—
	—	1.2	1.2	—
	—	2.5	2.5	2.5
	—	—	4.9	—
	—	6.1	6.1	6.1
スラスト力/有効上載圧 [—]	—	—	0	—
	—	1.4	1.4	—
	—	2.8	2.8	2.8
	—	—	5.6	—
	—	7.0	7.0	7.0

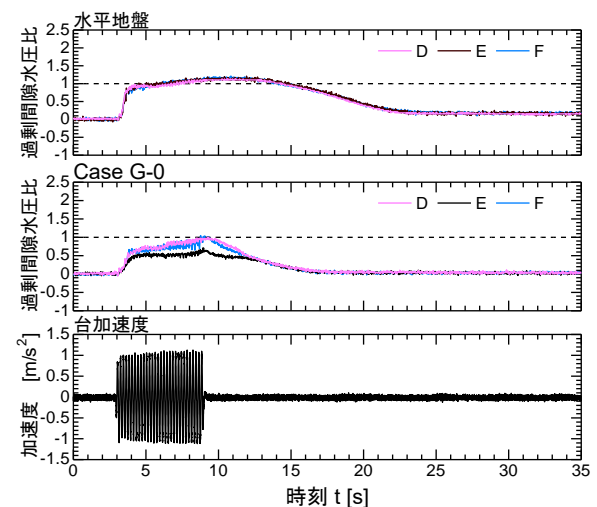


図-3 受圧体の水圧消散効果(管模型なし)

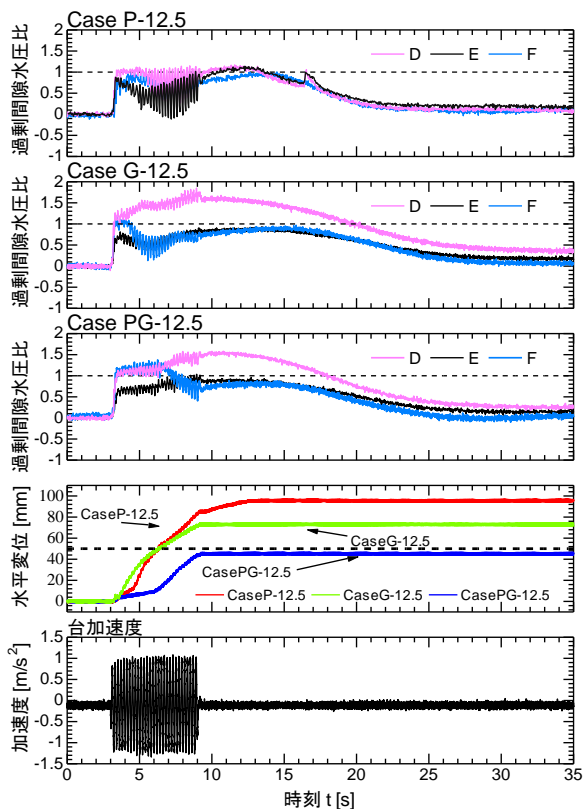


図4 最大のスラスト力が作用した時の過剰間隙水圧比と管の水平変位の時刻歴

G-12.5およびCase GP-12.5では加振終了後直ちに水平変位の進行がなくなる。この現象は、受圧体によって水圧の消散が促進して有効応力が速やかに回復したことが強く反映された結果と考えられる。

2)受圧効果に関して、スラスト力を負荷させたCase P-12.5の最終水平変位が100 mm程度であるのに対し、受圧体にスラスト力を負荷させたCase G-12.5の最終水平変位が70 mm程度であることから、射影面積が大きくなると液状化時での水平変位の抑制に有利になることが確認できる(図-4)。また、受圧体が管から間接的に負荷を受けるCase PG-12.5ではこの受圧効果が顕著に現れており、水平変位の進行は他の2ケースと比べ遅れ、最終水平変位も大幅に低減される。

スラスト力を受ける内圧管の液状化時の変位特性、および受圧体による変位抑制効果の把握のため、スラスト力の大きさ—管の水平変位の関係を図-5に示す。スラスト力は加振前の有効上載圧 σ_v で、水平変位は管径 D (=50 mm)でそれぞれ正規化している。本実験では、比較的小さなスラスト力であっても、無対策の管では周辺地盤の液状化によって水平変位が生じた。変位量 d はスラスト力の大きさによって異なるが、スラスト力の大きさだけでは定まらない。すなわち、液状化地盤

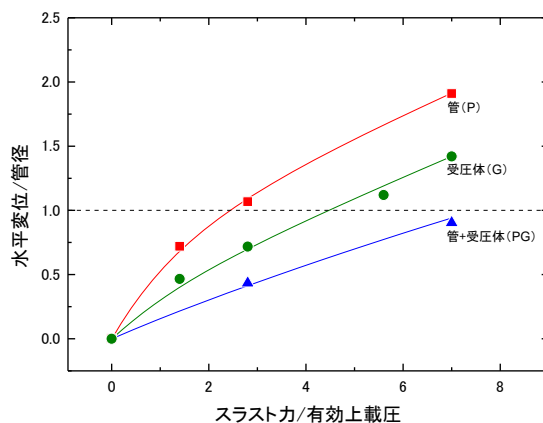


図-5 スラスト力—管の水平変位の関係

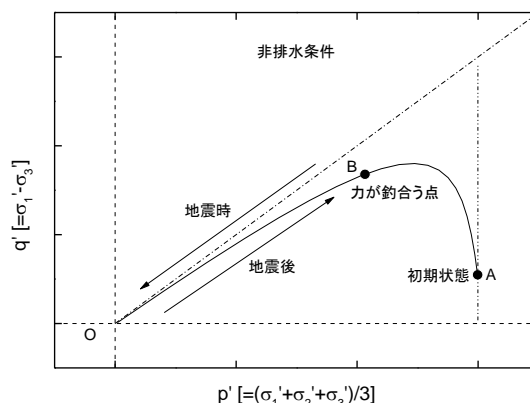


図-6 振動台実験における有効応力履歴のイメージ図

内にある内圧管に生じる水平変位量は、スラスト力の増大に対して変位の進展速度が減少していく特性であり、スラスト力の増大に伴って加速的に変位が増大するものではない。これは、管の水平変位が生じる過程で、受働領域の密度が増加して受働抵抗が発揮されることが原因であろう。この水平変位に伴う密度増加による受働抵抗の程度は土質や密度状態等によって異なると推測されるが、この受働抵抗が把握できれば管の水平変位量の予測、さらには対策の必要度の判定につながると考えられる。

地震によって地盤が液状化しても管に生じる水平変位量は、受圧体を配置することで抑制できる(図-5)。定量的には、無対策の管と比較すると変位量は半減され、常時で支持できる限界のスラスト力が作用する条件であっても管径 D 程度にとどめることができる。変位抑制の要因は、前述の水圧消散効果である。水圧消散効果による管周辺領域の有効応力の保持は、管の変位時での摩擦抵抗の保持にも関係してくる。 Δu が増加しても有効応力が残存していれば、受圧体の境界には摩擦抵抗(図-1b)が発揮される。受圧体の設置による有効応力が

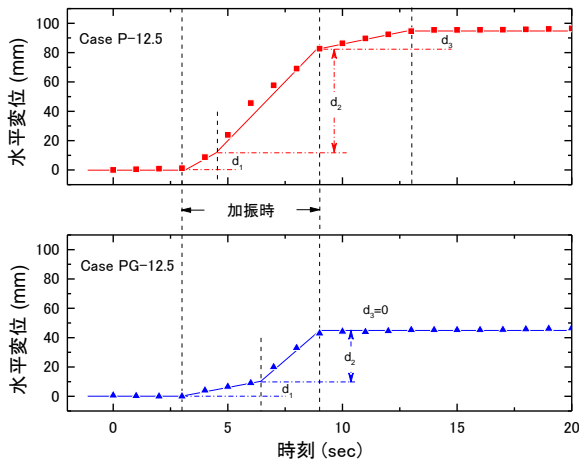


図7 最大スラスト力を負荷した管(Case P-12.5), および管+受圧体(Case PG-12.5)での水平変位 d の時刻歴

残存する領域は、受圧体境界面だけでなく管も含めた領域であるため、有効応力の残存は有意な抵抗成分となる。スラスト力が同一であっても受圧体(G)と管+受圧体(PG)との水平変位量 d には明確な差がある(図-5)ことから、受圧体による水圧消散効果は管周辺にも発揮されていることが分かる。すなわち、スラスト力への受圧体の抵抗成分は、正確には「受働抵抗」と「管と受圧体の境界に作用する摩擦抵抗」の総和であることが確認された。本研究で検討しているスラスト力防護工法は受圧体を管周辺に配置するのみという単純な方法であるが、従来の防護コンクリートと比較すると液状化時での抵抗成分を効果的に得られる結果、管系の地震時安定性の保持につながることを確認できた。この状態を有効応力経路で模式的に示したものを図-6に示す。受圧体を設置すると、地震時では少なからず Δu は生じ得るものの、管系の水平方向の力のつり合い条件を保持できる。

また、管の水平変位の時刻歴から、液状化時での管系の平衡状態の推移と受圧体の変位抑制効果が確認できる。図-7に、最大スラスト力を負荷した管(Case P-12.5), および管+受圧体(Case PG-12.5)での水平変位 d の時刻歴を示す。管の水平変位 d は、3つの状態での生じた変位の累積であると考えられる。

$$d = d_1 + d_2 + d_3 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

d_1 : 地震動の作用によって地盤内の Δu が増加して管系の平衡状態が崩れたが、有効応力は残存している状態で生じた変位

d_2 : $\Delta u/\sigma_v$ が1.0に達して、地盤がせん断抵抗を失い生じた変位

d_3 : 地震後に地盤の有効応力が回復して力の釣合いを取り戻すまでに生じた変位

$d_1 \sim d_3$ のうち、最も変形量が大きいののは d_2 である(図-7)。したがって、管系が破損せずにその機能を保持するためには、 d_2 の抑制の可否が重要となる。Case P-12.5において管単体では射影面積が小さく、排水性能を持たないため、加振直後($t=4$ s)に地盤が液状化状態に達しており、その後は有効応力がほぼゼロの状態で大分の変位 d_2 が生じている。加振終了後($t=10 \sim 13$ s)においても、過剰間隙水圧の消散に時間を要するため有効応力の回復が遅れた結果、 d_3 が生じてしまっている。

一方、Case PG-12.5においては、排水性能をもつ受圧体が管から負荷されるスラスト力を間接的に受け持つ結果、受圧体近傍に存在する地盤に有効応力がわずかに残存して粘り強くなっている。具体的には、 d_1 と評価できる変位が生じている時間($t=3 \sim 7$ s)が長く、抵抗力がほぼゼロの状態が生じる d_2 がCase P-12.5と比較すると2分の1以下になっている。受圧体によって管周辺における力の釣合いが安定したため、 d_3 も抑制したと考えられる。

4. まとめ

上水管の地震時安定性の向上にむけて、土のう型受圧体を用いたスラスト力防護対策の変位抑制効果およびそのメカニズムを検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 地震によって地盤が液状化しても、受圧体を配置することで管に生じる水平変位量を効果的に抑制できる。想定し得るスラスト力の範囲内において、水平変位量は管径程度以下に抑制できる。
- 2) 受圧体による管の水平変位抑制効果は、水圧消散効果と受圧効果である。水圧消散効果による管周辺領域の有効応力の保持は、管の変位時での摩擦抵抗の保持につながる。
- 3) 管の変位が生じる過程において変位は3段階に分けられ、変位の大部分を占めるのは地盤が液状化した状態において生じる変位である。したがって、管系が破損せずにその機能を保持するためにはこの変位を抑制することが極めて重要である。これに対して、排水性能を持つ土のう型受圧体を設置して周辺地盤の有効応力を保持することで液状化に対して管の安定性には韌性が期待できる。

参考文献

- 1) 農林水産省農村振興局整備部設計課：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」、9.8 スラスト力の検討, pp.387-398, 2019
- 2) 荒木裕行, 平川大貴：蛇籠型受圧体を用いた埋設管屈曲部のスラスト力防護工法の提案, 土木学会論文集 C, Vol74, No.1, pp106-117, 2018.