

繰返し水平載荷作用時の一体橋梁橋台 背面部における土圧増加挙動に関する研究

A study on earth pressure rise behavior at the back of integral bridge abutment under the cyclic horizontal loads

21N3100031K 瀬賀 達夫 (基礎・地下構造研究室)
Tatsuo SEGA / Foundation and Underground Structure Lab.

Key Words : integral bridge, cyclic horizontal load, aluminum rod laminate, distinct element method

1. はじめに

従来の橋梁では橋桁の温度伸縮に対処するために支承部があるが、地震時に支承部が可動域を超えることにより落橋する問題が生じている。さらに、支承部が狭隘な位置に存在しており、伸縮装置からの漏水による腐食化や砂の堆積による機能劣化に対する維持管理が必要であるため、構造的な弱点部である他、建設費・維持管理費が高く経済的な弱点部となっている。

一方、一体橋梁はRCの橋台と橋桁が一体化しているため、支承部がない橋梁であり、欧米を中心に普及している橋梁形式である¹⁾。しかし、大気温の変動により橋桁が熱伸縮し壁面工の繰返し水平変位が起こり、それに伴う土圧増加により壁面工損傷が生じる恐れがあるため、日本での新設橋梁の施工事例は少ないのが現状となっている。また、既設橋梁の延命化として、桁式橋梁を一体橋梁にリニューアルする工法が開発されている²⁾。この工法の設計においては、土圧増加に対する抵抗力を確保するために地山補強材での補強を前提としているが、土圧増加の影響を定量的に評価することができれば、敷設する地山補強材の量が低減されるなど、その設計を大幅に合理化できる可能性がある。

そこで、本研究では一体橋梁の温度伸縮による土圧増加のメカニズム解明を目的に、アルミ棒積層体を用いた擁壁土圧実験装置によって繰返し水平載荷実験を実施した。さらに本論文では、載荷中の背面地盤の粒子同士力の釣り合い（以下、粒子間接触力）を個別要素法による再現解析により可視化することで土圧増加のメカニズムを詳細に考察する。

2. 実験概要

擁壁土圧実験装置の概要を図-1に示す。本実験では、この装置の擁壁板の下端をピン固定した状態で擁壁板上部に水平変位を繰返し与えることで、温度変化による一体橋梁桁部の伸縮挙動を模擬した。

模型地盤材料には、側面の拘束がなく、2次元的な地盤の変形挙動を直接確認できるアルミ棒積層体を採用した。アルミ棒は、長さ150mmで、直径1.5mmと2.0mmと3.0mmを重量比1:1:1で混合したものを用いた。

本実験での載荷方法は、載荷装置の水平変位 δ を同一振幅で繰返し載荷回数 N が100になるまで与える変位制御とした。本論文では、主働側だけに繰り返す条件を対象として、その変位振幅 Δx_a を変化させた表-1に示す各実験ケースを実施した。なお、表-1には各実験での初期の静止土圧係数 K_0 を併せて示している。

実験装置概要、模型地盤の作成方法、受働側だけに繰返し載荷するケースおよび主働側と受働側に繰返し載荷を与える正負交番載荷のケースについては参考文献³⁾を参照されたい。

3. 実験結果

実験結果として、図-2にケースA18の繰返し回数 $N=1$ および2での水平土圧係数 K_h と壁体傾斜角 $\theta = \delta/H$ 関係

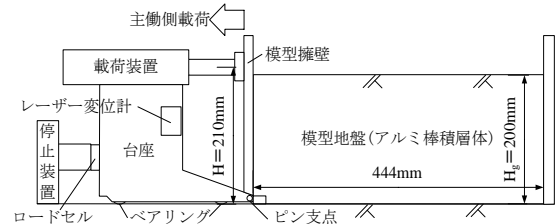


図-1 擁壁土圧実験装置

表-1 実験ケース

ケース名	変位振幅 Δx_a	壁体傾斜角の振幅 $\theta_{pp} = \Delta x_a / H$	初期の静止 土圧係数 K_0
A0.1	0.1mm	4.76×10^{-4}	0.445
A01	1mm	4.76×10^{-3}	0.434
A03	3mm	1.43×10^{-2}	0.436
A08	8mm	3.81×10^{-2}	0.491
A13	13mm	6.19×10^{-2}	0.467
A18	18mm	8.57×10^{-2}	0.463

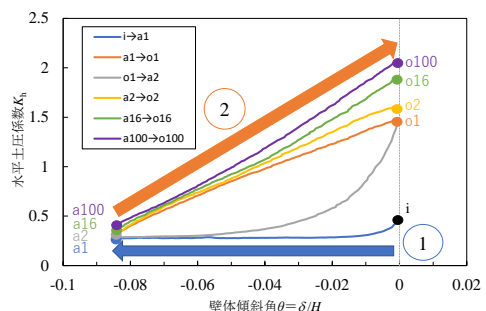


図-2 ケースA18の K_h - θ 関係

(以下、 $K_h-\theta$ 関係と表記)と $N=16$ および 100 での載荷装置水平変位が主働側最大変位時から初期位置に戻すまでの $K_h-\theta$ 関係を示す。なお、それぞれの図中には擁壁の初期位置を i 、繰返し回数 N 回目の主働側最大変位時を aN 、変位がゼロ(初期位置)に戻った時を oN として併記している。

図-2より、壁面を主働側に傾斜させると①の矢印に示すように主働土圧の $K_h-\theta$ 関係となる。その後、擁壁を主働側に傾斜させた状態から押し戻すと水平土圧係数が増加していく②の矢印に示すような $K_h-\theta$ 関係となり、水平変位 $\delta=0$ で初期状態の静止土圧係数を大きく上回る履歴ループを描く。繰返し載荷時の擁壁が変位ゼロ時である $i, o1, o2, o16, o100$ に着目すると、繰返し載荷回数 N の増加に伴って土圧が累積的に増加する傾向が確認できる。

この $K_h-\theta$ 関係における各サイクルの変位ゼロ時の最大土圧の増加挙動の程度を把握するため、全ケースの繰返し載荷回数 N と水平土圧係数 K_h の関係(以下、 K_h-N 関係と表記)を図-3に示す。なお、図-3では、 $i, o1, o2, o4, o8, o16, o32, o64, o100$ の値のみ抽出してプロットしている。この図よりA18の土圧の増加傾向が最も顕著であることわかり、振幅が大きいほど最大土圧が大きくなる傾向が確認できるほか、 $N=32$ 以降の土圧の値がほぼ一定値に収束していることが確認できる。

4. 個別要素法を用いた再現解析概要

本実験では主働側のみに繰返し載荷した結果、図-2のような土圧増加挙動が生じることがわかった。このような繰返し水平載荷による土圧増加挙動のメカニズムを詳細に解明するために、Itasca社製PFC2Dを用いた2次元個別要素法による再現解析を行った。実験に合わせて、粒子は直径1.5 mm, 2.0 mm, 3.0 mmのものを重量比1:1:1の割合で用いた。

再現解析に用いたパラメータを表-2に示す。使用モデルは、要素の回転運動に対する抵抗力が考慮可能なRolling Resistance Linear Modelを用いた。粒子の密度 ρ は実験に用いたアルミ棒と同様の密度 $\rho=2650 \text{ kg/m}^3$ 、摩擦係数 μ は、アルミ棒積層体を用いた一面せん断試験の結果⁹⁾を参考に $\mu=0.47$ 、粘性減衰定数 h は臨界減衰となる $h=1.0$ を用いた。

このほかの法線方向ばね定数 k_n 、接線方向ばね定数 k_s 、転がり摩擦係数 μ_r を設定するために、安息角試験と受働側単調載荷実験の再現解析を行った。なお、 k_n, k_s の比率は $k_n/k_s=3.0$ 程度では粒子の挙動が収束しないため、 $k_n/k_s=4.0$ としてパラメータの調整を実施した。

安息角試験は、アルミ棒積層体を用いた実験を個別要素法によって再現解析した研究事例⁹⁾を参考に行った。この安息角試験の概要を図-4(a)に示す。安息角試験で

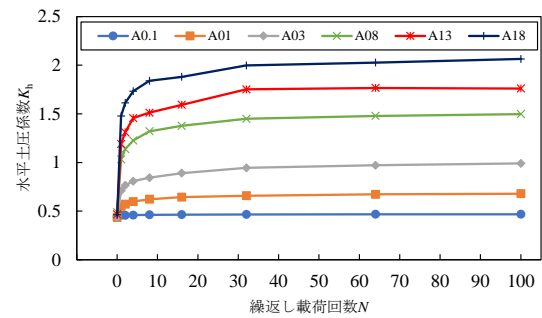
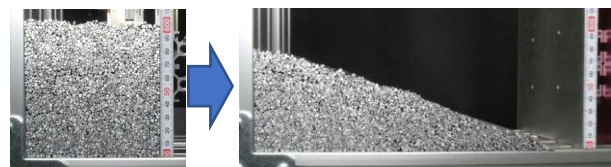


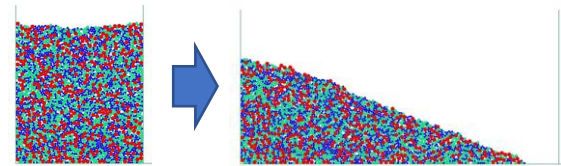
図-3 全ケースの土圧増加傾向

表-2 再現解析に用いたパラメータ

パラメータ	記号 (単位)	値
粒子の密度	ρ (kg/m^3)	2650
法線方向ばね定数	k_n (N/m)	1.0×10^6
接線方向ばね定数	k_s (N/m)	2.5×10^5
摩擦係数	μ (-)	0.47
転がり摩擦係数	μ_r (-)	0.05
粘性減衰定数	h (-)	1.0



(a) アルミ棒積層体を用いた安息角試験



(b) 個別要素法による安息角試験の再現解析

図-4 安息角試験の概要

は、アルミ棒を $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ に撒き出した後、片側の側壁を水平方向にゆっくりと除荷することによって形成された斜面角 α を計測した。この試験を5回行った結果、 $\alpha=18.87^\circ \sim 20.38^\circ$ となった。この範囲内に収まるように k_n, k_s, μ_r を調整した。表-2に示したパラメータにより再現した安息角試験の変形状況を図-4(b)に示す。再現解析の結果 $\alpha=20.09^\circ$ となり、5回行った安息角試験の斜面角の範囲内となった。

受働側単調載荷実験の再現解析は実験と同様に擁壁を下端を中心として傾斜した。実験を5回行った $K_h-\theta$ 関係の範囲内に収まる k_n, k_s, μ_r の値を設定した。5回の実験と再現解析の $K_h-\theta$ 関係を図-5に示す。なお、図-5では載荷前の初期の静止土圧係数土圧 K_0 には乖離があるが、 K_0 を基に k_n, k_s, μ_r を設定して、受働側単調載荷実験の再現解析を行った結果、図-5に示した曲線状の $K_h-\theta$ 関係とならず、線形増加することを確認している。そのため、本論文では $K_h-\theta$ 関係の非線形性が概ね一致した表-2に示したパラメータを設定した。

受働側単調載荷実験の背面地盤挙動の再現性を確認

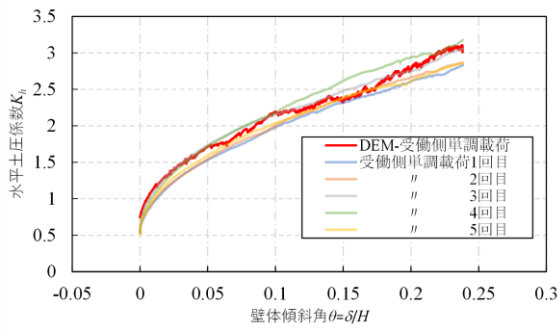


図-5 受働側単調載荷時の K_h - θ 関係

するため、Ditect社製DippStrainを用いたデジタル画像相関法による画像解析を行い、ひずみ分布を求めた。画像解析結果として、 $\theta=0.238$ ($\delta=50$ mm) の水平載荷によって生じた主せん断ひずみの分布を図-6 (受働側単調載荷実験を図-6(a)、受働側単調載荷による再現解析を図-6(b)) に示す。図-6(a)、(b)を比較するとひずみ分布の形状は概ね一致しており、背面地盤挙動を概ね再現できていることが確認できる。

以上のパラメータを用いて繰返し水平載荷実験の再現解析を行った。

5. 個別要素法を用いた再現解析結果

表-2で示したパラメータを用いて、模型擁壁の繰返し水平載荷を再現した。本解析では、主働領域に繰返し載荷し、土圧増加現象がほとんど生じていないケースA0.1、土圧増加現象が顕著であるケースA08を対象に繰返し載荷回数 N が4回に達するまでの再現解析を行った。なお、この2ケースの比較のため粒子の初期配置を同様にし、パッキングの差異による挙動の違いを無視できる状態にした。

図-3と同様に繰返し載荷回数 N の進展に伴う変位ゼロ

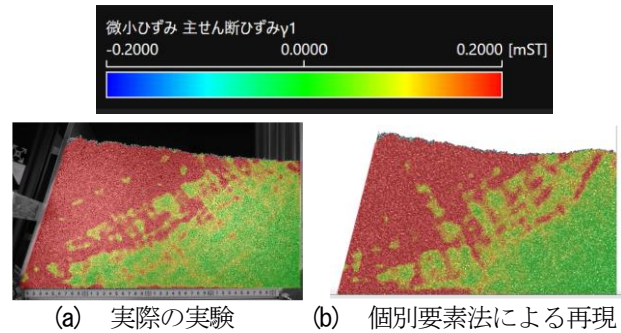


図-6 受働側単調載荷実験の概要

時の K_h 値の推移を図-7に示す。なお、比較のため実際の実験ケースA0.1、A08の K_h 値の推移も併せて示している。

図-7のケースA0.1の再現解析ケース (以下、DEM-A0.1) の K_h 値はケースA0.1と同様に繰返し載荷回数 N の増加による累積的な土圧増加が見られないことがわかる。また、ケースA08の再現解析ケース (以下、DEM-A08) の K_h 値はケースA08と同様に繰返し載荷回数 N の進展に伴い増加していることがわかる。グラフの形状が平行関係にあることが確認できるため、土圧増加挙動を再現できていると言える。

この土圧増加現象の違いを明確にするため、ケースDEM-A0.1、DEM-A08の粒子間接触力のコンター図を図-8

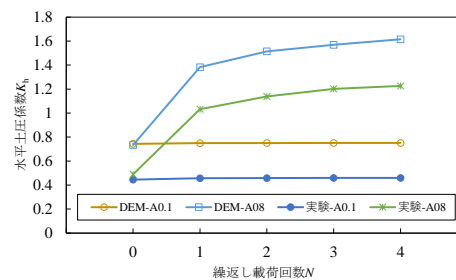


図-7 ケース DEM-A0.1、DEM-A08 の土圧増加傾向

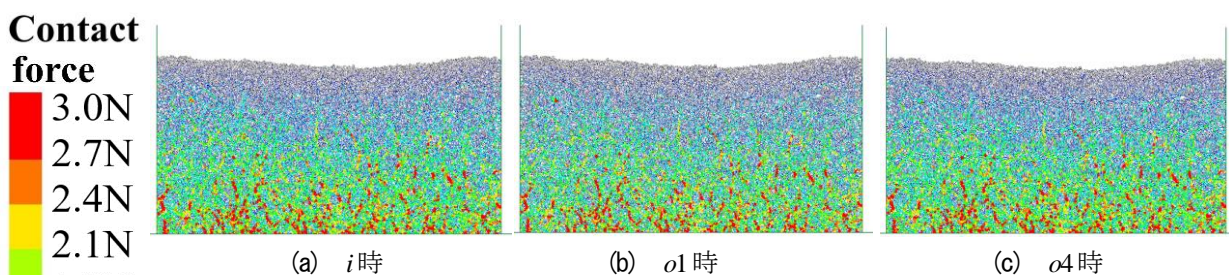


図-8 ケース DEM-A0.1 の粒子間接触力

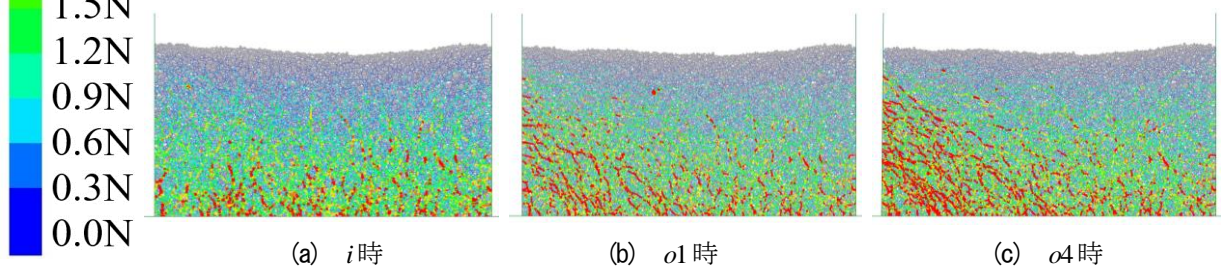


図-9 ケース DEM-A08 の粒子間接触力

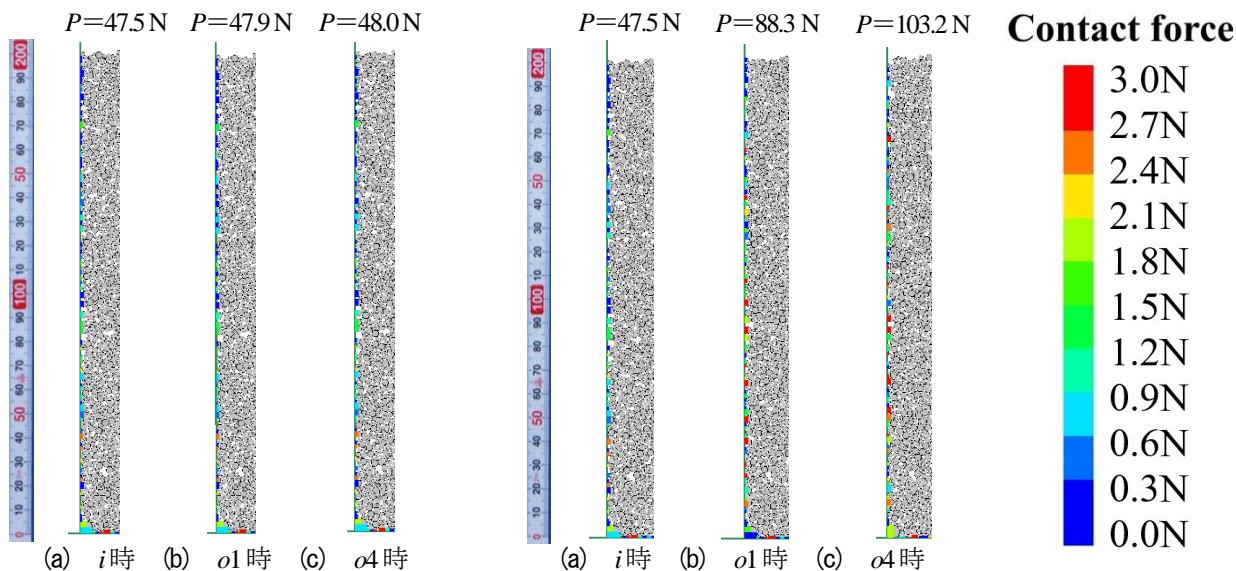


図-10 ケース DEM-A0.1 の粒子-壁間接触力

図-11 ケース DEM-A08 の粒子-壁間接触力

および図-9 (擁壁初期位置時である*i*時を(a), 繰返し回数1回目, 4回目の変位ゼロ時である*o1*時, *o4*時を(b), (c))にそれぞれ示す. 図-8(a), (b), (c)を比較すると全体の粒子間接触力の分布が概ね一致していることがわかる.

一方, 図-9(a), (b)を比較すると, 1サイクルの主働領域の繰返し載荷で粒子間接触力が3.0Nを超える領域が大幅に増加していることがわかる. 図-9(b), (c)を比較すると地盤高さ中間部を中心に3.0Nを超える領域が増加していることがわかる.

接触力が増加している領域を詳細に考察するためにケースDEM-A0.1, DEM-A08の粒子-壁間接触力を図-10および図-11 (*i*時を(a), *o1*時を(b), *o4*時を(c))にそれぞれ示す. なお, 参考として各図上にその時の土圧合力を示した.

図-10(a), (b), (c)を比較すると全体的に粒子-壁間接触力に変化はないことがわかる. 一方, 図-11(a), (b)に着目するとほぼすべての粒子-壁間接触力が増加していることがわかる. 次に, 図-11(b), (c)に着目すると下端から40 mmまで3.0Nを超える地点が*o1*時から*o4*時にかけて減少していることがわかる. 一方で, 下端からの高さ40 mm~100 mmにおいては3.0Nを超える地点の数に変化がない. 対して, 100 mm~160 mmにおいては粒子-壁間接触力が増加している地点が多くあることがわかる. すなわち, 全体の粒子-壁間接触力の分布が上昇しているといえる.

6. おわりに

本論文では, 擁壁土圧実験装置を用いて一体橋梁橋桁の温度伸縮に伴う橋台背面地盤挙動を模擬する実験を行った. そして, 繰り返す振幅が大きいほど土圧増加挙動が生じる結果を得た. さらに, この現象を説明

するためにDEMによる2次元個別要素法による再現解析を行った. その結果, 土圧増加現象が再現できていることを確認した. また, 土圧増加挙動を再現したときの全ての粒子間接触力を示した結果, 繰返し載荷によって粒子間接触力が大きくなる領域が判明した.

なお, 模型地盤高さ $H_g=200$ mmは, 建設済みのGRS一体橋梁の背面盛土高さ(概ね6 m~10 mの範囲)に対する相似比で約1/30~1/50相当である. この相似比からアルミ棒の最大粒径(3.0 mm)を実物換算すると90~150 mm程度となるが, これは鉄道分野での一般的な橋台背面盛土材料の最大粒径40 mm(粒度調整砕石M-40)の約2~4倍程度に相当する. よって, 今後は粒径に対する挙動の違いについて検証していく必要があり, 例えば個別要素法を用いて模型地盤高さや粒径をパラメータとした再現解析を行う必要があると考えられる.

参考文献

- 1) England, George L., Tsang, Neil C.M., and Bush, David I.: Integral bridges : a fundamental approach to the time-temperature loading problem, London, 2000.
- 2) 神田政幸, 須賀基晃, 横山知昭, 館山勝, 杉本一朗 : 鋼桁・橋台・盛土一体化による旧式橋梁の耐震補強, 鉄道総研報告, Vol. 26, No.4, pp.29-34, 2012.
- 3) 瀬賀達夫, 牧野聖, 久保田祐紀, 西岡英俊, 平川大貴 : 繰返し水平載荷を受ける一体橋梁およびGRS一体橋梁のアルミ棒積層体を用いた模型実験, ジオシンセティクス論文集, Vol. 37, pp.47-54, 2022.
- 4) 藤井幹生, 三浦文典, 中筋智之, 赤木寛一, 桐山貴俊 : 大変形領域に着目した擁壁背後の変形挙動, 第12回地盤工学関東支部発表会, pp.98-99, 2015.
- 5) Chao Xu, Cheng Liang, Panpan Shen, Fei Chai : Experimental and numerical studies on the reinforcing mechanisms of geosynthetic-reinforced granular soil under a plane strain condition, Soils and Foundations, Vol. 60, pp.466-477, 2020.