

山留め支保工における地盤改良地中梁の水平方向変形特性 Lateral Deformation Characteristics of Footing Beam improved by DMM in Earth-Retaining Support

今村 眞一郎*

Shinichiro Imamura

宮崎 啓一**

Keiichi Miyazaki

平岡 博明*

Hiroaki Hiraoka

佐藤 靖彦*

Yasuhiko Sato

萩原 敏行*

Toshiyuki Hagiwara

要 約

深層混合処理工法により造成された開削工事等の先行地中梁に関して、改良体全体としての水平剛性の評価方法を確立することを目的として、改良杭の配置形式や改良率を変化させた改良体の水平載荷試験を遠心力場で実施し、改良体水平方向の変形特性を調べた。その結果、改良幅一定の条件では、接円式配置では格子状よりも千鳥状、配置形式では接円式配置よりもラップ式配置が優れた水平抵抗を発揮することが確認された。また、格子改良では改良率が高いほど水平方向の剛性が大きくなり、未改良部の位置や数に応じて改良体は異なる変形破壊性状を示すことが確認された。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 遠心模型実験の概要
- § 3. 実験結果および考察
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

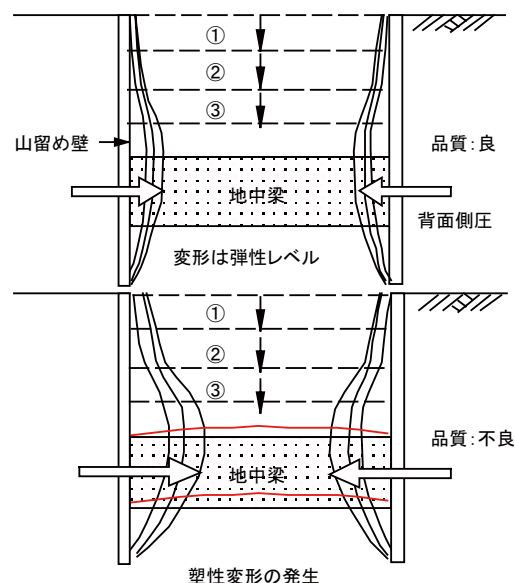
厚く堆積した軟弱地盤における深い開削工事では、山留め壁の変形の抑止および掘削底盤の安定性の確保を目的として、地盤改良による先行地中梁が造成されることが多い。変形抑止のためには、この先行地中梁は山留め壁を介して伝達される横方向からの外力に対して確実に抵抗することが要求される（図一1 参照）。

地盤改良工法によって造成される先行地中梁は、個々の改良杭が相互に組み合わせられたものであり、改良杭の品質状態や施工精度が山留め壁の最大変形量、掘削底盤や山留め架構全体の安定性に及ぼす影響が極めて大きい。実際の改良体地中梁は個々の改良体杭で構成された連続改良体（以下、マスと呼ぶ）として、外力に抵抗するものであり、そのマスとしての挙動を把握することは開削工事の安全性を担保するうえで重要であると考えられる。

本研究では、山留め支保工における地盤改良地中梁に

関して、改良体マスとしての水平剛性の評価方法を確立するために、改良杭の配置方法、改良率などの違いによる改良体水平方向の強度・変形特性および破壊性状を把握することを目的とした遠心模型実験を実施した¹⁾。

本報文では、遠心模型実験について、実験概要と実験結果について述べるとともに、現場計測に基づく山留め壁の変状予測解析における改良地盤のモデル化、変形係数の設定に関する留意点についても述べる。



図一1 山留め掘削に伴う改良体に作用する外力と変形概念図

* 技術研究所技術研究部土木技術研究課

** 技術研究所技術研究部

§ 2. 遠心模型実験の概要

図-2 に、計測工を含む遠心模型実験システムの概要を示す。実験には、前面にアクリル製観測窓を有する鋼製剛土槽（内寸法：長手 600 mm×奥行 200 mm×深さ 500 mm）を使用した。本実験では、深層混合処理工法により造成された開削工事の先行地中梁の一部をモデル化することにし、改良厚 4 m、改良幅・奥行き 16 m の部分を 1/80 縮尺モデルとして、掘削によって上載土が除去された状態で水平荷重を受けている改良体地中梁を想定した遠心模型実験を実施した。

実験システムは、土槽部と水平載荷機構部に分けられ、水平載荷板は載荷ジャッキを介して減速器および駆動モーターと接続されている。なお、載荷ジャッキに接続された載荷シャフトは、スライドベアリングを介して支持されており、シャフトが偏心しないように工夫している。

先行地中梁をモデル化した改良体は、塑性指数 $I_p = 19.8$ の木節粘土に超速硬セメント、遅延剤を添加して、目標一軸圧縮強度 $q_u = 500 \text{ kPa}$ の円柱体 ($\phi 40 \text{ mm}$) として作製したものを型枠に格子状、あるいは千鳥状に並べて作製した。比較のために製作した均一改良 (Case 1) は、改良材を型枠に投入して養生したものである。ラップ施工の場合には、室内での製作の都合上、円柱体と同じ改良材を間隙部に充填することでモデル化し、格子状や千鳥状配置とした改良体に設ける未改良部は石粉に寒天を混練りしたもの ($q_u = 30 \text{ kPa}$) を間隙部に充填することでモデル化した。また、改良地盤の支持地盤は、豊浦砂を用いて相対密度 $D_r = 80\%$ の乾燥砂地盤を 50 mm 厚で作製した。水平載荷試験での改良体と土槽内壁との摩擦低減を図るため、改良体側面にグリースを塗布したセロハン紙を設置した。

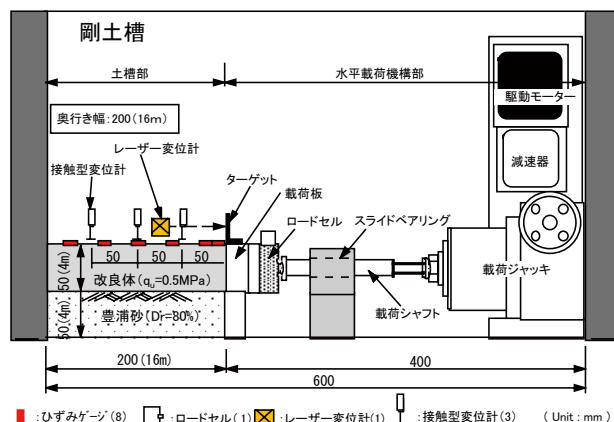
実験中の計測は、改良体のひずみ、水平荷重、鉛直変位および載荷板の水平変位の4項目とした。実験は改良杭の配置方法、改良率を変化させて、図-3および表-1に示す6ケースを実施した。水平載荷試験は、遠心加速度80g場にて遠隔操作により駆動モーターを稼働させて、ひずみ制御により載荷速度1mm/minで実施した。

§ 3. 実験結果および考察

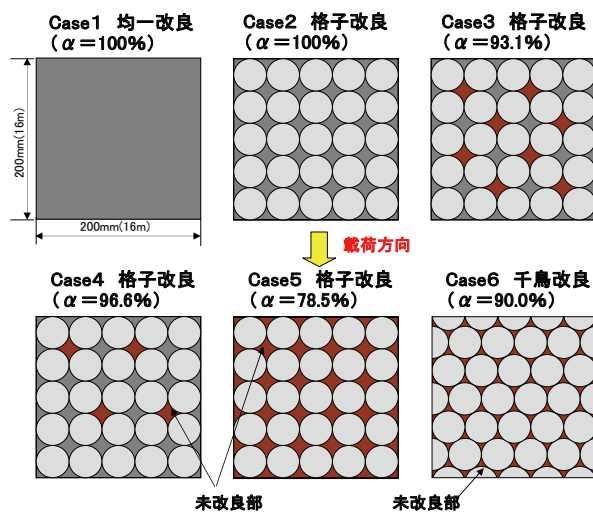
3-1 地盤改良地中梁の水平方向強度・変形特性

(1) 配置方法の影響

図—4 に、Case 2 (格子状ラップ：改良率 100%)，Case 5 (接円格子：78.5%) および Case 6 (接円千鳥：90%) について、水平載荷応力を改良コラム強度で除して正規化した強度比 $\sigma/\sigma_{u(max)}$ と改良体の水平変位量 δ を改良幅 B で除して正規化した水平ひずみ δ/B (%) との関係を示す。以下、写真—1 に示す改良体上面の変形・破壊状況を踏まえて考察を述べる。



図一2 実験システム概要図



図一3 改良パターン概要図

全体の水平抵抗力を比較すると、大きい方から Case 2, Case 6, Case 5 の順である。Case 2 では、初期勾配が上に凸の曲線形状を示しひずみ硬化を示している。実験後の改良体の観察では、Case 2 の改良体には Case 5 や Case 6 と比較しても著しいクラックや大きな変形は認められなかった。

改良率が最も低い Case 5 は、載荷開始直後では Case 2 に近い水平抵抗を発揮しているが、その後は水平変位の増加とともに漸増するような荷重増加を示し、強度比も最も小さい結果となった。Case 5 について実験後の改良体の破壊状況を確認したところ、その改良コラムの約半数に割裂破壊が生じていた。これに対し、千鳥配置の Case 6 では、Case 2 とほぼ同じ水平抵抗が認められる。しかしながら、Case 6 の初期勾配は載荷初期に認められる応力-ひずみ曲線のゆがみの影響を受けているため、小さめの値が得られている。

ここで、図-5 に実験後に観察された Case 5 (格子状改良) と Case 6 (千鳥状改良) の破壊モードを示す. Case 6 では、Case 5 で確認された割裂破壊のような破壊モード (モード A) とは異なるモード (モード B, あるいは C) が発生しており、破壊したコラム本数は明らかに少

表ー1 実験ケースおよび実験条件

Case	改良パターン	改良率 α (%)	試験体部位	湿潤密度 ρ_t (kN/m ³)	一軸圧縮試験		遠心力場水平荷重試験		変形係数比 (E_{m50}/E_{50})
					一軸圧縮強度 q_u (kN/m ²)	変形係数 E_{50} (MN/m ²)	降伏強度 $\sigma_{m(max)}$ (kN/m ²)	変形係数 E_{m50} (MN/m ²)	
Case1	均一改良	100	改良部	15.0	472	151	536	111	0.73
Case2	格子状改良 (ラップ改良)	100	円柱改良部	15.0	493	181	531	70.1	0.39
			間隙改良部	15.0	437	193			
Case3	格子状改良	93.1	円柱改良部	14.8	456	155	573	56.2	0.36
			間隙改良部	14.8	413	135			
			間隙未改良部	17.1	33	0.4			
Case4	格子状改良	96.6	円柱改良部	15.0	572	208	564	57.4	0.28
			間隙改良部	15.1	489	233			
			間隙未改良部	17.2	42	0.5			
Case5	格子状改良 (接円改良)	78.5	円柱改良部	15.0	535	177	487	24.3	0.14
			間隙未改良部	17.0	33	0.4			
Case6	千鳥状改良 (接円改良)	90.0	円柱改良部	15.1	487	170	528	23.4	0.14
			間隙未改良部	17.1	29	0.4			

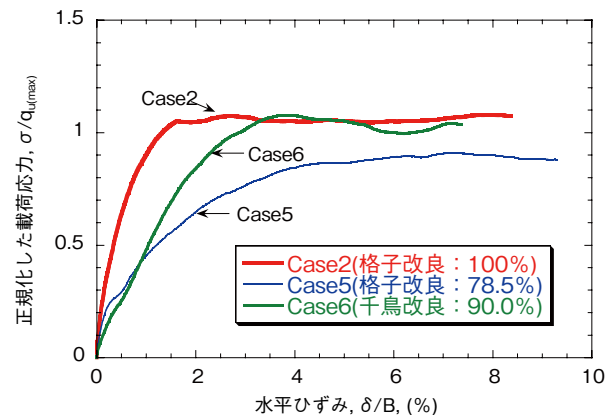
なかった。このような荷重変位関係や破壊モードの違いは、改良コラムの配置方法が大きく影響しているためで、配置方法の違いによる改良コラムの接円部における応力や間隙部における改良率が水平抵抗に大きく寄与していると考えられる。

(2) 改良率の影響

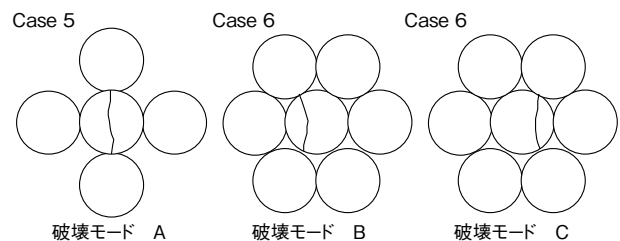
Case 2 (改良率 100%)、Case 3 (93.1%)、Case 4 (96.6%) および Case 5 (78.5%) の 4 ケースの格子状改良について、正規化した水平荷重応力 $\sigma/q_{u(max)}$ と水平ひずみ δ/B (%) との関係を図一6 に示す。水平ひずみ δ/B が大きくなるにつれて、同一水平ひずみレベルでの荷重応力の差が拡がり、改良率が大きいほど初期剛性が大きくなる傾向が認められる。Case 2 と Case 3 とでは、水平ひずみ δ/B が約 1% までの範囲では改良率の相違がほとんど認められない。Case 4 は改良コラム単体の強度が 572 kN/m² で Case3 の 456kN/m² よりも大きい(改良率はほぼ同じ)にも関わらず降伏強度が Case 3 よりも低く 564 kN/m² であり、水平ひずみ δ/B が 2% を超えるとひずみ軟化挙動を示している。

深層混合処理工法で造成されたセメント改良土の一軸圧縮試験の応力ひずみ関係は圧縮ひずみ 1~2% でピーク強度を示し、それ以上では破壊して急激に応力が低下する脆性的な挙動を示すことが一般に知られている。

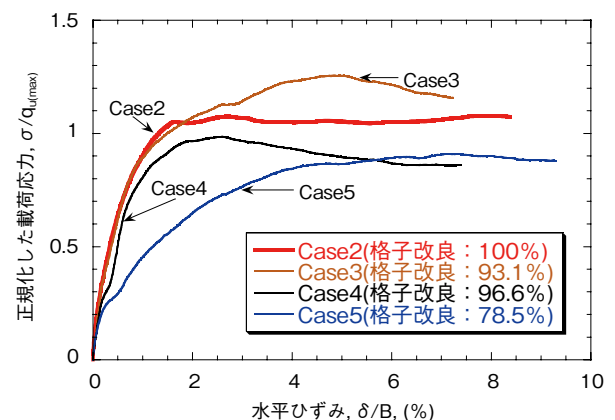
原位置での拘束状態にあれば、急激な応力低下は少ないと考えられるが、掘削除荷時に破壊応力に達すると変形が急激に進行する可能性がある²⁾。本実験での初期変形剛性には改良率の多少の違いは大きく影響しないが、2% を超えるひずみ範囲では変形破壊性状に差が現れる傾向がある(写真一1 参照)。ただし、改良体には周辺拘束があるため、一軸圧縮試験でみられるようなピーク強度後に急激なひずみ軟化は認められないが、圧縮強度付近になると線形性がなくなり、ひずみが軟化しやすい傾



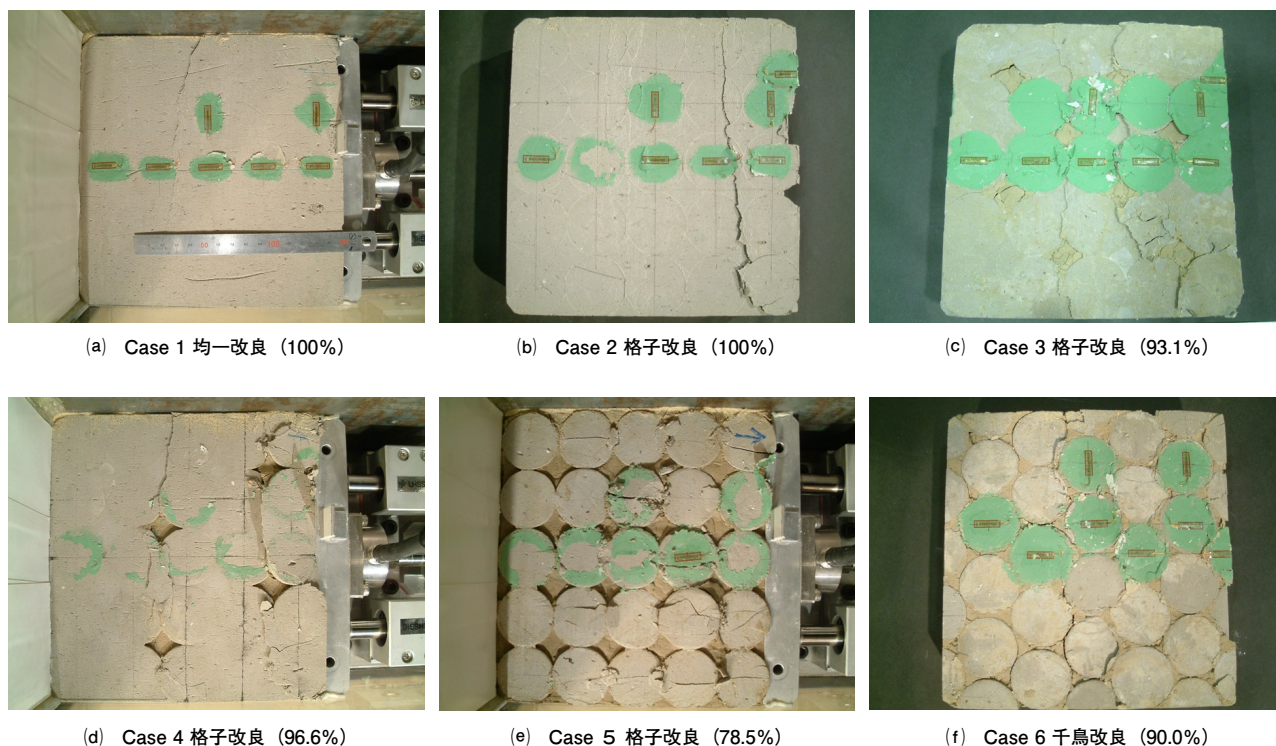
図一4 正規化した荷重応力と水平ひずみの関係



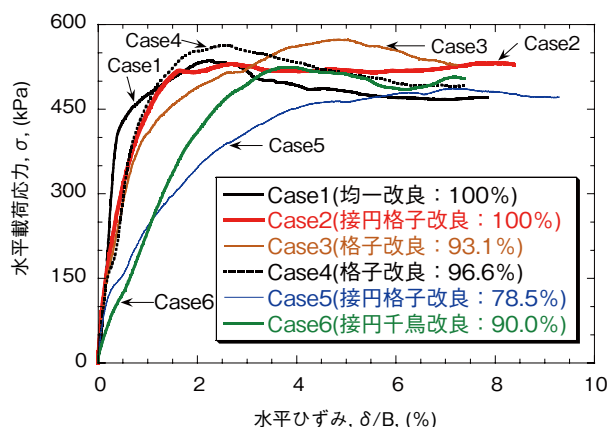
図一5 改良コラムの破壊モード



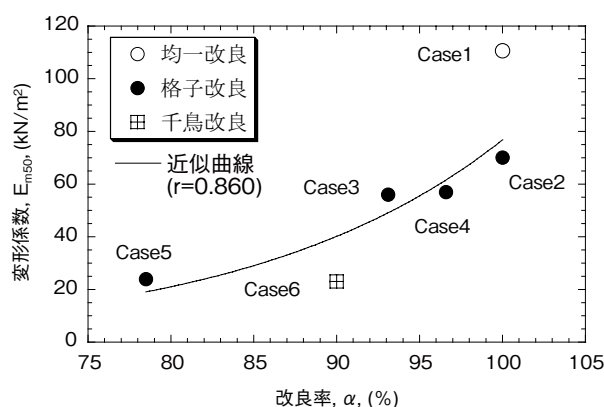
図一6 正規化した荷重応力と水平ひずみの関係



写真—1 改良体上面からの変形破壊状況



図—7 水平載荷応力と水平ひずみの関係



図—8 改良率と変形係数の関係

向にある。

(3) 改良率の違いによる水平方向変形係数

図—7 に、全ケースの水平載荷応力 σ と水平ひずみ δ/B (%) の関係を示す。実験から得られた応力-ひずみ曲線から割線弾性係数 E_{m50} を求め、改良コラムの割線弾性係数 E_{50} に対する改良体の割線弾性係数 E_{m50} の比を変形係数比 (E_{m50}/E_{50}) として、改良率との関係について検討する。図—8 に、改良率 α と変形係数 E_{m50} の関係を示し、図中には指数関数で近似した曲線も併せて示した。

格子状改良の場合、改良率が高くなるにつれ、改良体の水平方向変形係数は改良率に指数関数に比例して増加していく傾向が認められ、改良率との良好な相関性が認められる。このことから、改良幅一定の条件の下では、改良率が大きいほど、水平変位を抑止できるものと判断で

きる。なお、改良コラム単体の強度には最大で約 10% のバラツキはあるが、この改良率と水平方向変形係数の比例関係に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

格子改良した Case 2 (改良率 100%) の変形係数は、均一改良した Case 1 (改良率 100%) の 63% となっており、改良コラムで構成した改良体と均一改良した改良体との剛性の違いが明確となっている。

一方、千鳥改良した Case 6 (改良率 90%) の変形係数は、近似曲線から改良率 90% として推定される変形係数よりも約 50% 下回っている。このように、格子状配置と千鳥状の比較において、配置方法の違いが改良体の剛性(変形係数)に及ぼす影響が著しく現れている。

以上より、均一改良に対する接円格子改良および接円千鳥改良の変形係数の違いが明らかになった。

ここで、改良体の間隙部と改良コラム単体の強度をケー

ス別に比較すると、それぞれ強度の差が認められる(表一1 参照)。Case 1 は改良部全体を均一に固化させたものであるのに対し、Case 2 は円柱改良体を配置し、その間隙を同じ改良材で充填したものであり、共に改良率 100% であるが、Case 2 では間隙部に改良コラムの改良材を充填しても実際の改良体の間隙部と改良コラムには若干の強度差が認められる。その他のケースでは、改良不良箇所を設定して未改良土を充填しているため、その差は明らかに大きい。そこで、このような改良強度の差によるバラツキを平均化するため、強度比として式 (1) のように定義する。

$$\text{強度比} = (A_1 \times q_1 + A_2 \times q_2) / (A_0 \times q_0) \quad (1)$$

ここに、

A_0 : 均一改良体の全面積 (= $A_1 + A_2$)

A_1 : 格子改良体の面積合計

A_2 : 改良体間の土の面積合計

q_0 : 均一改良体と格子改良体の平均強度

q_1 : 格子改良体の平均強度

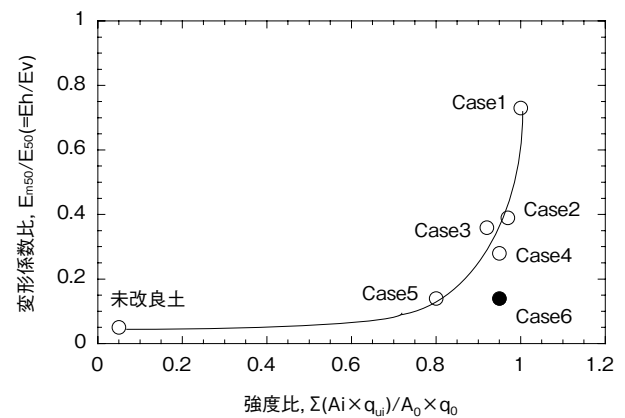
q_2 : 改良体間の土の平均強度

全ケースの改良コラム、間隙部および未改良土のそれぞれの強度のバラツキを平均化して、変形係数比との関係として整理したものが図一9 である。図から、変形係数比は平均化した強度比に比例して大きくなり、強度比と変形係数比の関係には図一8 に比べてより良好な相関関係が認められる。また、均一改良の Case 1 の変形係数比は改良コラムの変形係数に対して 0.73 であるのに対して、接円格子改良の Case 5 と接円千鳥改良の Case 6 の変形係数比は 0.14 と著しく小さい。Case 6 を除く格子改良ケースの変形係数比は、改良率との相関性が認められるが、改良率 100% とした Case 2 でも、その変形係数比は約 0.4 であった。

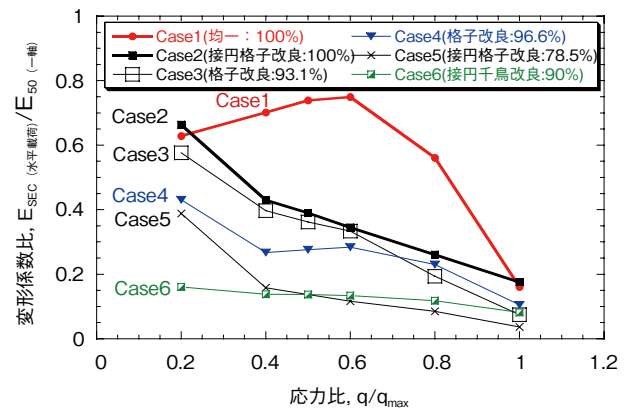
改良地盤の品質管理として、コアボーリングによって試料を採取し、 q_u や E_{50} (= E_v : 鉛直方向の変形係数) を把握することができるが、原位置改良地盤で、しかも深い位置での水平載荷試験を行うことはまれであり、改良地盤の水平剛性に関するデータを直接得ることが困難である。今後、原位置試験によって改良地盤の水平剛性を間接的にでも把握した変形係数比と強度比の現場データの蓄積ができれば、図一9 に示す関係図を利用して水平方向の変形を抑えるための剛性を決定し、その剛性を満足するような強度比、すなわち改良地盤の目標品質管理値とする改良率を定めることが可能になることを示唆するものである。

(4) 応力レベルの違いによる水平方向変形係数

図一10 に、応力比 $q/q_{\max}$ と各応力レベルで求めた割線弾性変形係数 (E_{sec}) を E_{50} で正規化した割線弾性変形係数比 E_{sec}/E_{50} の関係を示す。Case 2 から Case 6 の改良コラムで形成された改良ケースでは応力比の増大とともに



図一9 強度比と変形係数比の関係



図一10 応力比と割線弾性変形係数比の関係

に変形係数比が減少する傾向を示している。応力比と割線弾性変形係数比の関係には改良率の多少の違いは影響しないが、改良率が最も小さい Case 5 では応力比が 0.2 を超えると、 E_{sec}/E_{50} が急激に低下し、改良率の違いが明確である。また、Case 1 (均一改良) では他ケースと異なり、応力比が 0.8 程度までは大きな強度低下は認められず、改良体作製方法の違いによる影響が顕著に現れているものと考えられる。このことは、実挙動を実験的に捉えるためには、実状に応じて改良形式を忠実にモデル化すべきであることを示唆するものである。

(5) 配置形式、改良率の違いによる改良体ひずみ分布

改良形式や改良率の違いによるマスとしての改良体のひずみ分布性状を比較するため、改良体の水平ひずみ δ/B が 2% におけるひずみ分布を図一11 に示した。Case 6 を除く Case 1~5 でのゲージの貼付け位置は図中の左に示すとおり同じ配置で、圧縮方向に 5 点を改良コラムの表面に貼付けた。ひずみの符号は圧縮が負、引張が正である。

均一改良とした Case 1 (改良率 100%) では、載荷板近傍 (ゲージ番号 1) の改良コラムに圧縮力が集中し、ゲージ番号 2 から 5 までは平均で $-970 (\mu)$ の圧縮ひずみが改良体に発生している。 δ/B が 2% で改良体に明確なピークを有する圧縮ひずみが発生したのは、改良体の載荷板近傍であった。

格子状ラップとした Case 2 (改良率 100%) では、最大ひずみが発生している位置が改良体中央付近に集中しており、Case 1 とは明らかに異なる傾向を示している。

Case 3 (改良率 93.1%) や Case 4 (改良率 96.6%) では、未改良部位置の違いによって破壊性状が異なっているように、改良体に発生したひずみの全体分布には特徴的な傾向は認められない。また、Case 1, Case 2 と比べても顕著なひずみのピークは認められず、ひずみ発生量は相対的に小さい。

間隙部を未改良とした Case 5 (改良率 78.5%) では、いずれのゲージにも明確なピークが認められず、改良体全体がほぼ平均的に圧縮されていることが知れる。このような破壊形態を示すのは、5×5 列で規則的に配列された改良コラムの接点部を介して荷重応力が改良体全体に一様に伝達され、改良コラムが圧縮し、コラム接点での局所的破壊が進行した後、割裂破壊に至るためと考えられる。

千鳥配置とした Case 6 (改良率 90%) では、改良体中央部付近に若干ひずみが集中している様子が窺い知れ、Case 2 とは発生ひずみ量に違いがあるものの、この傾向は Case 2 とよく類似している。千鳥配置では改良コラムの接点数、作用荷重および荷重の伝達経路も Case 5 と異なるため、その結果、改良コラムの最大ひずみ量、クラックの発生位置や破壊モードも変わるものと考えられる。

以上のように、改良形式や改良率の違いによって、マスとしての改良体のひずみ分布性状が異なる。これらの結果は、改良形式や改良率が異なる実際のマスとしての改良体の変形・耐力性状を評価するための基礎データとなると考えられる。

3-2 地盤改良を用いた山留め壁の変状予測について

本実験によって、地盤改良地中梁は改良形式、改良率に応じて改良体の変形破壊性状は大きく異なること、地中梁への作用応力レベルに応じて割線弾性変形係数比が減少する程度は改良形式や改良率によってもそれぞれ異なることが明らかになった。この結果を踏まえ、現場施工での実測データに基づいて山留め変状予測解析をする際には、改良形式、改良率に応じて、改良杭の適切なモデル化と弾性変形係数の設定が必要である。さらに山留め壁に作用する応力レベルに応じて改良体の弾性変形係数を低減させる非線形モデルを導入することで、より精度の高い予測が可能になるものと考えられる。また、各掘削段階に応じて上載土による地中梁への拘束圧は異なることから、改良体の変形破壊性状、割線弾性係数比やその低減率も異なるものと考えられるため、掘削段階に応じて弾性変形係数や低減率を適切に設定することが必要であると考えられる。

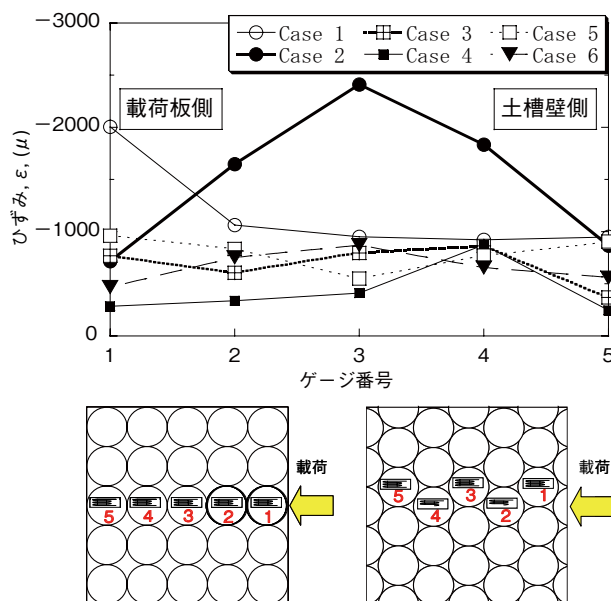


図-11 改良体の発生ひずみ ($\delta/B=2\%$)

§4. おわりに

本研究で得られた主な知見は、以下の通りである。

- 1) 改良幅一定の条件では、接円式配置では格子状よりも千鳥状、配置形式では接円式配置よりもラップ式配置が優れた水平抵抗を発揮する。
- 2) 格子改良では改良率が高いほど水平方向の剛性が大きくなる。
- 3) 配置形式に応じて接点数が異なり、改良体に作用する接点応力の大きさも変化するため、改良体の破壊モードが異なる。また、未改良部の位置や数に応じて改良体は異なるせん断破壊性状を示す。
- 4) 平均改良率と鉛直方向に対する水平方向の変形係数比には良好な相関性が認められた。横断方向の変形を抑えるための剛性が決まれば、その剛性を満足すべき強度比、すなわち改良地盤の目標品質管理値とする改良率を定めることが可能になることが示唆された。
- 5) 実測データに基づき山留め変状予測解析をする際には、改良杭で構成される連続改良体の適切なモデル化と弾性変形係数の設定が必要であることが示唆された。

謝辞：本研究を実施するにあたり、ご指導を戴いた中央大学理工学部 藤井齊昭教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 今村眞一郎, 佐藤靖彦, 宮崎啓一, 萩原敏行, 平岡博明, 藤井齊昭: 深層混合処理工法による粘性土改良地盤の水平方向の変形特性, 土木学会第 62 回年次学術講演会, pp. 639~640, 2007.
- 2) 小林 晃, 龍岡文夫: セメント混合により改良した飽和軟弱粘性土の強度変形特性Ⅶ - 長期加圧養生の影響, 生産研究, Vol. 34, No. 11, 1982.