

SG-Wall 工法の振動台実験に関する動的 FEM 解析

(株) 地域地盤環境研究所 長屋淳一

(独) 港湾空港技術研究所 菅野高弘

1. はじめに

SG-Wall 工法は、既存岸壁の前面に新設矢板を打設し、矢板に結合・敷設したジオグリッドに固化処理土を充填した構造体を構築し、護岸構造物の耐震性を向上させる工法である。本論文は、SG-Wall 工法の耐震性を検討するために実施した水中振動台実験と構造物被害予測プログラム FLIP を用いた動的 FEM 解析について示し、固化処理土とジオグリッドによる矢板の変位抑制効果を評価するものである。

2. 水中振動台実験概要

矢板式 SG-Wall 工法における耐震補強効果メカニズムを解明するとともに、構造設計に必要な基礎データを収集することを目的として全9ケースの3次元水中振動実験を実施した。ここでは、矢板下端が根入れされている場合において、ジオグリッド補強固化体の控え効果を定量的に確認し、補強固化体の改良幅、ジオグリッドの定着長の影響について検討した4ケースについて示す。

図-1 は、実験土槽の概要である。模型地盤は、模型土槽内に相馬砂 5 号を相対密度 80% に締固め、厚さ 10mm のアルミ製矢板を根入れ 250mm で設置した。矢板背面にはジオグリッド 1 枚を連結治具で固定し、養生 5 日で目標一軸圧縮強度 115kN/m^2 として配合した固化処理土(木節粘土+普通ポルトランドセメント)を厚さ 300mm(ジオグリッドの上 100mm、下 200mm)で打設し、定着させた。ジオグリッドは目合いが縦 28mm×横 40mm の格子形状で、製品基準強度が 17kN/m のポリプロピレン製の耐アルカリ性に優れたジオグリッドを使用した。模型は、1 つの土層を仕切板(合板にビニルシート被覆+潤滑材塗布)で 3 等分し、ジオグリッドの敷設長の影響、矢板との連結の有無による影響を比較した。実験ケースは、ジオグリッドの敷設長を 250mm として矢板と連結した CASE-1、ジオグリッドの敷設長を 700mm として矢板と連結せずに自立式矢板とした CASE-2、ジオグリッドの敷設長を 700mm として矢板と連結した CASE-3 の計 3 ケースである。各ケースの概要を表-1 に示す。計測項目は、ジオグリッドに約 100mm 間隔で貼付けたひずみゲージから引張りひずみ、矢板に 100mm 間隔で貼付けたひずみ

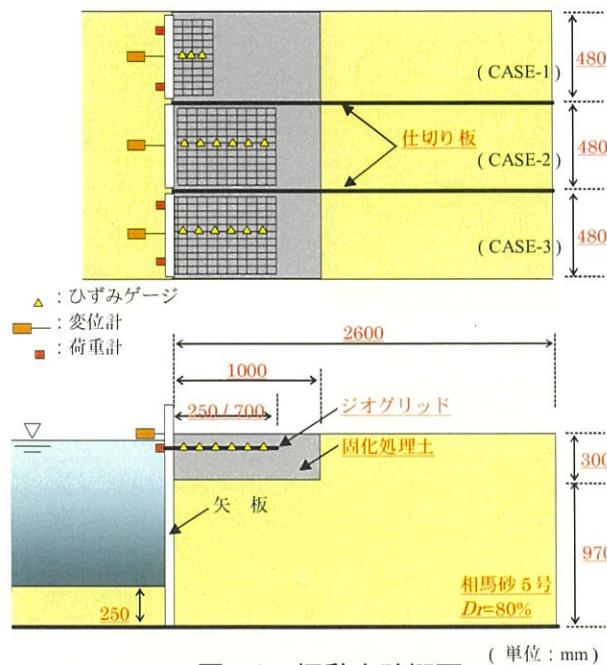


図-1 振動実験概要

ゲージから曲げひずみ、矢板に設置した変位計から矢板の変位量、および矢板とジオグリッドの連結部に設置した荷重計からジオグリッドの引張り力である。加振条件は周波数 2Hz の正弦波を 1 加振 20 波とし、加速度は 100, 200, 300, 400Gal の段階加振とした。

3. 数値解析

水中振動台実験について液状化による構造物被害予測プログラム FLIP を用いて動的数値解析シミュレーションを行い、固化処理土とジオグリッドによる矢板の変位を拘束するメカニズムを調べるとともに、解析手法の妥当性を検証する。FLIP の解析モデルについては、文献 1),2)を参照されたい。

3.1 解析条件

(1) 有限要素メッシュ

図-2 に解析に用いた有限要素メッシュを示す。締め固め砂はマルチスプリングモデル、固化処理土は弾性体、ジオグリッドは弾性ビーム材料とした。また、土と構造物の間の滑りと剥離挙動を表現するために矢板と締め固め砂の間、ジオグリッドと固化処理土の間にジョイント要素を配置した。

(2) 入力地震波

模型実験では段階加振を行ったが、本解析では 400gal の加振を対象としてシミュレーション解析を行った。図-3 に解析に用いた入力波(= 実験時に計測した振動台の加速度)を示す。

(3) 解析ケース

表-1 にシミュレーション解析を行った振動台実験の実験ケースを示す。シミュレーション解析を実施したのは、実験ケースのうち、固化体の幅、ジオグリッドの敷設長、矢板と補強材の連結の有無の影響を検討したケースについて実施した。

(4) 計算条件

動的解析の計算ステップは 2400 であり、ステップの時間増分は $\Delta t=0.005$ 秒である。また、レーレー減衰定数は、 $\alpha=0$ 、 $\beta=0.005$ とし、初期剛性比例型を用いた。

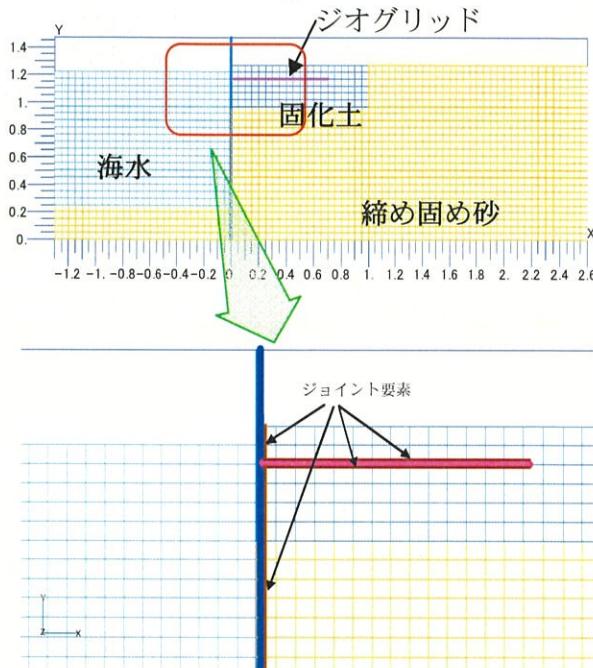


図-2 有限要素メッシュ図

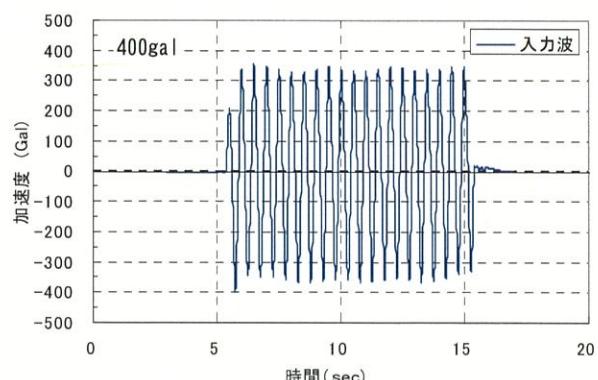


図-3 解析に用いた入力波

表-1 シミュレーション解析ケース

ケース	固化体の幅(mm)	ジオグリッドの敷設長(mm)	矢板とジオグリッドの連結
Case-1	1000	250	有り
Case-2	1000	700	無し
Case-3	1000	700	有り
Case-4	2500	700	有り

3.2 材料パラメータ

(1) 固化処理土（弾性体）

固化処理土は弾性体とし、ヤング係数 E は、固化処理土の引張試験における応力～ひずみ関係の初期勾配より設定した。図-4に固化処理土の引張試験結果、表-2に固化処理土の材料パラメータを示す。

(2) 締め固め砂（マルチスプリング要素）

締め固め砂はマルチスプリング要素を用い、等価N値 $N_{65}=10$ 、細粒分含有率 $F_c=0$ と仮定し、FLIPの簡易設定法³⁾より求めた。但し、振動台実験では、振動に伴う過剰間隙水圧がほとんど発生しておらず、実験結果の過剰間隙水圧の発生状況をシミュレートするために、液状化パラメータ w_1 を大きな値に設定しており、 ϕ_f と p_2 も適宜に調整した。表-3に締め固め砂の材料パラメータを示す。

(3) 矢板（線形ビーム要素）

振動台実験において矢板は厚さ 10mm のアルミ板を使用しており、解析における材料パラメータは使用した材料に合わせて設定した。表-4に矢板の材料パラメータを示す。

(4) ジオグリッド（線形ビーム要素）

ジオグリッドは線形ビーム要素とし、ジオグリッドの引張試験より求めた。図-5にジオグリッドの引張り試験結果、表-5にジオグリッドの材料パラメータを示す。

表-4 矢板の材料パラメータ

ヤング率 $E(kPa)$	質量密度 $\rho(kg/m^3)$	断面積 (m^2/m)	断面2次モーメント (m^4/m)
7.0×10^7	2.7×10^3	0.01	8.33×10^{-8}

表-5 ジオグリッドの材料パラメータ

ヤング率 $E(kPa)$	質量密度 $\rho(kg/m^3)$	断面積 (m^2/m)	断面2次モーメント (m^4/m)
8.8×10^5	0.34	3.8×10^{-4}	4.5×10^{-12}

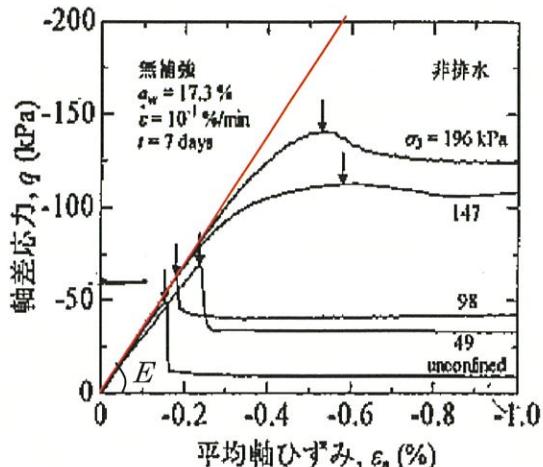


図-4 固化処理土（無補強）の引張試験結果

表-2 固化処理土の材料パラメータ

ヤング率 E	ボアソン比 ν	質量密度
$3.0 \times 10^4 kPa$	0.2	$1.4 \times 10^3 kg/m^3$

表-3 締め固め砂の材料パラメータ

締め固め砂			
初期せん断弾性係数 G_{ma} (kPa)	8.45×10^4	液 状 化 特 性	変相角 ϕ_p 28.0
体積弾性係数 K_{ma} (kPa)	2.20×10^5		s_1 0.005
基準化拘束圧 σ_{ma} (kPa)	98		w_1 2915
拘束圧依存係数 m_g/m_K	0.5		p_1 0.5
質量密度 ρ (g/cm ³)	2.0		p_2 0.54
間隙率 n	0.45		c_1 1.0
粘着力 C (kPa)	0		
内部摩擦角 ϕ_f (°)	42.08		
ボアソン比 ν	0.33		

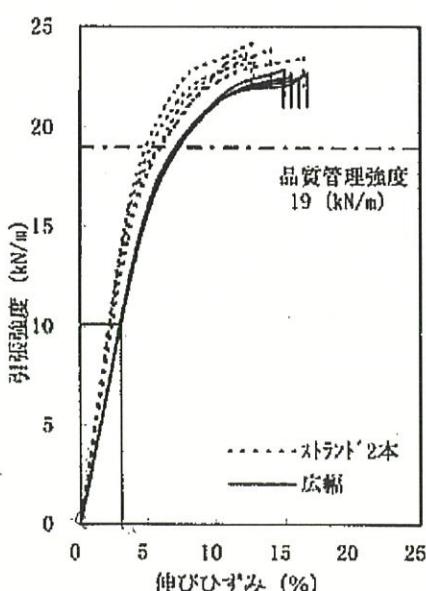


図-5 ジオグリッドの引張試験結果

(5) ジオグリッドと固化処理土間のジョイント

ジオグリッドと固化処理土の滑りを表現するためにジョイント要素を配置した。ジョイント要素のせん断抵抗力およびせん断方向接線剛性は、図-6に示す固化処理土におけるジオグリッドの引抜試験結果より以下のように求めた。表-6にジョイント要素の材料パラメータを示す。

① 粘着力

引抜荷重のピーク値は 23kN/m であり、せん断抵抗力 τ は、 $\tau=23/(0.6\times 2)=19\text{kPa}$ (=引抜荷重のピーク値/せん断面の面積) である。せん断抵抗力 τ_f は、 $\tau_f=c_j+\sigma \tan \phi_j$ であるが、ここでは、 $\phi_j=0$, $c_j=19\text{kPa}$ とする。

② せん断接線剛性

ピーク値に達する時の前変位は 6.5mm 、後変位は 0mm であり、平均値の 3.25mm をせん断面の平均変位と仮定し、 $k_s=19/(3.25\times 10^{-3})=5846\text{ (kN/m}^3)$ とする。

(6) 矢板と固化処理土、締め固め砂間のジョイント

振動台実験で矢板とジオグリッドの連結がない場合には、矢板が剥離する実験結果となった。シミュレーション解析において矢板の剥離を表現するために矢板と固化処理土および締め固め砂の間にジョイント要素を設置し、表-7のような材料パラメータを仮定した。

3.3 解析結果および考察

以下に解析結果と実験結果の比較を示す。実験は、 100gal 每の段階加振で行っているが、ここで示す実験結果は 400gal 加振時の増分値を示してある。

(1) 矢板の水平変位

図-7に入力波 400gal の場合の矢板天端における水平変位の時刻歴、図-8に最終変位分布を示す。矢板とジオグリッドの連結なしのケース (Case2) の場合、矢板が転倒し、測定ができないため、実験値が得られなかった。それに対し、矢板とジオグリッドを連結した場合には $1\sim 2\text{mm}$ 程度の変位であり、矢板とジオグリッドを連結することによって矢板の変位を抑制されている。解析においても、同様な傾向を評価している。但し、矢板の変位量については両者の相違があり、Case 2 (連結なし)において、実験結果では 200Gal の加振により矢板が徐々に海側に傾き、 400gal では矢板が倒れたが、解析の矢板変位量は実験結果ほど大きくない。原因として、実験上、矢板と砂地盤が剥離すると、砂粒子がすぐにその隙間に入り込み、矢板をさらに変位させると考えら

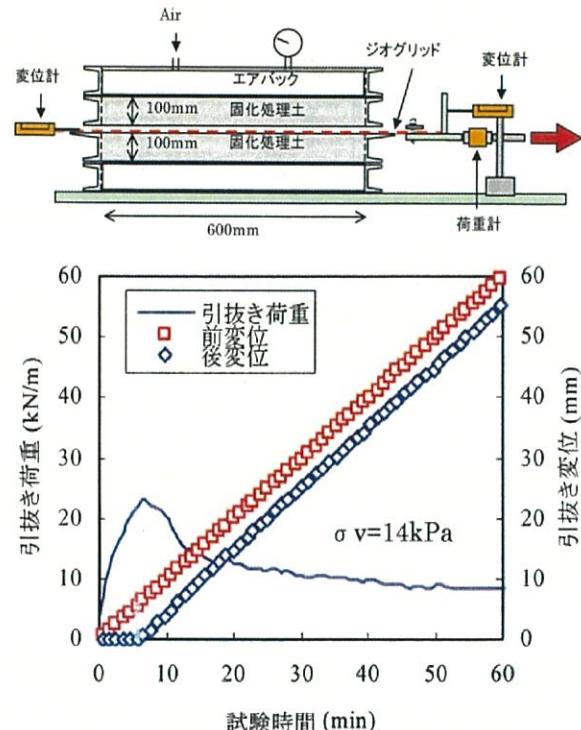


図-6 補強材の引抜き実験

表-6 ジョイント要素の材料パラメータ

垂直方向接線剛性 $k_n\text{ (kN/m}^3)$	せん断方向接線剛性 $k_s\text{ (kN/m}^3)$	粘着力 $c_j\text{ (kPa)}$	摩擦角 $\phi_j\text{ (°)}$
1.0×10^9	5.85×10^3	19.0	0

表-7 ジョイント要素の材料パラメータ

垂直方向接線剛性 $k_n\text{ (kN/m}^3)$	せん断方向接線剛性 $k_s\text{ (kN/m}^3)$	粘着力 $c_j\text{ (kPa)}$	摩擦角 $\phi_j\text{ (°)}$
1.0×10^6	1.0×10^4	0.0	15

れる。解析では、このような現象をシミュレーションができない為、加振後、矢板の残留傾斜量は小さく評価されると思われる。

また、Case4(固化処理土の幅 2300mm)は Case3(固化処理土の幅 1000mm)より矢板の変位が小さく、固化処理土の幅が矢板の変形に影響するが、Case1(ジオグリッド敷設長 250mm)と Case3(ジオグリッド敷設長 700mm)に大きな差はなく、ジオグリッド敷設長の影響は少ないと考えられる。

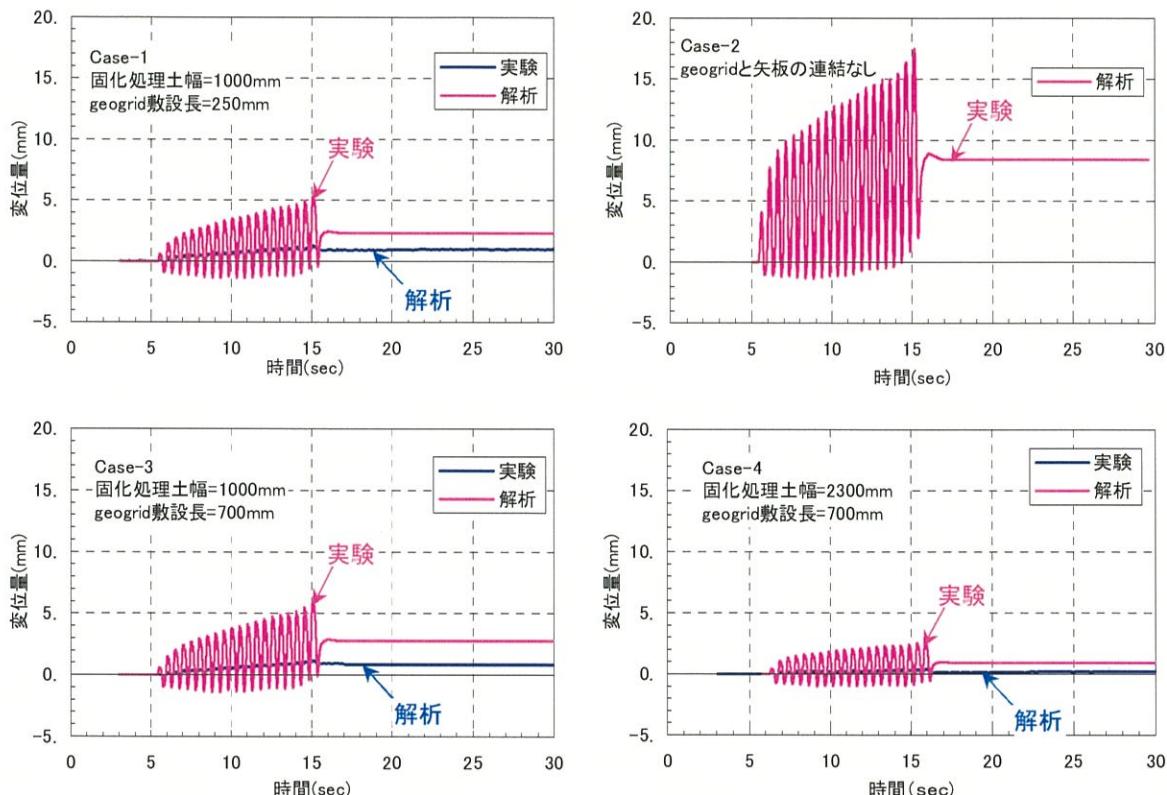


図-7 矢板天端水平変位の時刻歴

(2) 矢板モーメントの分布

図-9により、Case1,3,4 では、ジオグリッド連結部と矢板根入れ部を支点として矢板中央付近で最大となっており、解析結果は実験結果と同じ傾向を示している。なお、Case2 は矢板が転倒したため、測定不能であった。

(3) ジオグリッドの引張りひずみ分布

ジオグリッドの引張りひずみの実験結果は、連結部で最大値を示し、矢板から離れると、徐々に小さくなっており、矢板からの離隔が 400mm 以上では、引張りひずみはほとんど発生していない。解析結果は、これらの実験傾向を定性的に評価している。

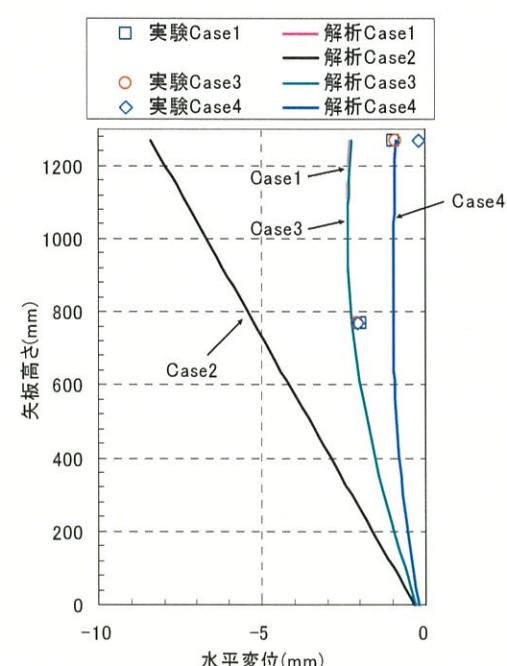


図-8 加振後矢板の残留変形モード

4. まとめ

振動台実験についてシミュレーション解析を行い、固化処理土とジオグリッドによる矢板の変位を拘束するメカニズムを調べるとともに、解析手法の妥当性を検証する。その結果、以下のような結論を得た。

①矢板とジオグリッドの連結なしの場合、

矢板は大きく変位し、最終的には転倒するが、矢板とジオグリッドを連結した場合には1~2mm程度の変位であり、矢板とジオグリッドを連結することによって矢板の変位を抑制される。解析においても、同様な傾向を評価している。

②固化処理土の幅が矢板の変形に影響するが、

ジオグリッド敷設長の影響は少ないと考えられる。

③ジオグリッド連結部と矢板根入れ部を支点として矢板中央付近で最大となっており、解析結果は実験結果と同じ傾向を示している。

④ジオグリッドの引張りひずみの実験結果は、

連結部で最大値を示し、矢板から離れると、

徐々に小さくなってしまい、矢板からの離隔が400mm以上では、引張りひずみはほとんど発生していない。解析結果は、これらの実験傾向を定性的に評価している。

⑤SG-Wallの振動台実験をFLIPによりシミュレーション解析を行った結果、解析結果は計測結果の挙動を概ね再現している。FLIPによる動的解析によりSG-Wallの地震時における挙動を表しており、実現場におけるSG-Wallの地震時挙動を評価できると考えられる。

本研究は、五洋建設株、住友金属工業株、東亜建設工業株、東洋建設株、三井化学産資株およびみらい建設工業株とともにに行っている共同研究成果の一部であり、著者らは携わったものである。また、防衛大学校 宮田喜壽准教授、広島大学 一井康二准教授にご指導いただいており、謹んで感謝いたします。

参考文献

- 1) Towhata,I. and Ishihara,K.: "Modelling soil behaviour under principal stress axes rotation" Proc. 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Vol.1, 1985, pp.523-530.
- 2) Iai,S., Matsunaga,Y., and Kaneoka,T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56,1990.
- 3) 井合 進, 松永康男, 鎌岡知弘(1990) : サイクリックモビリティーのモデルのパラメタの同定, 港湾技術研究所報告, 第29卷第4号, pp.57-83.

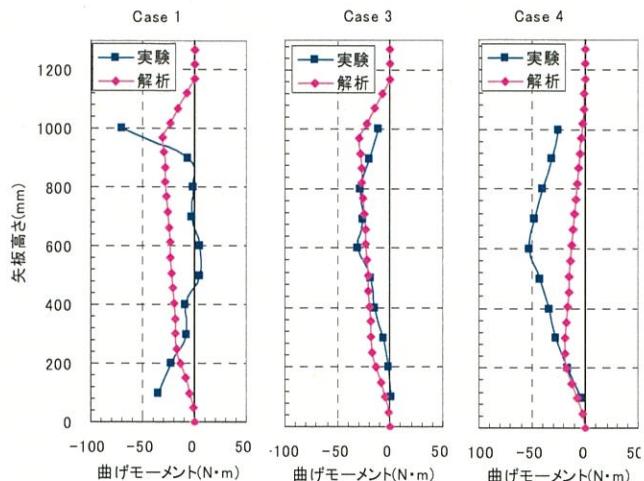


図-9 加振後矢板の残留曲げモーメント

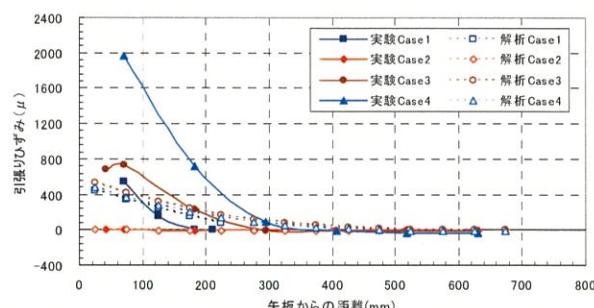


図-10 加振後ジオグリッドの残留ひずみ

6