

2022 年度 博士論文

動的試験による外壁仕上タイルの剥落性状の把握と
剥落防止工法の提案

2023 年 3 月

佐々木聡

東京都立大学大学院 都市環境科学研究科

建築学域

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的と方法	2
1.3	本論文の構成	2
1.4	既往の研究	5
	参考文献	9
第 2 章	建築外壁材の動的衝撃試験方法の検討	10
2.1	動的衝撃試験	10
2.1.1	試験概要	10
2.1.2	試験体	11
2.1.3	試験方法	12
2.2	面外変位計測手法の提案	14
2.2.1	面外変位計測手法概要	14
2.2.2	計測概要	15
2.2.3	ダイヤルゲージを用いた実測	15
2.2.4	3D スキャナーを用いた計測	16
2.2.5	実測値と計測値の結果	18
2.3	最大加速度と浮きタイル部付与エネルギー推定値 U の算定	19
2.3.1	試験概要	19
2.3.2	試験方法	19
2.3.3	試験結果	21
2.4	まとめ	44
第 3 章	動的衝撃試験による各種タイル仕上の面外変形性状の把握	45
3.1	動的衝撃試験によるタイル剥落性状	45
3.1.1	試験概要	45
3.1.2	試験体概要	45
3.1.3	試験方法	48

3.1.4	試験結果	53
3.1.4.1	浮きタイルの面外残留変位 R の結果	53
3.1.4.2	破壊開始時付与エネルギー U_0	63
3.1.4.3	タイル剥落時の累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と 動的荷重 F	72
3.2	まとめ	77
第4章	シミュレーション解析による各種タイル仕上の 面外変形性状推定	78
4.1	解析概要	78
4.2	解析方法	79
4.3	解析結果	85
4.3.1	解析結果	85
4.3.2	剥落直前の計測結果と解析結果との比較	86
4.3.3	解析結果の検討	97
4.4	まとめ	106
	参考文献	107
第5章	タイル仕上面に対する補強方法の有効性の検討	108
5.1	補強方法について	108
5.2	動的衝撃試験の結果	109
5.2.1	浮きタイルの面外残留変位 R の結果	109
5.2.2	破壊開始時付与エネルギー U_0 の比較	127
5.2.3	タイル剥落時の累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と 動的荷重 F の比較	143
5.2.4	剥落直前の計測結果と解析結果との比較	149
5.3	まとめ	170
第6章	まとめ	172
6.1	本研究の総括	172

6.2 各章のまとめ	174
6.3 今後の課題	178
参考文献	179
謝辞	180

第1章 序論

1.1 研究の背景

無機質材である外壁仕上タイルは高い耐久性を有しており建築物の仕上材として多くの建物に使用されている。しかしながら、1989年に北九州市の公団住宅の最上階部の外壁タイルが落下し死傷者が3名の大事故が発生した¹⁾。この事故を期に外壁仕上タイルの安全性が問われるようになった。その後もタイルの剥落による人身事故や物損事故の発生が多数報告されている。また、近年は、地震力に加えて、大型台風などの大風力に伴う外壁材の面的剥落が問題となっている。

タイルの剥落の外力の一つは、地震力、風力などの面外の動的な引張荷重と考えられる。既往の研究ではタイル剥落強度の評価は単数タイルの引張試験によっている。しかしながら、浮きが複数枚生じているタイルの面的な引張強度の評価は従来の一軸の引張試験ではアタッチメントの載荷面積が大きくなるなど均一な載荷が難しい。また、実際に生じる加速度を伴う動的な荷重を付与するためには振動試験、風圧試験など大掛かりな装置が必要であり、部分的な浮きを生じた複数枚のタイルの剥離抵抗性を、各種実験要因ごとに評価するためには面的試験体の動的な引張試験方法の確立が必要である。また、剥落に至るまでの剥離性状の定量的な把握には、浮きを生じた面的タイル全体の面外の変形性状の評価が必要であるが通常の変位計での評価は難しい。さらに、浮きタイルの剥落にはモルタルなど目地の強度が影響しているが目地の強度に着目している研究も見られない。

1.2 研究の目的と方法

本研究は、建物に多く用いられている外壁仕上タイルの剥離・剥落性状に関し、浮きを生じたタイルを再現した試験体に対し、動的衝撃試験と面外残留変位 R の計測から外壁仕上タイルの剥落性状を評価する方法を提案し、剥離・剥落に及ぼすタイル目地の影響を明らかにするとともに、剥落防止に有効な補修工法の提案を行うことを目的とする。

また、剥落に要するエネルギー量についても推定する。本研究はタイルと下地との間に一定面積の浮きを生じている場合を想定しており対象とする工法は限定しないが有機系接着剤を用いた直張り工法などを想定している。なお本稿において、浮きとはタイルの裏面が下地材に未接着の状態、剥離とはタイルが動的荷重 F により面外残留変位 R がある状態、剥落とはタイルが面外に完全に剥がれた状態とする。

また解析による浮きタイルの変位の予測と動的衝撃試験によるタイルの剥落性状の計測と有限要素法を用いた解析結果を考察・検討することにより実際のタイルの剥落性状についての推定手法を提案する。

1.3 本論文の構成

本論文の構成と特徴について図 1-1 に示した。各章の概要について以下にまとめる。

第1章では、本研究の背景と目的、既往の研究について述べ本論文の構成を示した。

第2章では、動的衝撃試験による浮きタイル部付与エネルギーとタイル面の剥離性状との関係性を評価する手法を検討する。まず、落下衝撃試験機により浮きタイル試験体に動的な面外変形を生じさせるとともに、ハイスピードカメラを用いた非接触加速度計測による最大加速度と浮きタイル部付与エネルギーの評価を行う。また、衝撃試験後の浮きタイルの剥離性状の評価方法として、剥離タイル面の面外塑性変形について3次元レーザー反射光を用いて多数点評価する方法を検討し、浮きタイル部付与エネルギーに対するタイル面の剥離性状を定量的に評価する方法を確立する。

第3章では、浮きを生じたタイル試験体の動的衝撃試験による剥離性状

を把握する。種々の条件により浮きを生じさせたタイル試験体に対して動的衝撃試験を行い、浮きタイル部付与エネルギーとタイルの面の剥離性状との関係を、目地部の塑性変形量、剥離が生じ始める降伏荷重、剥落が生じるまでの塑性変形エネルギーなどにより評価する方法を提案する。実験要因として、タイルの浮き面積6条件、劣化目地を想定し目地強度3条件など設定し、それらがタイルの剥離性状に及ぼす影響を明らかにする。

第4章では、浮きを生じたタイル試験体の剥離性状を数値解析によるシミュレーションにより推定する方法を検討する。数値解析には FEM プログラム FrontISTR²⁾を用い、目地部の塑性変形とタイル面全面の変形を変位増分手法により算出する方法を試みる。実験結果と解析結果との整合性について検討する。

第5章では、浮きタイル仕上に対する有効な補強方法の検討を行う。浮きタイルを生じさせた試験体の補強方法として、タイル中央をアンカーピンにより固定化するアンカーピン固定工法と、タイル全面を繊維補強面材で補強するピンネット工法に着目し、それらの工法を施工した浮きを生じたタイル試験体について動的衝撃試験を行い、目地部の塑性変形量、剥離が生じ始める降伏荷重、剥落が生じるまでの塑性変形エネルギーなどについて未補修試験体での実験結果との比較を行う。また数値解析によるシミュレーションにより剥落抵抗性の評価を行なった。それらの結果に基づき、浮きを生じたタイル面の有効な補修工法を提案する。

第6章では、本研究で得られた研究成果を総括し、得られた知見を章ごとにまとめるとともに、今後の課題について述べる。

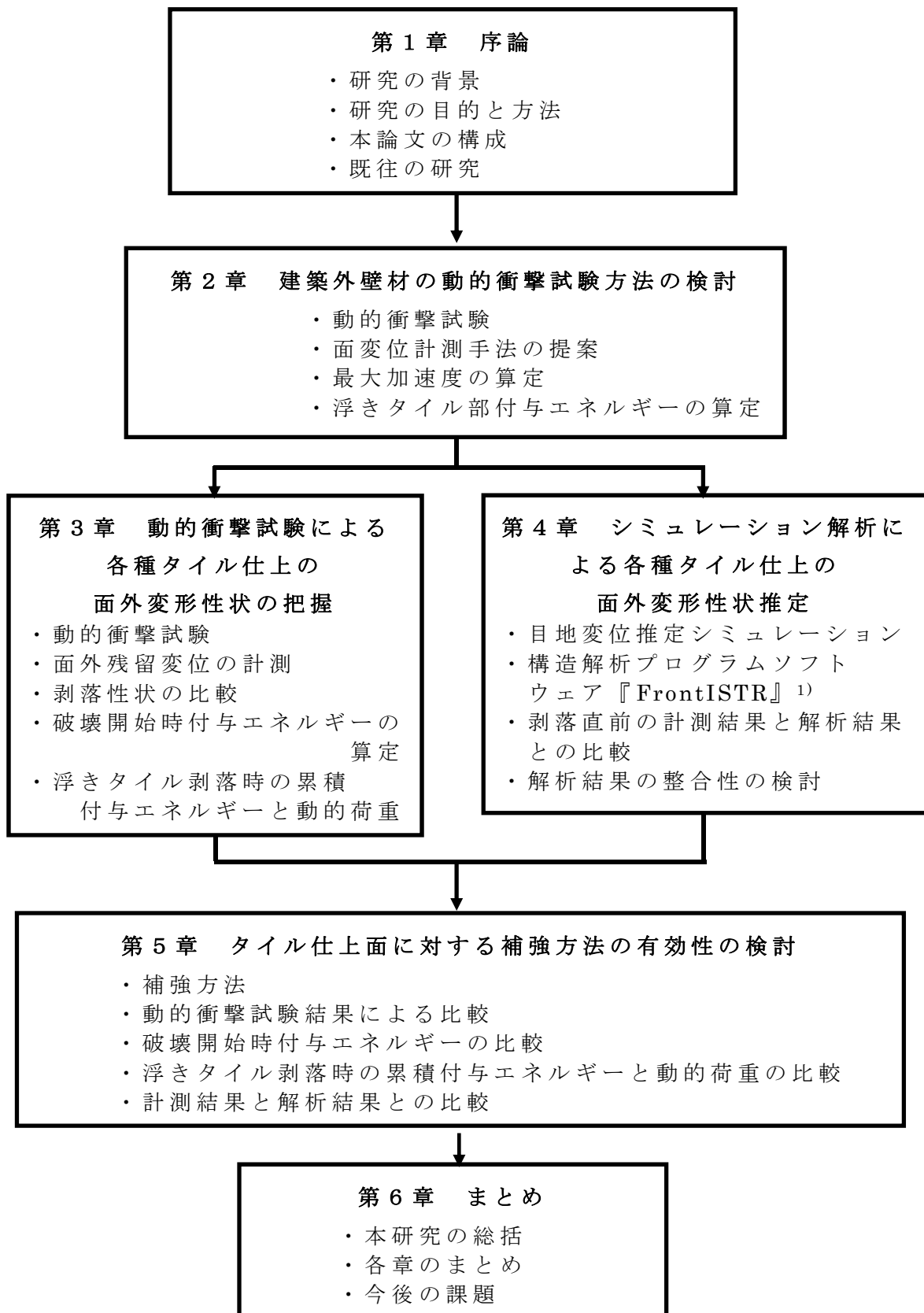


図 1-1 本論文の構成と特徴

1.4 既往の研究

タイル剥離に関する既往の研究として、小川ら³⁾は、図 1-2 に示すタイル張り工法の実仕様の縮小試験体を作製し、地震時を想定した静的水平力載荷実験によって新築時の各種タイル張り工法による耐震安全性を検討している。この研究においては、静的水平力載荷を採用しているが本研究においては動的荷重 F を採用している点で異なっている。図 1-3 に剥離分布を示す。

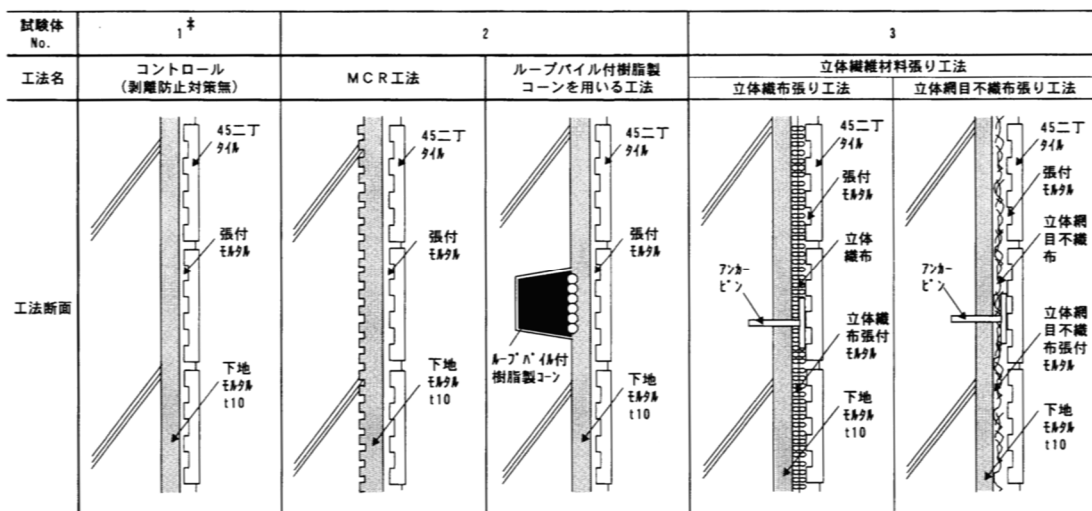


図 1-2 タイル張り工法の種類

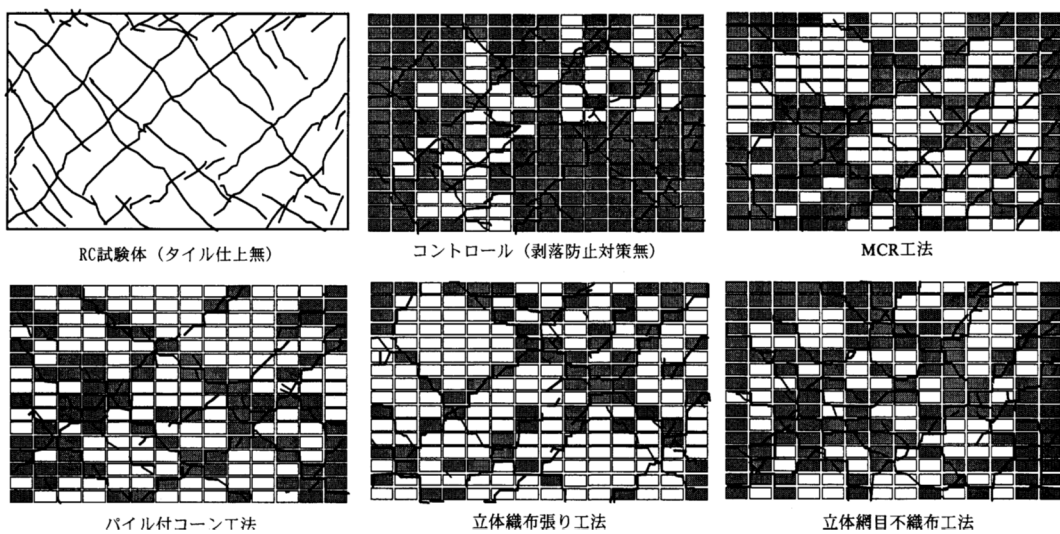


図 1-3 試験体のひび割れ分布およびタイル仕上面のひび割れ及び剥離分布 (層間変形角 1/250、■ : 剥離部分)

三谷ら⁴⁾は、ボックス型の鉄筋コンクリート造耐震壁に施工された従来工法によるタイル張りとは剥落防止対策を施したタイル張りの2種類の工法を対象とし、3次元振動台を用いて水平一方向加振実験を行い、外壁タイル張りの耐震性能について検討している。この研究においては新築時のタイル張り工法の耐震性能について検討したもので本研究における浮いた状態にあるタイルについてはではない。

古賀ら⁵⁾は、タイルの剥離・剥落の原因の1つに図1-4に示すコンクリート躯体と張付けモルタル間における面内方向に生じる剥離応力があり、この剥離応力は部材を形成する材料の伸縮量の違いが原因で、コンクリート躯体と張付けモルタル間に弾性のポリマーセメント系下地調整剤等を緩衝材として使用したタイル直貼り工法に着目して剥離メカニズムの研究を行っている。この研究においても新築時のタイル張工法の剥落に至る応力を検討したもので浮いた状態にあるタイルについてはではない。



図 1-4 剥離応力と弾性モルタルによる応力緩和

山田ら⁶⁾は、外壁タイル剥離評価を対象とした非破壊試験法について解析的に検討を行い、弾性波法を適用した外壁タイルの剥離評価の可能性および適用性について実験的および解析的検討を行い、検出波形の周波数特性および低周波数領域における共進周波数の出現状況に着目することによって、タイルの剥離状況のある程度正確に評価できることを報告している。この研究は、剥離を評価するうえでの非破壊試験方法の検討であり、浮きの状態のタイルの剥落性状の評価とは異なる

タイル剥落性状の解析手法に関する既往の研究として、高野ら⁷⁾は、タイル壁面の打撃音信号からマザーウェーブレットを設計し、解析に利用す

る独自の手法を考案し、各種壁面状態を可視化した。実験では実タイル壁面を模擬した試験用壁面を作成し、現実に近い状態を再現した。実験結果よりウェーブレット解析を用いることで2種類のタイルの剥離状態を視覚的に判別することが出来ることが確認されている。この研究は、可視化という点においては本研究と同様であるが、浮きタイルの剥離状態を把握する手法であり目地モルタルに着目して剥落性状を把握しようとするものではない。図 1-5 に剥離状態のウェーブレット平面における可視化したものを示す。

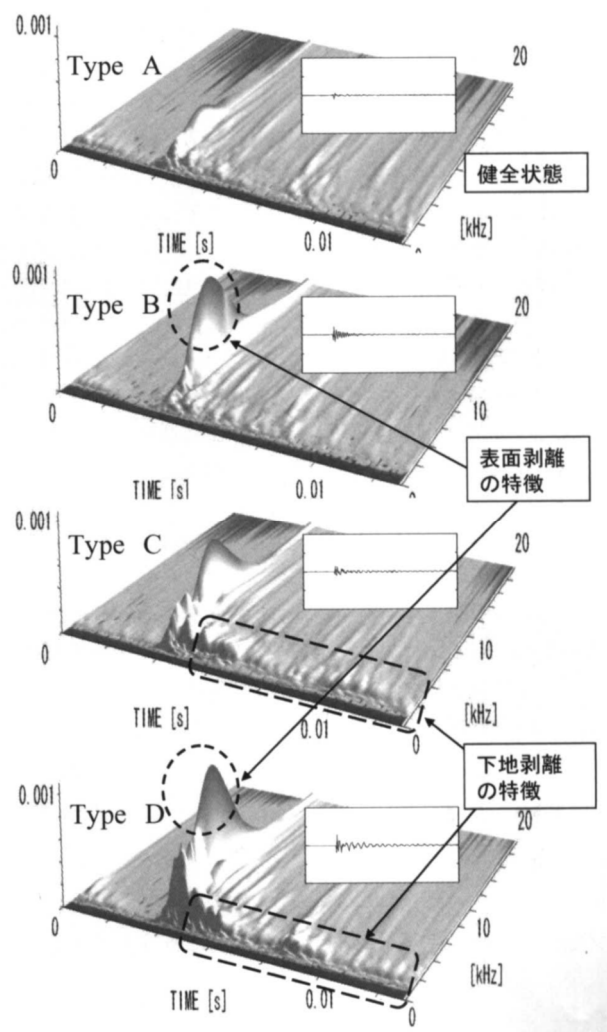


図 1-5 剥離状態のウェーブレット平面における可視化

渡部ら⁸⁾は、タイル剥離の原因として下地となるコンクリートとタイル仕上間とのひずみ差から起こるといふ説より、コンクリートとタイルの温度を測定することは、温度ひずみを推定するうえで非常に重要であると考へタイル張りを施した壁模擬試験体を屋外に暴露し温度計測を行うことでひずみ差を推定した。この研究は、

温度ひずみに着目してタイルの剥離の原因を検討しているが、本研究はモルタル目地の弾性変形に着目しており異なるものである。

岩瀬⁹⁾は、打撃による剥離タイルの検知方法の根拠である音色の違いの原因である剥離タイルと非剥離タイルの振動特性そのものの相違を模擬剥離タイルによる実験で調べ、明らかになった振動特性の大きな差異に着目した検知方法を提示した。打撃による剥離タイルの検知については、現在では一般的に用いられており、人為的に浮き状態にあるタイルの試験体を作製した際の浮きの確認に用いている。

稲葉ら¹⁰⁾は、力学モデルに立脚した剥離モデルを構築し、コンクリート躯体とモルタルの界面近傍におけるタイルの剥離を対象とした解析手法を提案している。この研究は、ひずみ追従性試験を用いており非線形のバネの特性を推定している点においては類似しているが、目地モルタルについては検討されていない。

参考文献

- 1) 建設省住宅局建築指導課長通達，建設省住指発第二二一号,1990.5.19
- 2) 一般社団法人 FrontISTR Commons : FrontISTR について、オープンソース大規模並列 FEM 非線形構造解析プログラム、<https://www.frontistr.com/>[アクセス日]2022.01.21
- 3) 小川晴果，三谷一房，津田和明，甚野学，川口徹，江戸宏彰：タイル剥落防止工法の耐震実験，日本建築学会技術報告書，第14号，pp31-36，2001
https://doi.org/10.3130/aijt.7.31_2
- 4) 三谷一房，小川晴果：水平一方向振動加振実験による外壁タイル張りの耐震性能に関する検討，日本建築学会構造系論文集，No.656，pp1773-1780，2010.10
<https://doi.org/10.3130/aijs.75.1773>
- 5) 古賀一八，成田瞬：モルタルの乾燥収縮に着目した外壁タイルの剥離メカニズムに関する研究 その5 弾性セメントモルタルによる剥落防止工法（タイル（2）,材料施工）：日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1 材料施工，No.1438，pp875-876，2011.8
- 6) 山田和夫，惣田篤子，吉井尚世：外壁タイルの剥離評価に関する解析的研究，日本建築学会東海支部研究報告書，No.26，pp101-104，1993-02
- 7) 高野章，太田有，井上文宏，諸戸竜一：ウェーブレット解析を用いた建築用外装タイルの定量的剥離診断，可視化情報学会誌，26巻 Suppl2号，pp.189-192，2006.9
https://doi.org/10.3154/jvs.26.Supplement2_189
- 8) 渡部嗣道：線形破壊力学を用いた界面剥離応力の解析的研究 タイル張り仕上げとコンクリートとの界面に接着欠陥を有する場合，日本建築学会構造系論文集，75巻 656号，pp.1809-1818，2010.10
<https://doi.org/10.3130/aijs.75.1809>
- 9) 岩瀬昭雄：剥離タイルの振動特性と触診型検知方法に関する研究 模擬剥離タイルを用いた検討：日本建築学会計画論文集，No.455，pp.1-7，1994.1
https://doi.org/10.3130/aija.59.1_1
- 10) 稲葉洋平，佐々木正治，閑田徹志：タイルの剥離評価に関する研究 ひずみ追従性試験および剥離モデルの提案，日本建築学会構造系論文集，76巻 667号，pp.1577-1582，2011.9
<https://doi.org/10.3130/aijs.76.1577>

第2章 建築外壁材の動的衝撃試験方法の検討

2.1 動的衝撃試験

2.1.1 試験概要

動的衝撃試験により試験体に動的荷重 F をかけると、浮きを生じたタイルが徐々に剥離し始め、最終的に剥落する。その剥離・剥落過程を図 2-1 に示す。その時の面外残留変位 R を計測し動的衝撃試験より求めた浮きタイル部付与エネルギー U と面外残留変位 R の関係を考察する。

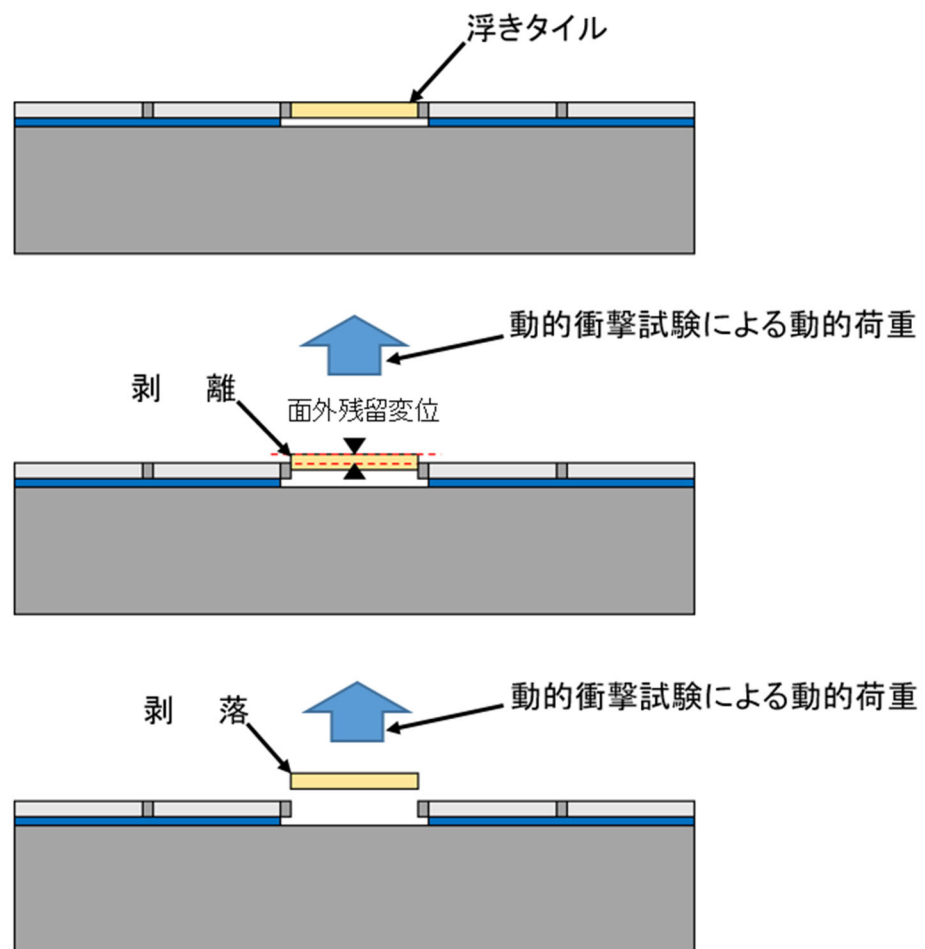


図 2-1 タイルの剥離・剥落過程

2.1.2 試験体

250×250×50 (mm) のコンクリート平板にタイル用弾性接着剤を用いて45角タイル (45×45 mm、厚さ 6mm) 裏足ありを貼り付ける。試験体概要図を図 2-2 に示す。タイルの質量は 29.4 (g/枚)、目地セメントは既調合の NS 目地セメントを使用する。NS 目地セメントの性状を表 2-1 にタイル用弾性接着剤の性状を表 2-2 に示す。

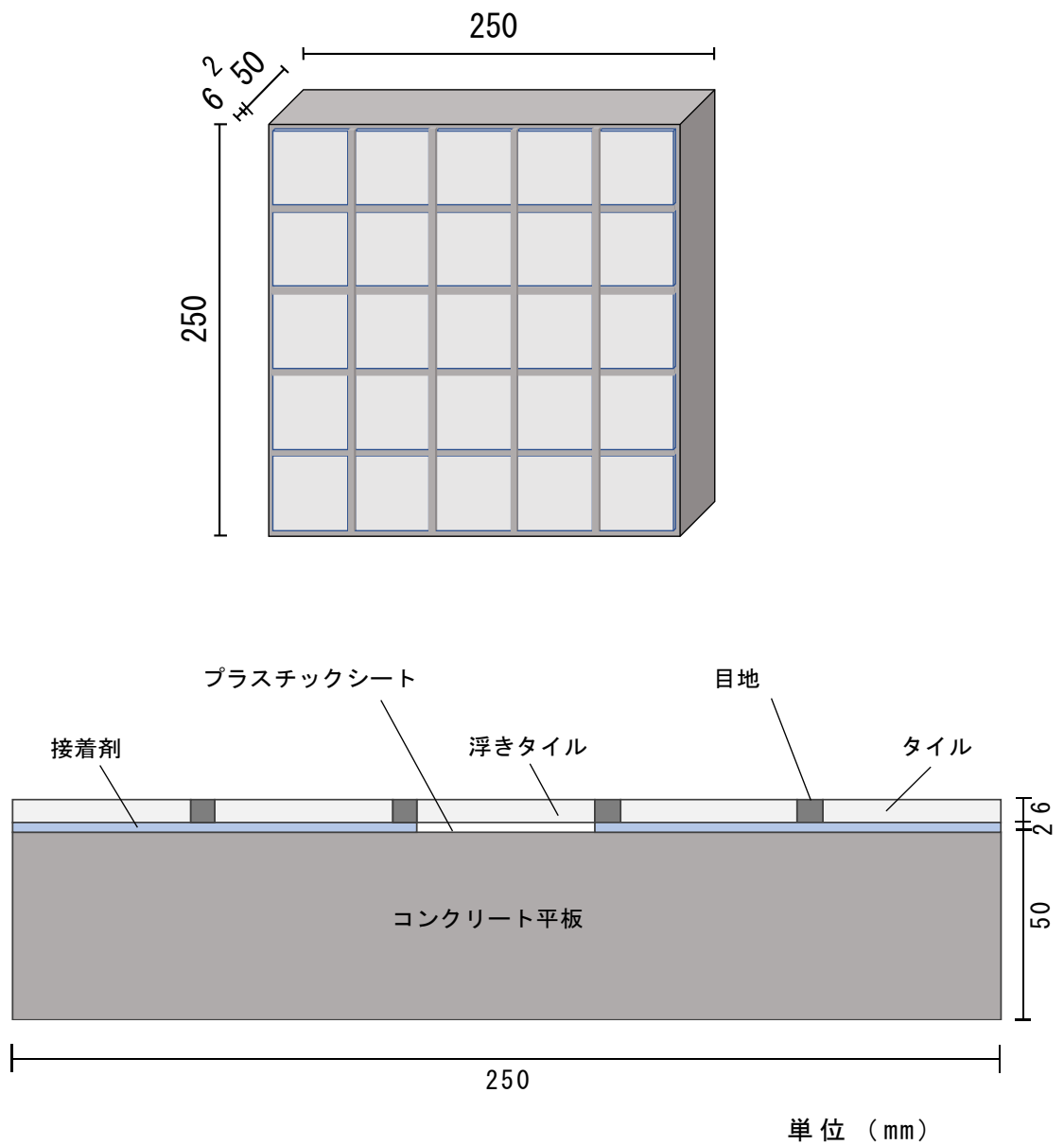


図 2-2 試験体概要図

表 2-1 NS目地セメント性状 (M-2)

試験項目	試験結果	試験方法
軟度変化率 (%)	1.6	JIS A 6916
曲げ強さ (N/mm ²)	6.7	JIS R 5201
圧縮強さ (N/mm ²)	26.6	JIS R 5201
吸水率 (%) [24時間]	6.5	JIS A 1404
透水量 (g)	4.8	JIS A 1404
単位容積質量 (kg/ℓ)	2.01	-

表 2-2 タイル用弾性接着剤の性状

項目	性状
主成分	変性シリコン・エポキシ樹脂
外観	着色ペースト状
粘度	500~1000Pa・s (23℃)
比重	1.45~1.65
貼り付け可能時間	約 30分(夏季)約 60分(冬季)

2.1.3 試験方法

動的衝撃試験概要を図 2-3 に示す。試験体をタイル面が下向きになるように写真 2-1 に示す治具に取り付け試験機に設置し、自由落下により落下させ台座が受衝撃板に衝突する。これにより図 2-1 に示すように動的荷重 F をタイル面全体に生じさせることができ複数枚の面的なタイルの引張り強度の評価が可能になる。さらに落下高さを変えることにより動的荷重 F を増加させてタイルに面外残留変位 R が発生し、剥落するまで動的衝撃試験を行う。本試験機は、落下高さは 10cm から最大 110cm までの高さで試験が可能で、5cm 間隔で動的衝撃試験を行い、タイルの剥落直前までの残留変位の微小な変化が計測できるよう試験体の条件によって細かく高さを変えて動的衝撃試験を行った。動的衝撃試験治具は、試験体を固定し張り付

けたタイルに動的衝撃荷重が均一にかかり治具が変形しないようにアルミの押し抜き部材を加工してサイズ 250×250×200(mm)を作製した。写真 2-1 に衝撃試験機を写真 2-2 に動的衝撃試験治具示す。動的荷重 F は、動的衝撃試験で計測された加速度 $a(m/s^2)$ と浮きタイルとその目地モルタルの質量の合計 $m(kg)$ より(式 1)で求めた。

$$F = m \times a \quad (N) \quad (\text{式 1})$$

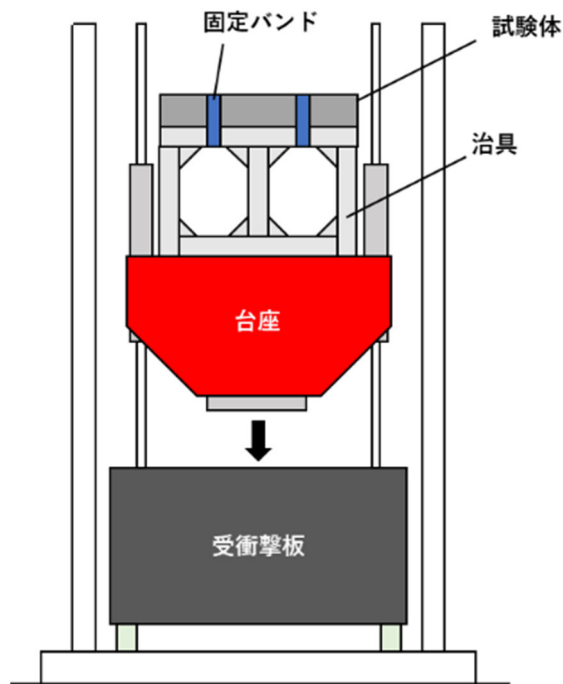


図 2-3 動的衝撃試験概要

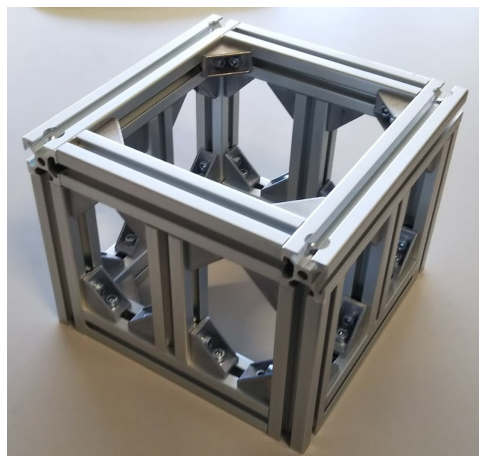


写真 2-1 動的衝撃試験治具



写真 2-2 衝撃試験機

2.2 面外変位計測手法の提案

2.2.1 面外変位計測手法概要

浮きを生じた面的タイル全体の面外の変形は通常の変位計での計測は、ダイヤルゲージを用いた実測が行われてきた。この方法では、不陸部分を簡易的に測定できるなどの利点がある一方、単点計測であるため計測箇所が多い場合に時間がかかってしまうことや、不陸量の分布などが正確に測定できないことなどが欠点となっている。そこで医療業界、自動車開発、建設現場、文化遺跡の保存など多岐の分野で活用されている 3D スキャナーに着目した。3D スキャナーは、短時間で大量の測定点が測定可能であり、かつ単点測定に対して点群測定が出来るため、不陸を面として短時間で計測することが可能となる。3D スキャナーの計測精度の検討としてダイヤルゲージを用いた実測の計測結果との比較を行い 3D スキャナーの有効性を検討する。

2.2.2 計測概要

250×250×50 (mm) のコンクリート平板に、中央のタイル1枚のみ浮きを生じさせた試験体を作製し、タイル仕上面を下向きにした状態で試験体を治具に設置し動的衝撃試験を行った。動的衝撃試験を行う前にダイヤルゲージによる実測と3Dスキャナーによる計測を行い、5cm, 10cmの落下高さから動的荷重 F を加えるごとに、面外残留変位 R のダイヤルゲージ (0.01mm 精度) を用いた実測値と、3Dスキャナーによるスキャン計測値の比較をした。

2.2.3 ダイヤルゲージを用いた実測

あらかじめ図2-4に示すように試験体の実測する点をマーキングし、ダイヤルゲージを固定して試験体を動かしながらタイル一辺に対し4点、合計12点実測した。全ての点の実測後、最初に実測した点の実測を再度行い、実測中に実測器がずれていないことを確認した。使用したダイヤルゲージを写真2-3に示す。

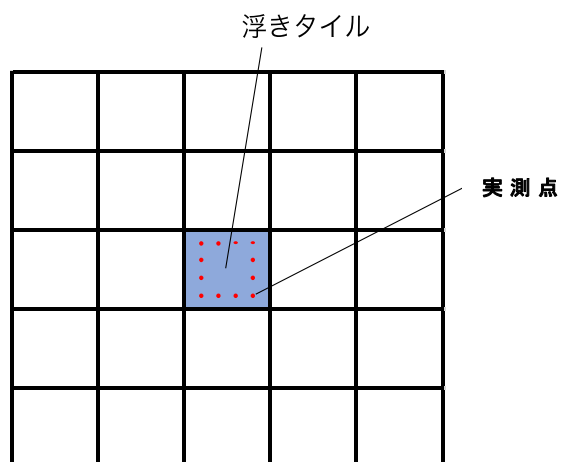


図 2-4 ダイヤルゲージ実測点



写真 2-3 ダイヤルゲージ

2.2.4 3D スキャナーを用いた計測

3D スキャナー概要を図 2-5 に示す。3D スキャナーは SHINING 3D 社の EinScan-Pro+ を使用し、性能を表 2-3 に 3D スキャナーを写真 2-4 に示す。3D スキャナーから出た光が試験体に当たり反射したものをカメラで撮影することにより 3 次元座標データを 3D スキャナーの計測精度は 0.05mm である。ダイヤルゲージの計測点 1 点に対して 3D スキャンでは、対象座標を中心とした直径 1mm の点群（約 14 点）の値を平均したものとし、タイル一辺に対し 4 点、合計 12 点計測した。

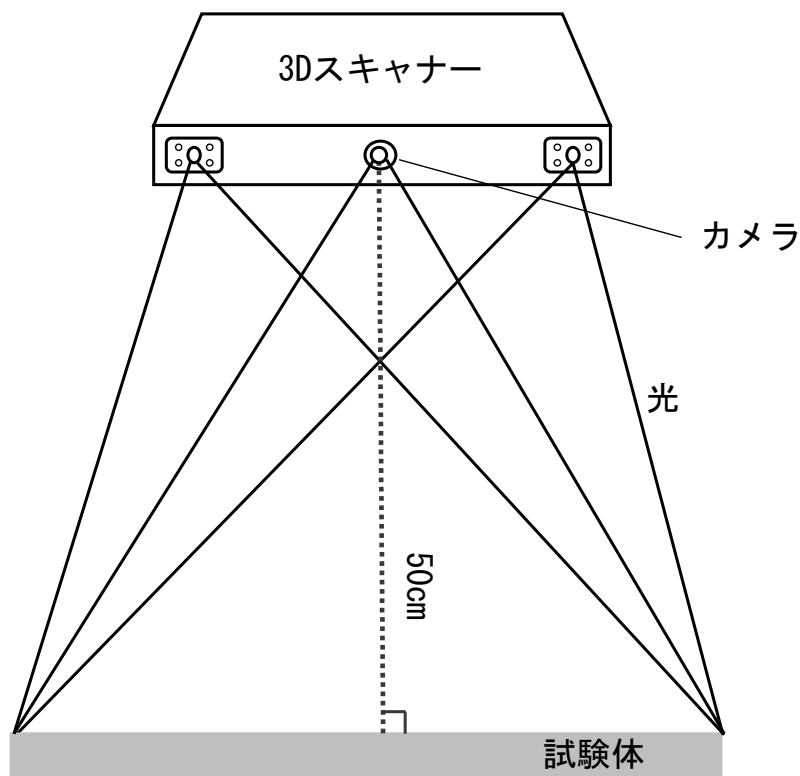


図 2-5 3D スキャナー概要

表 2-3 3D スキャナー性能

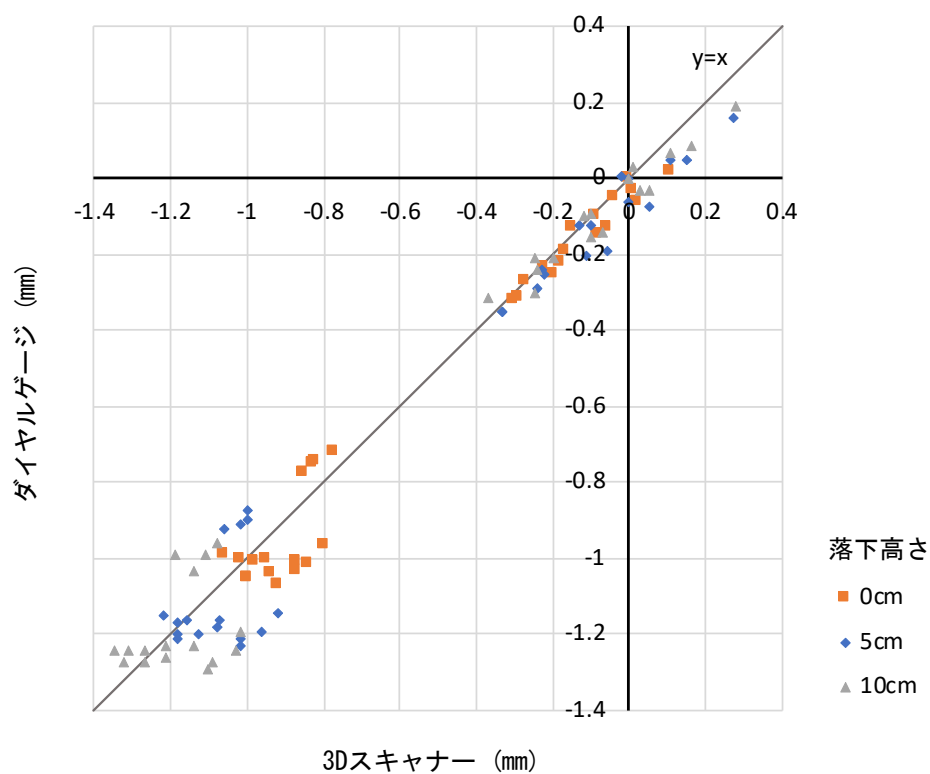
スキャン精度	0.05mm
ポイント間隔	0.24mm
スキャン範囲	300×170mm
スキャンスピード	550,000ポイント/秒



写真 2-4 3D スキャナー

2.2.5 実測値と計測値の結果

ダイヤルゲージの実測値と 3D スキャナーの計測値の結果を図 2-6 に示す。それぞれの落下高さでのダイヤルゲージを用いた実測値と 3D スキャナーを用いたスキャン計測値の相関関係 (R) は 0.993 となった。計測結果から、3D スキャン計測でダイヤルゲージと近い精度での計測が可能として、残留変位に分布がある場合の多点計測には、3D スキャナーによる計測が同等の精度を有することが確認された。今後、本研究の動的衝撃試験における面外残留変位 R 計測に使用することとした。

図 2-6 面外残留変位 R のダイヤルゲージ実測値と 3D スキャナー計測値

2.3 最大加速度と浮きタイル部付与エネルギー推定値 U の算定

2.3.1 試験概要

動的衝撃試験を行なう際、試験体にかかる浮きタイル部付与エネルギー推定値 U を算定するために各落下高さにおける最大加速度 a が値として必要である。加速度計を用いて計測を行ったが、今回の衝撃荷重では加速度計測には限界があり、非接触による加速度計測を検討した。

試験で用いる試験体と同じ、 $250 \times 250 \times 50$ (mm) のコンクリート平板を試験体として使用し、治具に固定したうえでハイスピードカメラを用いた撮影による最大加速度の測定を行なった。試験体を $10\text{cm} \sim 110\text{cm}$ まで 10cm 間隔で落下させ、高速度カメラ撮影を行い動画解析ソフトウェア DIPP-Motion(共に DITECT 社)を用いて、それぞれの落下高さから試験を行なって動画を撮影し、解析ソフト『Dipp-Motion V』を使用して最大加速度 a を算定した。

2.3.2 試験方法

治具に試験体を固定し、試験体側面に解析ソフトで追跡するための任意の6点をマーキングする。加速度試験概要図を図2-7に、追跡点をマーキングした試験体を写真2-5に示す。

高さ 10cm から 110cm まで 10cm ずつ落下高さを高くしていき、計11回落下させ、それぞれの落下高さから試験を行なった際に、試験体が最下点に落下する瞬間を高速度カメラで撮影する。撮影する際のフレームレートは 2000fps に設定している。使用した高速度カメラを写真2-6に示す。

高速度カメラ撮影を行い動画解析ソフトウェア DIPP-Motion(共に DITECT 社)を用いて、加速度を求め落下高さとの関係をプロットし、回帰式により本実験での加速度を求めた。本試験装置で得られる最大加速度は、最大落下高さ 110cm とした。DIPP-Motion 上では図2-7に示すように追跡点を点 P1～点 P6 にそれぞれ設定して各点の位置の変化を追跡・解析している。解析結果の平均から加速度 a を算定した。

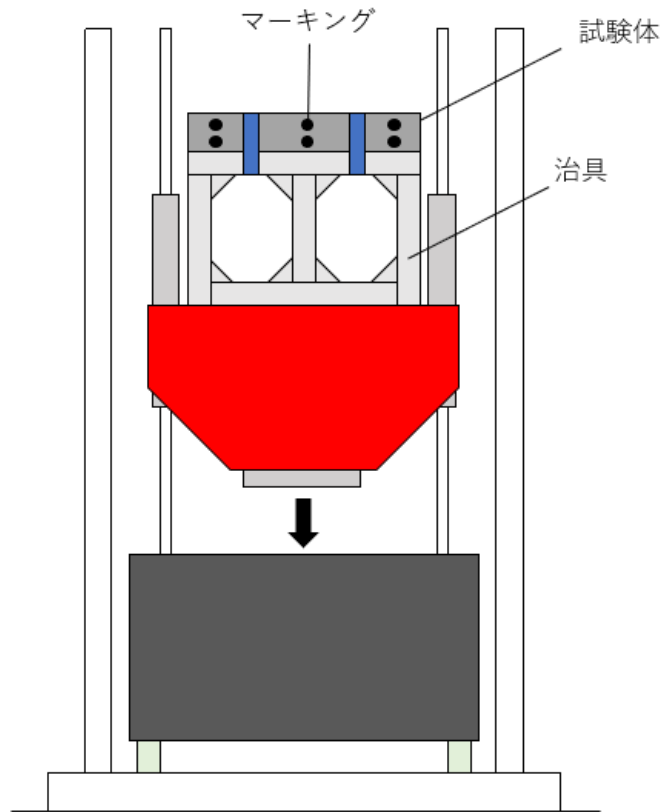


図 2-7 加速度試験概要図

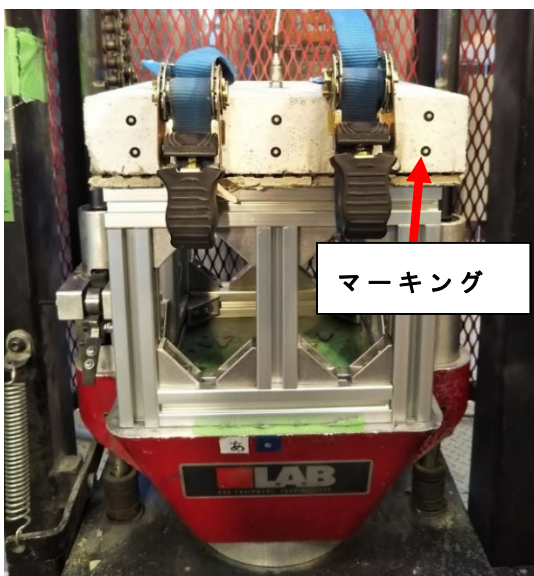


写真 2-5 試験体マーキング位置



写真 2-6 高速度カメラ

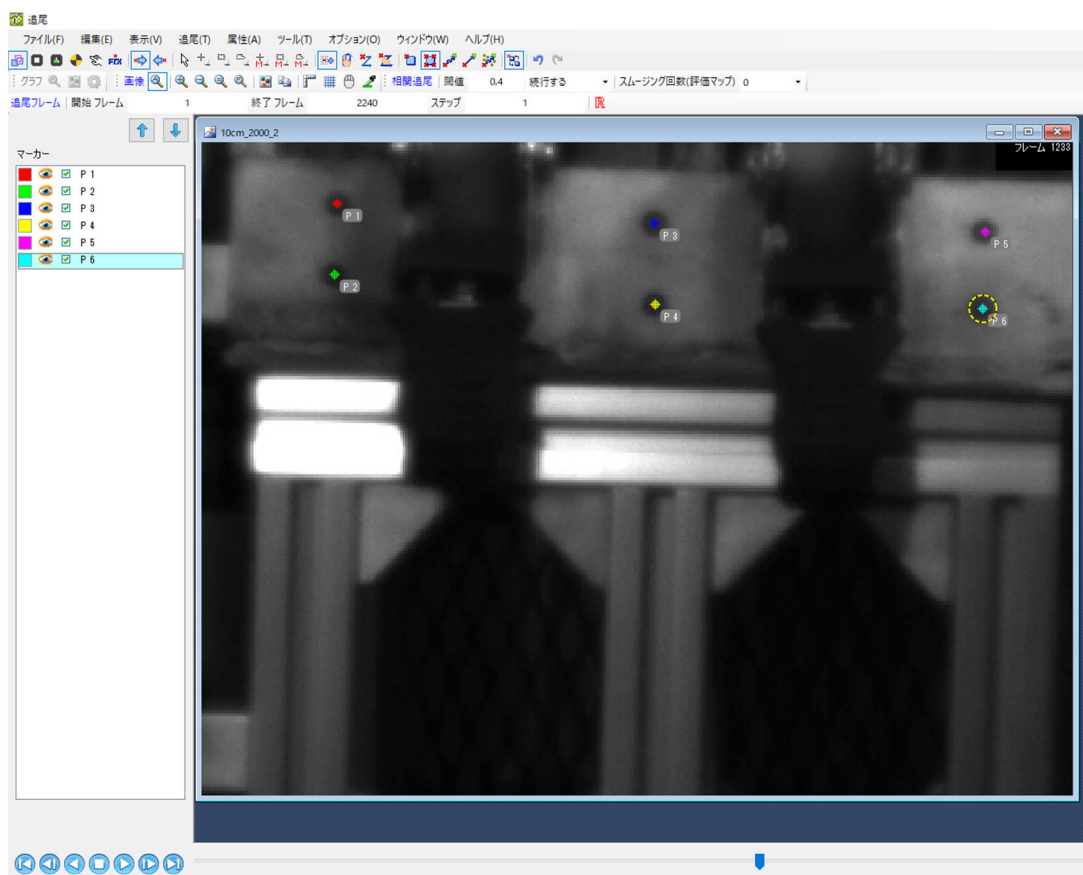


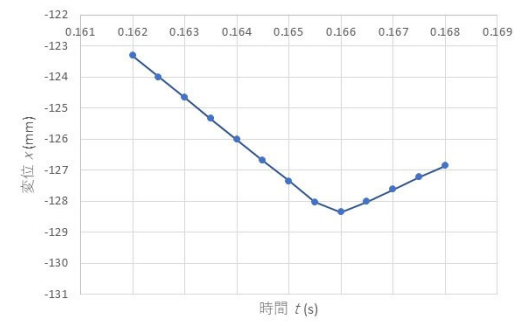
図 2-7 DIPP-Motion 上での追跡点

2.3.3 試験結果

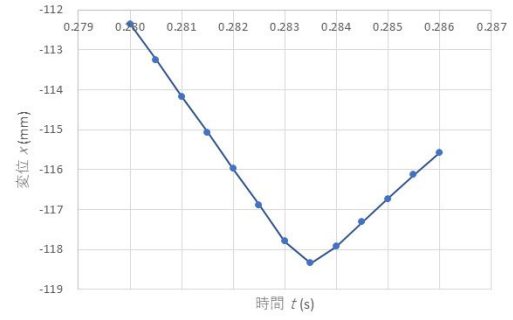
高速度カメラ撮影を行い動画解析ソフトウェア DIPP-Motion(共に DITECT 社)を用いて、変位と時間、加速度と時間の関係を計測し、その結果からエネルギーと時間の関係を求めた。

試験体①～③の計測結果を落下高さごとに変位 x と時間 t の関係、浮きタイル部に生じる加速度 a と時間 t の関係、この計測結果より求めた浮きタイル部付与エネルギー推定値 U と時間 t の関係を図 2-8～図 2-25 に示す。

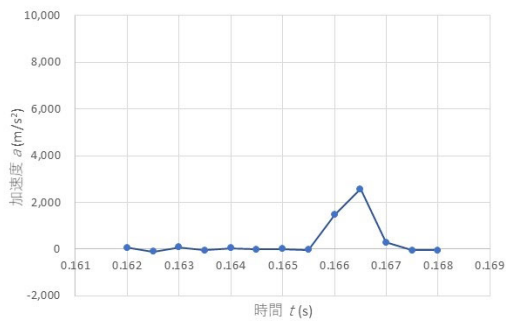
タイル部に生じる加速度推定値と時間 t の関係から最大加速度 a を求めたものを表 2-4 に示す。回帰式により本実験での加速度を求めた。試験結果を図 2-26 に示す。図 2-26 のグラフにおける近似式は、 $y=-0.819x^2+167.11x$ で、決定係数は $R^2=0.9092$ である。試験結果から、落下高さとも最大加速度の間には相関があることがわかり、決定係数も高い値を取って



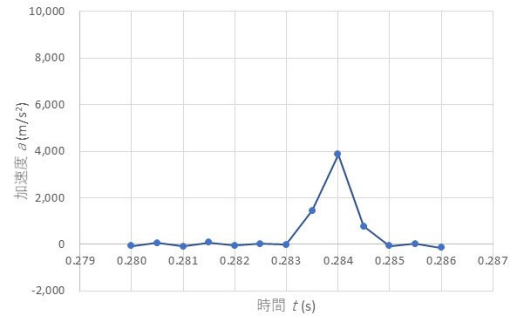
変位



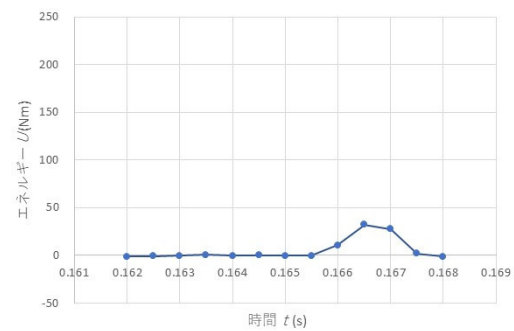
変位



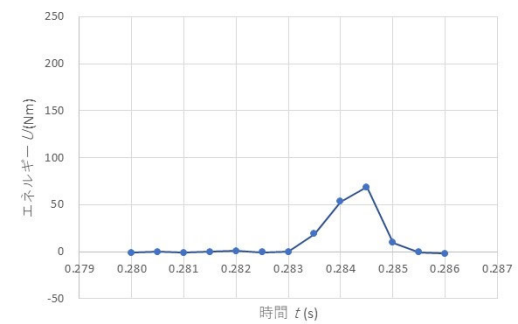
加速度



加速度



エネルギー

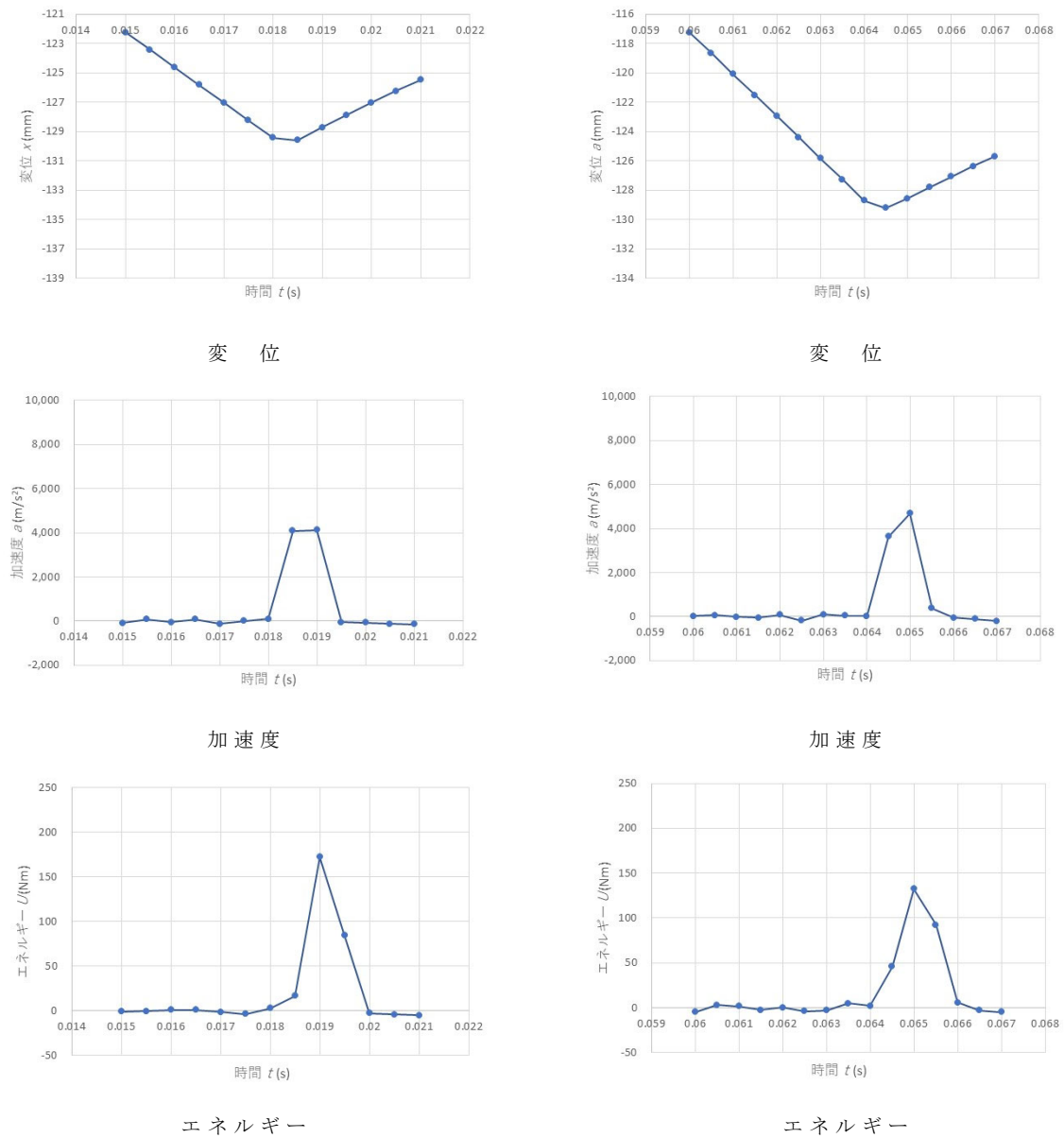


エネルギー

a) 落下高さ 10cm

b) 落下高さ 20cm

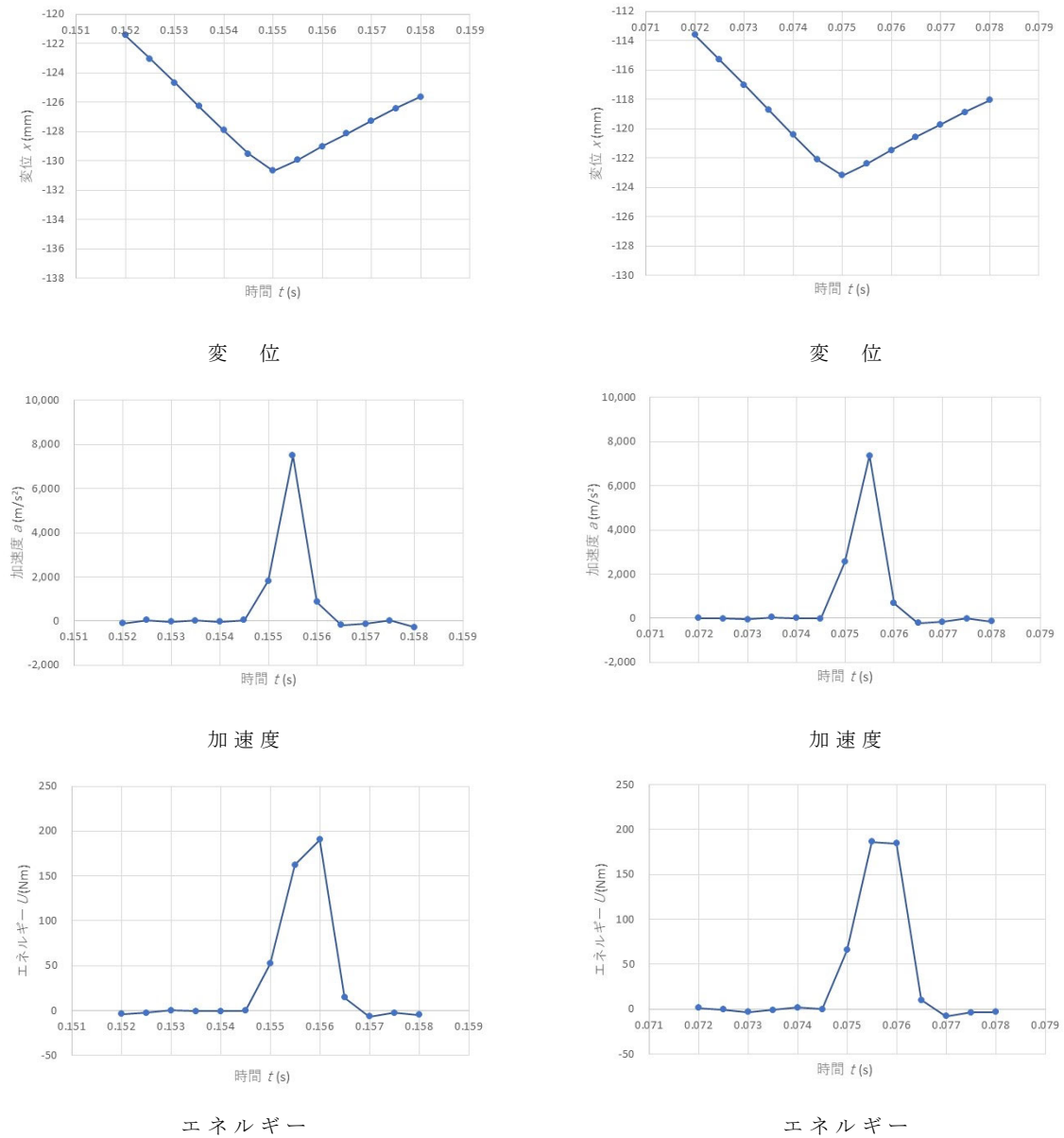
図 2-8 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体① 落下高さ 10cm・20cm)



a) 落下高さ 30cm

b) 落下高さ 40cm

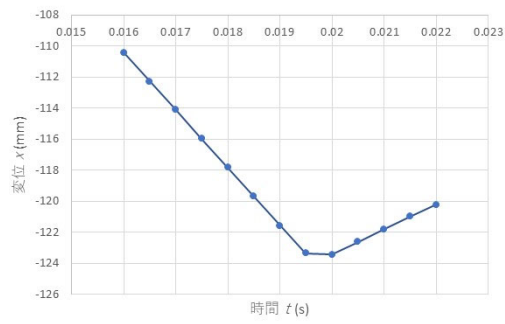
図 2-9 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体① 落下高さ 30cm・40cm)



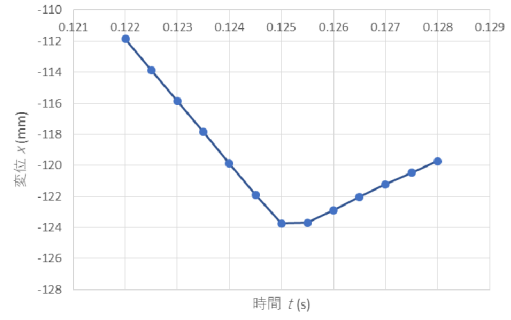
a) 落下高さ 50cm

b) 落下高さ 60cm

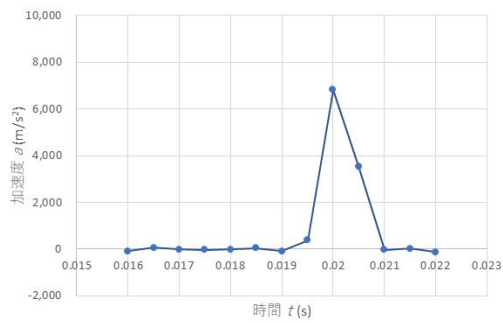
図 2-10 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体① 落下高さ 50cm・60cm)



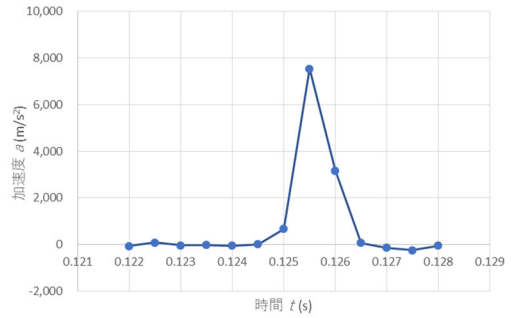
変位



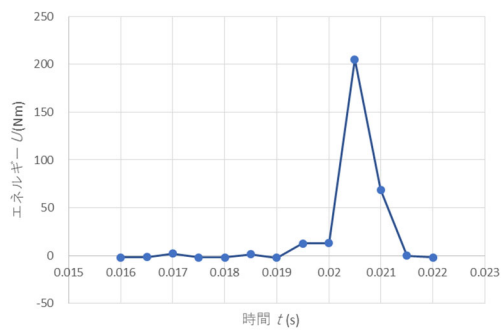
変位



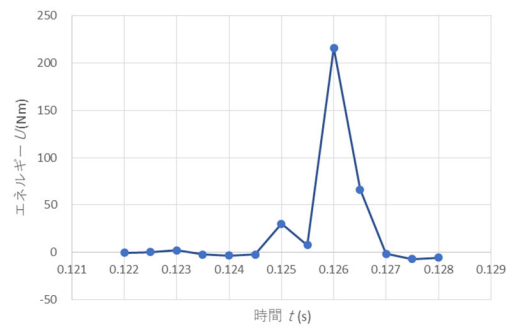
加速度



加速度



エネルギー

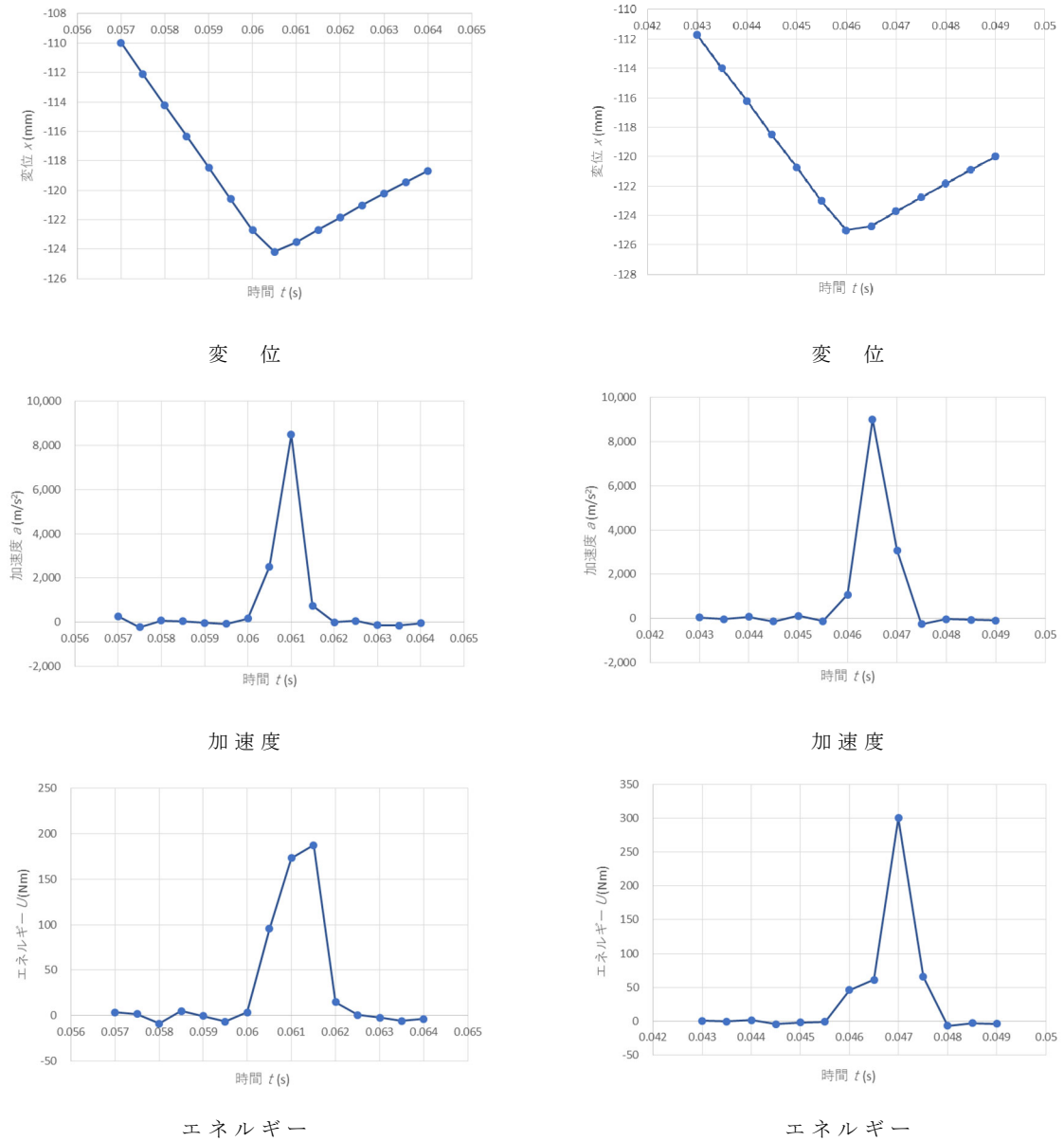


エネルギー

a) 落下高さ 70cm

b) 落下高さ 80cm

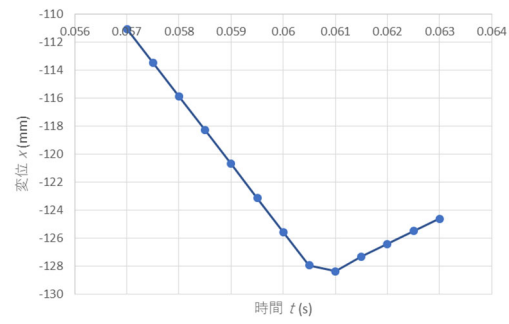
図 2-11 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体① 落下高さ 70cm・80cm)



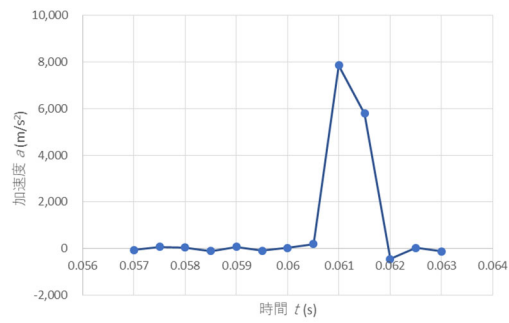
a) 落下高さ 90cm

b) 落下高さ 100cm

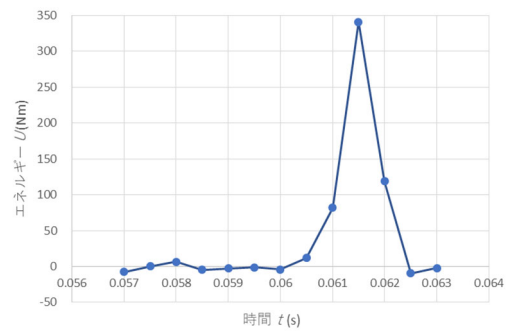
図 2-12 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体① 落下高さ 90cm・100cm)



変 位



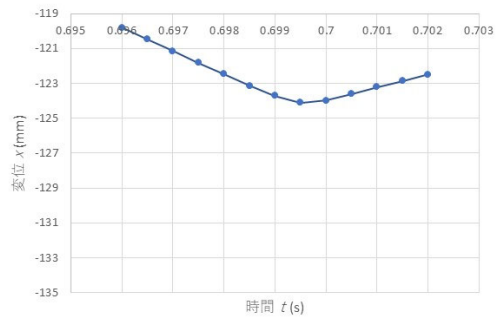
加 速 度



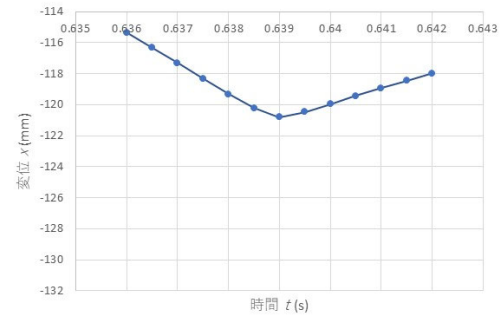
エ ネ ル ギ ー

a) 落下高さ 110cm

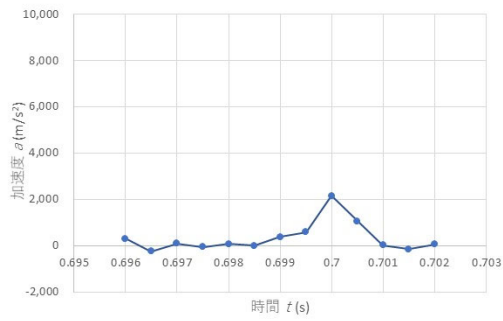
図 2-13 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体① 落下高さ 110cm)



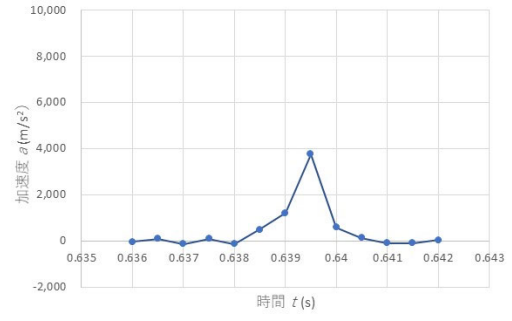
変位



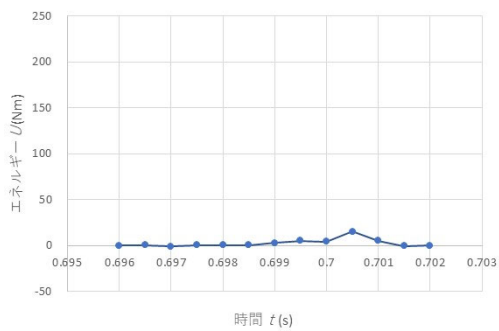
変位



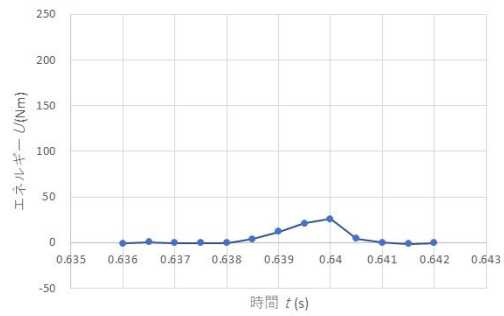
加速度



加速度



エネルギー

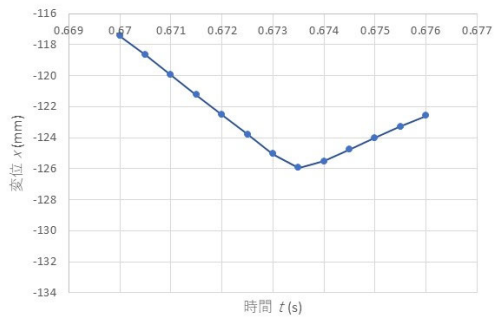


エネルギー

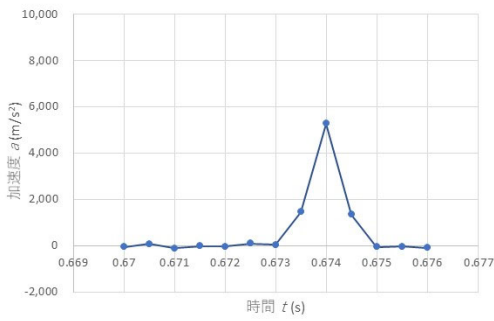
a) 落下高さ 10cm

b) 落下高さ 20cm

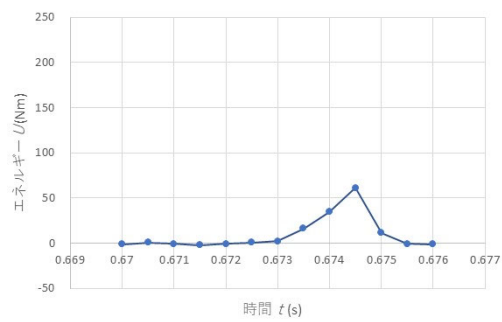
図 2-14 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体② 落下高さ 10cm・20cm)



変位

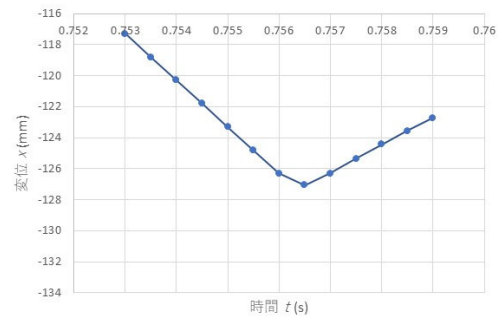


加速度

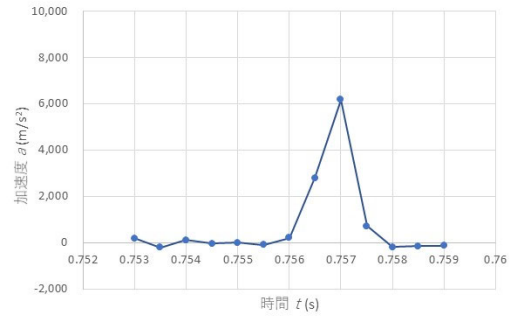


エネルギー

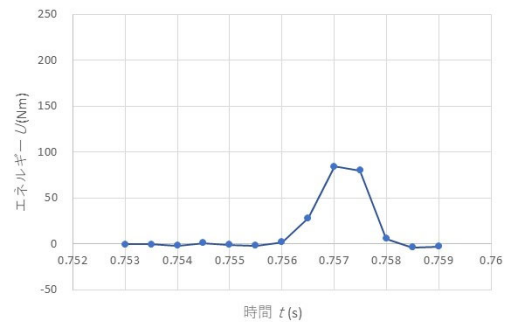
a) 落下高さ 30cm



変位



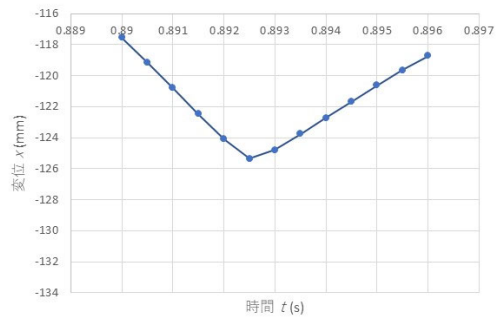
加速度



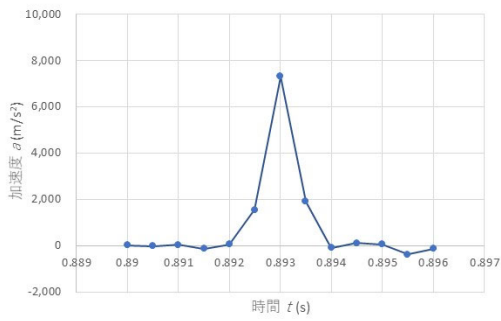
エネルギー

b) 落下高 40cm

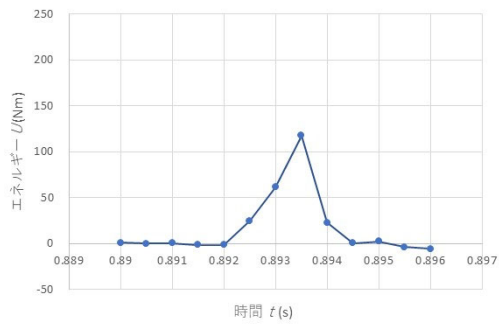
図 2-15 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体② 落下高さ 30cm・40cm)



変位

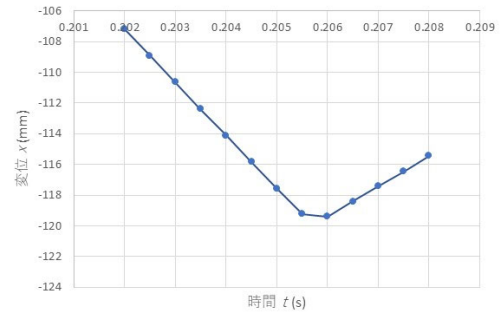


加速度

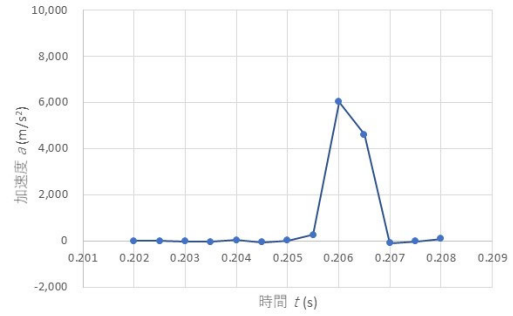


エネルギー

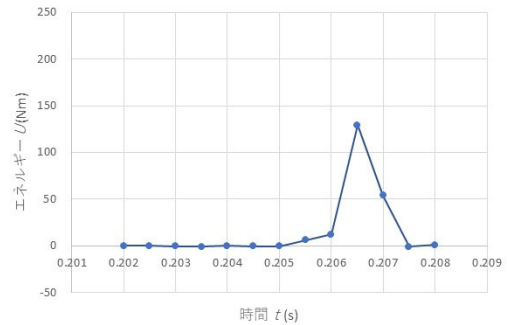
a) 落下高さ 50cm



変位



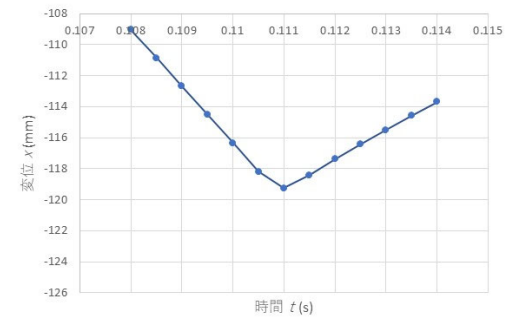
加速度



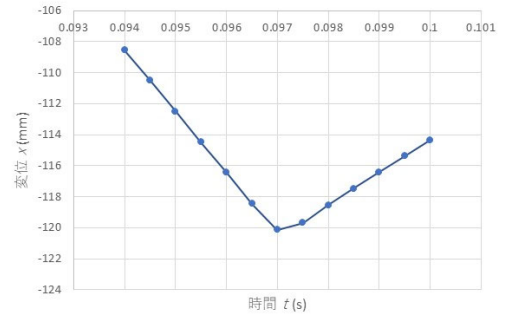
エネルギー

b) 落下高さ 60cm

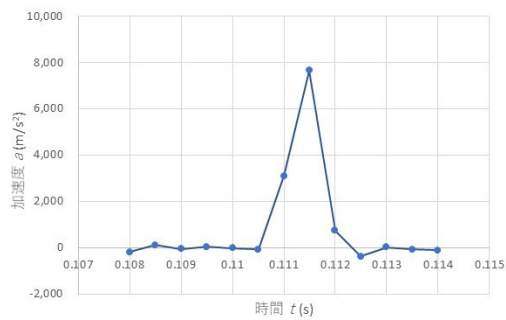
図 2-16 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体② 落下高さ 50cm・60cm)



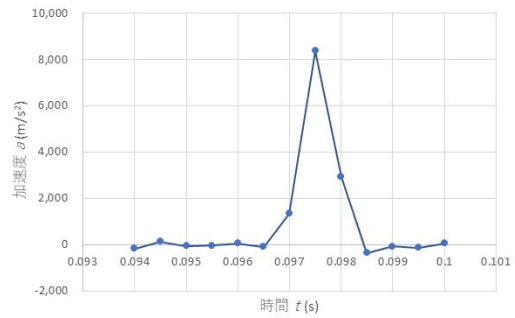
変位



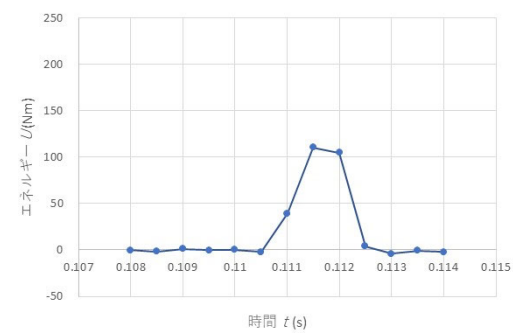
変位



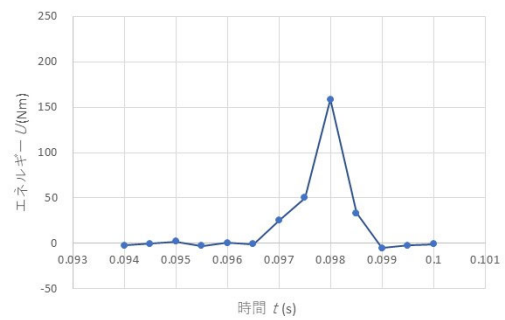
加速度



加速度



エネルギー

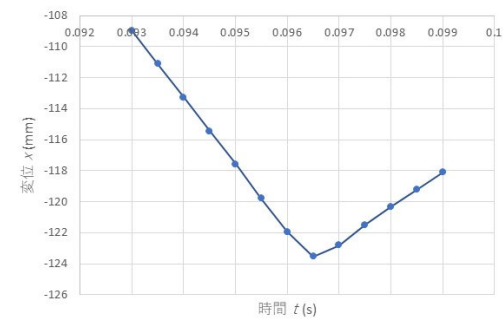


エネルギー

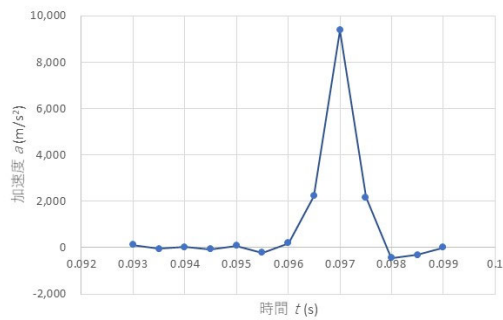
a) 落下高さ 70cm

b) 落下高さ 80cm

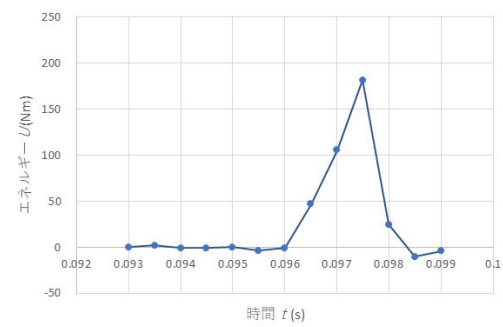
図 2-17 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体② 落下高さ 70cm・80cm)



変位

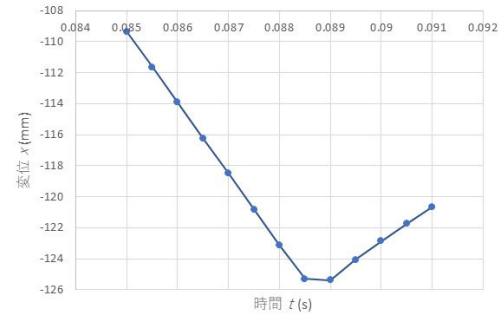


加速度

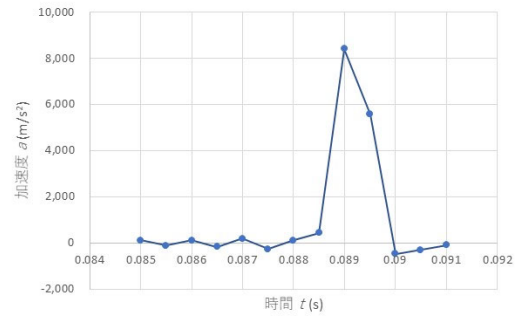


エネルギー

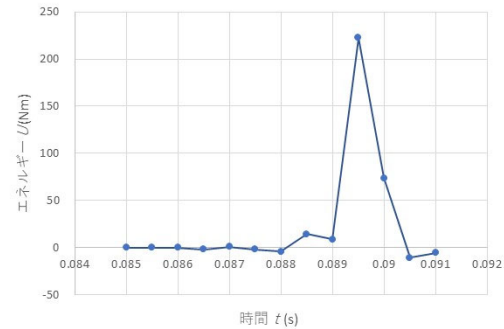
a) 落下高さ 90cm



変位



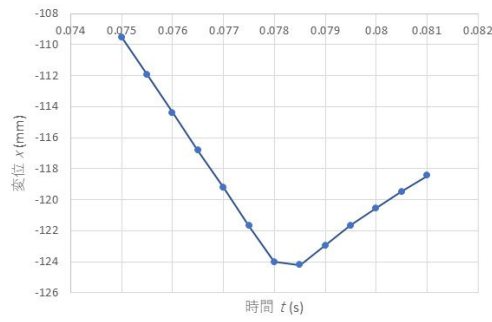
加速度



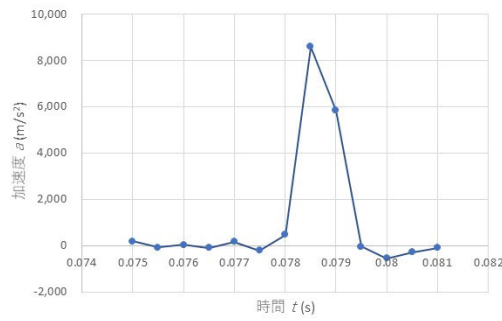
エネルギー

b) 落下高さ 100cm

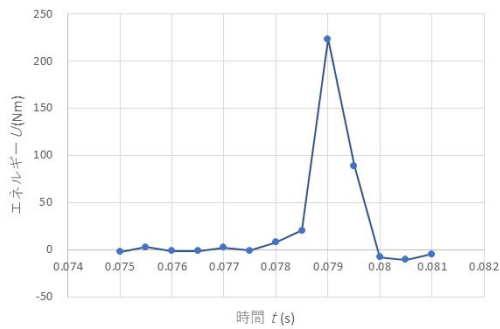
図 2-18 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体② 落下高さ 90cm・100cm)



変 位



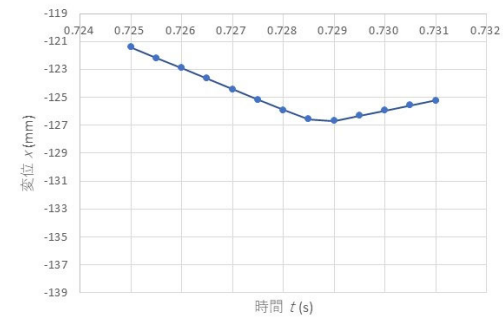
加 速 度



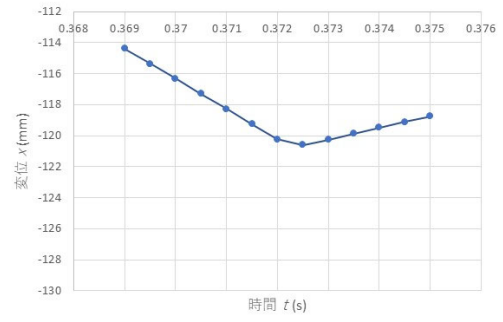
エ ネ ル ギ ー

a) 落下高さ 110cm

図 2-19 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体② 落下高さ 110cm)



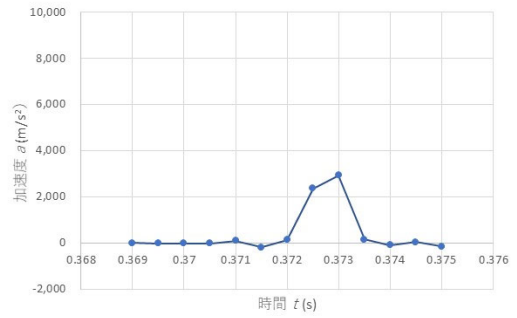
変位



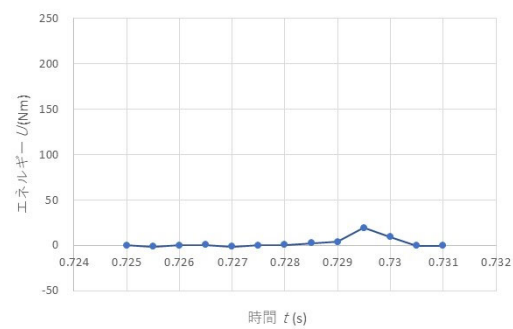
変位



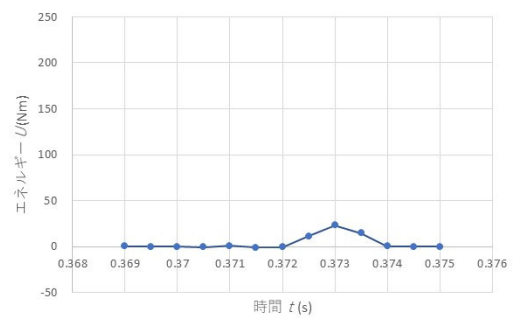
加速度



加速度



エネルギー

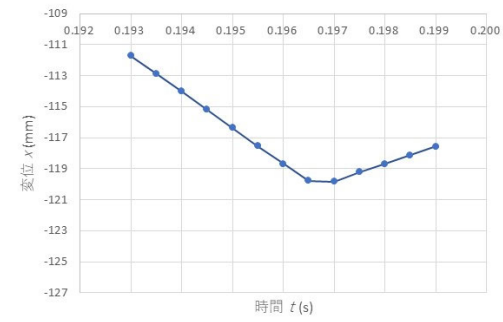


エネルギー

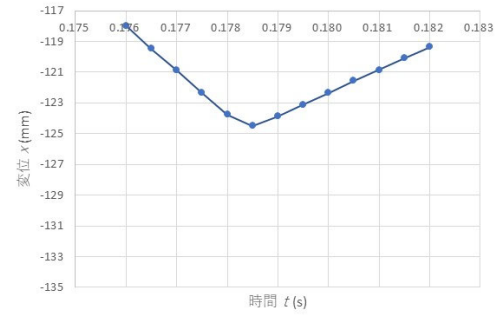
a) 落下高さ 10cm

b) 落下高さ 20cm

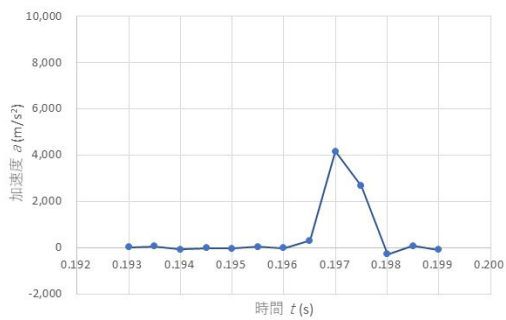
図 2-20 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体③ 落下高さ 10cm・20cm)



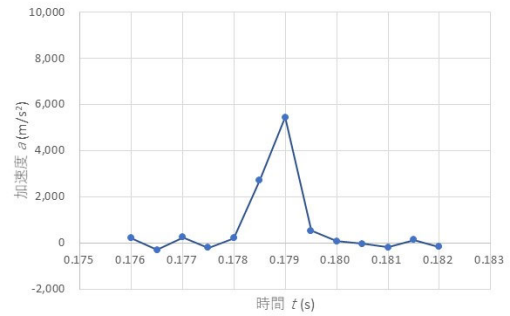
変位



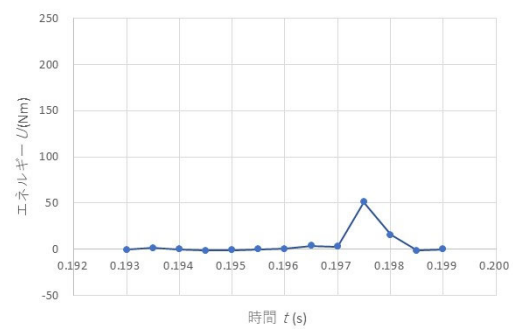
変位



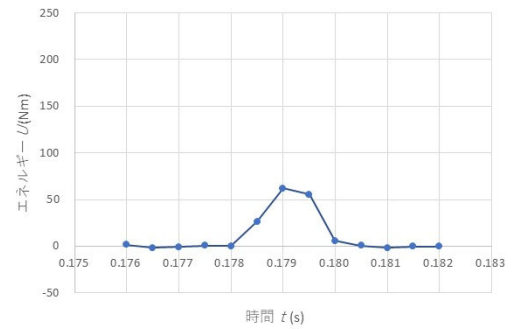
加速度



加速度



エネルギー

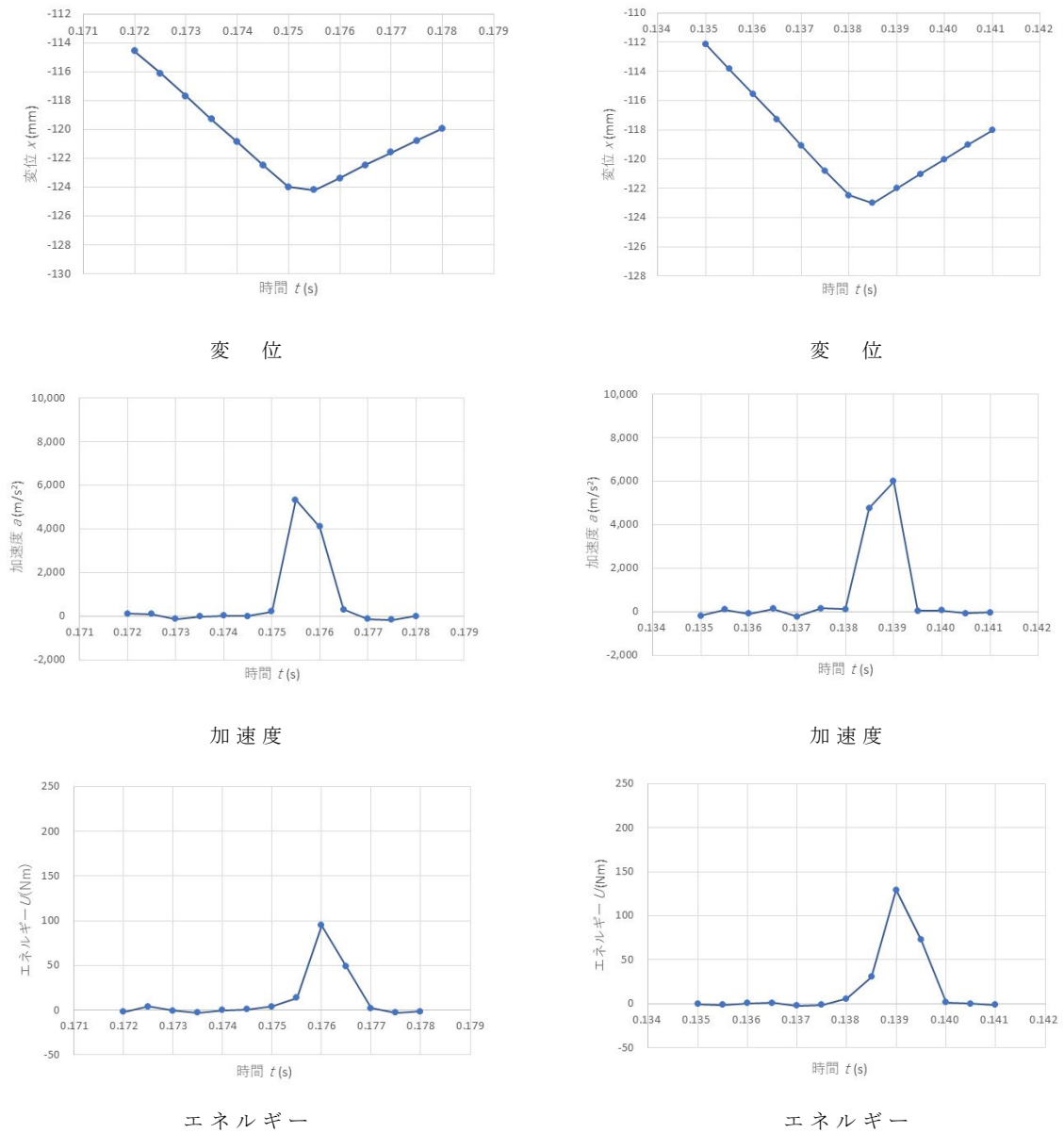


エネルギー

a) 落下高さ 30cm

b) 落下高さ 40cm

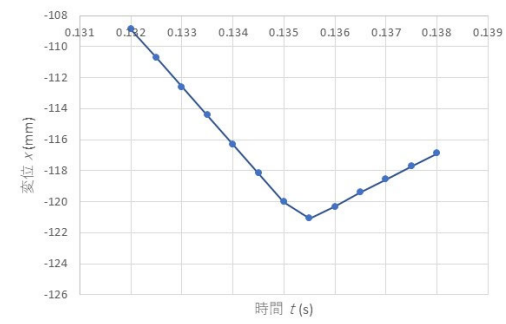
図 2-21 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体③ 落下高さ 30cm・40cm)



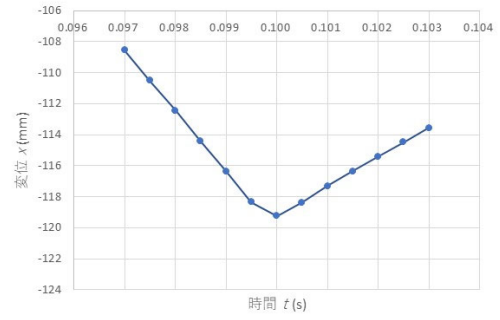
a) 落下高さ 50cm

b) 落下高さ 60cm

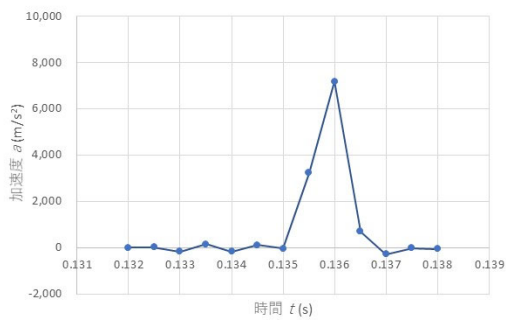
図 2-22 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体③ 落下高さ 50cm・60cm)



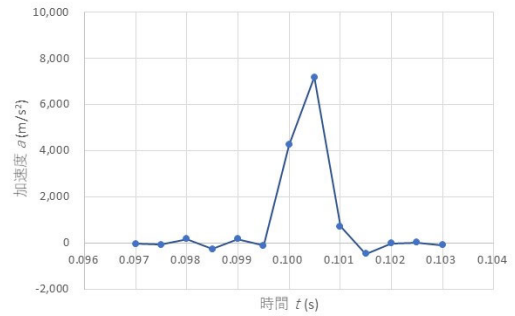
変位



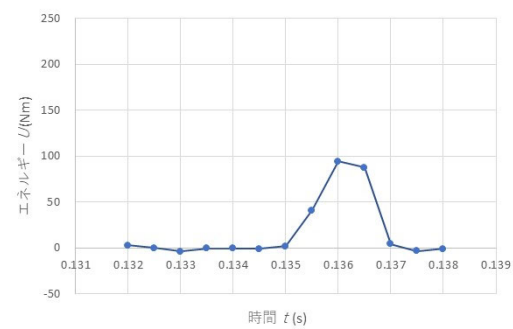
変位



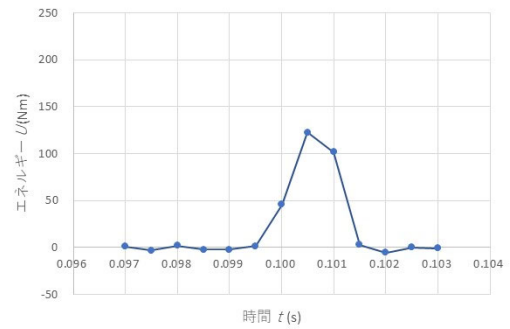
加速度



加速度



エネルギー

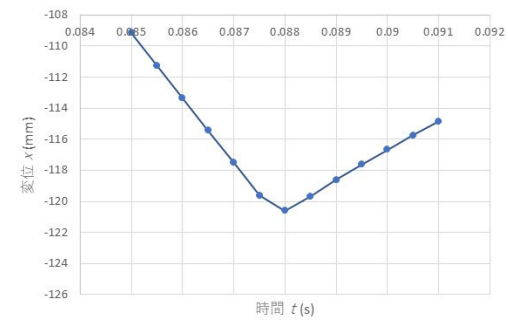


エネルギー

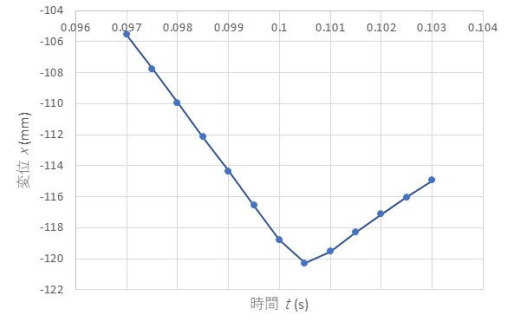
a) 落下高さ 70cm

b) 落下高さ 80cm

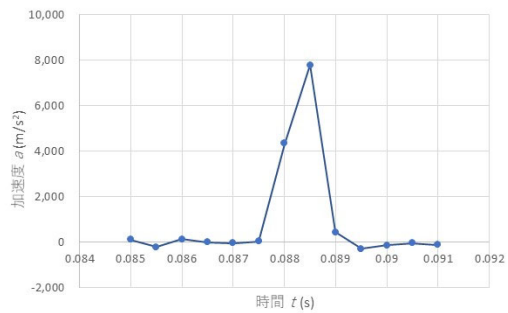
図 2-23 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体③ 落下高さ 70cm・80cm)



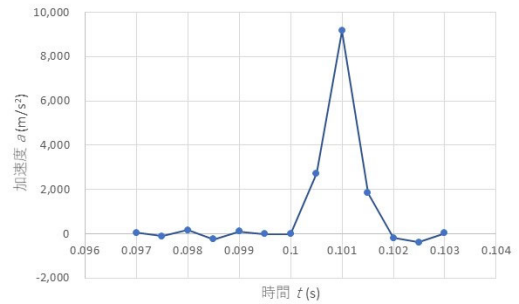
変位



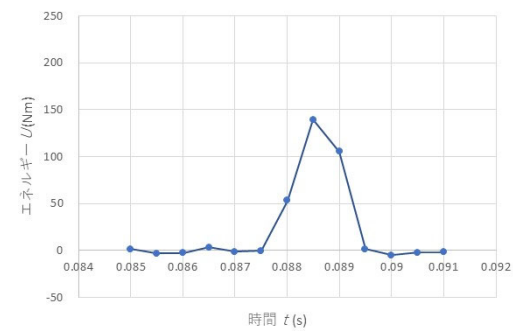
変位



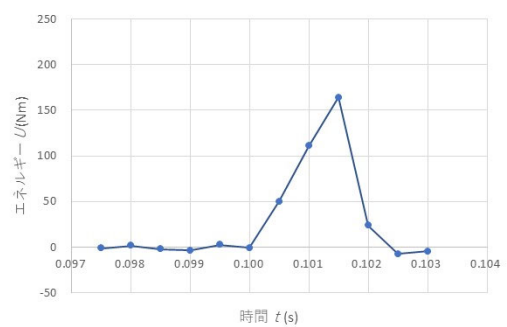
加速度



加速度



エネルギー

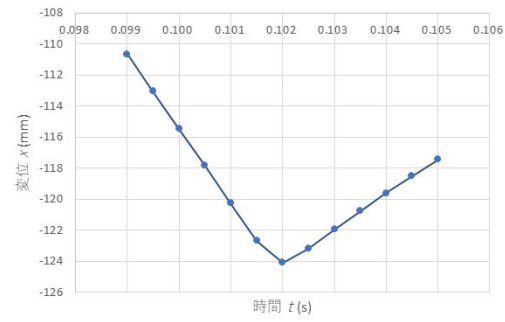


エネルギー

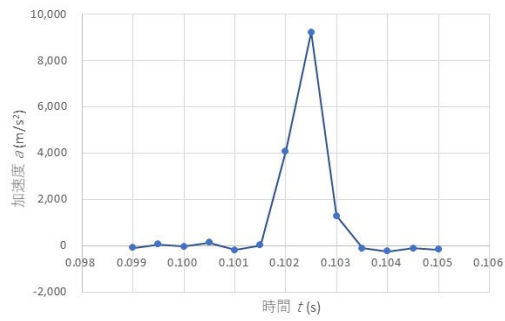
a) 落下高さ 90cm

b) 落下高さ 100cm

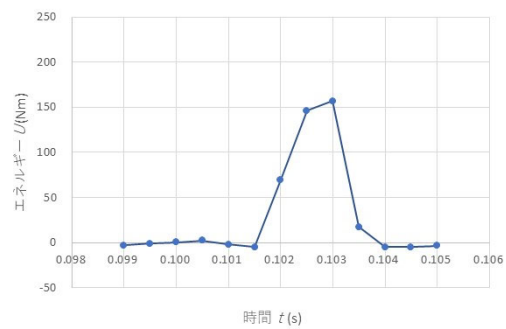
図 2-24 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体③ 落下高さ 90cm・100cm)



変 位



加 速 度



エ ネ ル ギ ー

a) 落下高さ 110cm

図 2-25 変位 x と加速度 a の計測結果とエネルギー U
(試験体③ 落下高さ 110cm)

表 2-4 各落下高さにおける最大加速度 a (m/s²)

高さ(cm)	試験体①	試験体②	試験体③	平均値
10	2565.25	2159.78	2191.66	2305.56
20	3863.57	3754.32	2936.30	3518.06
30	4123.77	5266.21	4151.50	4513.83
40	4678.33	6181.00	5450.15	5436.49
50	7501.51	7308.51	5331.23	6713.75
60	7354.32	6032.38	5991.92	6459.54
70	6821.58	7655.46	7176.62	7217.89
80	7544.77	8360.93	7183.30	7696.33
90	8486.37	9386.85	7786.77	8553.33
100	9014.18	8411.37	9170.17	8865.24
110	7857.50	8593.74	9217.05	8556.09

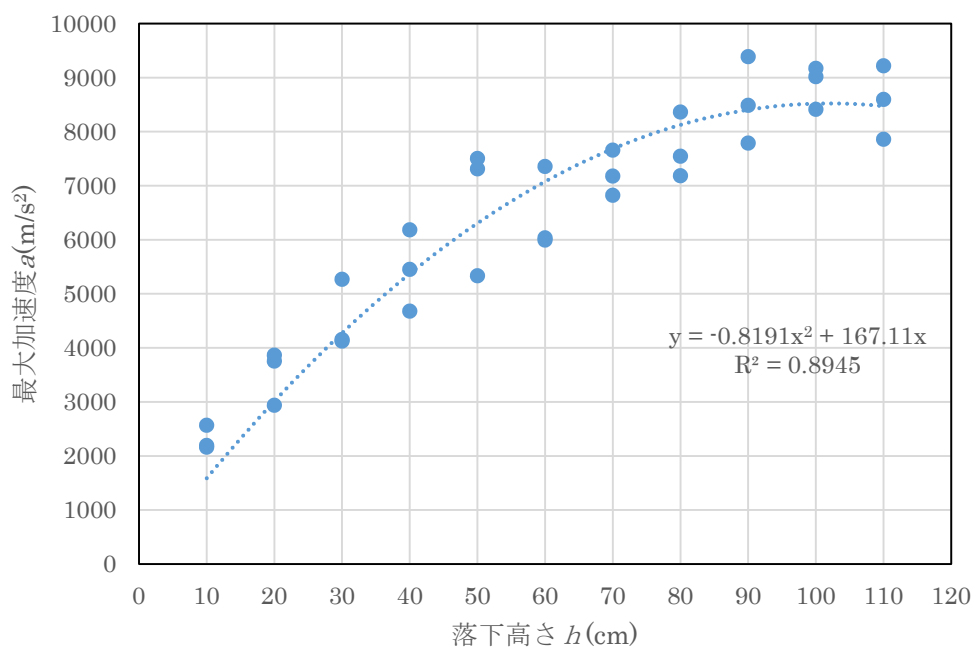


図 2-26 落下高さ h と最大加速度 a の関係

表 2-5 近似式により求められた各落下高さ h の最大加速度 a (m/s^2)

高さ(cm)	加速度(m/s^2)
5	815.07
10	1589.19
15	2322.35
20	3014.56
25	3665.81
30	4276.11
35	4845.45
40	5373.84
45	5861.27
50	6307.75
55	6713.27
60	7077.84
65	7401.45
70	7684.11
75	7925.81
80	8126.56
85	8286.35
90	8405.19
95	8483.07
100	8520.00
105	8515.97
110	8470.99

いるため、得られた近似式の精度は高いものであると言える。

前述、近似式より動的荷重 F の算定に用いる、各落下高さ h における最大加速度 a を表 2-5 に示す。

図 2-8～図 2-25 に示す浮きタイル部付与エネルギー推定値 U と時間 t の関係より、各高さにおける浮きタイル部に付与されるエネルギー推定値 U を求めたものを表 2-6 と図 2-27 に示す。

表 2-6 浮きタイル部付与エネルギー推定値 U

高さ (cm)	エネルギー平均 (Nm)	標準偏差	mgh (Nm)
10	34.94	1.42	196.0
20	64.27	10.98	392.0
30	112.80	27.80	588.0
40	163.97	25.94	784.0
50	200.23	27.21	980.0
60	221.11	15.63	1176.0
70	212.36	45.87	1372.0
80	234.04	52.37	1568.0
90	298.63	49.33	1764.0
100	301.61	47.42	1960.0
110	335.67	46.36	2156.0

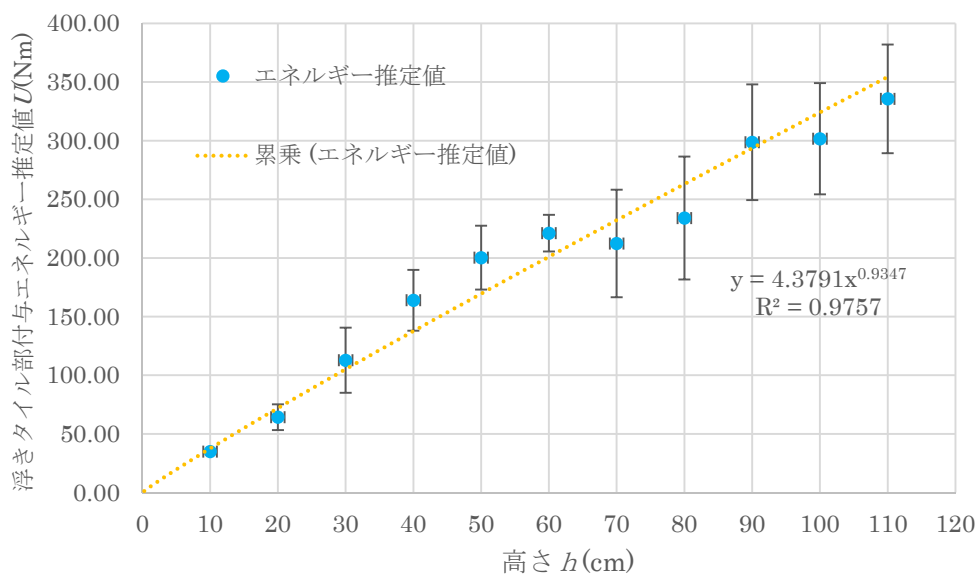


図 2-27 浮きタイル部付与エネルギー推定値 U と落下高さ h の関係

図 2-27 より近似 $y=4.3791x^{0.9347}$ 、 $R^2=0.9757$ が求められた。これより各落下高さにおける単位重量当りエネルギー U を近似式より求めたものを表 2-7 に示す。

表 2-7 各落下高さ h における単位重量当りエネルギー推定値 U

落下高さ (cm)	単位重量当り エネルギー (Nm/kg)
5	811.16
10	1550.52
15	2265.02
20	2963.82
25	3651.18
30	4329.56
35	5000.56
40	5665.32
45	6324.65
50	6979.20
55	7629.49
60	8275.93
65	8918.85
70	9558.54
75	10195.26
80	10829.21
85	11460.58
90	12089.52
95	12716.19
100	13340.70
105	13963.18
110	14583.72

2.4 まとめ

本章では、動的衝撃試験方法について検討し、それに必要な面外変位計測手法の提案と最大加速度の算定・浮きタイル部付与エネルギーの算定について検討した。本章で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 落下衝撃試験機を用いた浮きタイルの面外の動的な荷重の評価試験方法を提案した。
- (2) 落下衝撃試験機での試験体落下高さを変えることで、試験体へ付与するエネルギーおよび動的荷重を変化制御可能とした。
- (3) 模擬落下試験体落下時のレーザー変位計による変位時刻歴計測から試験体に付与される加速度およびエネルギーの推定方法を示した。
- (4) 浮きタイルに対する2次元面外残留変位分布のレーザー変位計による計測方法を提案した。

第3章 動的衝撃試験による各種タイル仕上の面外変形状の把握

3.1 動的衝撃試験によるタイル剥落性状

3.1.1 試験概要

動的衝撃試験で仕上タイルを貼り付けた試験体に動的荷重 F をかけ、人為的に浮きを生じさせたタイルを徐々に剥離させ、全ての浮きタイルが剥落するまで試験を行なう。その過程で、各落下高さにおいて面外残留変位 R を計測し、浮きタイル部付与エネルギー推定値 U との関係を考察する。

3.2.2 試験体概要

2.1.2 で示した試験体と同様にタイルを張付ける。張付け方法は、変性シリコン・エポキシ系樹脂系接着剤を凸部が 2~4 mm 程度になるように楕目状に塗付けたうえでタイルを張付ける。その際、プラスチックシートを用いてタイルと接着剤の界面との浮きを疑似的に再現した。タイルと母材のコンクリート平板の間には、試験の衝撃で母材が損壊することのないよう補強の金属板が入っている。試験体概要図を図 3-1 に示す。

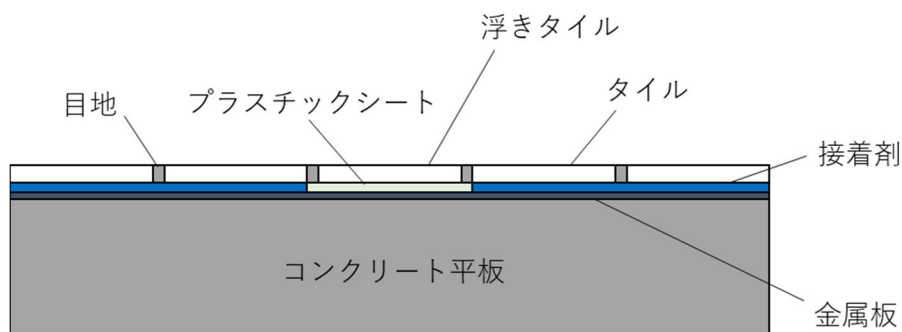


図 3-1 試験体概要図

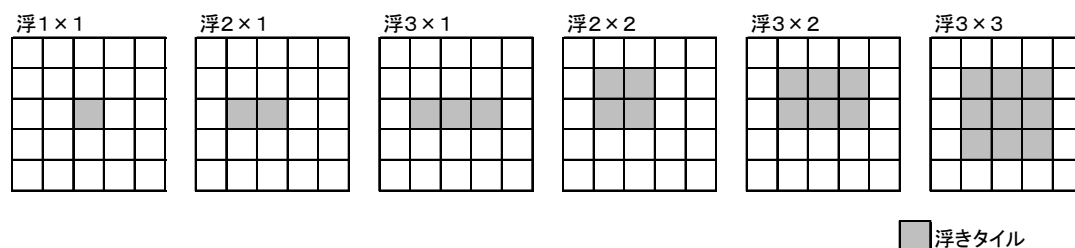


図 3-2 タイル浮きタイプ

試験体は、6種類の浮きのタイプを作製した。タイル浮きタイプを図 3-2 に示す。

A 試験体（補修なし）：浮きタイルのみ（補修なし）

A 試験体（補修なし）は、浮きタイルのみ再現し補修を施さないものがある。この試験体を動的衝撃試験により動的荷重 F をかけると、浮きを生じたタイルの部分が徐々に剥離しはじめ、最終的に剥落する。その時の面外残留変位 R を計測し、浮きタイル部付与エネルギー推定値 U と面外残留変位 R の関係を考察する。

今回は、経年劣化などで強度が低下した目地を想定し、目地モルタルの水セメント比 (W/C) を 100%、160%、180% と 3 水準設定し分離が起きない程度に砂を後添加し砂セメント比 (S/C) を調整したモルタルとした。浮きタイル試験体作製と同時期に 50mm ϕ × 高さ 100 mm の供試体を作成し 28 日気中養生後、引張試験と圧縮試験を求めた。目地に用いたモルタルの特性を表 3-1 に示す。タイル浮きのタイプを 6 種類とし、目地水準 3 種類と組み合わせると計 18 種類の試験体を作成した。A 試験体（補修なし）を写真 3-1 に示す。

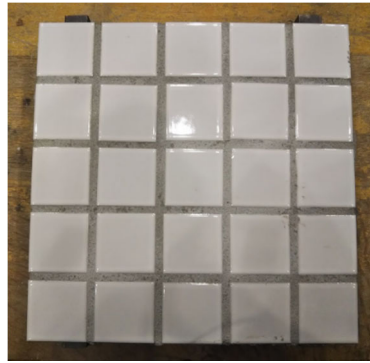


写真 3-1 A 試験体（補修なし）

表 3-1 目地モルタルの特性

目地呼称	W/C (%)	S/C (%)	密度 (g/cm ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
H	100	4.00	1.91	8.09	0.73
M	160	4.30	1.85	4.73	0.65
L	180	5.06	1.80	4.14	0.63

表 3-2 試験体質量

材 料	寸 法(cm)	比 重	質 量(g)
母材コンクリート	25×25×5	2.46	7687.5
接着剤	25×25×0.2	1.55	193.8
目地モルタル	厚み0.5		87.0
タイル	4.5×4.5	23.79	594.8
試験体 合計			8563.0

3.1.3 試験方法

2.1 動的衝撃試験で前述した方法によりタイルが剥落するまでまたは最大落下高さ 110cm まで動的衝撃試験を行う。落下後に 3D スキャナー『EinScan-Pro+』を用いて面外残留変位 R の計測を行う。3D スキャナー計測で得られた 3D データから、blender を用いてタイル 1 辺に対し 4 点の面外残留変位 R を算出し、浮きタイル部付与エネルギー推定値 U との相関や浮きタイプ状との相関を検討する。

動的衝撃試験に使用した治具の下面から試験体を見た際の、治具と試験体の位置関係を写真 3-2 に示す。

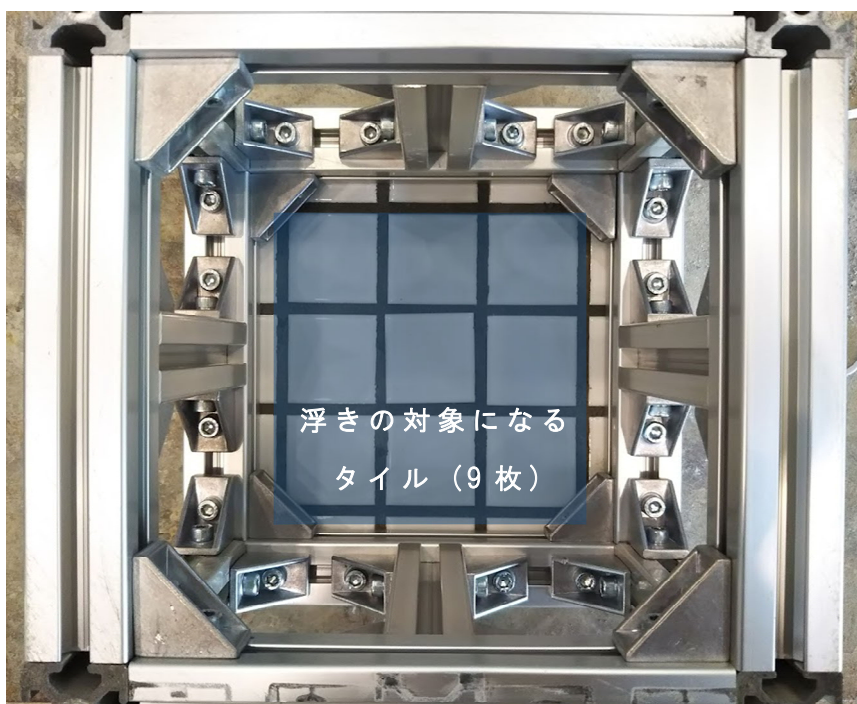


写真 3-2 治具と試験体の位置関係

次に、3D スキャンの概要を図 3-3 に、スキャン環境を写真 3-3 に示す。3D スキャンを行う際、向きを間違えないようにするために写真 3-4 に示すように角部のタイルにマーキングをし、位置がずれないように台に試験体の位置をマーキングしタイル面を下面にして台に乗せて試験体の下面側からスキャンをし、試験体が落下直後と近い状態になるようにした。

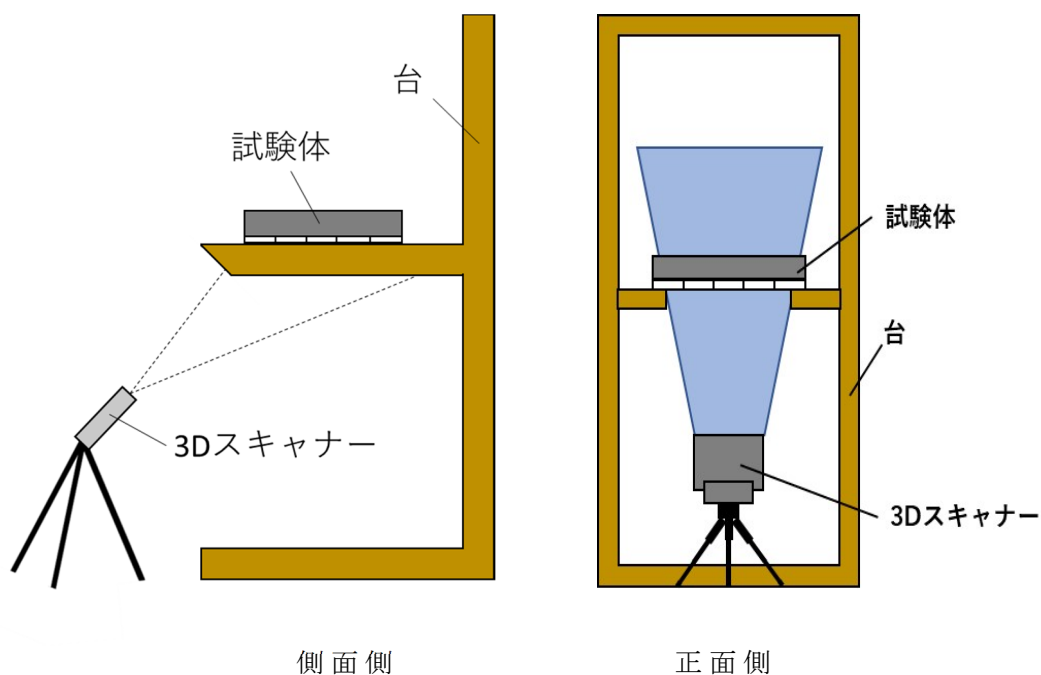


図 3-3 3D スキャン概要図



写真 3-3 3D スキャン環境

また、試験実施の効率化のために、動的衝撃試験開始直後はレーザー距離計を用いて浮きタイルの剥離状況を測定し、面外残留変位 R のない間は3D スキャンによる記録を行わないこととした。試験体中央のタイルにレーザー距離計で測定を行うためのマークを3点取り、それらが試験開始前の状態から 0.5 mm 程度浮くか、あるいはその浮きが確認される前でも浮きタイル周辺の目地が明らかな損壊をした場合に 3D スキャンによる記録を開始することとした。

図 3-4 に測定時の概要図を、写真 3-4 に測定用ポイントを取った試験体、写真 3-5 に使用したレーザー距離計を示す。

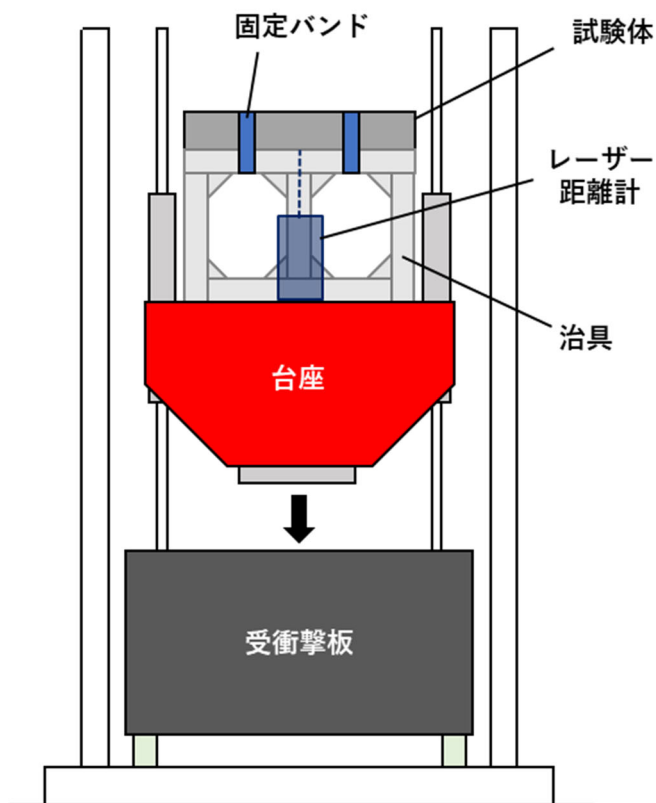


図 3-4 レーザー距離計による測定の概要図

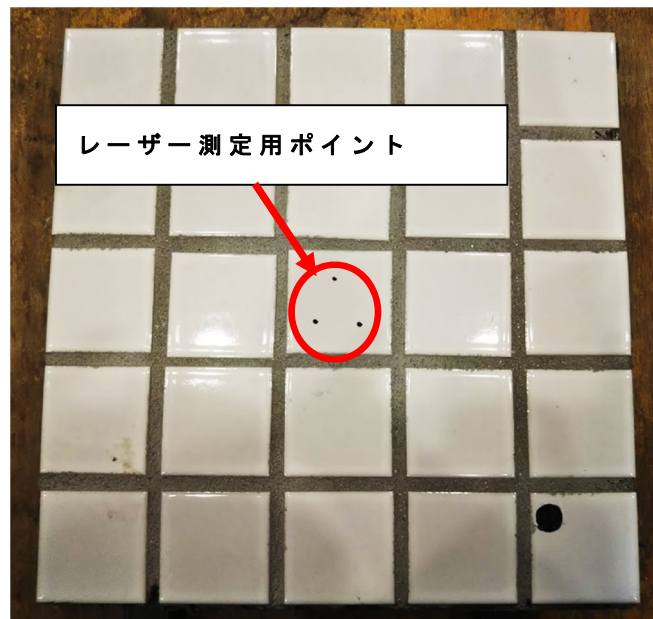


写真 3-4 レーザー測定用ポイント 3点



写真 3-5 レーザー距離計

次に、blender を用いてタイル 1 辺に対し 4 点の面外残留変位 R を算出する際の、タイル面に対する算出対象点の位置について図 3-5 に示す。

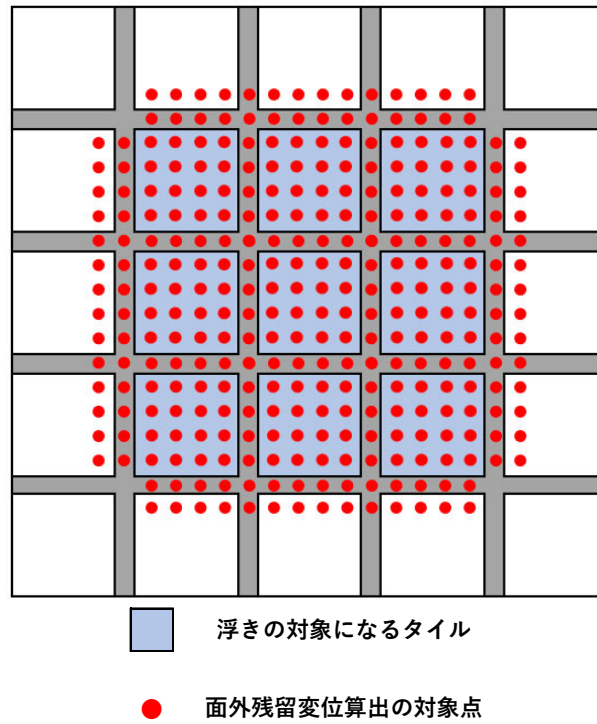


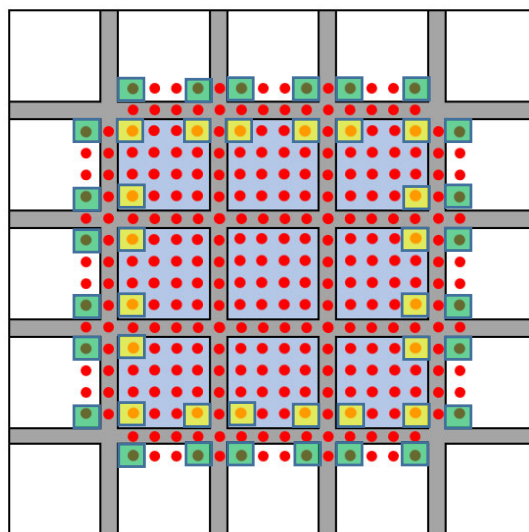
図 3-5 面外残留変位算出の対象点

3.1.4 試験結果

3.1.4.1 浮きタイルの面外残留変位 R の結果

浮きタイルの面外残留変位 R は、図 3-5 に示すタイル 1 枚当たりの測定点が 16 点あるうちの浮きタイル外周囲角の 2 点 (■黄色) とその周囲の基準点 (■緑点) の差を面外残留変位 R として求めた。その用いる測定点を図 3-6 に示す。

A 試験体 (補修なし) の浮きタイプにおける目地 H, M, L の違いによるそれぞれの累積浮きタイル部付与エネルギー推定値 Ut と浮きタイル面外残留変位 R の測定結果を図 3-7~図 3-12 に示す。浮きタイル部付与エネルギー推定値 U は、図 2-12 に示すエネルギー推定値 U をもとに近似曲線を求め、それより表 2-7 に示す単位重量当たりエネルギー推定値 U を求め、各浮きタイプ・高さごとの値を求めたものを表 3-3 に示す。



- 浮きタイルの面外残留変位に用いる測定点
- 隣接する基準点

図 3-6 浮きタイルの面外残留変位測定点

表 3-3 浮きタイル部付与エネルギー推定値 U

落下高さ h (cm)	単位重量当り エネルギー (Nm/kg)	浮きタイプ別 浮きタイル部付与エネルギー推定値 U (Nm)					
		浮1×1	浮2×1	浮3×1	浮2×2	浮3×2	浮3×3
5	811.16	23.52	49.48	75.44	103.83	158.18	240.91
10	1550.52	44.97	94.58	144.20	198.47	302.35	460.51
15	2265.02	65.69	138.17	210.65	289.92	441.68	672.71
20	2963.82	85.95	180.79	275.63	379.37	577.94	880.25
25	3651.18	105.88	222.72	339.56	467.35	711.98	1084.40
30	4329.56	125.56	264.10	402.65	554.18	844.26	1285.88
35	5000.56	145.02	305.03	465.05	640.07	975.11	1485.17
40	5665.32	164.29	345.58	526.87	725.16	1104.74	1682.60
45	6324.65	183.41	385.80	588.19	809.55	1233.31	1878.42
50	6979.20	202.40	425.73	649.07	893.34	1360.94	2072.82
55	7629.49	221.26	465.40	709.54	976.57	1487.75	2265.96
60	8275.93	240.00	504.83	769.66	1059.32	1613.81	2457.95
65	8918.85	258.65	544.05	829.45	1141.61	1739.18	2648.90
70	9558.54	277.20	583.07	888.94	1223.49	1863.92	2838.89
75	10195.26	295.66	621.91	948.16	1304.99	1988.08	3027.99
80	10829.21	314.05	660.58	1007.12	1386.14	2111.70	3216.28
85	11460.58	332.36	699.10	1065.83	1466.95	2234.81	3403.79
90	12089.52	350.60	737.46	1124.33	1547.46	2357.46	3590.59
95	12716.19	368.77	775.69	1182.61	1627.67	2479.66	3776.71
100	13340.70	386.88	813.78	1240.69	1707.61	2601.44	3962.19
105	13963.18	404.93	851.75	1298.58	1787.29	2722.82	4147.06
110	14583.72	422.93	889.61	1356.29	1866.72	2843.83	4331.36

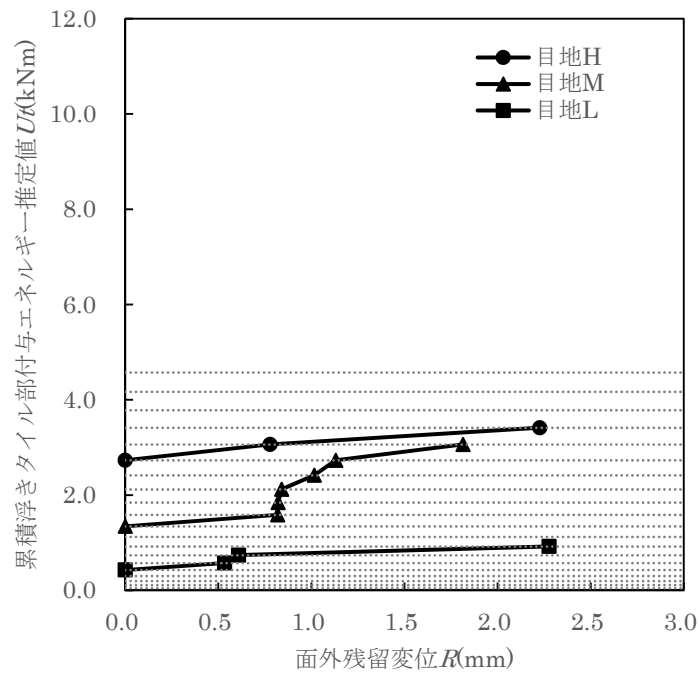


図 3-7 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(A 試験体 (補修なし)・浮 1×1)

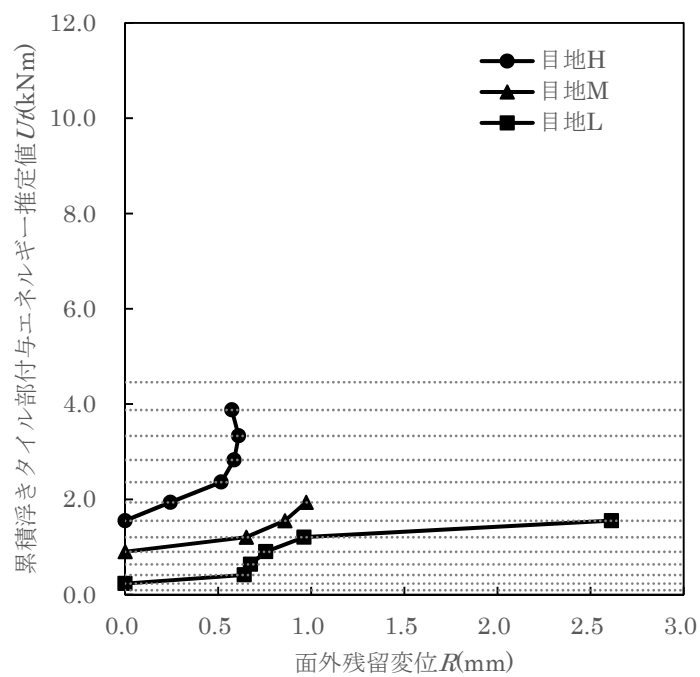


図 3-8 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(A 試験体 (補修なし)・浮 2×1)

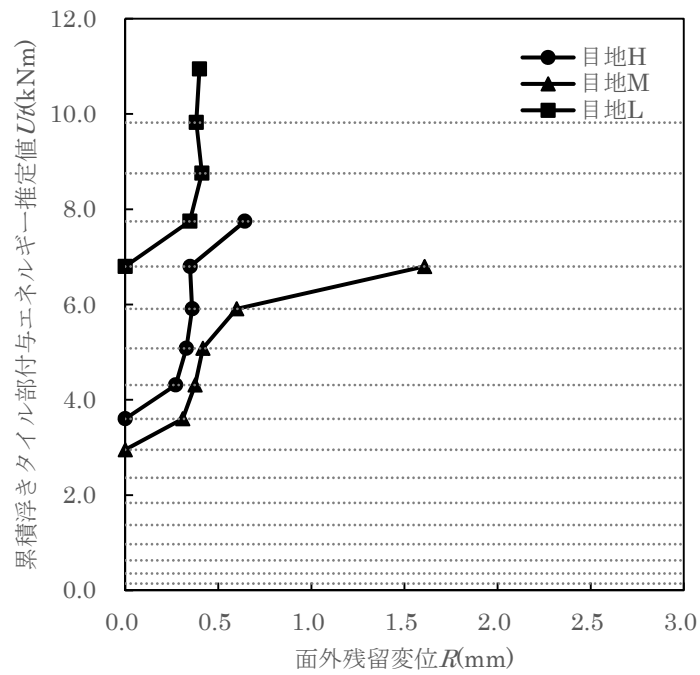


図 3-9 累積浮きタイル部付与エネルギー Ut と面外残留変位 R の関係
(A 試験体 (補修なし)・浮 3×1)

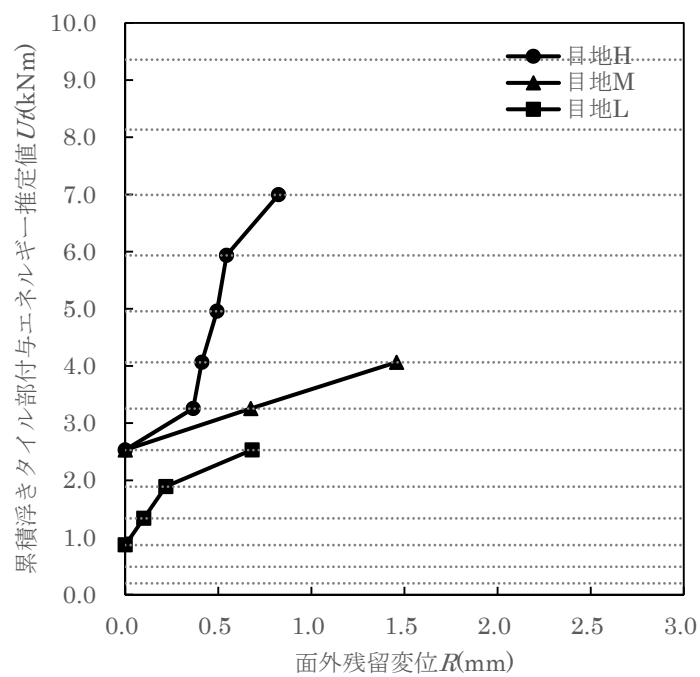


図 3-10 累積浮きタイル部付与エネルギー Ut と面外残留変位 R の関係
(A 試験体 (補修なし)・浮 2×2)

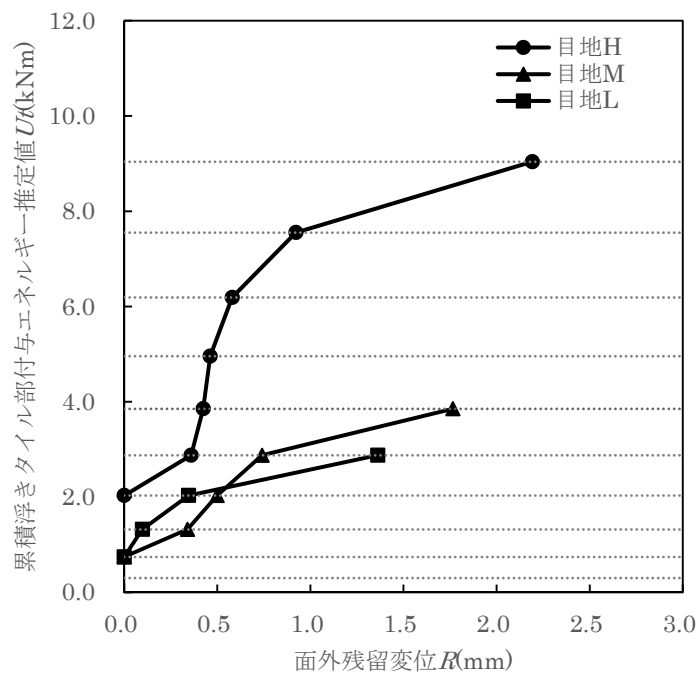


図 3-11 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(A 試験体 (補修なし) 浮 3×2)

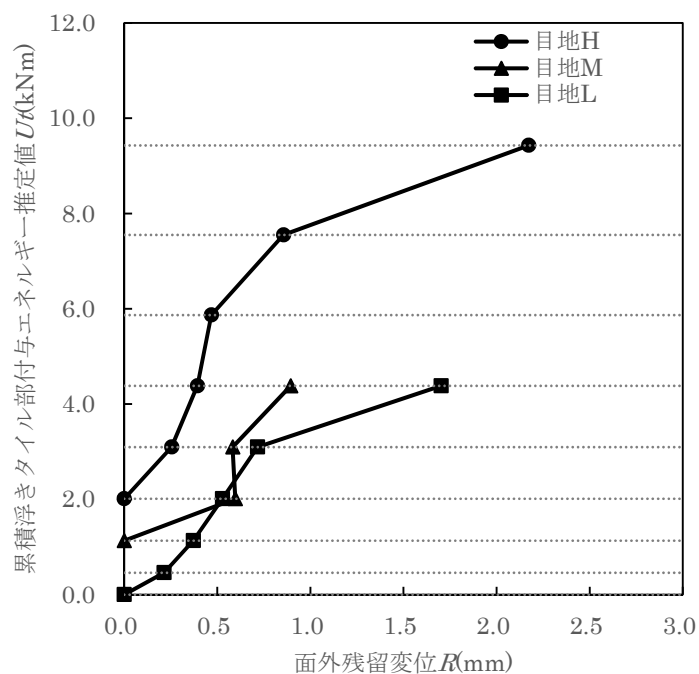


図 3-12 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(A 試験体 (補修なし) 3×3)

A試験体（補修なし）においては、浮きタイルを補修していない状態である。そこで図 3-7 から図 3-12 においては、目地強度が大きいほうが浮きタイルの剥落するまでに要する累積浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t が大きくなる傾向が見られた。

浮 1×1 については、浮きタイル枚数が 1 枚ということから累積浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t はあまり大きくならないが、面外残留変位 R が大きくなる傾向がある。

浮 2×1 と浮 3×1 は、浮きタイルが横方法に 2 枚または 3 枚並んで浮いている状況の影響で面外残留変位 R があまり大きく変化せず累積浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t が大きくなる傾向が見られた。

浮 2×2、浮 3×2 と浮 3×3 については、浮きタイル枚数が増えていることから面外残留変位 R が並びに累積浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t が同様に大きくなる傾向が見られた。

図の中において、面外残留変位 R が増加せず累積浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t だけが増加する推移が見られるのは、周辺のタイルでなく中央部の目地や浮きタイルにエネルギーが付与され面外残留変位 R が増加しないためと考えられる。また変位の途中から同様の推移が見られる場合については、何らかの原因で浮きタイルの変位性状が変化し中央部の目地や浮きタイルにエネルギーが付与されて面外残留変位が増加しないと考えられる。面外残留変位 R 並びに累積浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t が緩やかに上昇していく場合は、浮きタイルに平均的にエネルギーが付与され浮きタイル全体が変位している状態にあると考えられる。

これより一概にタイルの枚数が多いほど浮きタイルの剥落する際の面外残留変位 R の大小関係があるとは判断できないが、目地強度が小さいほうが面外残留変位 R の値が大きくなる傾向がみられる。また目地強度が大きいほど累積浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t が大きくなる傾向があり浮きタイルの剥落に目地強度の大小関係が影響することが確認できた。

また浮 3×1 についてその他の浮きタイプより、浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t が大きい値となっており、表 3-4 に浮きタイル部の目地本数を示しているように、浮きタイル 3 枚に対し、①浮きタイルと浮きタイ

ルの間の目地の本数が2本、②浮きタイルと浮いていないタイルの間の目地の本数が8本と浮きタイルを支える周囲目地の比率が4となり浮きタイルの2倍となっていることが影響していると考えられる。

浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t はほぼ目地 H > 目地 M > 目地 L となっており目地強度の影響が大きいと考えられる。よって目地強度が大きければ、浮きタイルの剥落が発生しにくいと考えられる。

次にA試験体（補修なし）について、剥落直前の面外残留変位 R を3Dスキャナーで計測した結果について、図3-13、図3-14に示す。3Dスキャンで得られたデータから図3-5で示した各算出対象点の変位を求めて色付けしている。

表 3-4 浮きタイルと目地の本数

浮タイプ	①浮きタイルと浮きタイルの間の目地の本数(本)	②浮きタイルと浮いていないタイルの間の目地の本数(本)	比率②/①
浮1×1	0	4	∞
浮2×1	1	6	6.00
浮3×1	2	8	4.00
浮2×2	4	8	2.00
浮3×2	7	10	1.43
浮3×3	12	12	1.00

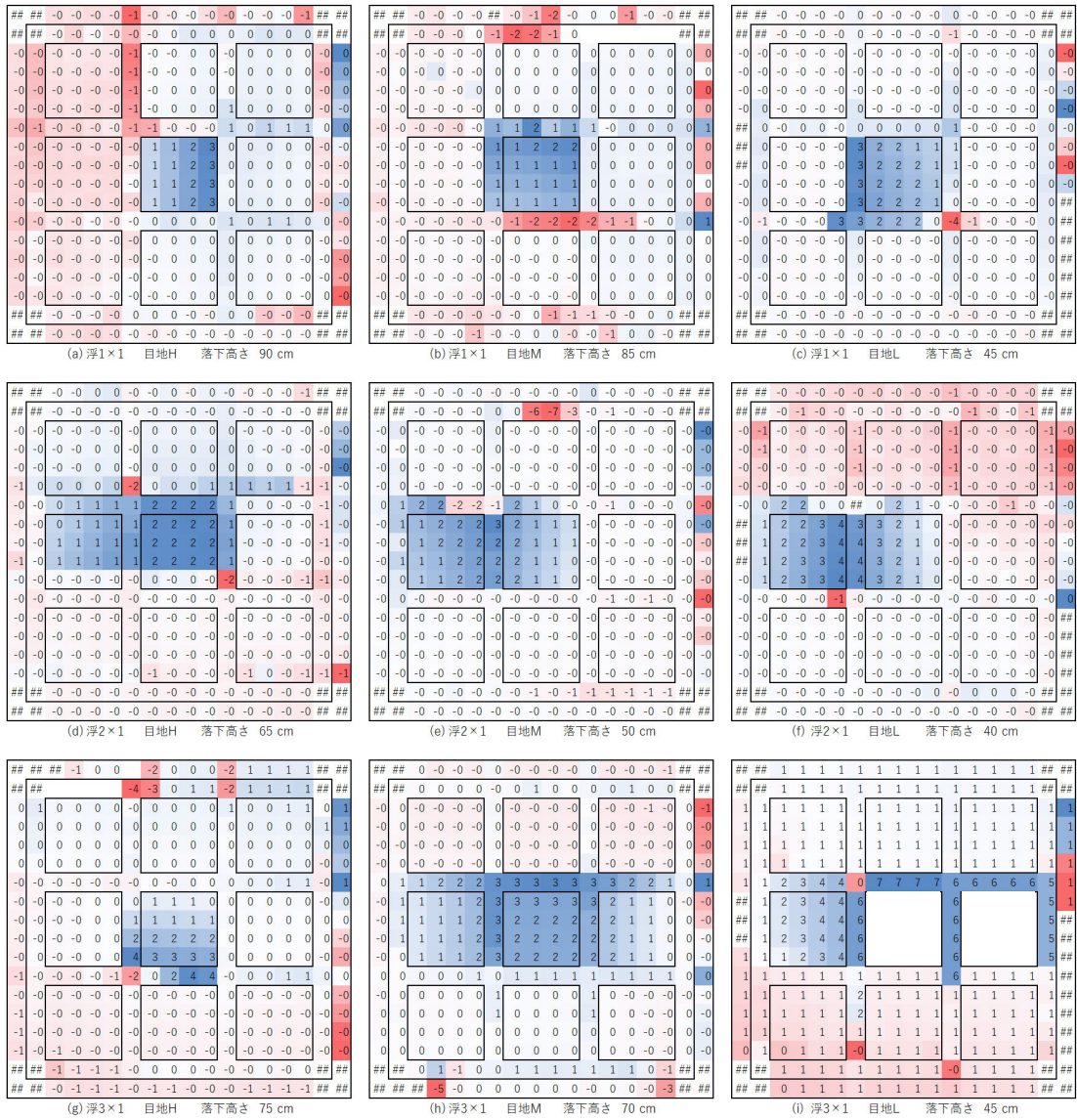
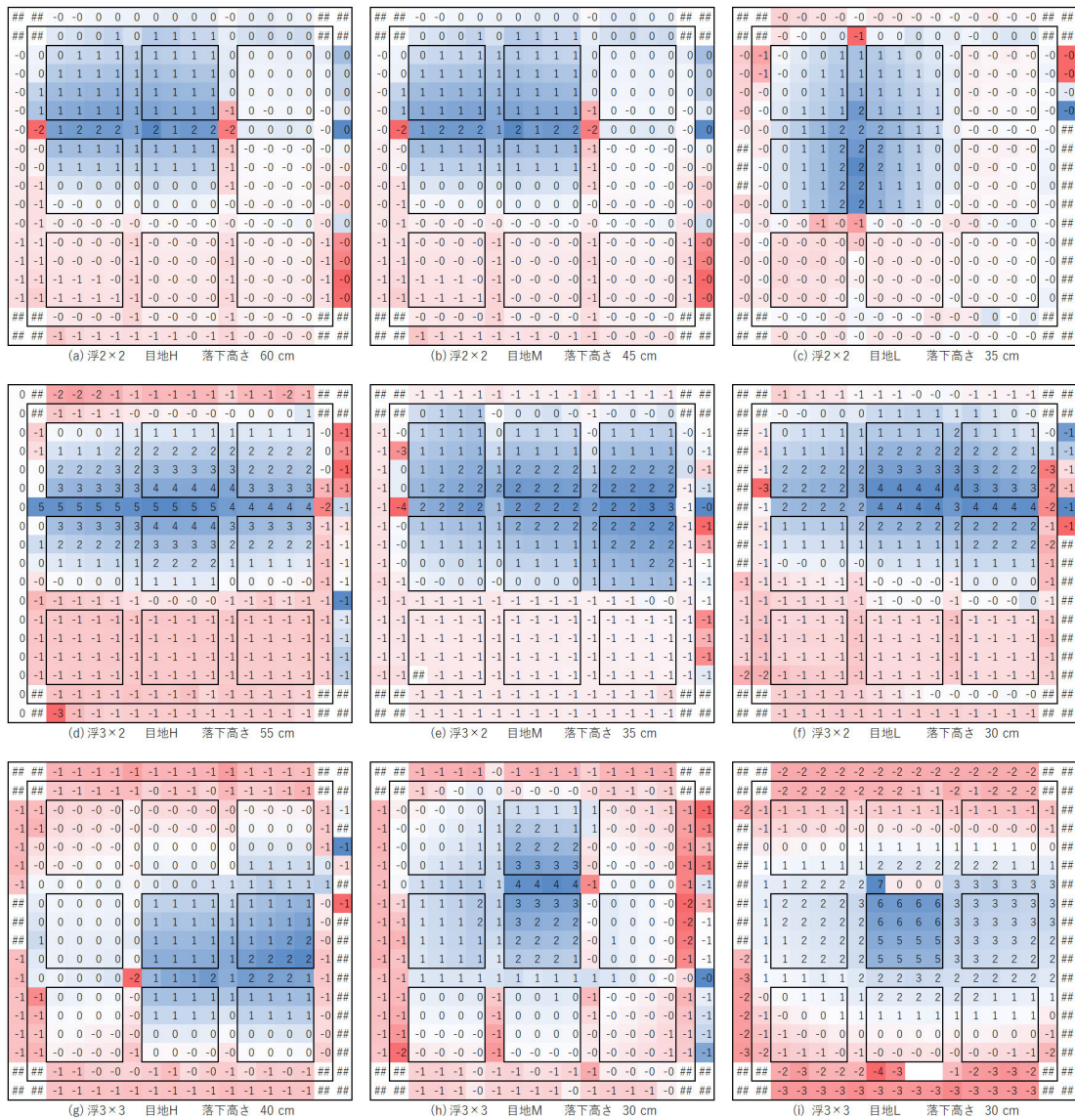


図 3-13 剥落直前の面外残留変位 R の概要(変位 1 mm 刻みで示す)

(A 試験体 (補修なし) - 浮 1×1~浮 3×1)



凡例 数字：0.5mm 四捨五入

青色：面外残留変位プラス

赤色：面外残留変位マイナス

#：計測不可

図 3-14 剥落直前の面外残留変位 R の概要(変位 1 mm 刻みで示す)

(A 試験体(補修なし) - 浮 2×2~浮 3×3)

図において、赤い部分はマイナス値を示している。これは目地の部分であれば目地材が部分的に破壊して剥落したことを示している。また図 3-13 浮 3×1・目地 L・落下高さ 45cm については、タイルの部分が 2 枚赤くなっ

ている。これは落下高さ 40cm の際に面外残留変位 R があまり現れずいきなり次の試験で剥落を発生した例である。これは、目地 L の場合で目地強度が小さいことが原因であると考えられる。また各浮きタイプについて目地材の違いにより剥落直前の落下高さが明らかに目地 H > 目地 M > 目地 L という結果になっており、浮きタイルの剥落は目地材の影響が大きいと考えられる。

剥落の直前に目地の面外残留変位 R が大きくなる辺としては、浮きタイルと浮きタイルの間に挟まれた目地となっていることが確認できた。その挟まれた目地につられて、浮きタイルの面外残留変位 R が大きくなり剥落につながっていることが確認できた。また浮きを生じていないタイルにおいても浮きタイルに隣接するタイルについては、それに挟まれる目地の面外残留変位 R が増加することにより、その目地の影響を受け面外残留変位 R が多少ではあるが増加している。これより、浮きタイルが発生するとその周辺のタイルにも影響を及ぼし浮きタイルが広がっていくことを示していると考えられる。

3.1.4.2 破壊開始時付与エネルギー U_0

前述の浮きタイル部付与エネルギー U で得られたデータを基に累積浮きタイル部付与エネルギー Ut と面外残留変位 R の関係を利用して破壊開始時付与エネルギー U_0 について検討する。

図 3-15 に破壊開始時付与エネルギーの概念図を示す。累積浮きタイル部付与エネルギー推定値 Ut と面外残留変形 R の関係の図より、面外残留変位 R が最初に発生した際の浮きタイル部付与エネルギー推定値 U を破壊開始時付与エネルギー U_0 と定義した。

A 試験体（補修なし）の破壊開始時付与エネルギー推定値 U_0 について、表 3-5、図 3-16 に示す。

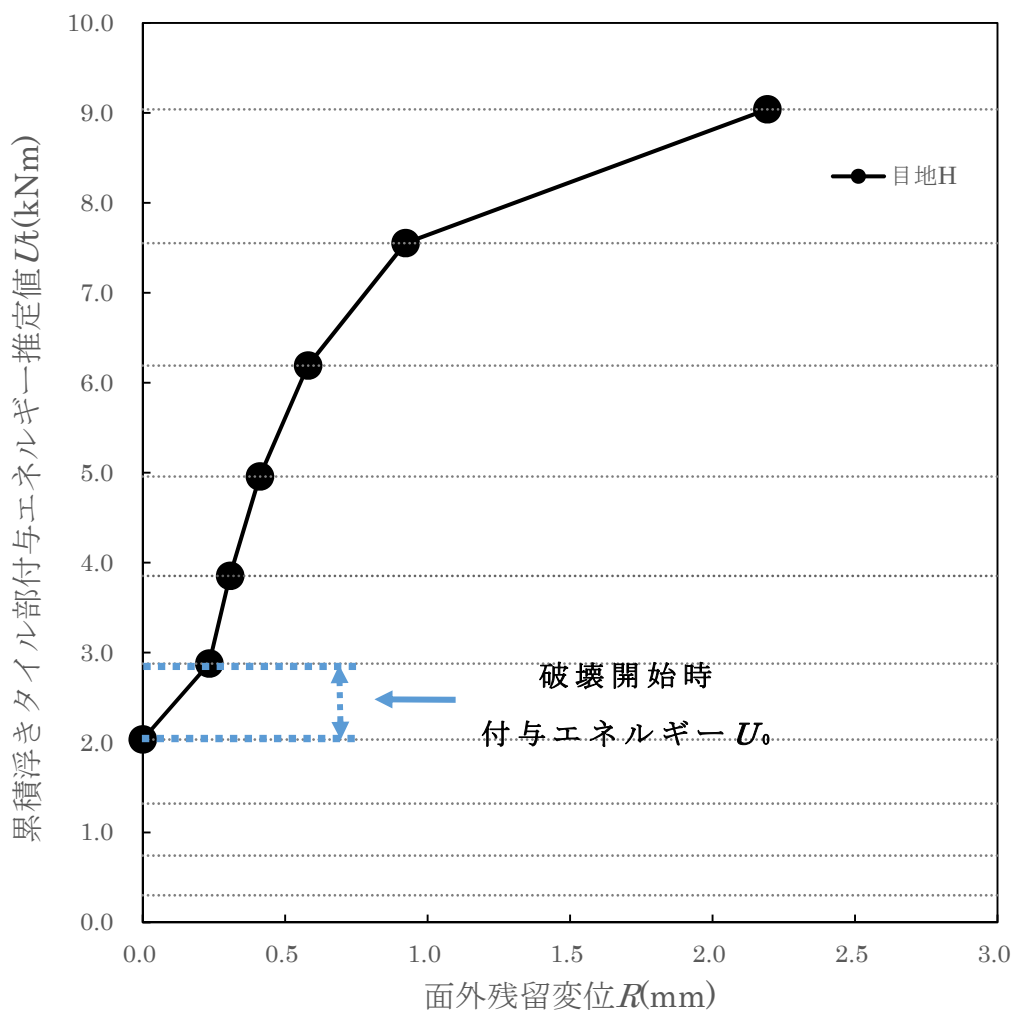


図 3-15 破壊開始時付与エネルギー U_0 推定値の概念図

表 3-5 試験体（補修なし）の破壊開始時付与エネルギー U_0

浮タイプ	目地	付与エネルギー(Nm)
浮1×1	H	332.36
	M	240.00
	L	145.02
浮2×1	H	385.80
	M	305.03
	L	180.79
浮3×1	H	709.54
	M	649.07
	L	948.16
浮2×2	H	725.16
	M	725.16
	L	467.35
浮3×2	H	844.26
	M	577.94
	L	577.94
浮3×3	H	1084.40
	M	880.25
	L	460.51

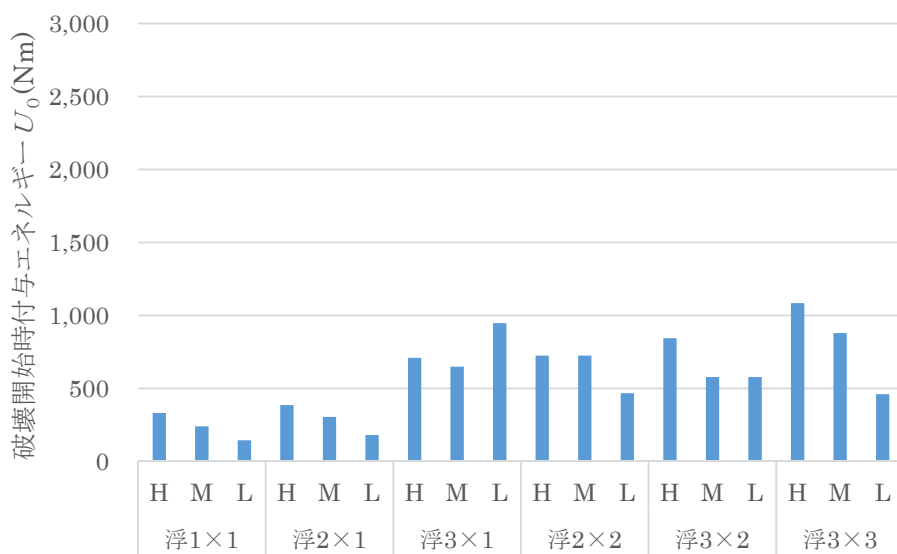


図 3-16 A 試験体（補修なし）の破壊開始時付与エネルギー U_0

図 3-16 に示す、破壊開始時付与エネルギー U_0 については、目地強度が大きいほどまた浮き枚数が多いほど破壊開始時付与エネルギー U_0 が大きくなる傾向が見られた。

破壊開始時付与エネルギー U_0 と目地圧縮強度 F_c の関係を図 3-17 に示す。

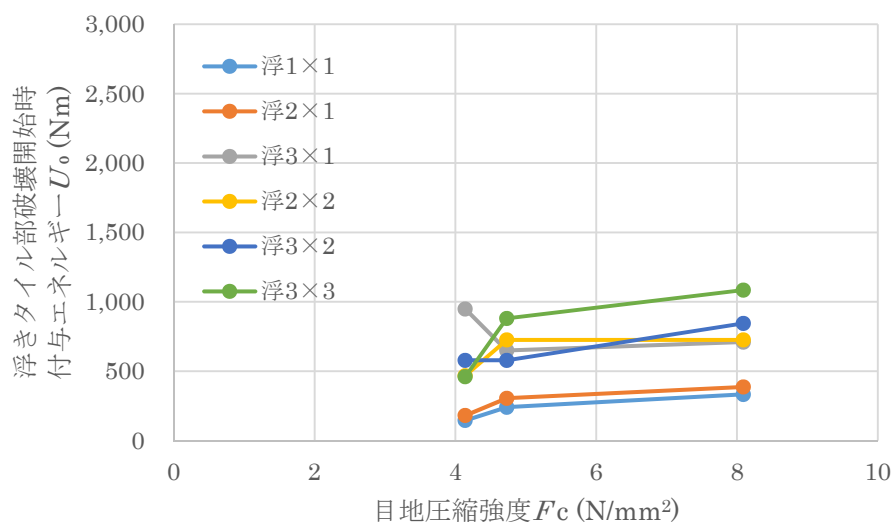


図 3-17 破壊開始時付与エネルギー U_0 と目地圧縮強度 F_c の関係

この結果より目地圧縮強度 F_c が大きいほど破壊開始時付与エネルギー U_0 は大きくなる傾向となっている。また浮きタイル枚数が多いほど破壊開始時付与エネルギー U_0 が大きくなる傾向となった。

次に、破壊開始時付与エネルギー U_0 と浮きタイル周辺目地長さ L との関係を浮きタイプが方形のもの（浮 1×1・浮 2×2・浮 3×3）を図 3-18、浮きタイプが長方形のもの（浮 2×1・浮 3×1・浮 3×2）を図 3-19 に示す。

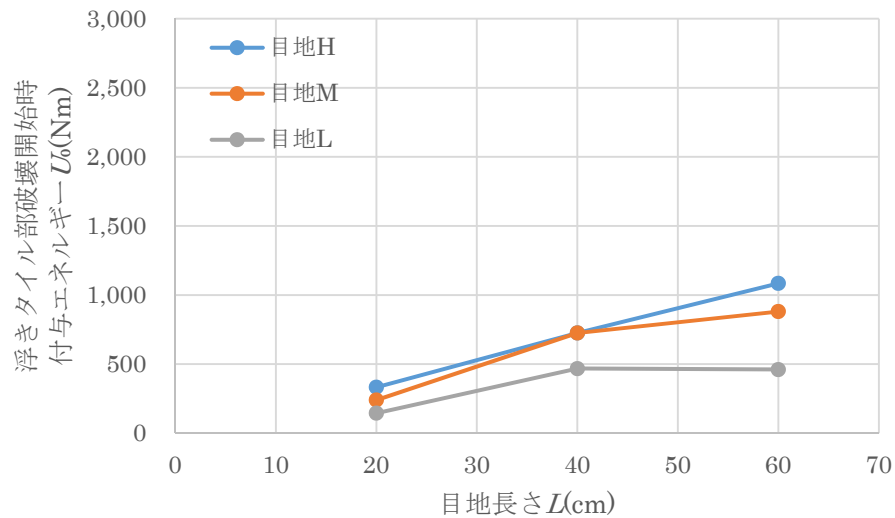


図 3-18 破壊開始時付与エネルギー U_0 と浮きタイル周辺目地長さ L の関係（浮 1×1・浮 2×2・浮 3×3）

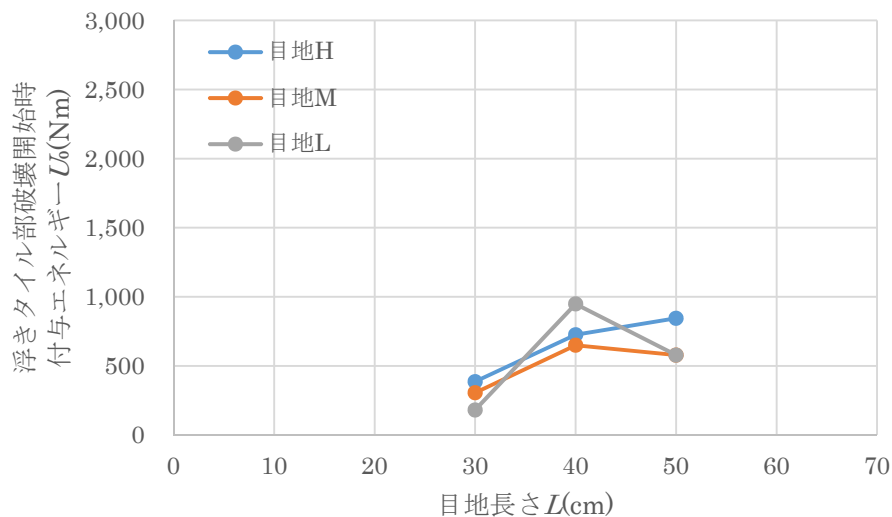


図 3-19 破壊開始時付与エネルギー U_0 と浮きタイル周辺目地長さ L の関係（浮 2×1・浮 3×1・浮 3×2）

浮きタイプが方形の場合、浮きタイル周辺目地長さ L が大きいほど、破壊開始時付与エネルギー U_0 が大きくなる傾向となった。

また浮きタイプが長方形の場合においては、目地長さが大きい場合に、目地強度が大きい目地 H は破壊開始時付与エネルギー U_0 大きくなっているが、目地 M と目地 L に減少する傾向が見られた。これは目地強度が小さいために目地長さが大きくなると目地が破壊しやすくなるのではないかと考えられる。方形の場合において浮きタイル周辺目地の長さ L が大きいほど、破壊開始時付与エネルギー U_0 が大きくなる傾向はあるが、目地強度の小さい目地 L は目地長さが大きくなっても破壊開始時付与エネルギー U_0 に変化がないのも同様のことが考えられる。

これより浮きタイルの周辺目地の長さ L が破壊開始に大きな影響を及ぼすことまた浮きタイプによって違いがあることが確認された。

次に累積浮きタイル部付与エネルギー Ut と面外残留変位 R の関係から線形回帰により近似式 $y=ax+b$ を求め、傾き a を変形抵抗 Re として定義した。近似式による近似線を図 3-20～図 3-25 に点線にて表示している。図 3-26 に変形抵抗 Re を示す。

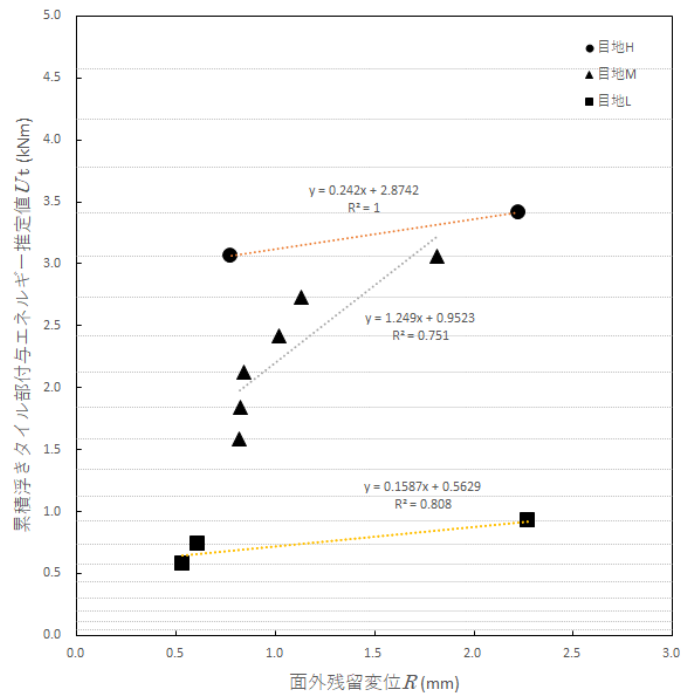


図 3-20 A 試験体（補修なし）・浮 1×1 の線形回帰図

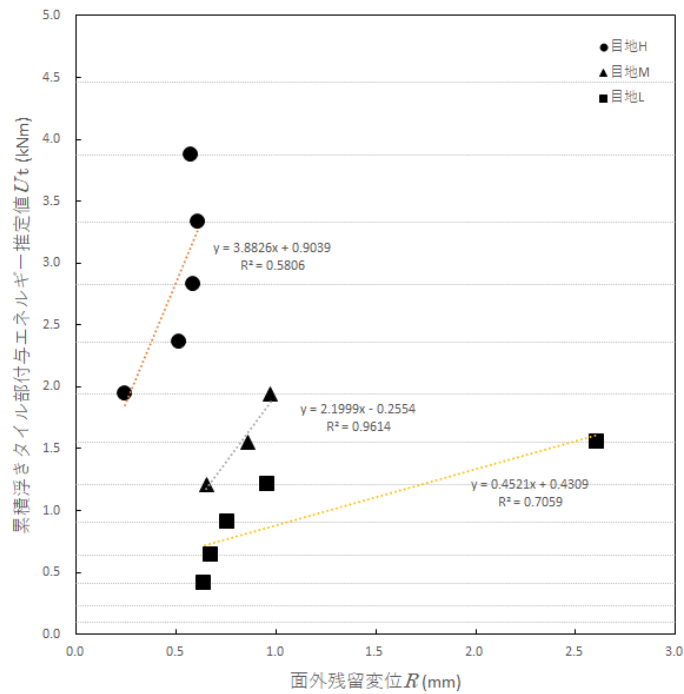


図 3-21 A 試験体（補修なし）・浮 2×1 の線形回帰図

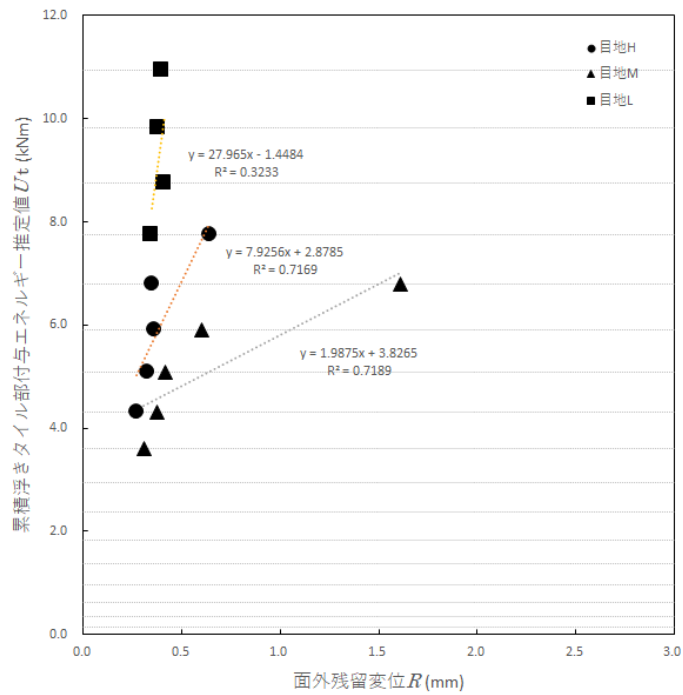


図 3-22 A 試験体（補修なし）・浮 3×1 の線形回帰図

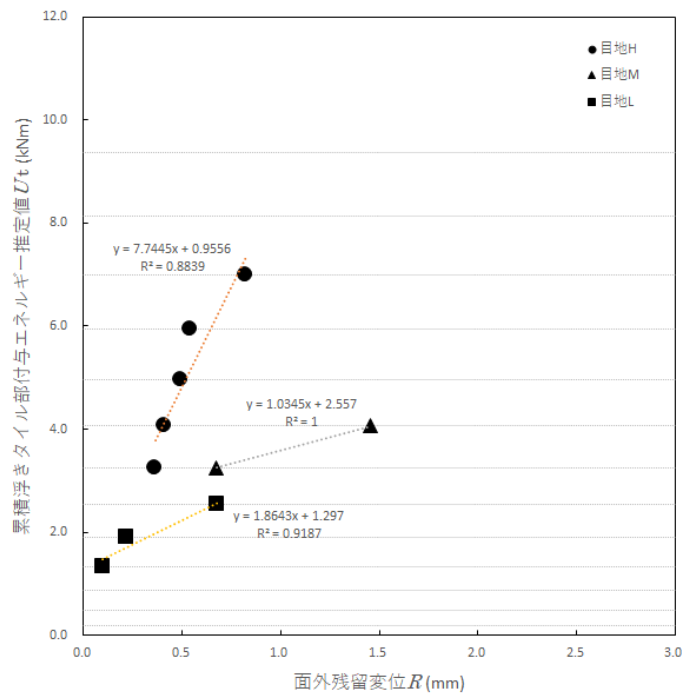


図 3-23 A 試験体（補修なし）・浮 2×2 の線形回帰図

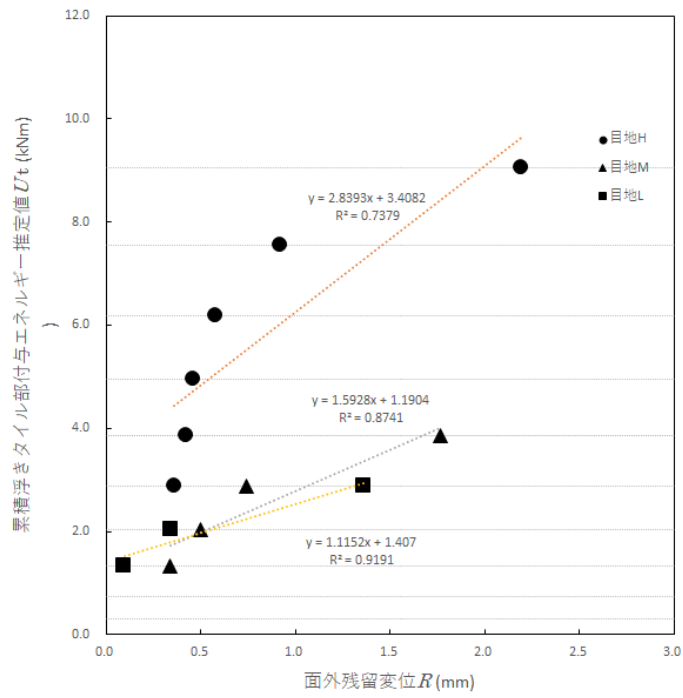


図 3-24 A 試験体（補修なし）・浮 3×2 の線形回帰図

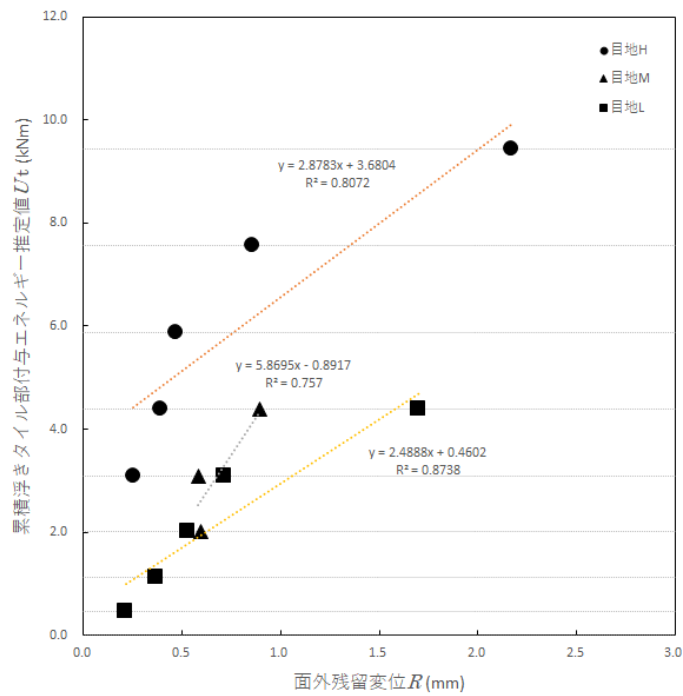


図 3-25 A 試験体（補修なし）・浮 3×3 の線形回帰図

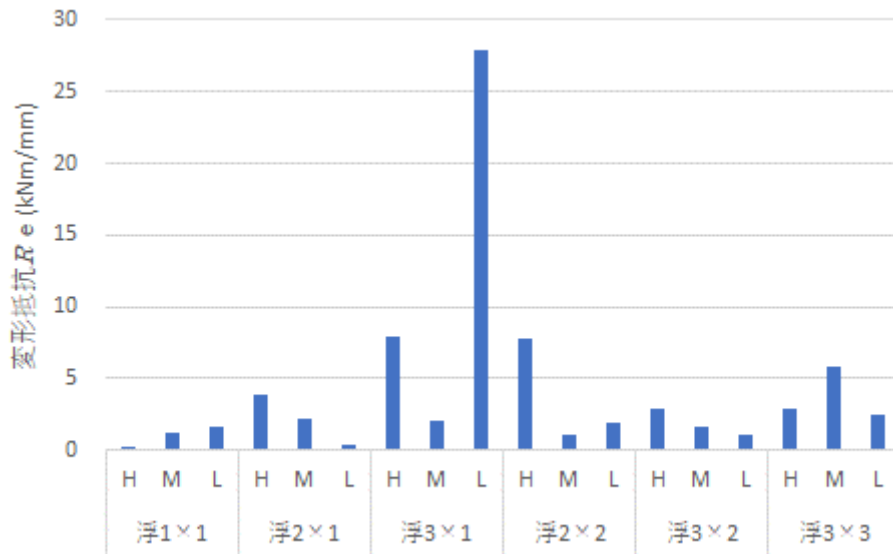


図 3-26 A 試験体（補修なし）の変形抵抗 R_e

図 3-26 に示す変形抵抗 R_e について、大小関係は明確には表れていない。

3.1.4.3 浮きタイル剥落時の累積浮きタイル部付与エネルギー Ut と

動的荷重 F

A試験体（補修なし）について破壊し始めてから最終的に浮きタイル部分が剥落する落下高さ h までの累積浮きタイル部付与エネルギー Ut について目地圧縮強度 F_c との関係を図 3-27 に示す。

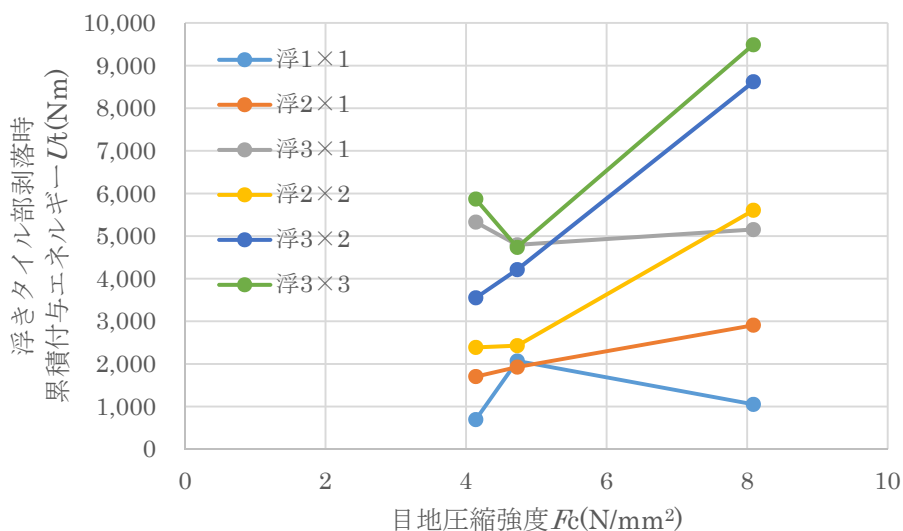


図 3-27 剥落時累積付与エネルギー Ut と目地圧縮強度 F_c の関係

図 3-27 の浮きタイル部剥落時累積付与エネルギー Ut と目地圧縮強度 F_c の関係において浮きタイルの枚数が多いほど剥落に必要な累積付与エネルギー Ut 大きくなる傾向が見られた。

次に累積浮きタイル部付与エネルギー Ut と浮きタイル周辺目地長さ L の関係を、浮きタイプが方形のもの（浮 1×1 ・浮 2×2 ・浮 3×3 ）を図 3-28 に、浮きタイプが長方形のもの（浮 2×1 ・浮 3×1 ・浮 3×2 ）を図 3-29 に示す。

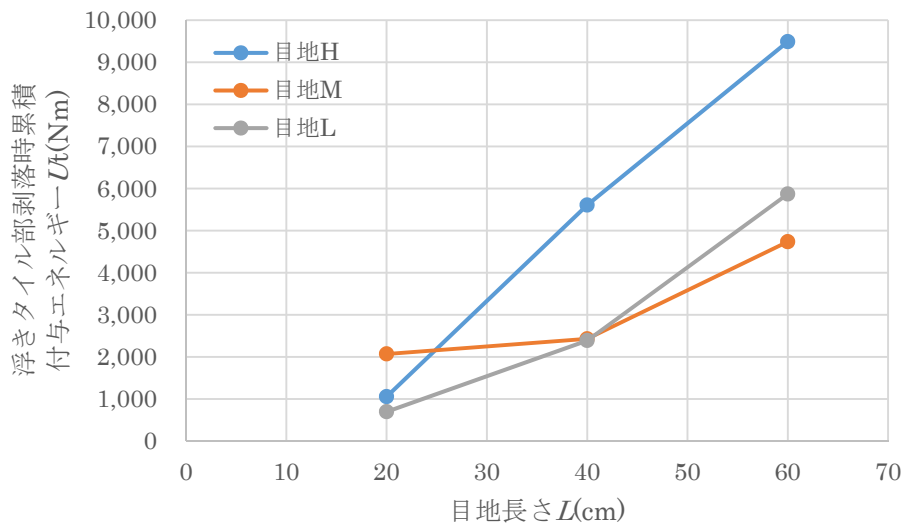


図 3-28 剥落時累積付与エネルギー Ut と目地長さ L の関係
(浮 1×1 ・浮 2×2 ・浮 3×3)

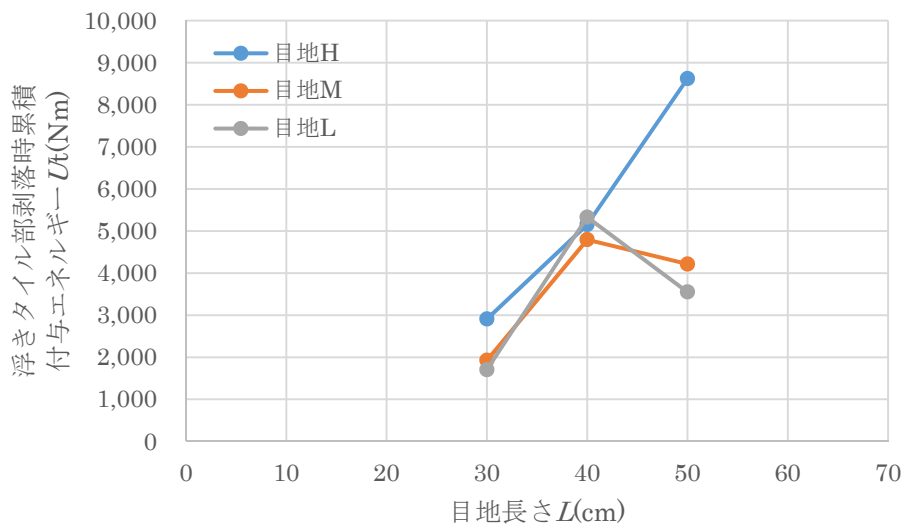


図 3-29 剥落時累積付与エネルギー Ut と目地長さ L の関係
(浮 2×1 ・浮 3×1 ・浮 3×2)

浮きタイプが方形の場合、浮きタイル周辺目地の長さ L が大きいほど、浮きタイル部剥落時累積付与エネルギー U_t が大きくなる傾向となった。

また浮きタイプが長方形の場合においては、目地長さが大きい場合に、目地強度が大きい目地 H は浮きタイル部剥落時累積付与エネルギー U_t 大きくなっているが、目地 M と目地 L に減少する傾向が見られた。これは目地強度が弱く目地長さが長くなると目地が破壊しやすくなるのではないかと考えられる。これは破壊開始時付与エネルギー U_0 と同様の傾向となった。

これより浮きタイルの周辺目地の長さ L が破壊開始に大きな影響を及ぼすことまた浮きタイプによって違いがることが確認された。

次に浮きタイルが剥落する直前直後の動的荷重 F と目地圧縮強度 F_c との関係を図 3-30 に示す。また浮きタイルが剥落する直前直後の動的荷重 F と浮きタイル周辺目地長さ L との関係を図 3-31 に示す。図の ●印は剥落直前の動的荷重 F 、×印は剥落直後の動的荷重 F を示している。

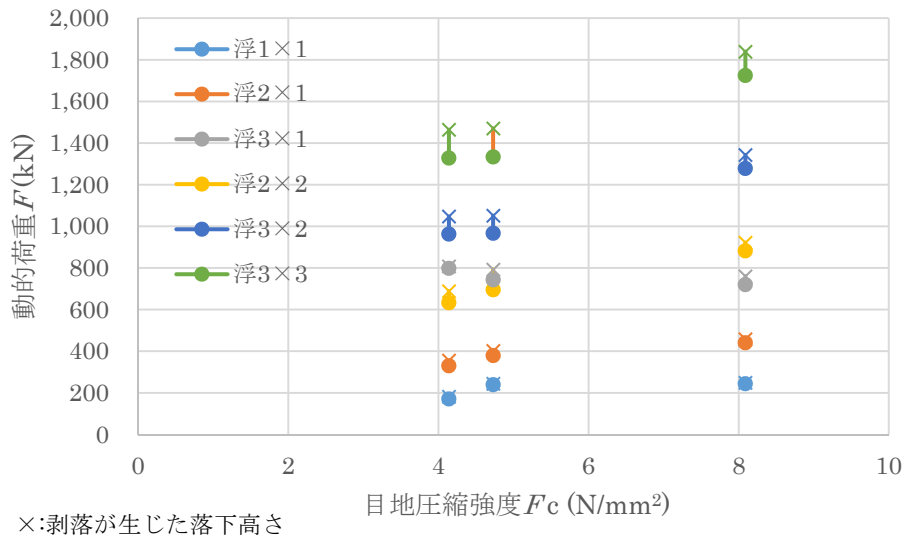


図 3-30 剥落直前直後の動的荷重 F と目地強度 F_c の関係

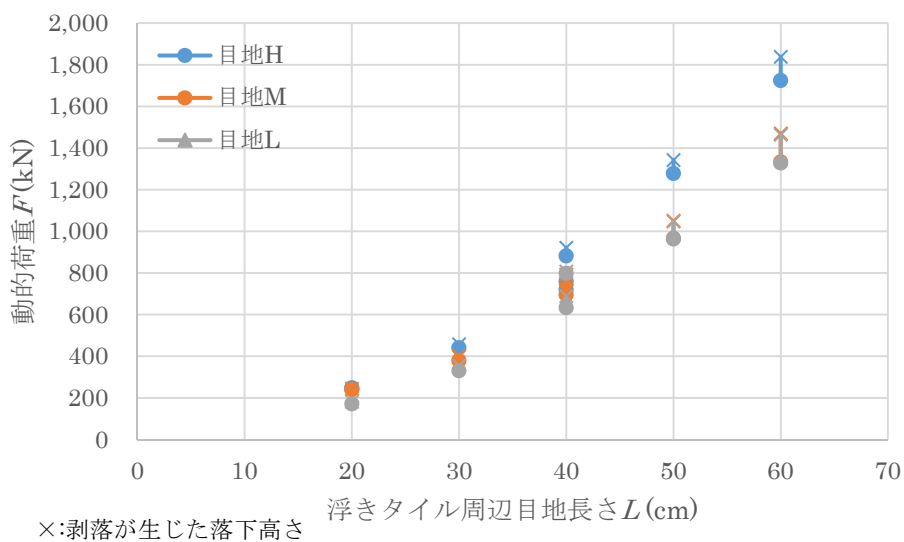


図 3-31 剥落直前直後の動的荷重 F と目地長さ L の関係

図 3-30・図 3-31 より目地強度 F_c が大きくなるほど、タイル周辺目地長さ L 大きくなるほど剥落直前直後の動的荷重 F は大きくなり、剥落直前と剥落直後の動的荷重 F の差が大きくなる傾向がある。

3.2 まとめ

本章では、動的衝撃試験による各種タイル仕上の面外変形状の把握をするために、動的衝撃試験により人為的に浮きタイルを生じさせた6種類の試験体を作製し、経年劣化などで強度が低下した目地を想定して目地モルタルの水セメント比(W/C)を100%、160%、180%した目地材を使用して試験を行い検討した。本章で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 浮きタイル試験に対する落下衝撃試験により、試験体落下高さを制御した繰り返し単調増加動的力の付与と、各種浮きタイル部分の非接触による2次元的面外残留変位分布との関係を求めることができた。残留変位の分布は各試験条件とも目地部の局所的な部分から残留変異が発生し、その後、落下高さの増加にしたがって残留変位が増加し最終的には剥落に至る傾向があった。また、浮きタイル試験に対する落下衝撃試験により継時的な剥落性状が把握できる本試験方法は、各種浮きタイルの剥落評価試験として有効であることを示した。
- (2) 浮きタイル試験に対する落下衝撃試験において、各落下高さごとに求めた浮きタイル部分に生じる浮きタイル部分付与エネルギー推定値と、浮きタイル部分の残留変形の平均値との関係を求めた結果、それらには比例的に増加の傾向があり、浮きタイル部分付与エネルギー推定値に対する変形抵抗として評価回帰式を提案した。
- (3) 浮きタイル部分の残留変形が最初に生じた浮きタイルの部分付与エネルギー推定値を破壊開始時付与エネルギーと定義し、各浮きタイル試験体の条件との関係を求めた結果、破壊開始時付与エネルギーは、目地の長さが大きいほど、また、目地強度が大きいほど大きくなる傾向があった。
- (4) 浮きタイル試験に対する落下衝撃試験時にレーザー変位計で計測した最大加速度から求めた動的荷重 F 推定値について、最終的に浮きタイル部分が剥落する落下高さの動的荷重推定値を示し、目地の長さが大きいほど、また、目地強度が大きいほど大きくなる傾向については両者とも同じであった。

第4章 シミュレーション解析による各種タイル仕上の

面外変形性状推定

4.1 解析概要

既往研究の推定手法¹⁾において行われた目地変位推定シミュレーションに、構造解析プログラムソフトウェア『FrontISTR』¹⁾を用いて有限要素法アプローチを導入した。本研究でのシミュレーションでは、母材底面部を固定したうえで各部材を決められたメッシュ幅で分割し、浮きタイルごとに荷重を入力して解析を行なった。面外方向の変位の最大値を0.1秒間隔で1秒後まで算定し、その最大値を面外残留変位 R の推定値とした。解析概念図を図4-1に示す。

ここで動的荷重 F における各落下高さ h の加速度 a は表3-2で求められた結果を用いることとする。

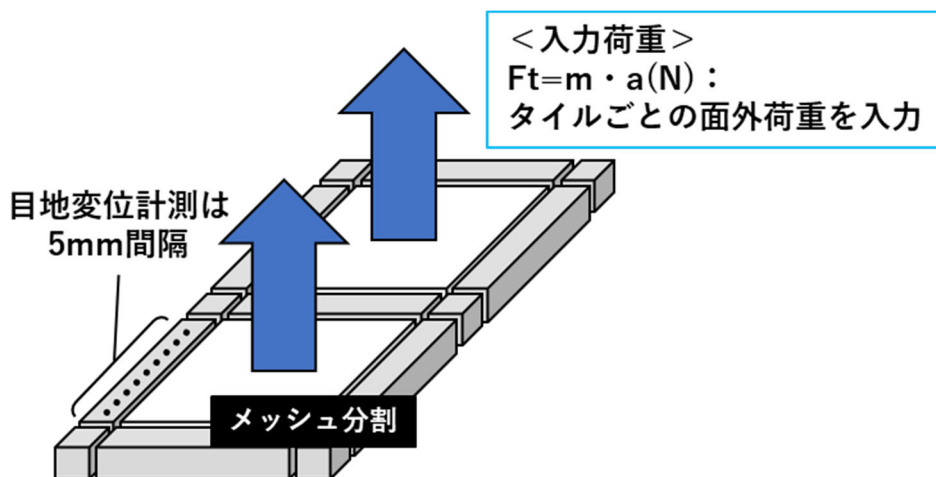


図4-1 解析概念図

4.2 解析方法

本研究の推定手法¹⁾では、図4-2のように浮きタイルの外周1辺45mmを9分割、タイル1枚ごとの面外荷重を $16 \times 16 = 256$ グリッドに分割し、この256グリッドに分割した荷重 f_t を最も近傍の分割目地に担保させて分割目地のせん断荷重 $f_j(i)$ からせん断応力 σ_i を算定した後、各分割目地の破壊時のせん断応力から目地が破壊される順番を推定し、剥落に至るまでのタイルの浮きの形状を推測した。既往研究の推定手法における目地破壊進展図を図4-3に示す。しかし、目地接点間の応力が考慮されず、破壊後の塑性変形の再現ができなかった。そこで本研究では、構造解析プログラムソフトウェア『FrontISTR』を使用して解析する手法を検討した。

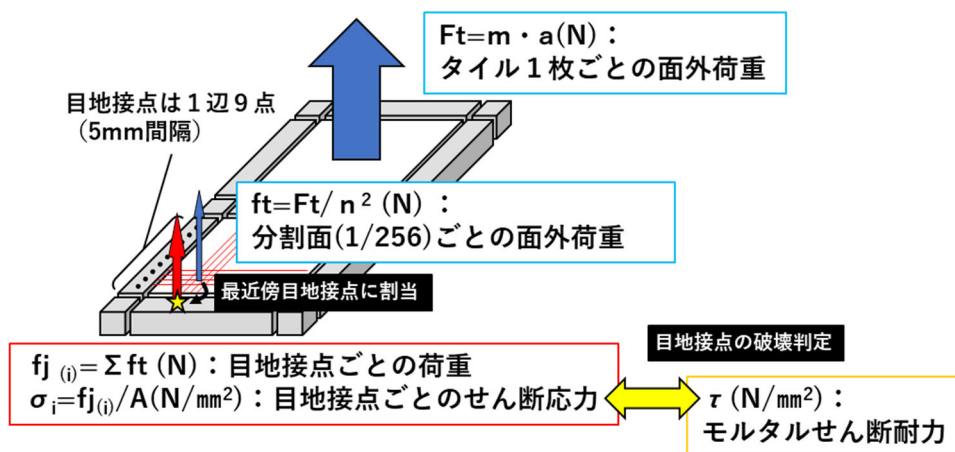


図4-2 本研究の推定手法におけるせん断応力推定図

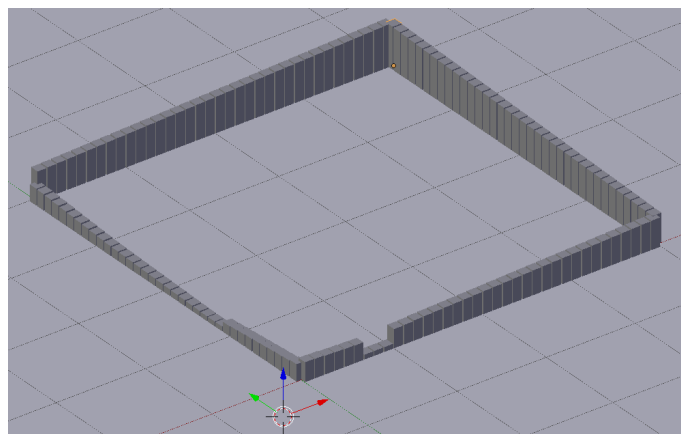


図4-3 本研究の推定手法における目地破壊進展図

本研究で使用する構造解析プログラムソフトウェア『FrontISTR』は、一般社団法人 FrontISTR Commons によるオープンソース大規模並列 FEM 非線形構造解析プログラムである。全ての要素をメッシュで再現しばねで繋ぐ有限要素法を取り入れた FrontISTR を用いることで目地接点間の応力まで考慮して目地の変位を推定でき、要素間の応力のつり合いから変形や応力分布を再現した。

本研究では FrontISTR と blender を用いてモデル作成、解析、データ出力までを行う。解析フローを図 4-4、システムフローを図 4-5、システムシミュレーション条件を表 4-1 に示す。

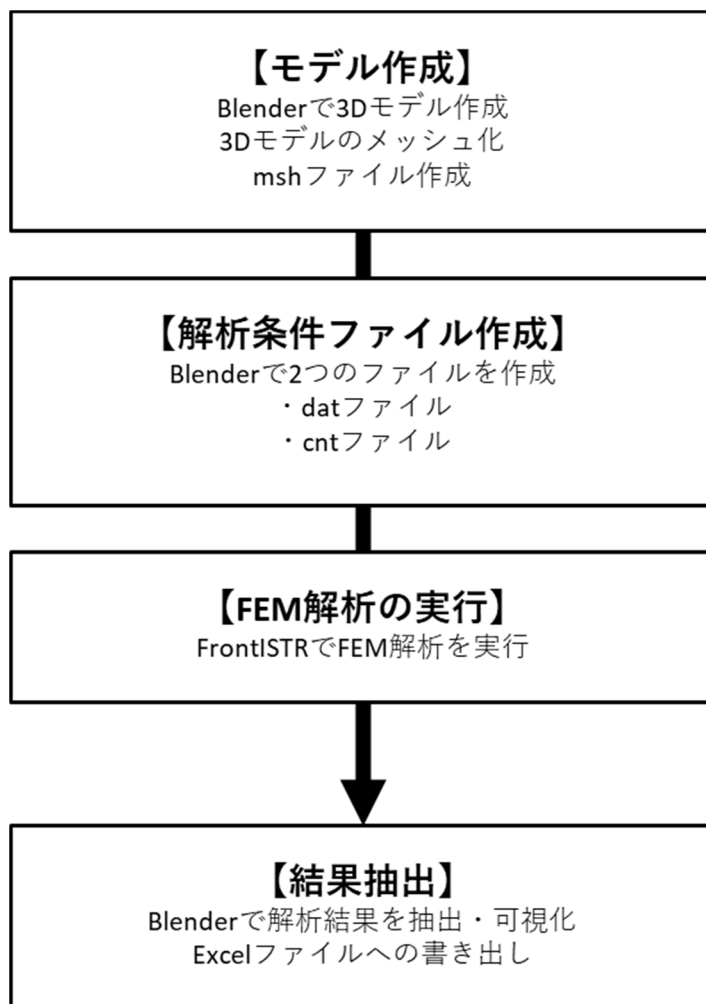


図 4-4 解析フロー

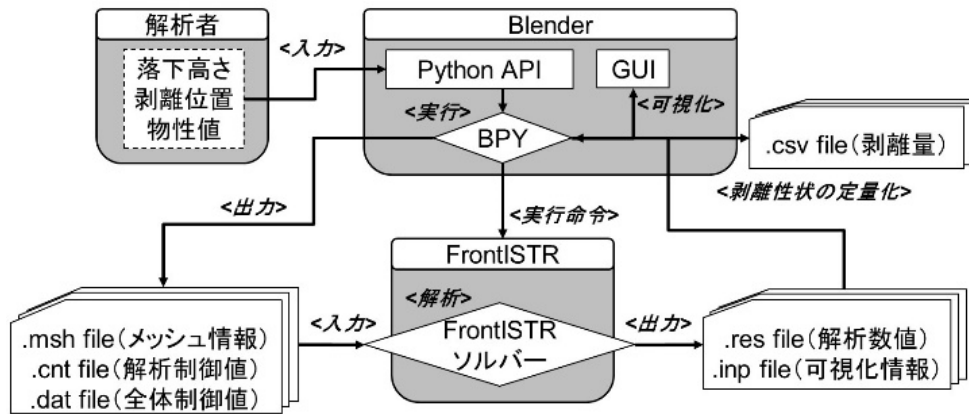


図 4-5 システムフロー

表 4-1 シミュレーション条件

Environment	
PC OS	Windows8 Professional
Memory (RAM)	16GB
CPU	Intel Core i7-6700
Display Adapter	NVIDIA Quadro K620 GPU
Software	Blender 2.39
Program	Python3

表 4-2 使用材料物性値

材料名	W/C (%)	推定ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比	密度 (g/cm ³)	推定圧縮強度 (N/mm ²)	推定引張強度 (N/mm ²)
母材コンクリート	49	2.77E+04	0.20	2.46	33.75	5.72
接着剤	-	8.39E-01	0.23	1.55	-	0.94
タイル	-	5.50E+04	0.20	2.35	-	54.71

目地変位推定シミュレーションでは、浮きを生じさせた試験体について解析を行ない、動的衝撃試験の結果と比較して解析の精度を評価する。まず、Blenderを用いて試験体の3Dモデルを作成し、メッシュファイルを生成する。3Dモデルでは母材コンクリート、目地モルタル、タイル、貼付け下地の4つの材料をそれぞれ割り当てた。使用材料物性値を表4-2に示す。

ここで解析を行う際に設定するメッシュ幅について、浮き3×1の浮きタイルが3枚の場合のイメージを図4-6、図4-7、図4-8に示す。メッシュ幅は全部で3種類あり、一番小さいものから順に2.5mm、5mm、10mmである。浮きタイルに隣接している目地を2.5mm幅のメッシュで、それ以外の目地と貼り付け下地を5mm幅のメッシュで、母材コンクリートを10mm幅のメッシュでそれぞれ分割した。

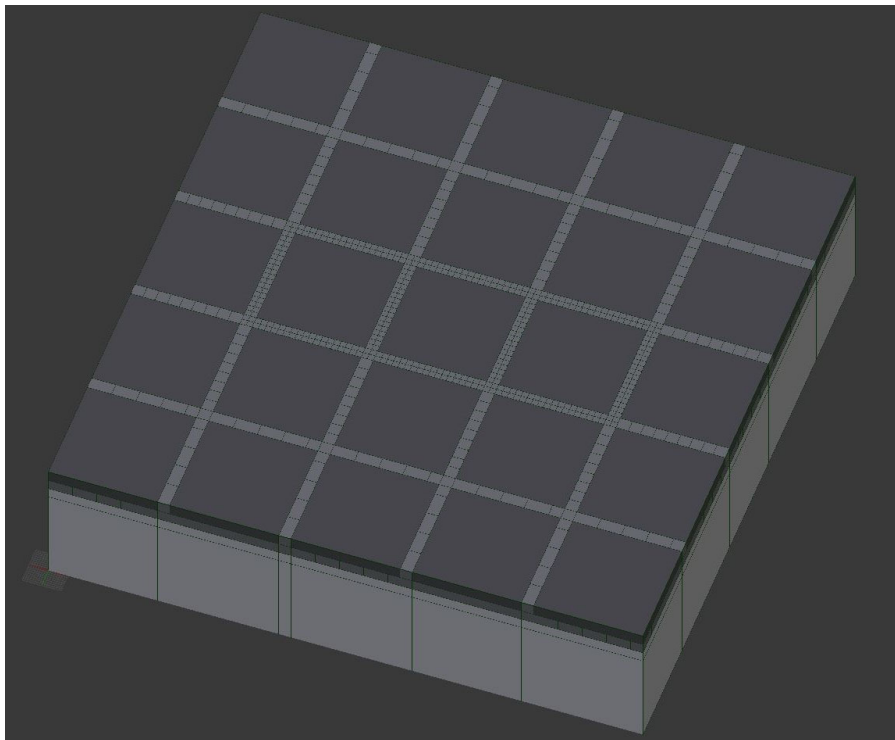


図 4-6 解析用試験体モデル

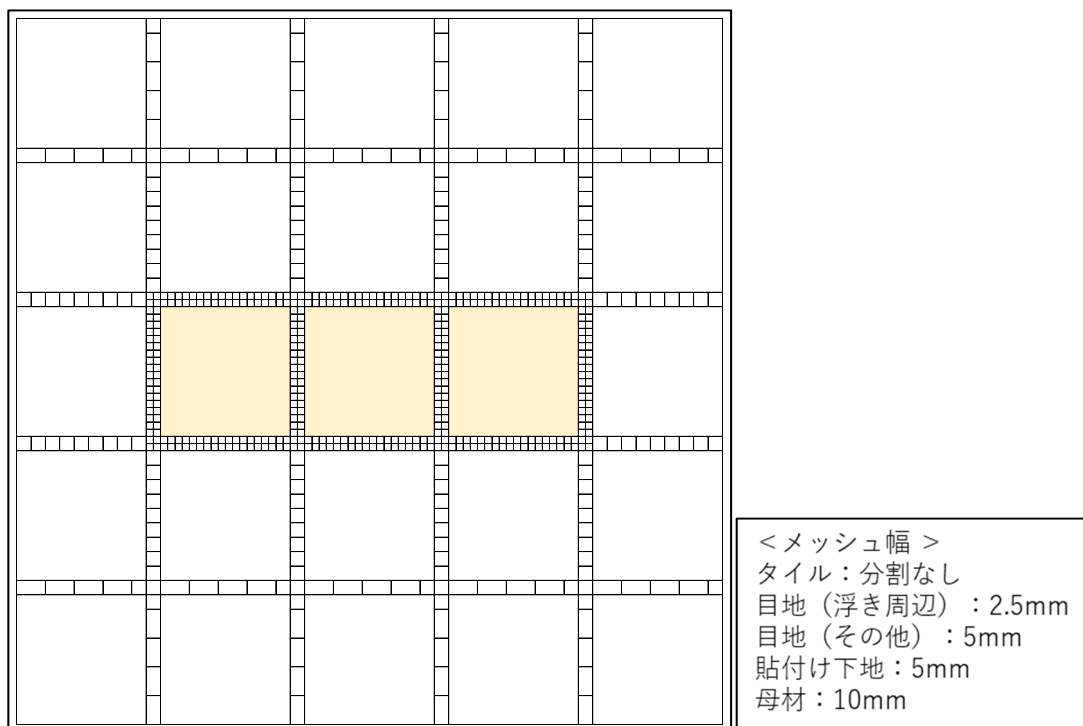


図 4-7 メッシュ平面図

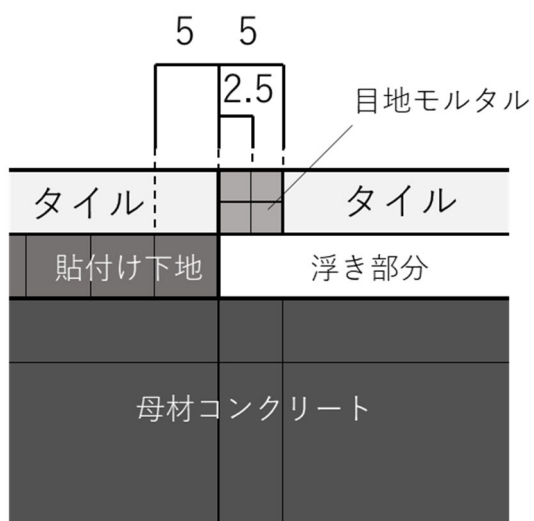


図 4-8 メッシュ断面図

次に、Blenderで cnt ファイルと dat ファイルを生成する。cnt ファイルでは荷条件や境界条件を設定する。その後、生成した msh ファイルと cnt ファイルと dat ファイルを使用して、Blender 内で FrontISTR による FEM 解析を実行し、解析の結果から目地の面外残留変位 R のデータを出力する。解析で得られる目地の面外残留変位 R を可視化したものを図 4-8 に示す。図 4-9 では、A 試験体（補修なし）・浮 3×1・目地 H の試験体が 80cm の高さから落下した際の変位結果を 1/2 倍でプロットしている。赤、緑、青の矢印がそれぞれ x、y、z 軸を表している。

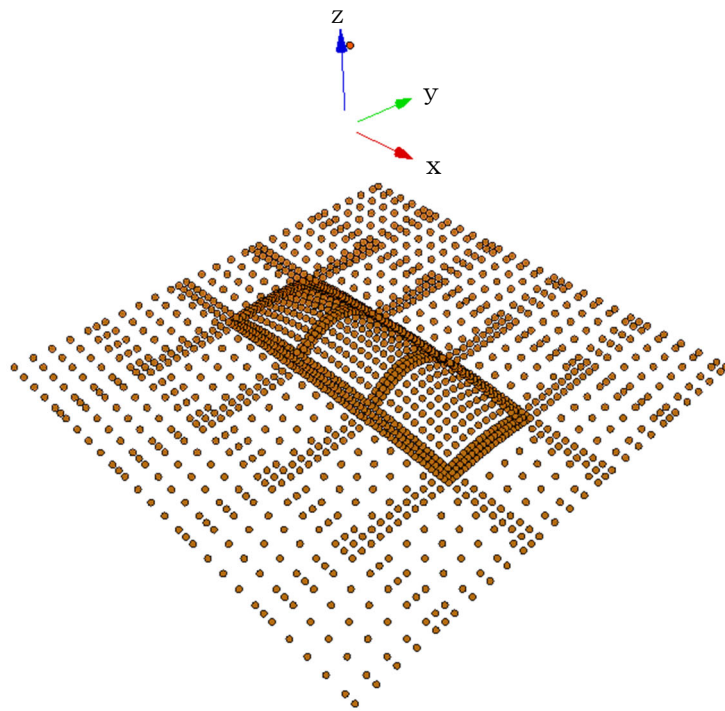


図 4-9 解析結果のイメージ図

4.3 解析結果

4.3.1 解析結果

ここではシミュレーションをした解析結果の一例を図 4-10 から図 4-11 に示す。

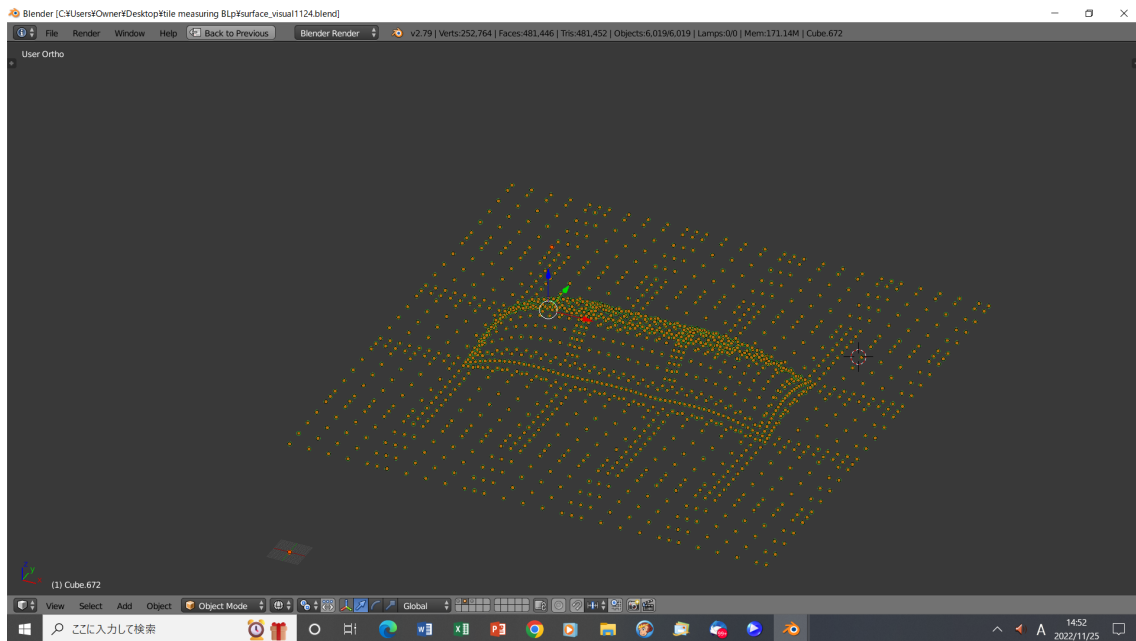


図 4-10 解析結果 (A 試験体(補修なし)・浮 3×1・目地 L・落下高さ 110cm)

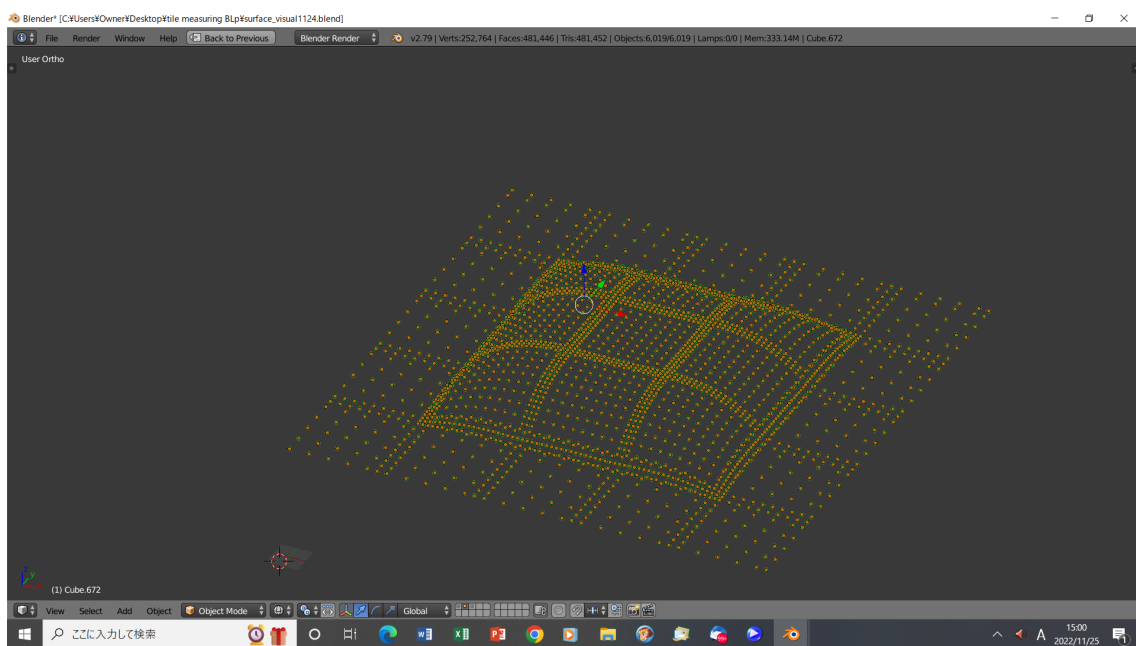


図 4-11 解析結果 (A 試験体(補修なし)・浮 3×3・目地 L・落下高さ 40cm)

4.3.2 剥落直前の計測結果と解析結果との比較

動的衝撃試験により浮きタイルが剥落する直前又は一部剥落し始めた際の落下高さとその1つ前の落下高さにおける計測結果と解析結果を比較したものを図4-12～図4-47に示す。

解析で得られる面外残留変位 R のデータは全ての数値が0以上であるため、計測結果における目地の面外残留で数値が0未満であるものは全て0表記に一部目地の剥落が発生した部分はマイナス数値の絶対値をとして修正して比較した。残留変位の大きい位置を試験結果においては赤色で、解析結果においては青色で示している。また、浮きタイル剥落開始直前までのデータで比較しており、動的衝撃試験で取得できたデータ数は試験体によって異なる。

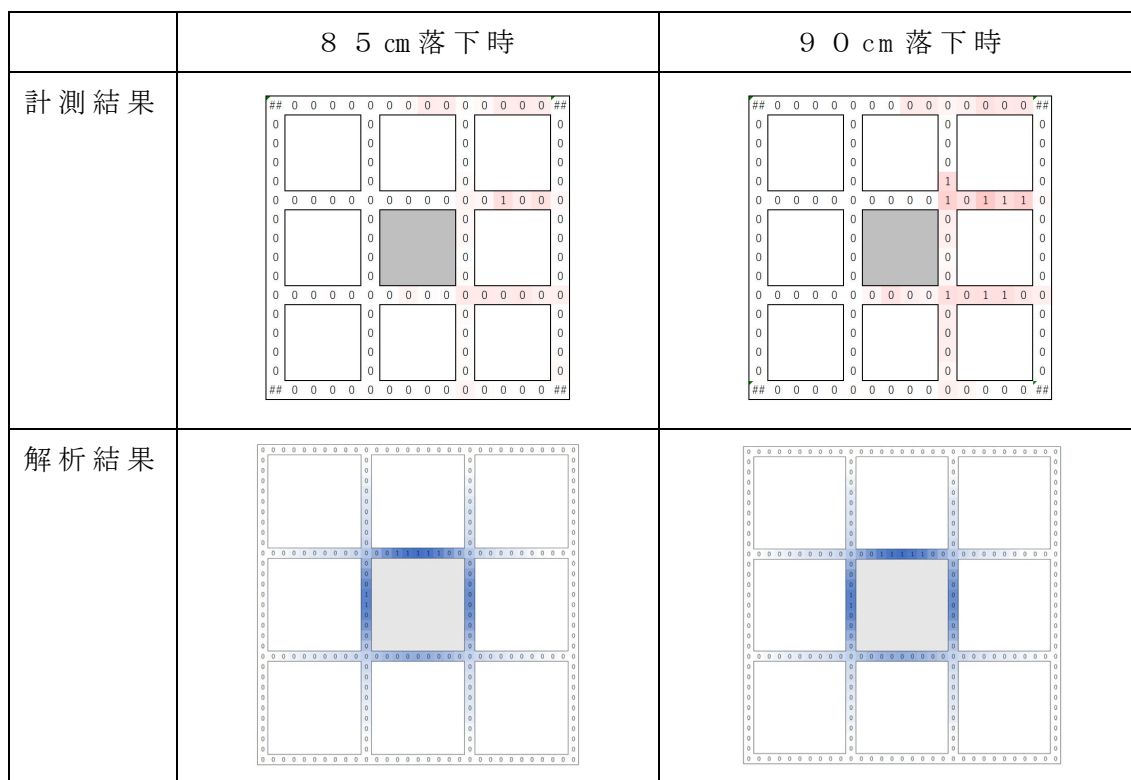


図 4-12 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 1×1・目地 H)

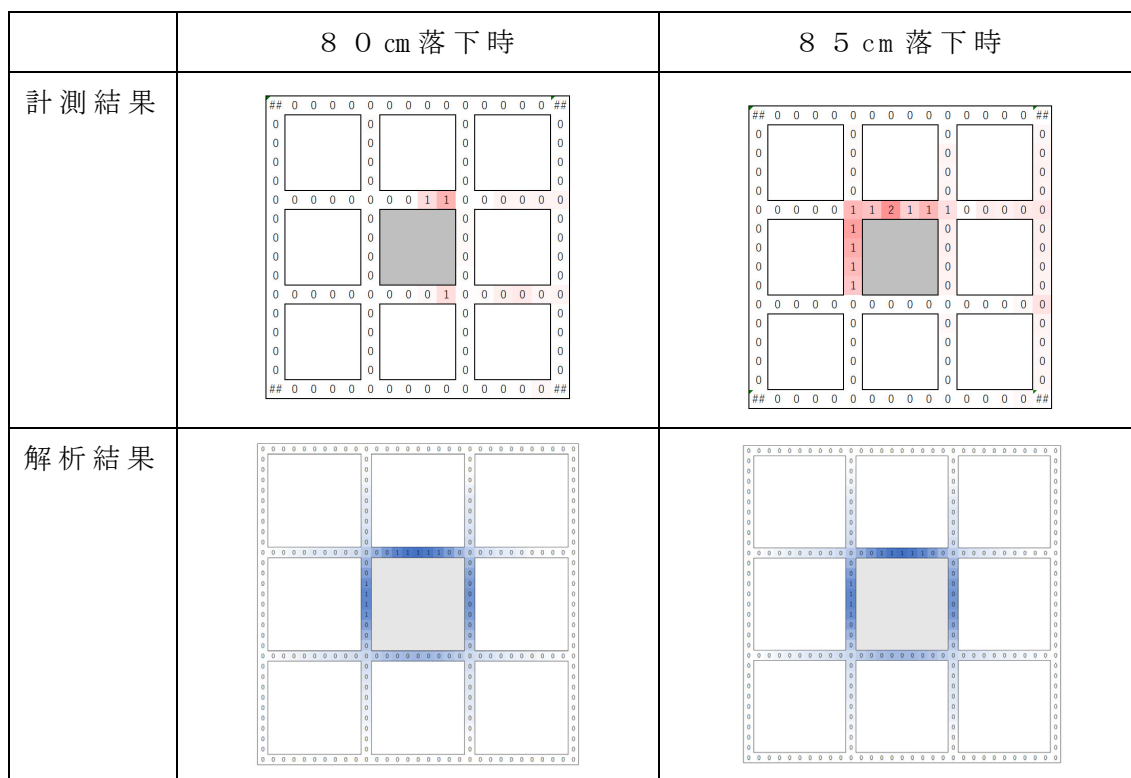


図 4-13 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 1×1・目地 M)

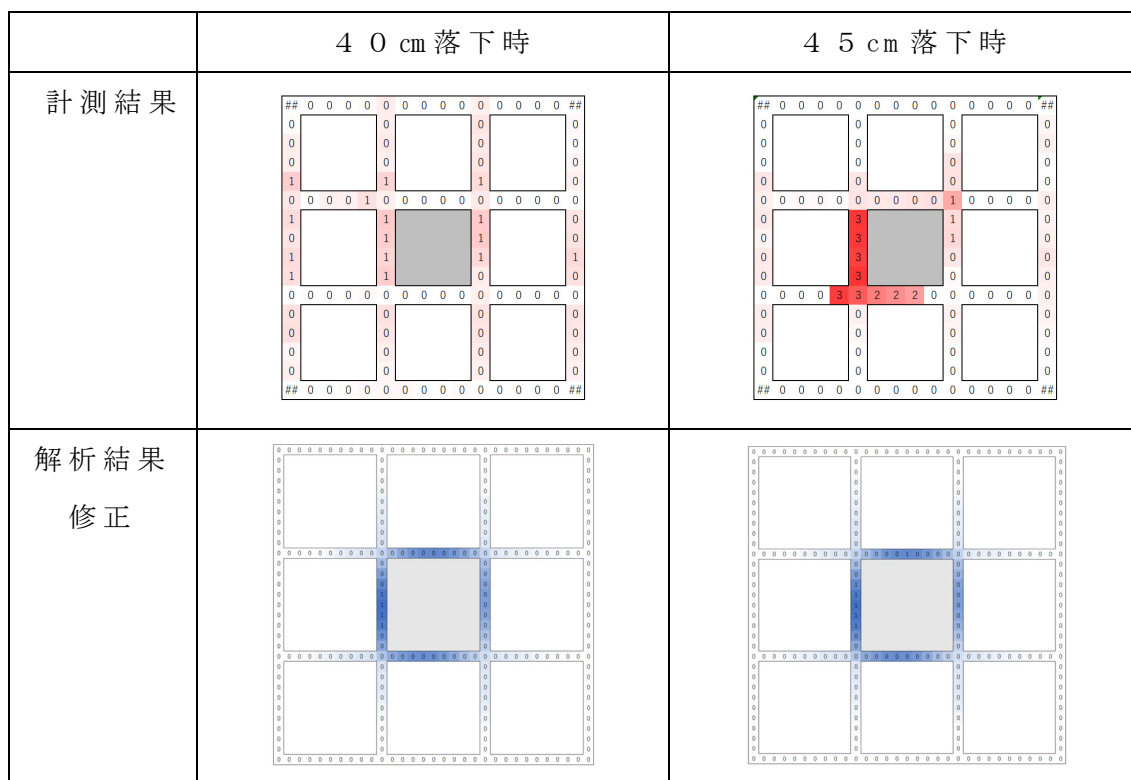


図 4-14 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 1×1・目地 L)

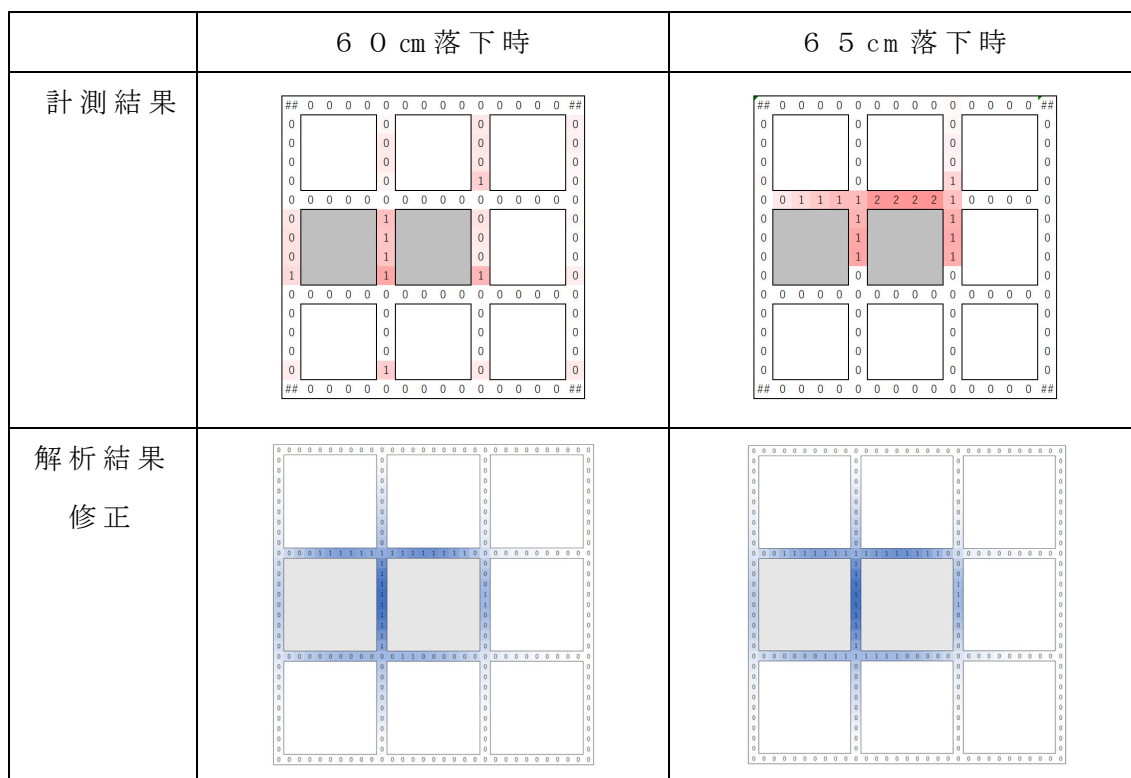


図 4-15 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 2×1・目地 H)

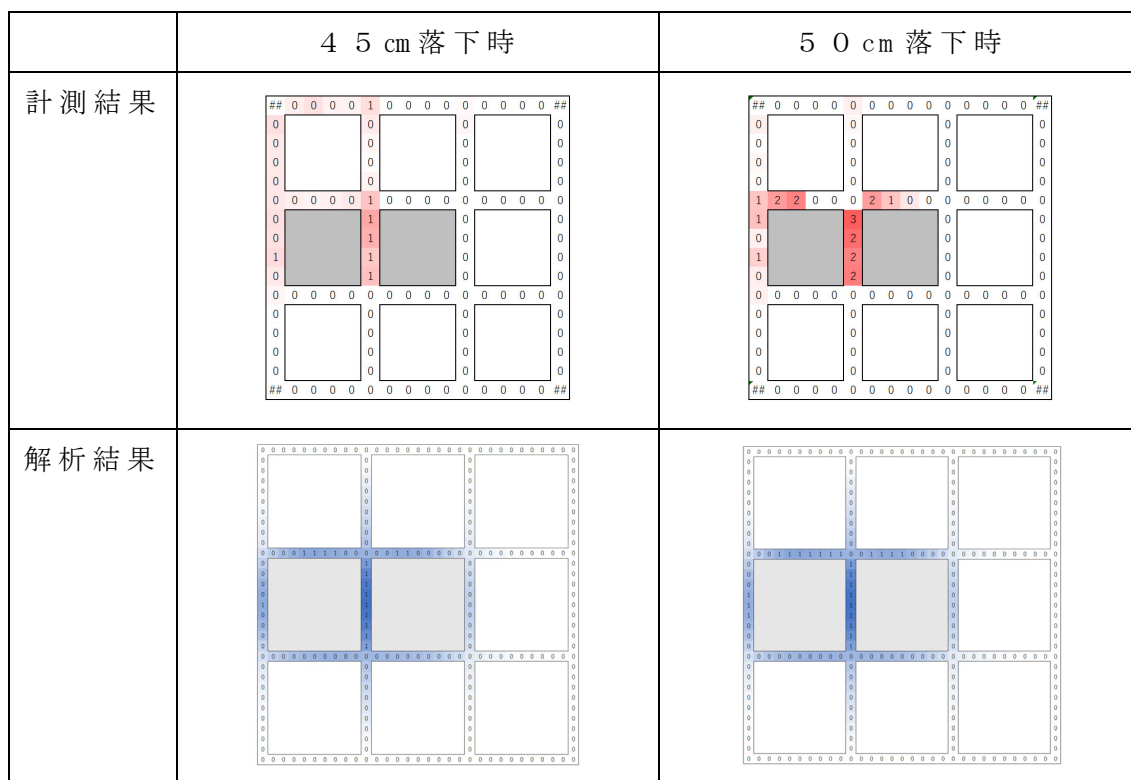


図 4-16 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 2×1・目地 M)

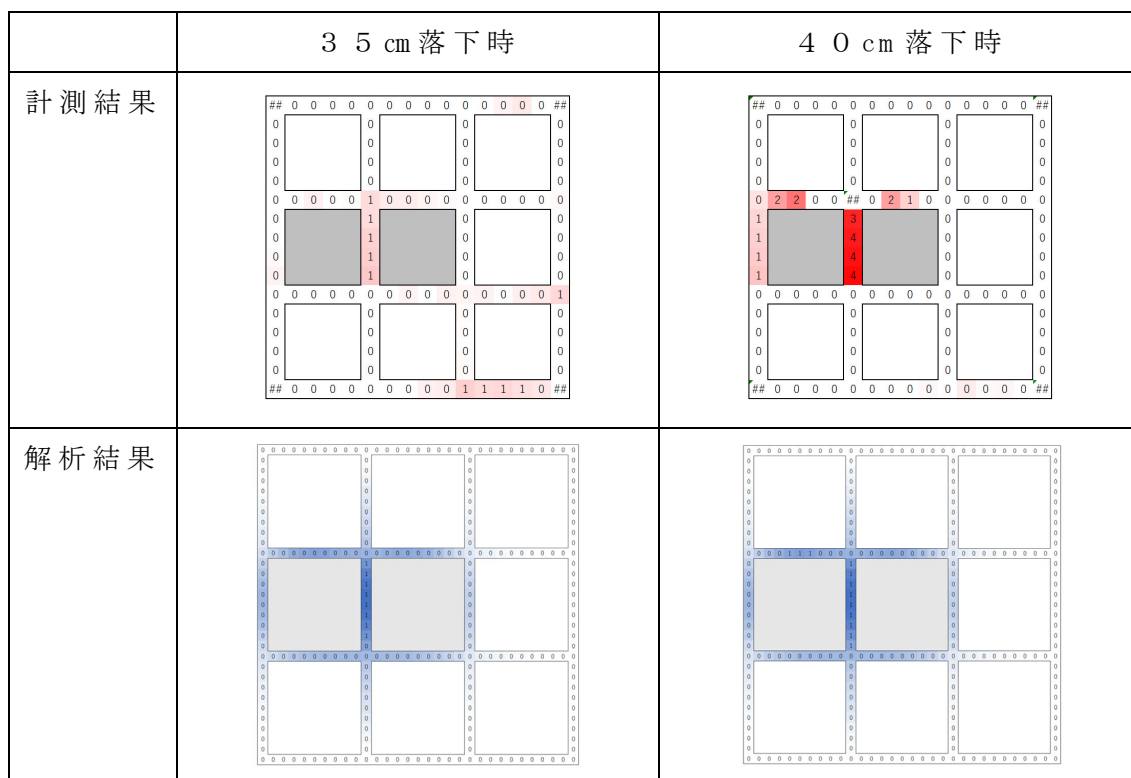


図 4-17 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 2×1・目地 L)

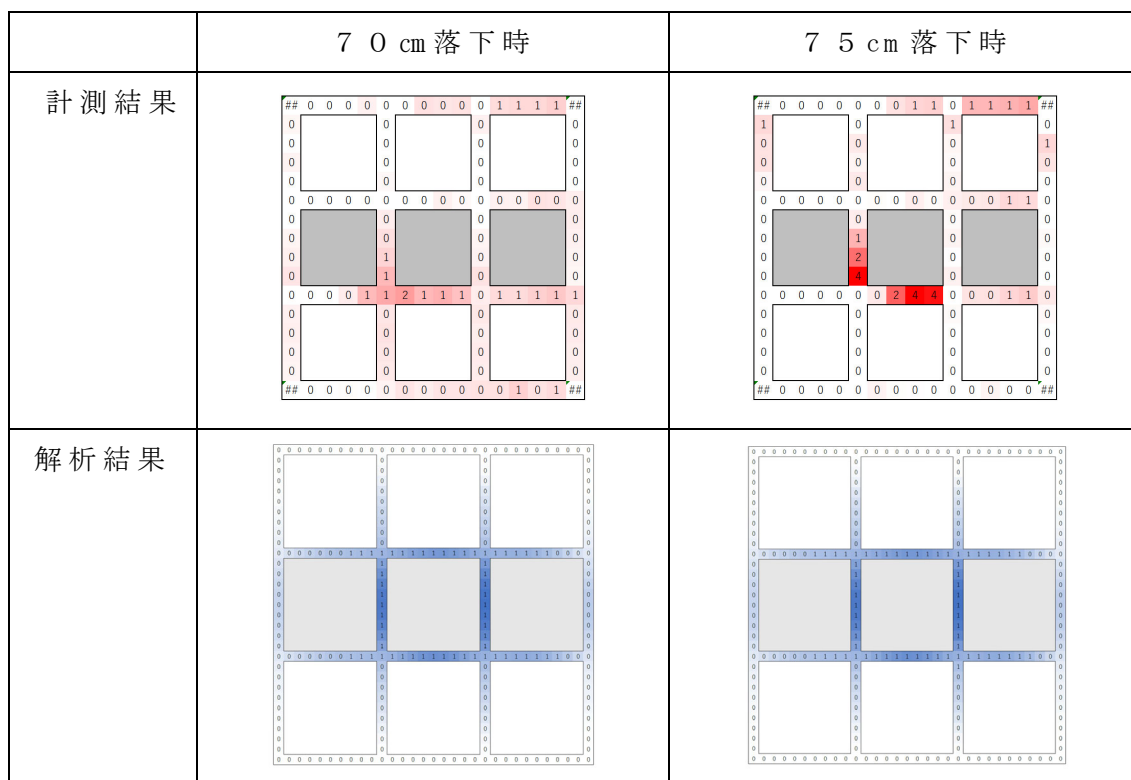


図 4-18 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 3×1・目地 H)

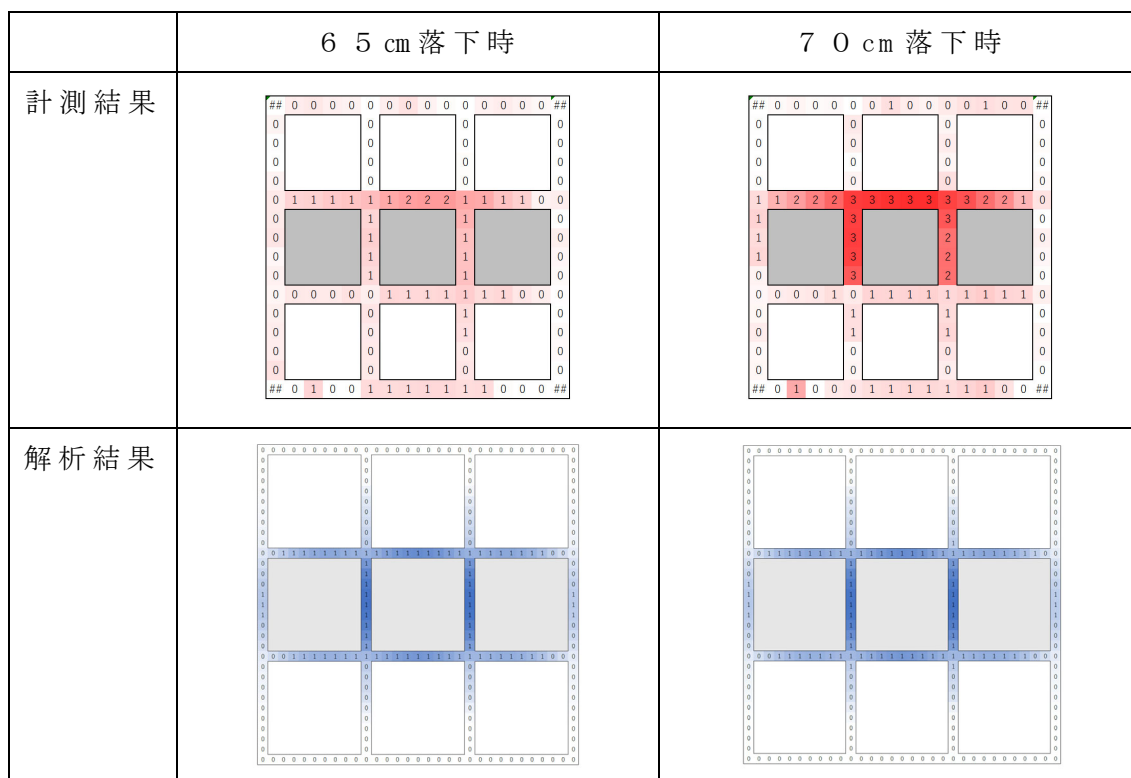


図 4-19 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 3×1・目地 M)

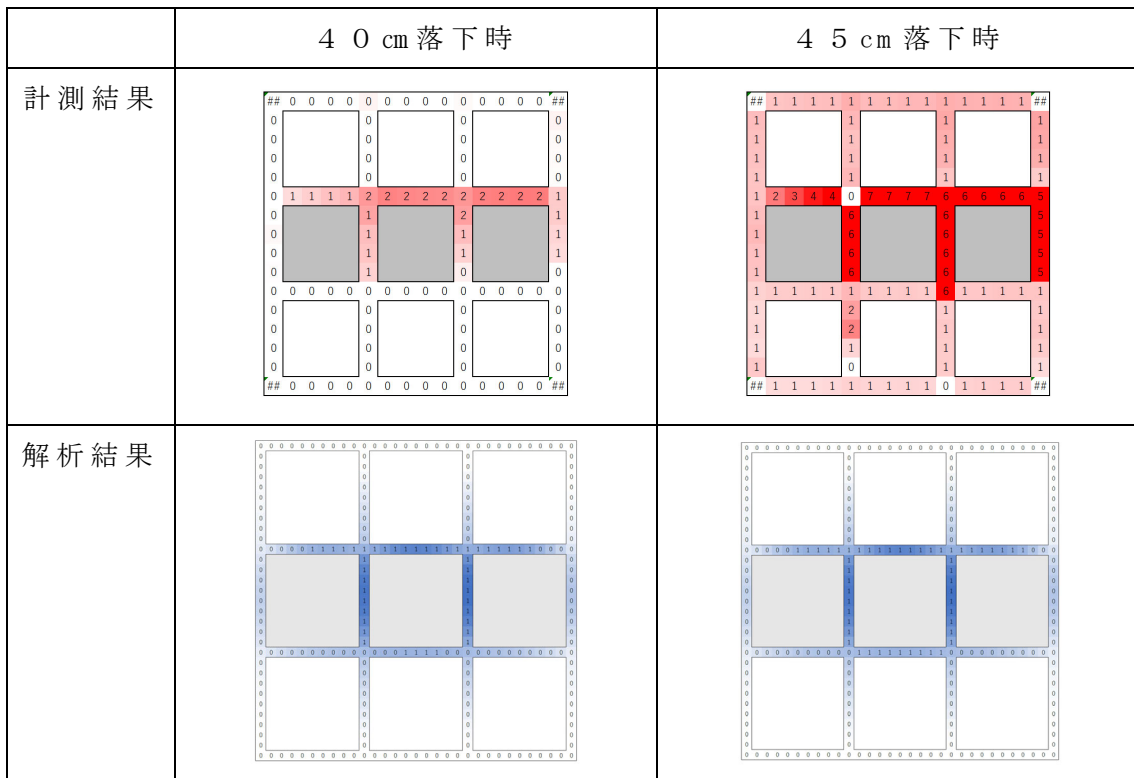


図 4-20 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 3×1・目地 L)

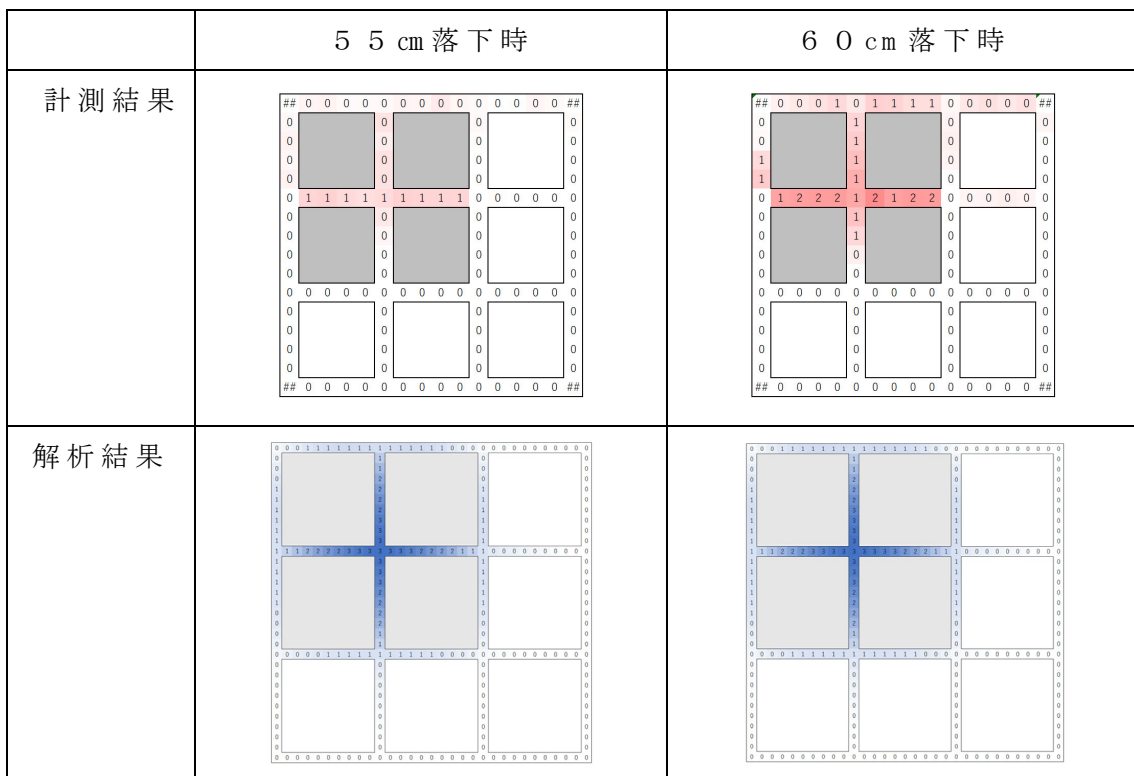


図 4-21 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 2×2・目地 H)

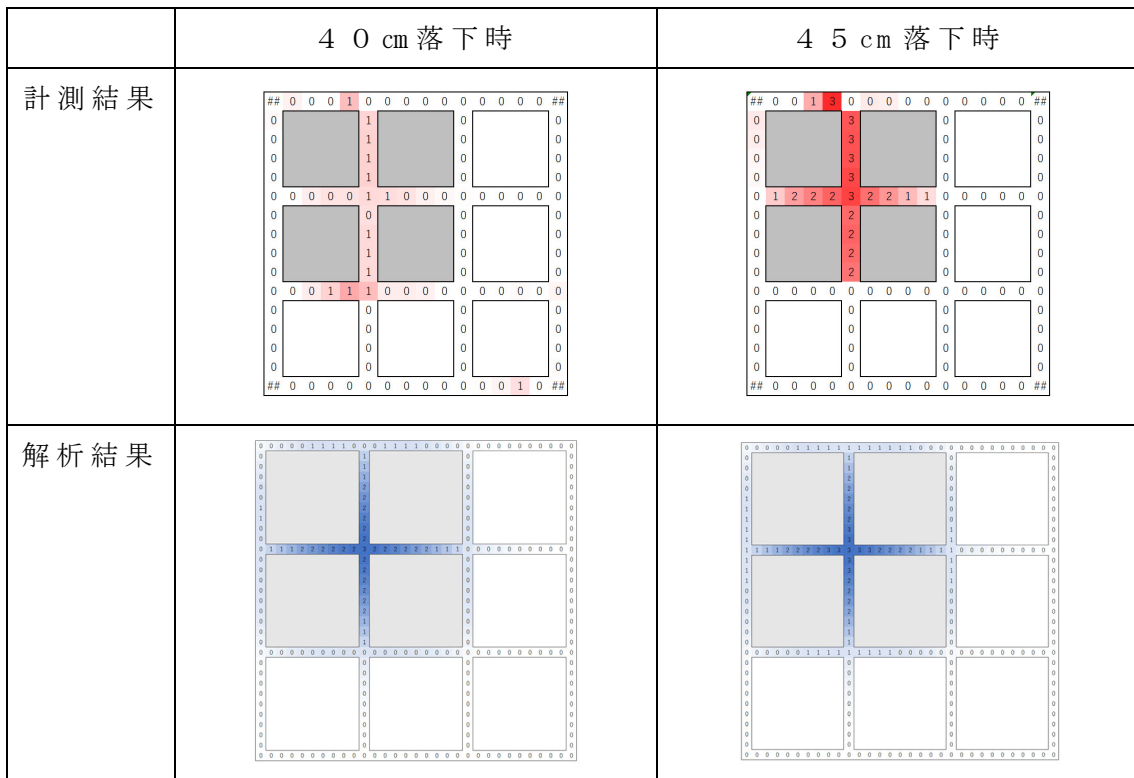


図 4-22 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 2×2・目地 M)

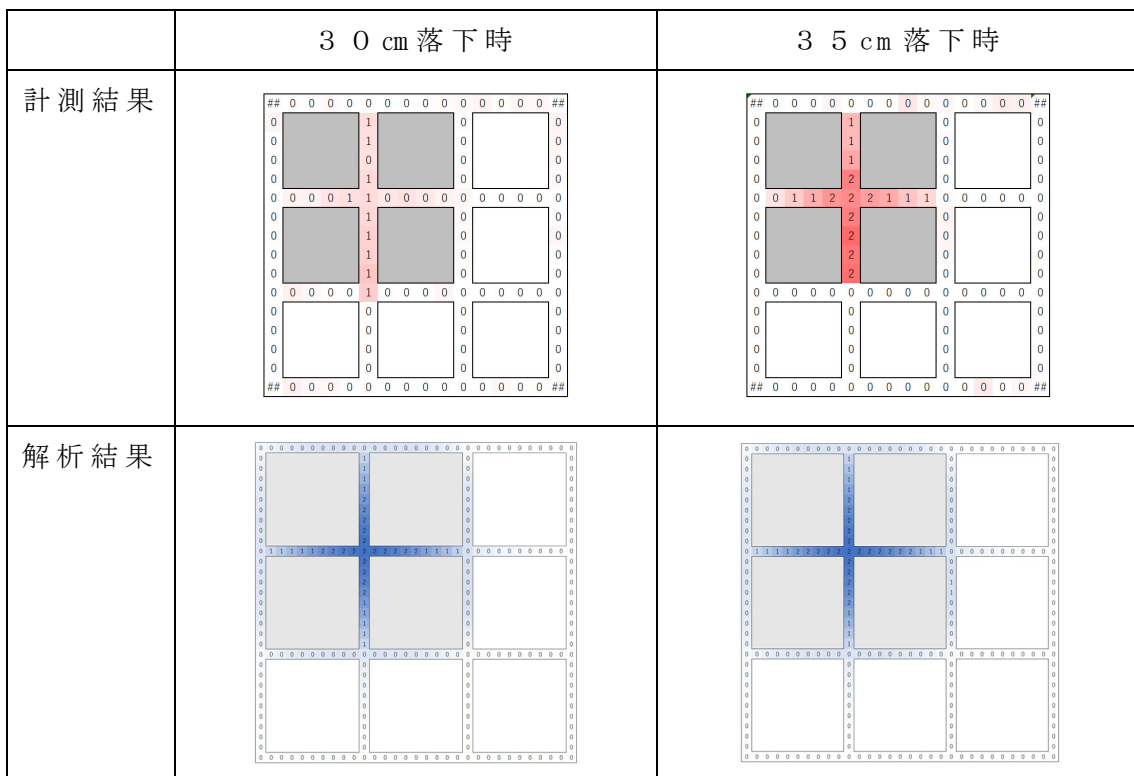


図 4-23 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 2×2・目地 L)

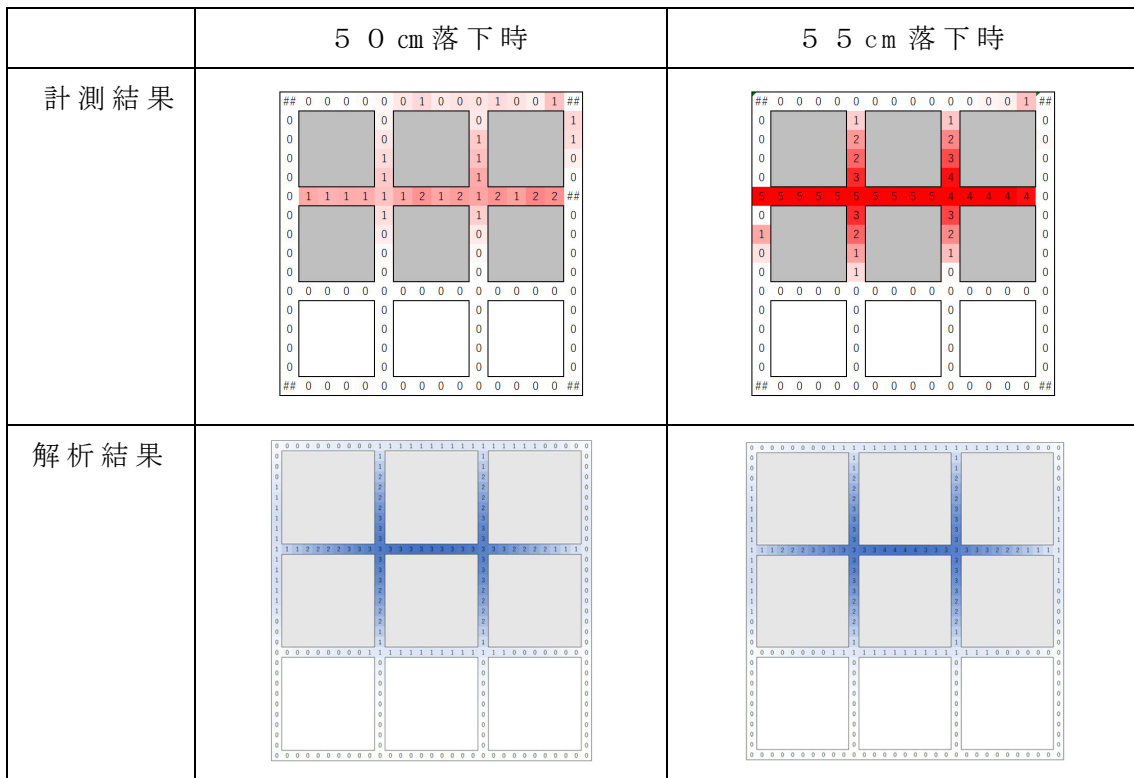


図 4-24 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 3×2・目地 H)

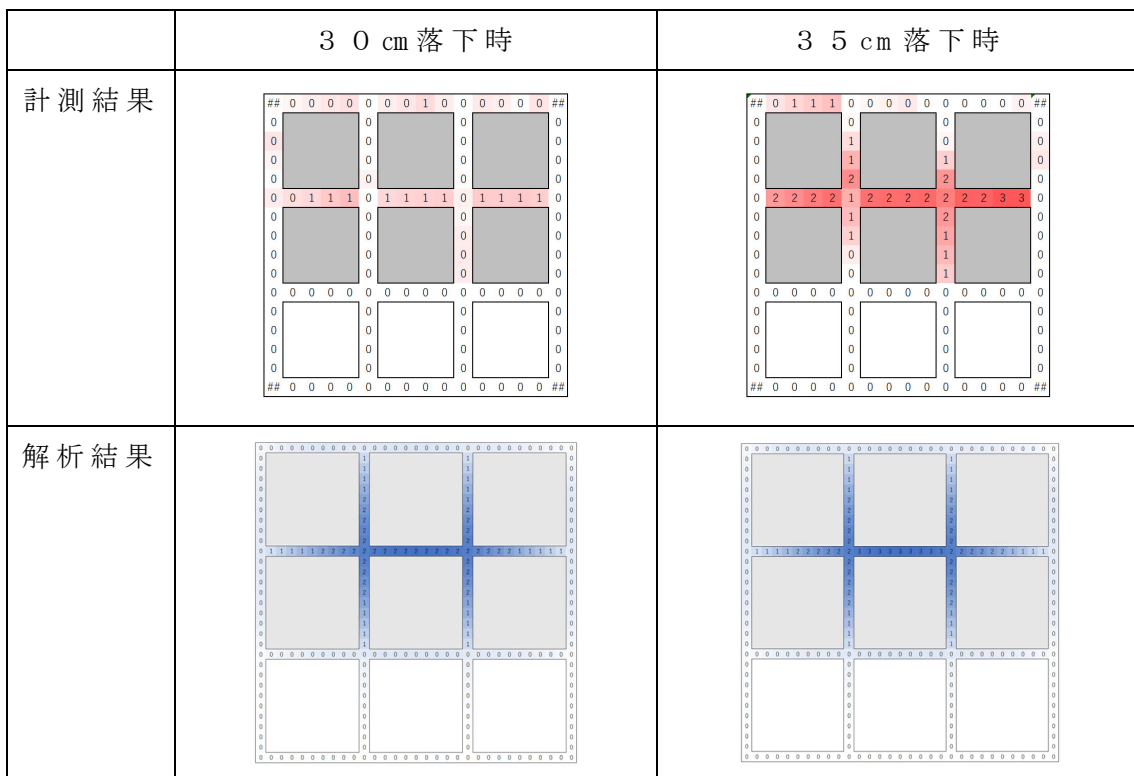


図 4-25 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 3×2・目地 M)

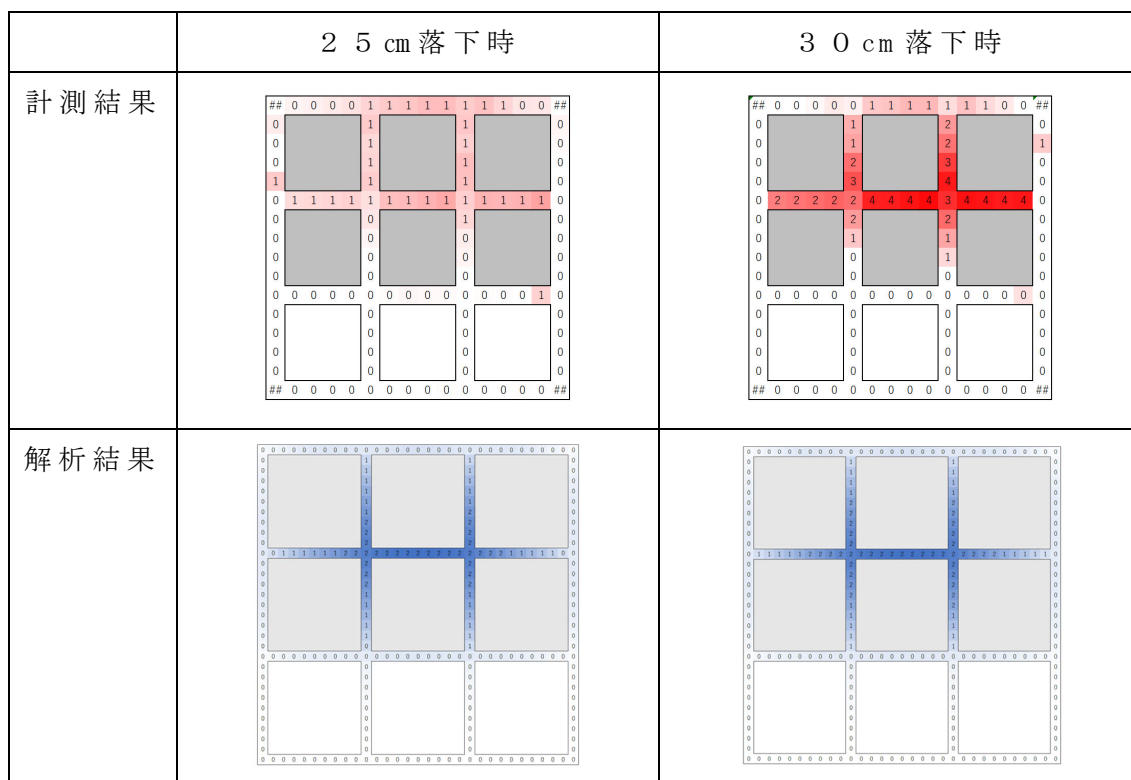


図 4-26 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 3×2・目地 L)

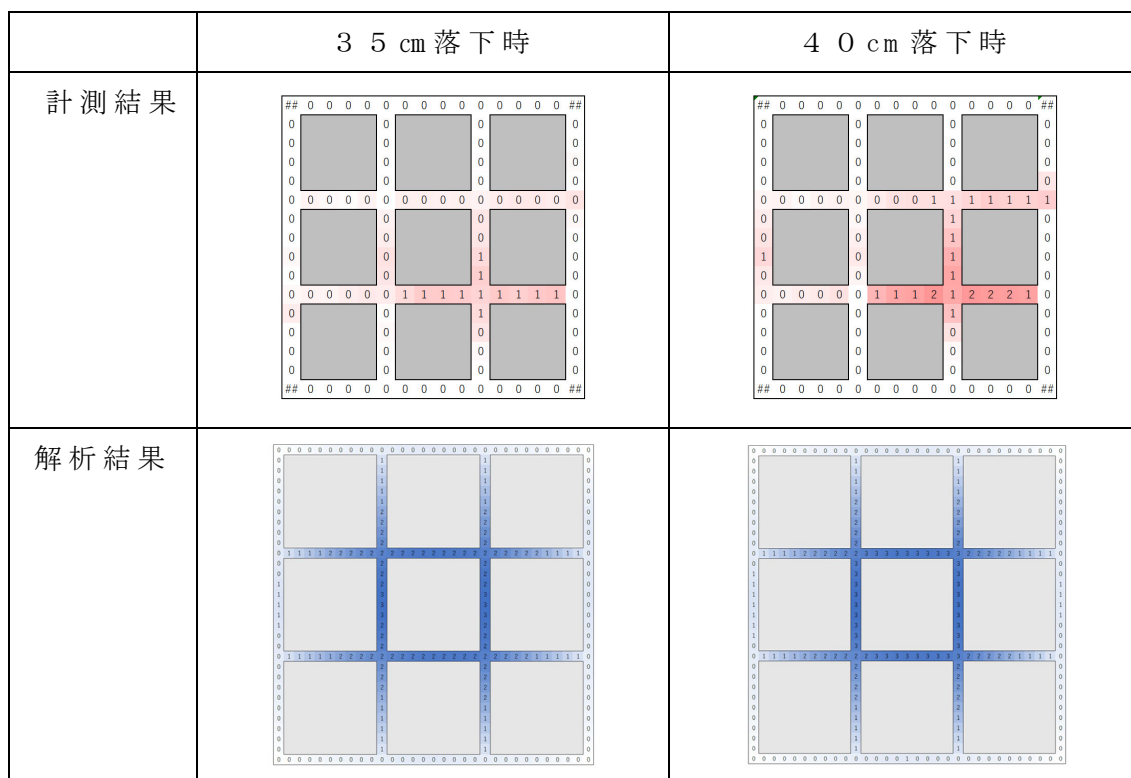


図 4-27 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 3×3・目地 H)

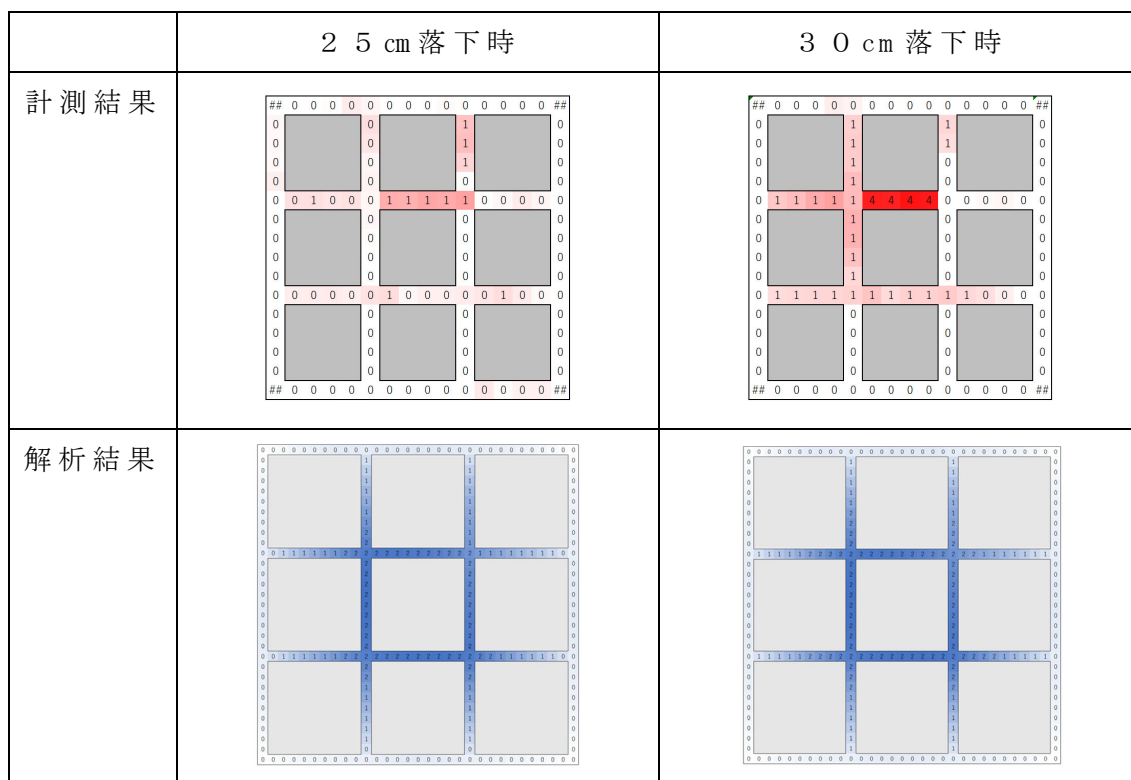


図 4-28 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 3×3・目地 M)

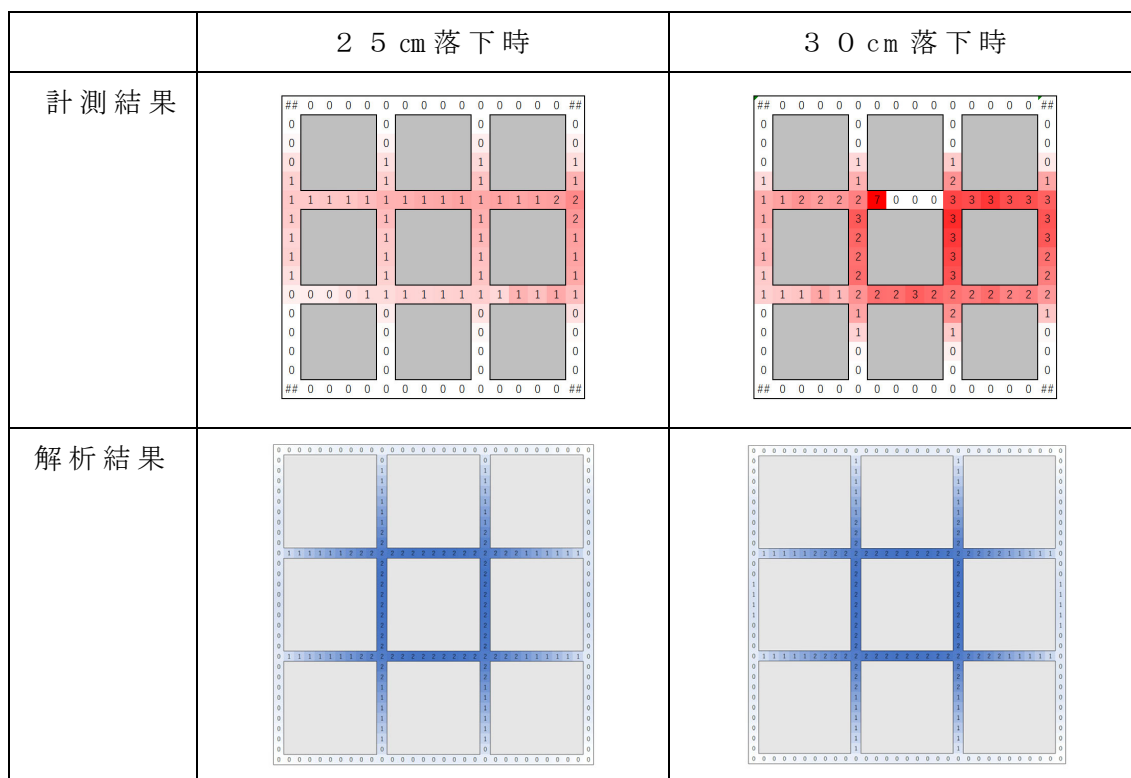


図 4-29 面外残留変位の計測結果と解析結果 (A 試験体・浮 3×3・目地 L)

結果として、A試験体（補修なし）において浮 $1\times 1\sim 3\times 3$ のどの場合においても面外残留変位の形状は線対象となっており、動的衝撃試験の測定結果とは相違が出た。タイルは剥離を起こすと目地モルタルに連結することにより剥落を防止しているため目地モルタルに依存度が高いと考えられる。そこで、実際のタイル施工の場合、特に目地モルタルについては施工時の均一性に欠けることや初期欠陥がある場合が考えられ、これにより結果に相違が出たと考える。

しかしながら各浮きタイプにおいて解析結果と動的衝撃試験の計測結果を比較すると大きな違いはなく、相似した剥落形状になっている。浮きタイプごとに考察してみると、浮 2×1 や浮 3×2 は、荷重を大きくしていくと浮きタイルが山のような形を作るが、その折れ曲がる部分にあたる目地モルタルがより早く浮いてくることが動的衝撃試験の計測結果と解析結果で示されている。同様に浮 3×1 では、周囲にある健全なタイルが最も少ない中央のタイルが両隣の2枚の浮きタイルよりも早く浮く傾向がみられ、それに伴って中央のタイル周辺の目地モルタルがより浮きやすくなっていることが動的衝撃試験の計測結果と解析結果で示されている。また、複数枚の浮きタイルがあり浮きタイプが正方形である形状4と形状6は、浮きタイプ状の中心に近い目地モルタルほど浮きやすくなっていることが動的衝撃試験の計測結果と解析結果で示されている。また、目地材の違いによるタイル剥落高さについて、どの浮きタイプにおいてもヤング率の高い目地材のほうが高い値となっている。

4.3.3 解析結果の検討

A試験体（補修なし）の解析結果と計測結果の整合性について検討する。計測結果の比較する側定点を図4-50に黄色に示す。浮きタイル周辺の面外残留変位 R について解析結果と比較する。

解析結果を比較する際に必要な実測加速度に対してかける補正係数 α 求める方法として、剥落直前の解析結果による面外残留変位 R_{cal-m} と計測結果による面外残留変位 R_{obs-m} より線形回帰より傾き $a-m$ を求めその逆数を補正係数 $\alpha-m$ 、破壊開始時の解析結果による面外残留変位 R_{cal-i} と計測結果による面外残留変位 R_{obs-i} より線形回帰より傾き $a-i$ を求めその逆数を補正係数 $\alpha-i$ を求める。係数 $\alpha-m$ と係数 $\alpha-i$ を用いて解析結果と計測結果の比較をする。

図5-51に剥落直前の解析結果による面外残留変位 R_{cal-m} と計測結果による面外残留変位 R_{obs-m} の結果を、図5-52に破壊開始時の解析結果による面外残留変位 R_{cal-i} と計測結果による面外残留変位 R_{obs-i} の結果を示す。

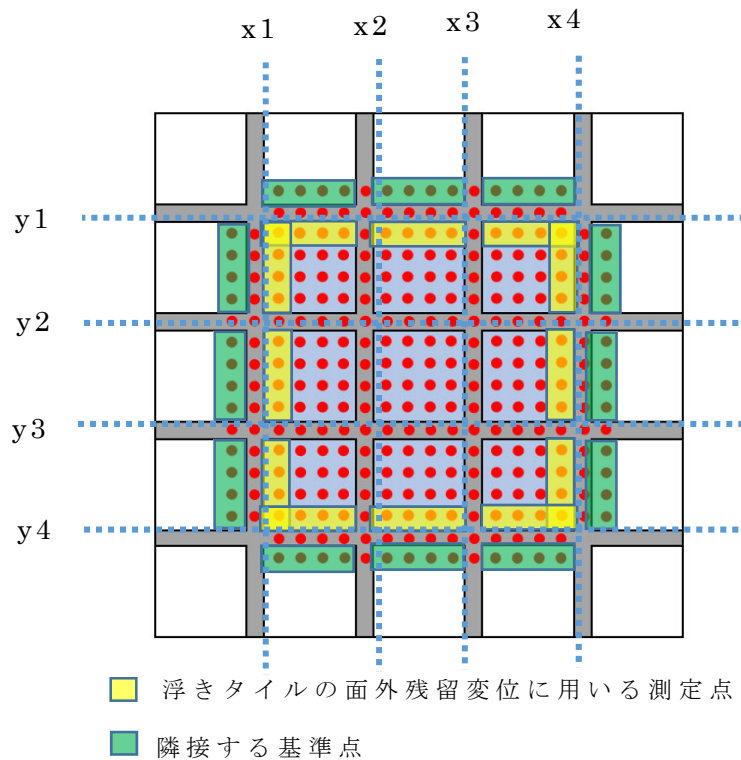


図4-50 面外残留変位測定点と浮き周辺目地

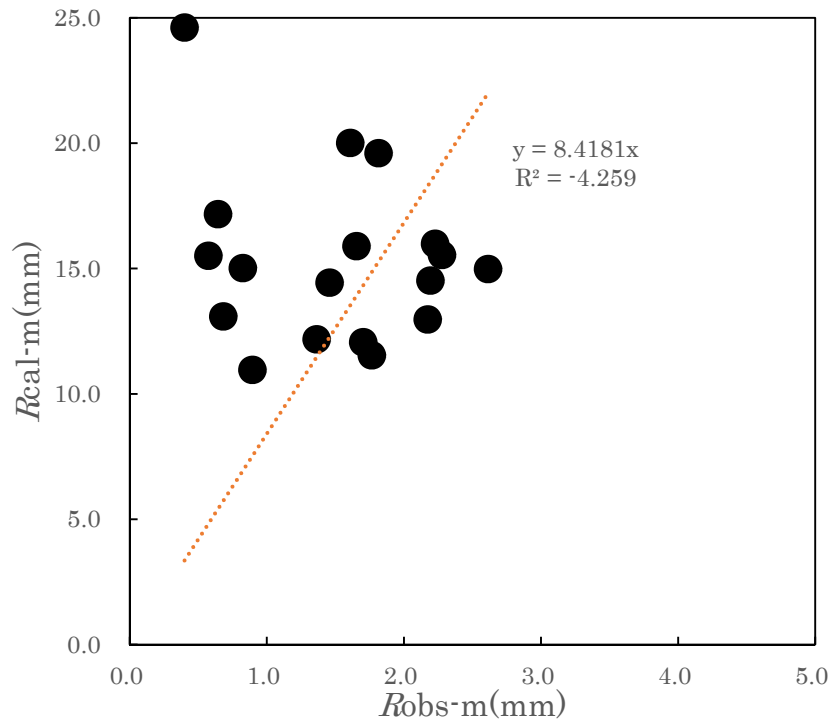


図 4-51 剥落直前の解析結果と計測結果の面外残留変位

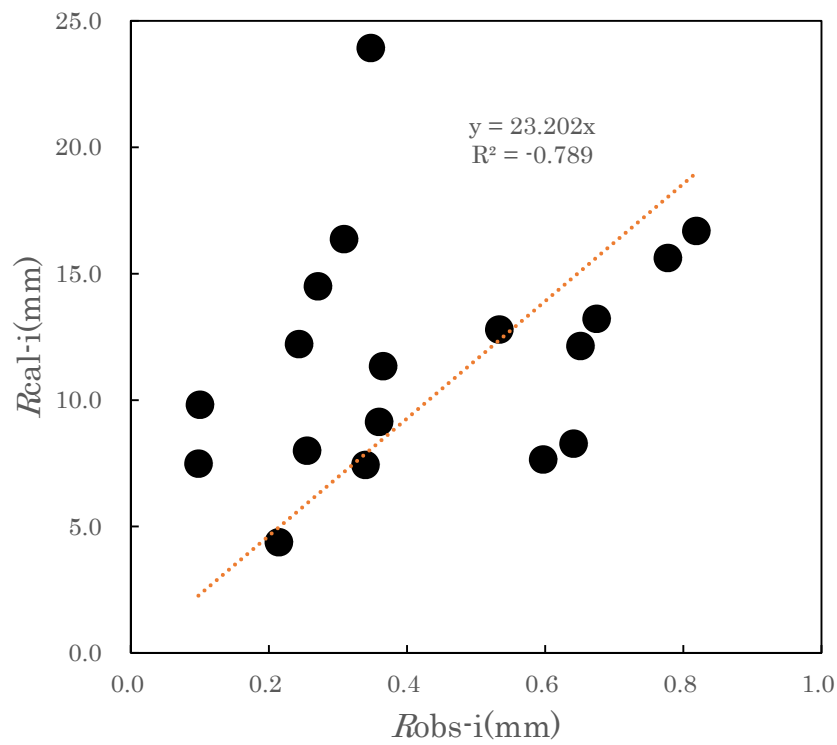


図 4-52 破壊開始時の解析結果と計測結果の面外残留変位

図 4-51 の近似稚式の結果より剥落直前の傾き $a \cdot m = 8.4181$ となり補正係数 $\alpha \cdot m = 0.119$ 、図 4-52 の近似式の結果より破壊開始時の傾 $a \cdot i = 23.202$ より $\alpha \cdot i = 0.043$ が求められた。これを用いて解析結果と計測結果の比較図を示す。

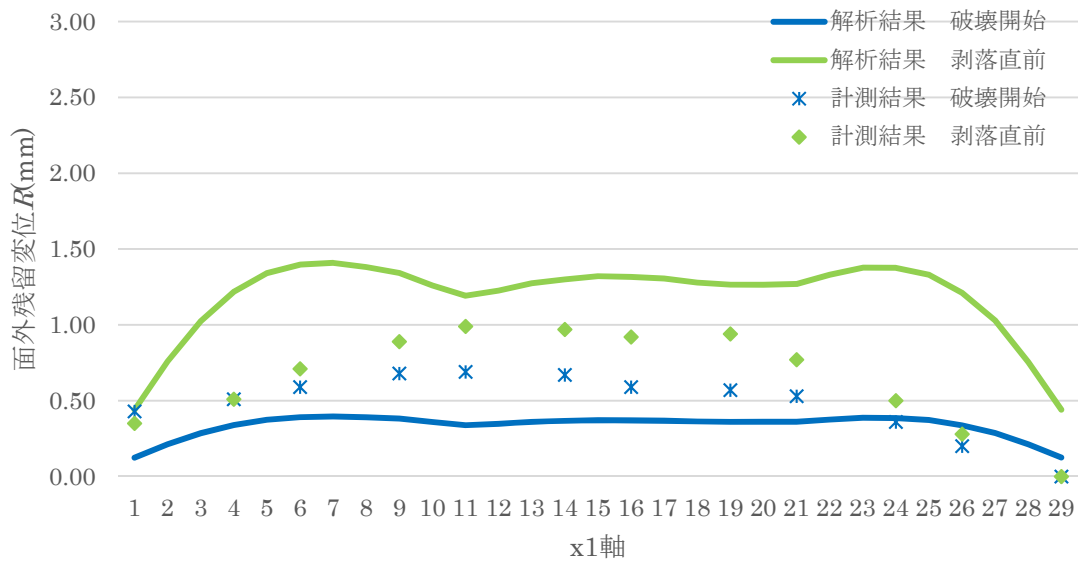


図 4-53 解析結果と計測結果の比較

(A 試験体 (補修なし) 浮 3×3・目地 M・x1)

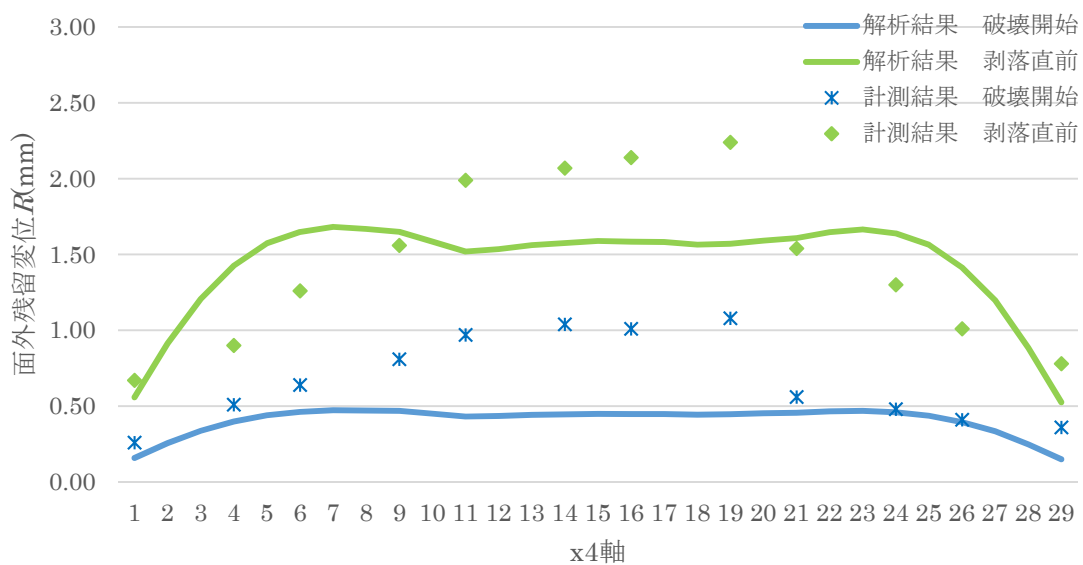


図 4-54 の解析結果と計測結果の比較

(A 試験体 (補修なし) 浮 3×3・目地 M・x4)

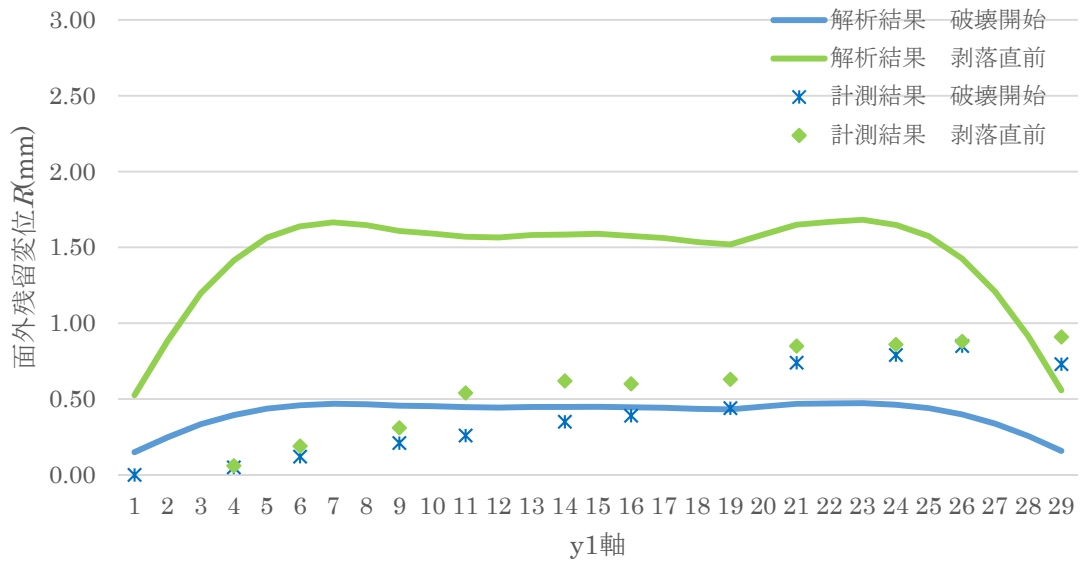


図 4-55 解析結果と計測結果の比較
(A 試験体(補修なし)浮 3×3・目地 M・y1)

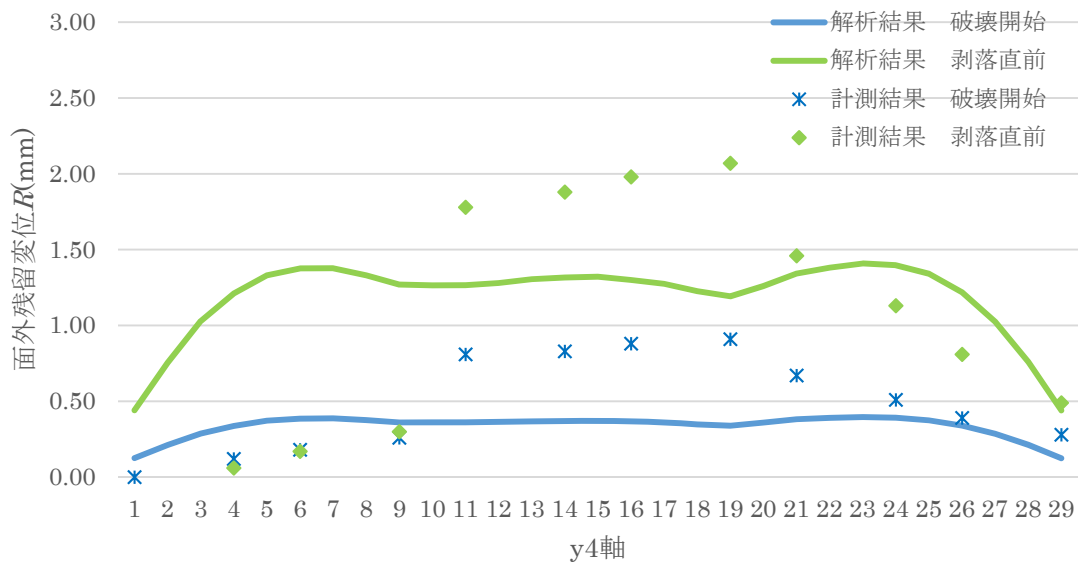


図 4-56 解析結果と計測結果の比較
(A 試験体(補修なし)浮 3×3・目地 M・y4)

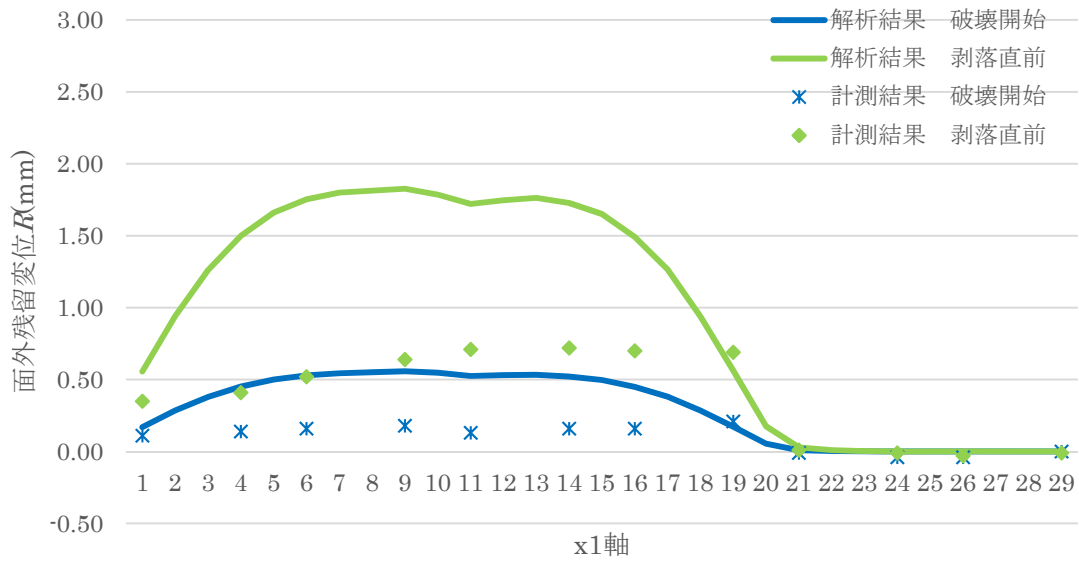


図 4-57 解析結果と計測結果の比較
(A 試験体(補修なし)浮 3×2・目地 M・x1)

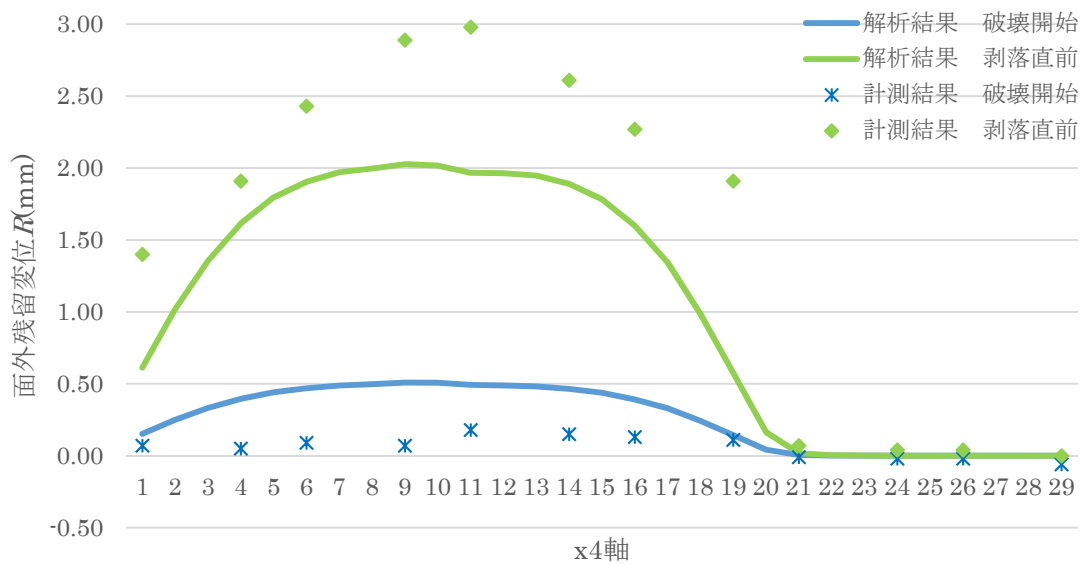


図 4-58 解析結果と計測結果の比較
(A 試験体(補修なし)浮 3×2・目地 M・x4)

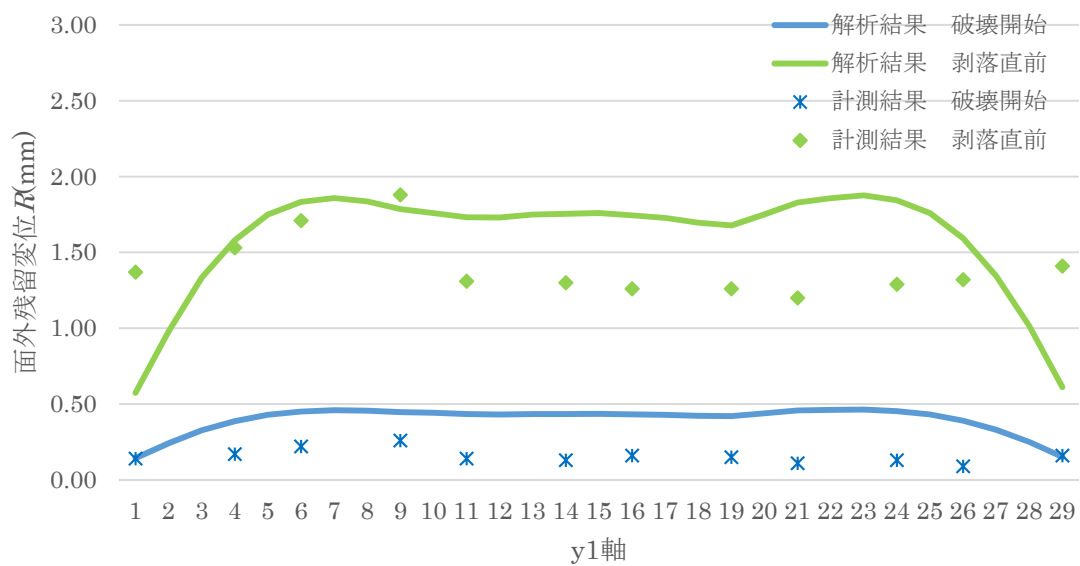


図 4-59 解析結果と計測結果の比較
(A 試験体(補修なし)浮 3×2・目地 M・y1)

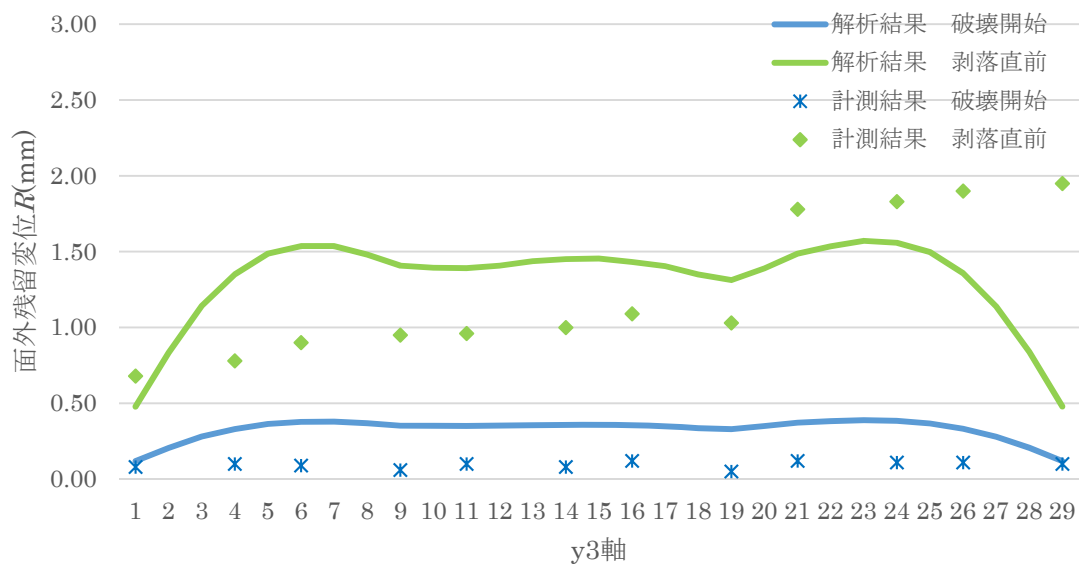


図 4-60 解析結果と計測結果の比較
(A 試験体(補修なし)浮 3×2・目地 M・y3)

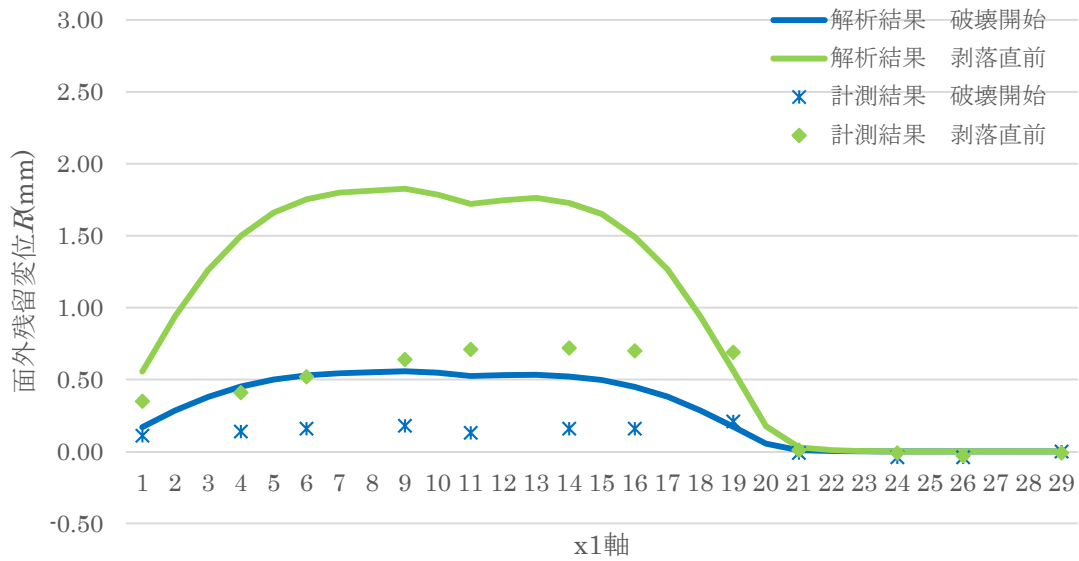


図 4-61 解析結果と計測結果の比較
(A 試験体(補修なし)浮 2×2・目地 L・x1)

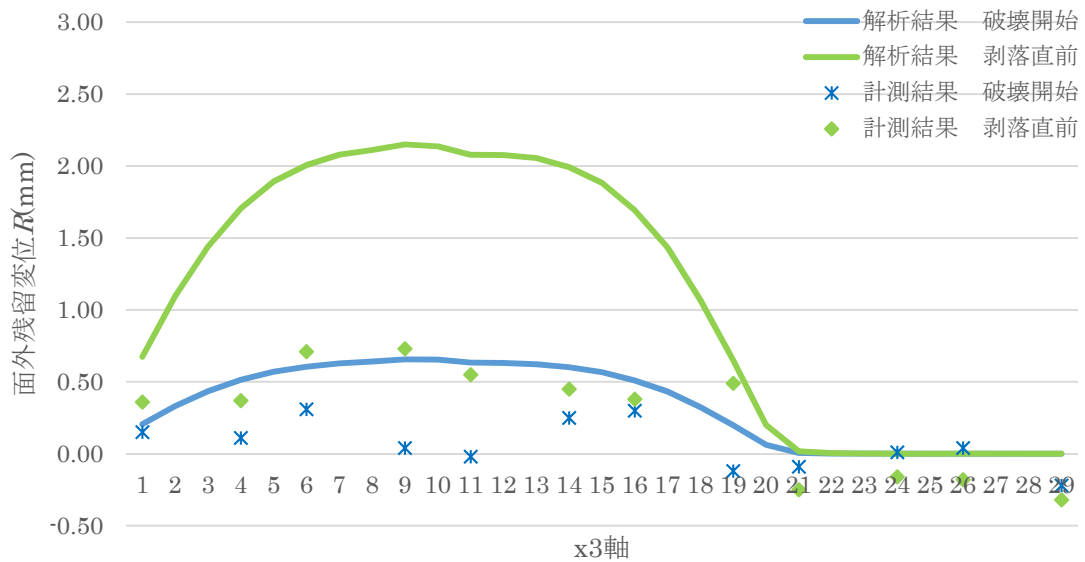


図 4-62 解析結果と計測結果の比較
(A 試験体(補修なし)浮 2×2・目地 L・x3)

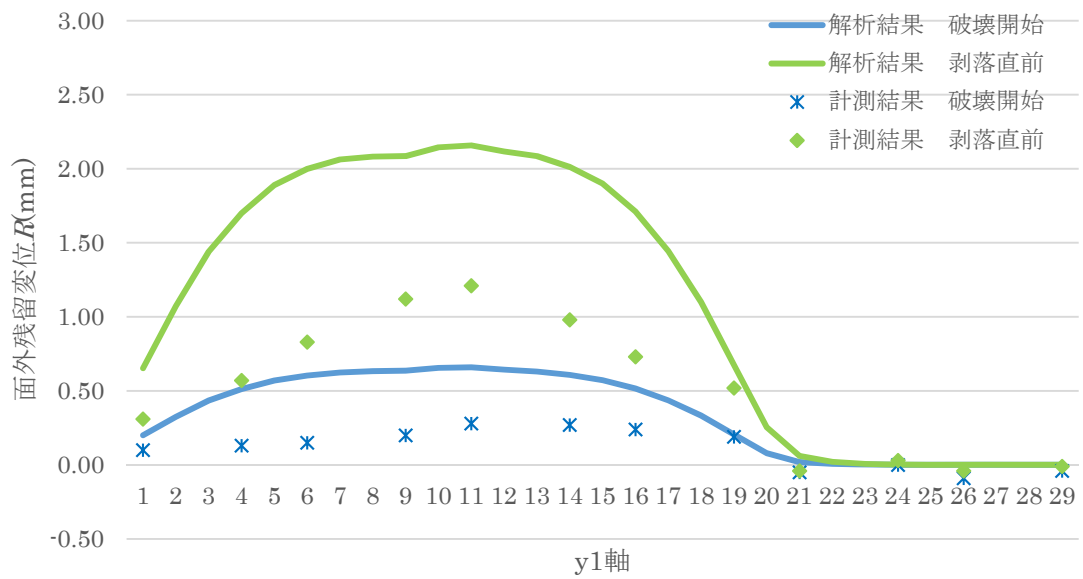


図 4-63 解析結果と計測結果の比較
(A 試験体(補修なし)浮 2×2・目地 L・y1)

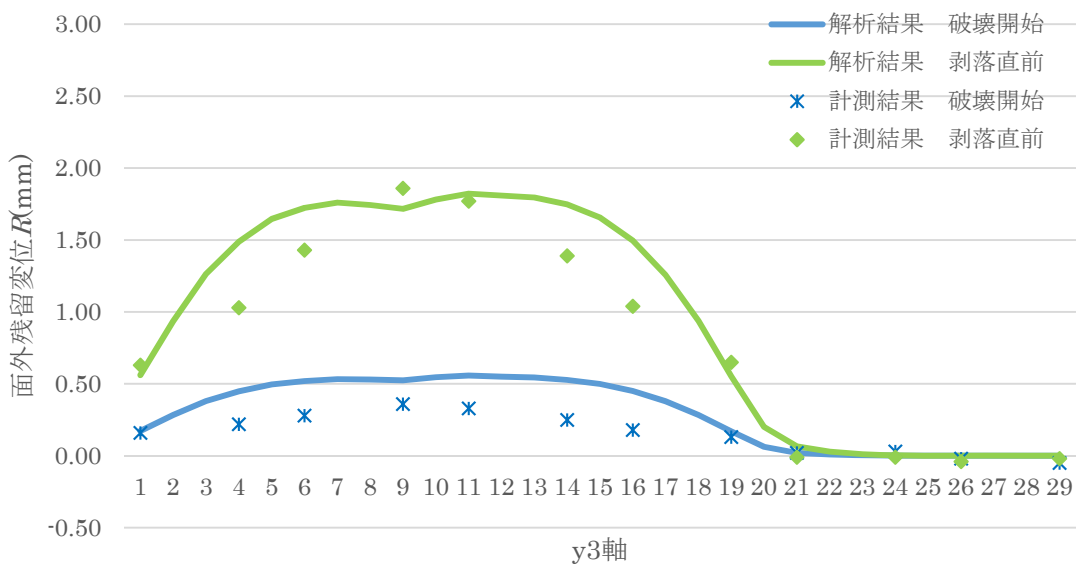


図 4-64 解析結果と計測結果の比較
(A 試験体(補修なし)浮 2×2・目地 L・y3)

A試験体(補修なし)の補正係数 α を用いて解析結果と計測結果の比較図を、図4-53～図4-56に浮 3×3 ・目地M、図4-57～図4-60に浮 3×2 ・目地M、図4-61～図4-64に浮 2×2 ・目地Lを示す。

図4-53～図4-56に示す浮 3×3 ・目地Mの場合、破壊直前はあまり相関が見られないが、破壊開始時は比較的良い相関がみられる。また浮タイルの剥落が局所的に生じ浮き部分の変形が均一に起きていないと考えられる。

図4-57～図4-60に浮 3×2 ・目地Mの場合、破壊直前はあまり相関が見られないが、破壊開始時は比較的良い相関がみられる。数値は違うが、同様の面外残留変位の形状となっており解析結果と相似している。

図4-61～図4-64に浮 2×2 ・目地Lの場合、数値は違うが、同様の面外残留変位の形状となっており解析結果と相似している。解析結果が図4-64のy3についてはかなり相似した形状となった。

全体的に面外残留変位 R は計測結果と比較すると解析結果よりも小さくなった。その理由は静的な解析に対して実験では動的荷重が大きく見かけの剛性が大きくなり変形が小さくなったためと考えられる

破壊直前はあまり相関がないが計測結果では浮き部分個々のタイル剥落が局所的に生じ浮き部分の変形が均一に起きていないためと考えられる。

4.4 まとめ

目地変位推定シミュレーションに構造解析プログラムソフトウェアを用いて解析を行った。本章で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 3D解析による浮きタイルの変形シミュレーション方法を提案した。
- (2) 残留変形の計測結果と解析結果の比較では、破壊開始時は比較的良い相関がある。
- (3) 破壊直前はあまり相関がないが計測結果では浮き部分個々のタイル剥落が局所的に生じ浮き部分の変形が均一に起きていないためと考えられる。
- (4) 残留変形の計測結果は解析結果よりも小さくなった。その理由は静的な解析に対して実験では動的荷重が大きく見かけの剛性が大きくなり変形が小さくなったためと考えられる。
- (5) 浮きタイル周辺部分の残留変形の分布を求めた結果、残留変形の分布は端で小さく中央に凸となる傾向があり、解析結果は計測結果と類似した分布形状となった。

参考文献

- 1) 一般社団法人 **FrontISTR Commons** : **FrontISTR** について、オープンソース大規模並列 **FEM** 非線形構造解析プログラム、<https://www.frontistr.com/>[アクセス日]2022.01.21
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018

第5章 タイル仕上面に対する補強方法の有効性の検討

5.1 補強方法について

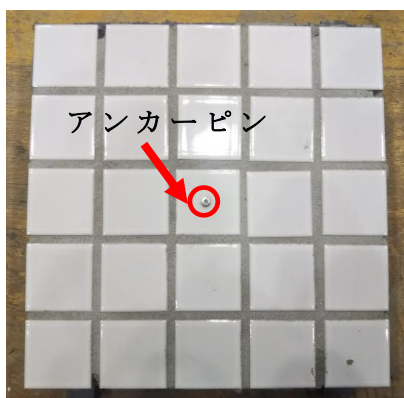
第3章にてA試験体（補修なし）の動的衝撃試験を行い目地の強度の違いで剥落に影響を及ぼすことを示した。そこで浮きタイルの剥落防止を抑制する補強方法として、アンカーピン固定工法とピンネット工法についての有効性を検討する。それぞれの工法について下記に示す。

B試験体：タイル浮き+アンカーピン打ち（アンカーピン固定工法）

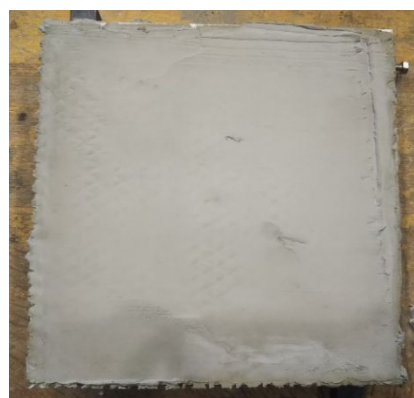
C試験体：タイル浮き+ピンネット工法（ピンネット工法）

B試験体（アンカーピン固定工法）は、アンカーピンは直径5mm・長さ35mm・SUS303製の芯棒打ち込み式のものを使用し、タイル中心部に削孔して打ち込み、タイルを直接固定するアンカーピン固定工法を施したものである。

C試験体（ピンネット工法）は、セメント系フィラーを用いて繊維補強面材であるビニロン系ネットを埋め込み、その上からアンカーピンは直径6mm・長さ30mm・SUS304製の芯棒打ち込み式のものをタイル中心部に削孔し打ち込みさらにその上からセメント系フィラーにて仕上塗りをするピンネット工法を施したものである。試験体を写真5-1に、タイル浮きタイプを図5-1に示す。



B試験体
(アンカーピン固定工法)



C試験体
(ピンネット工法)

写真5-1 試験体

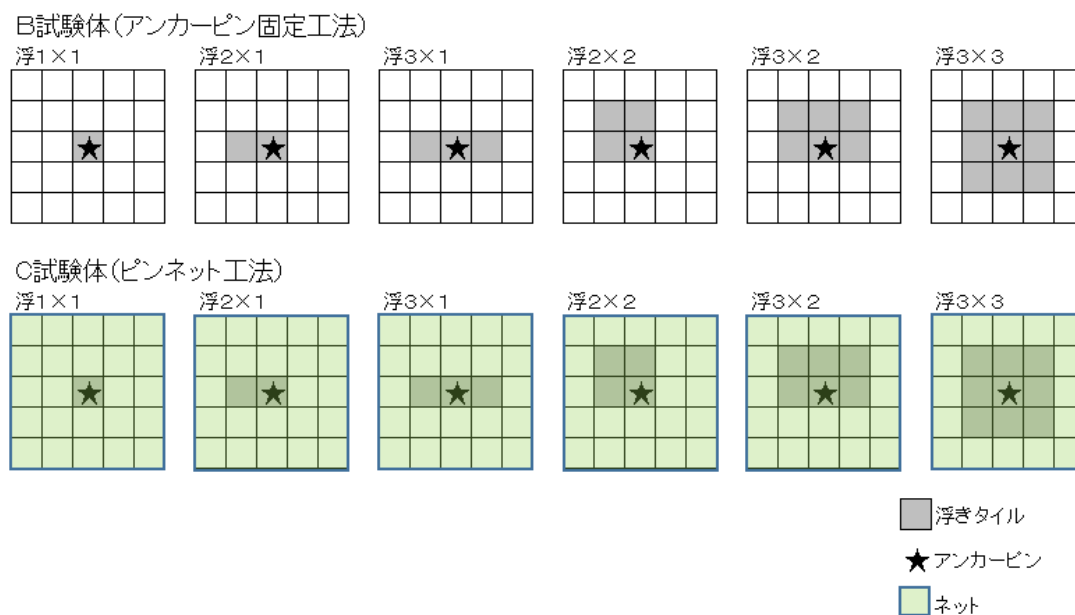


図 5-1 タイル浮きタイプ

5.2 動的衝撃試験の結果

A 試験体（補修なし）と同様に B 試験体（アンカーピン固定工法）・C 試験体（ピンネット工法）においても、動的衝撃試験を行い浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t と面外残留変位 R についての関係を計測した。その結果を以下に示す。

5.2.1 浮きタイルの面外残留変位 R の結果

浮きタイプにおける目地 H, M, L の違いによるそれぞれの累積浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t と浮きタイル面外残留変位 R の測定結果を B 試験体（アンカーピン固定工法）については図 5-2～図 5-7 に、C 試験体（ピンネット工法）については図 5-8～図 5-13 に示す。

A 試験体（補修なし）と同様に B 試験体（アンカーピン固定工法）と C 試験体（ピンネット工法）についても、浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t は、各浮きタイプ・高さごとの値を求めた表 3-3 を用いる。

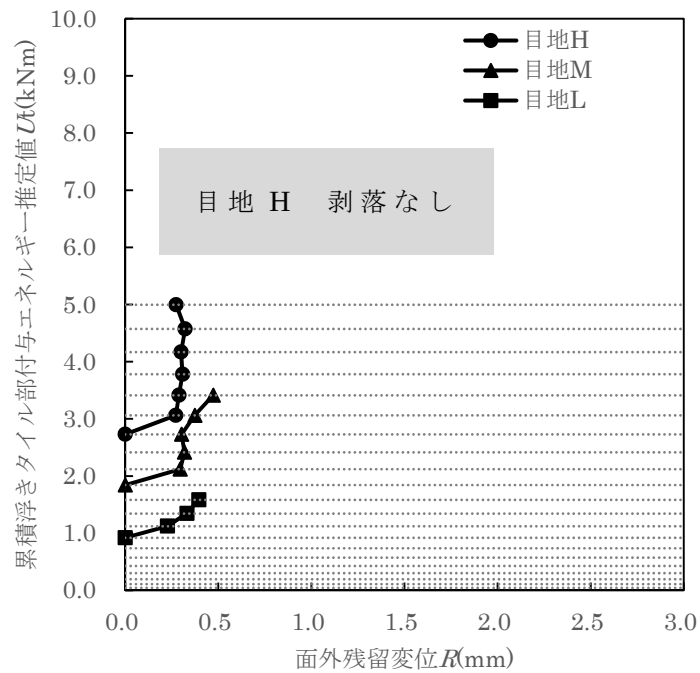


図 5-2 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(B 試験体(アンカーピン固定工法)・浮 1×1)

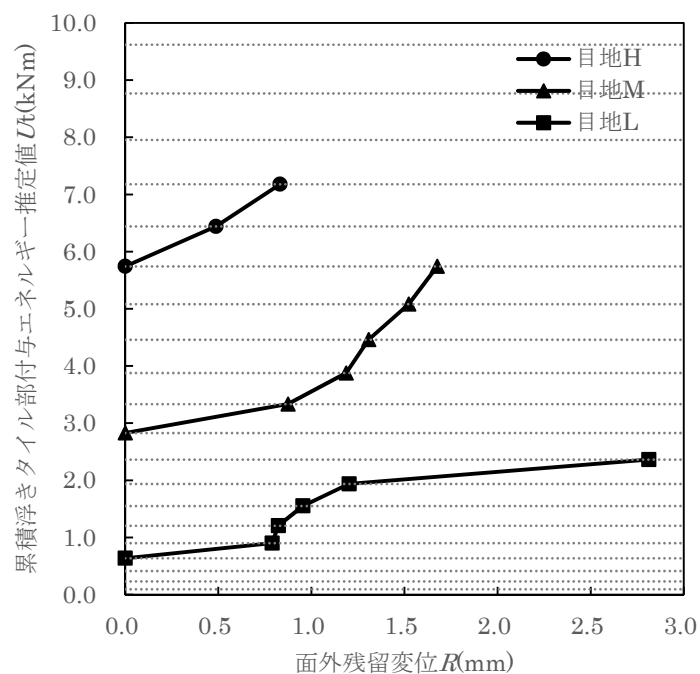


図 5-3 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(B 試験体(アンカーピン固定工法)・浮 2×1)

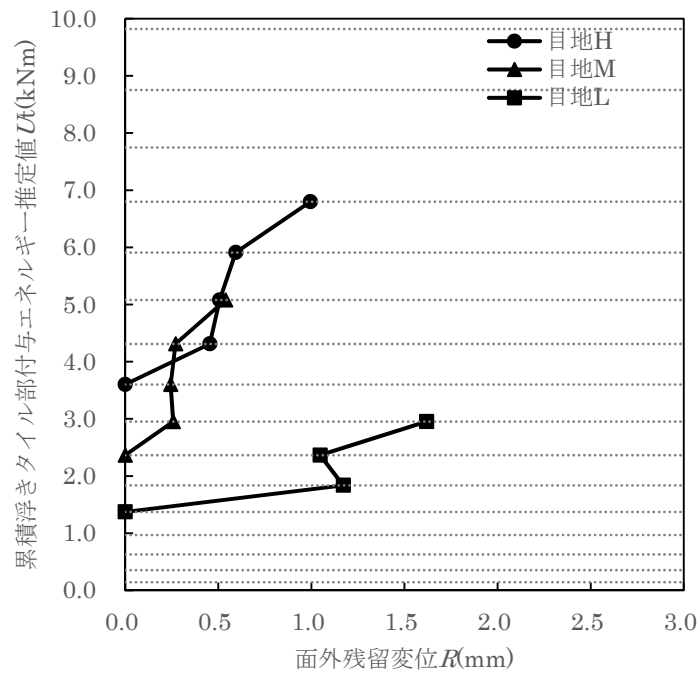


図 5-4 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(B 試験体 (アンカーピン固定工法)・浮 3×1)

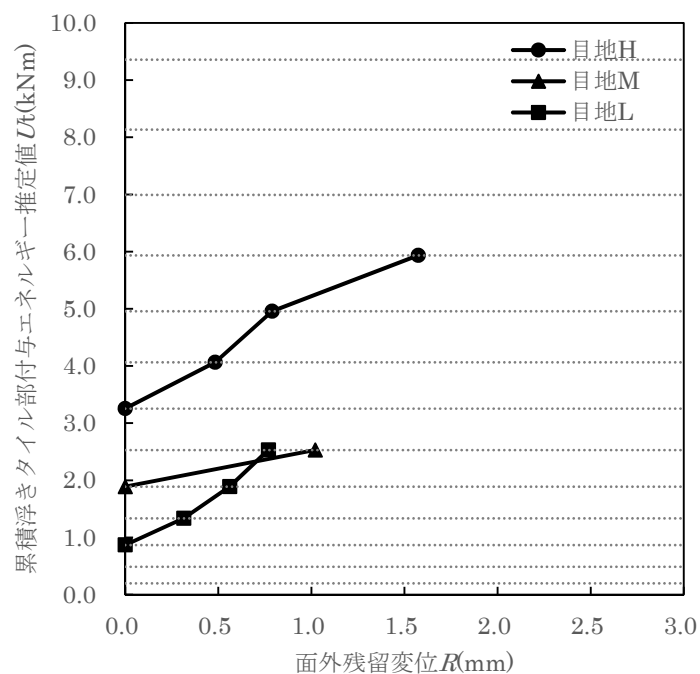


図 5-5 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(B 試験体 (アンカーピン固定工法)・浮 2×2)

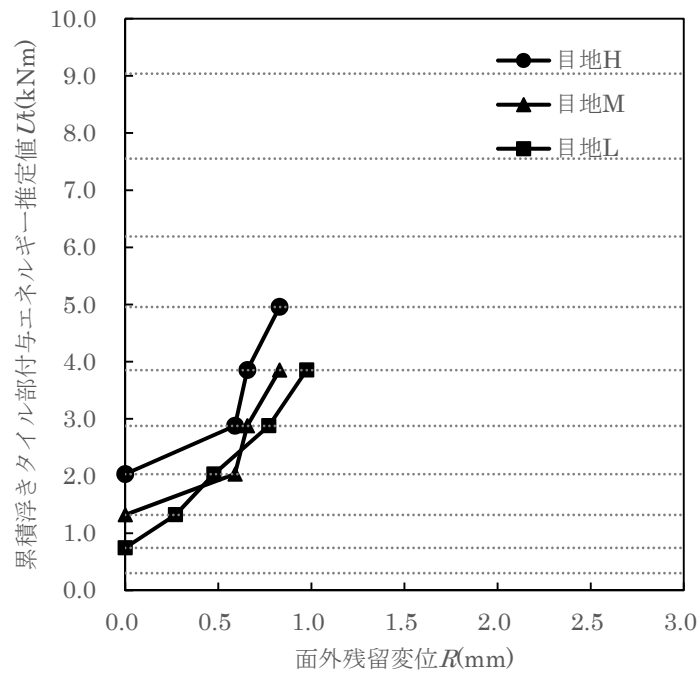


図 5-6 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(B 試験体 (アンカーピン固定工法)・浮 3×2)

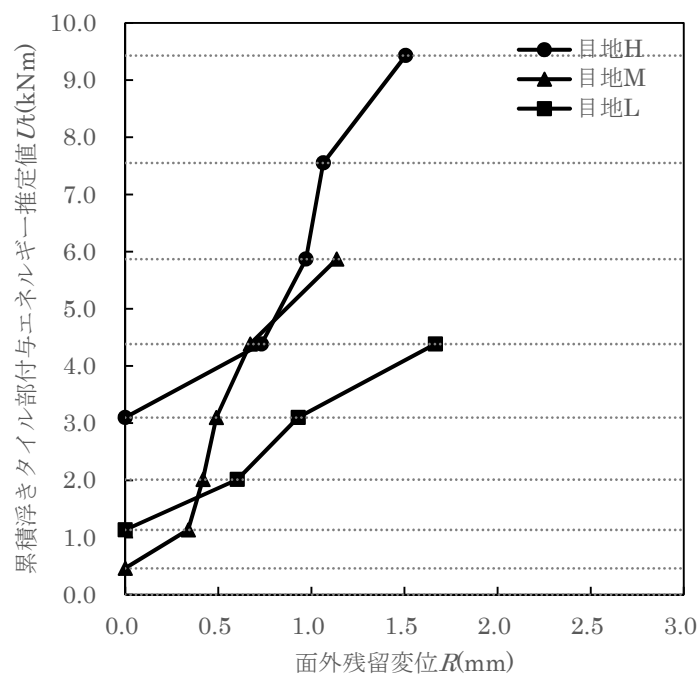


図 5-7 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(B 試験体 (アンカーピン固定工法)・浮 3×3)

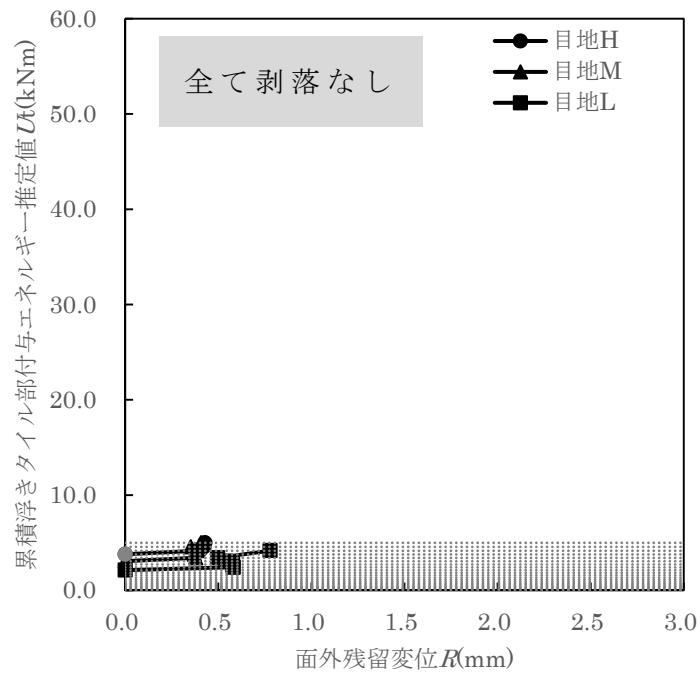


図 5-8 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(C 試験体(ピンネット工法)・浮 1×1)

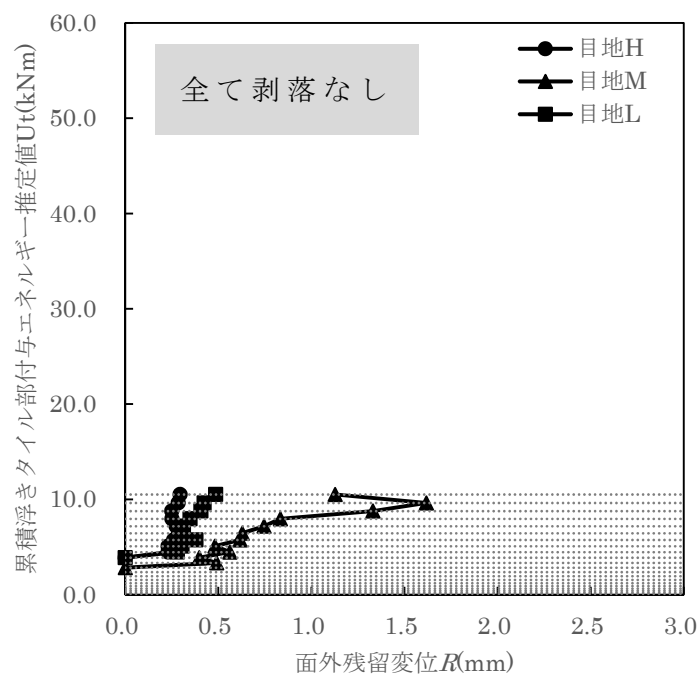


図 5-9 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(C 試験体(ピンネット工法)・浮 2×1)

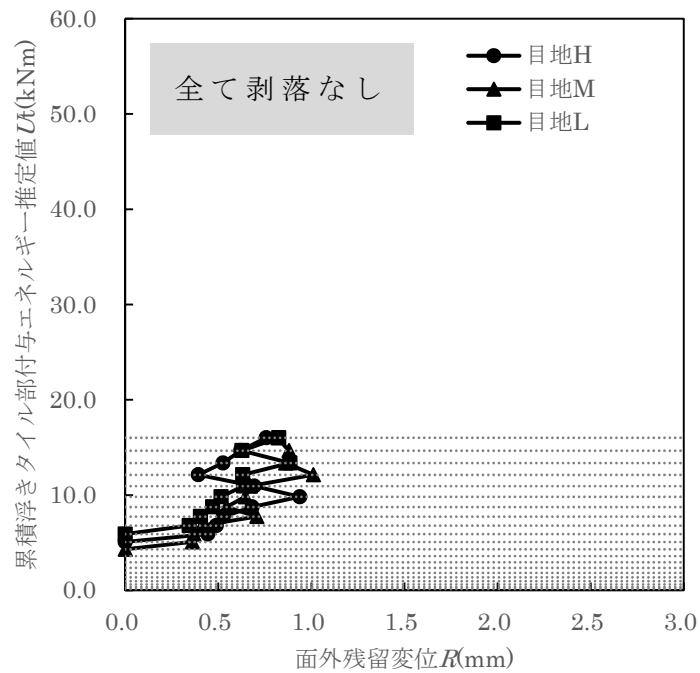


図 5-10 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(C 試験体 (ピンネット工法) ・浮 3×1)

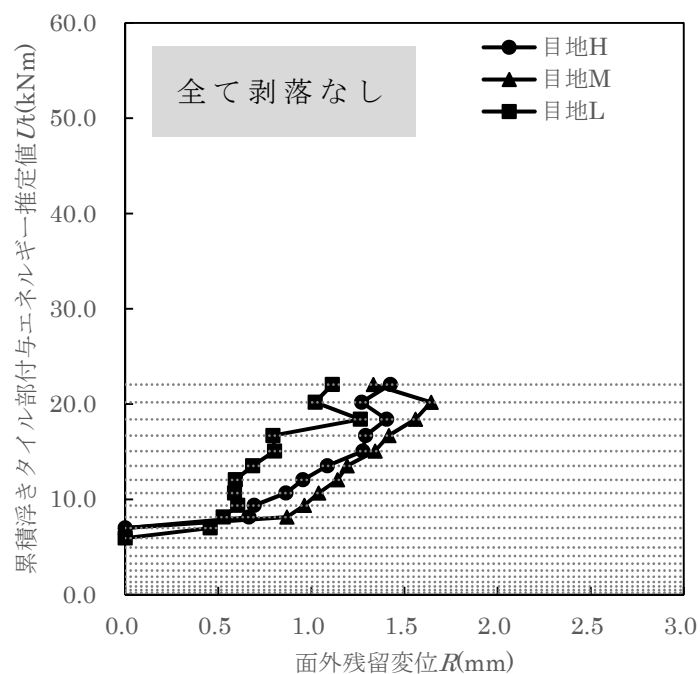


図 5-11 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(C 試験体 (ピンネット工法) ・浮 2×2)

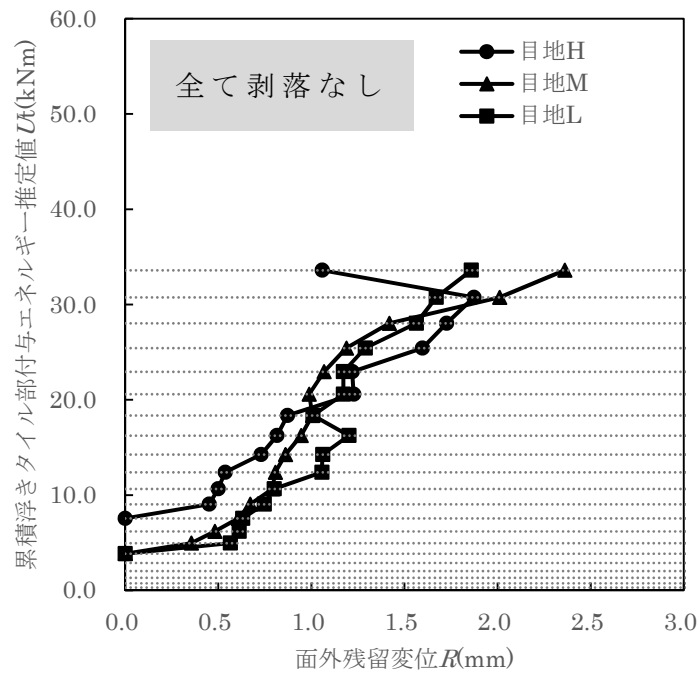


図 5-12 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(C 試験体 (ピンネット工法) ・浮 3×2)

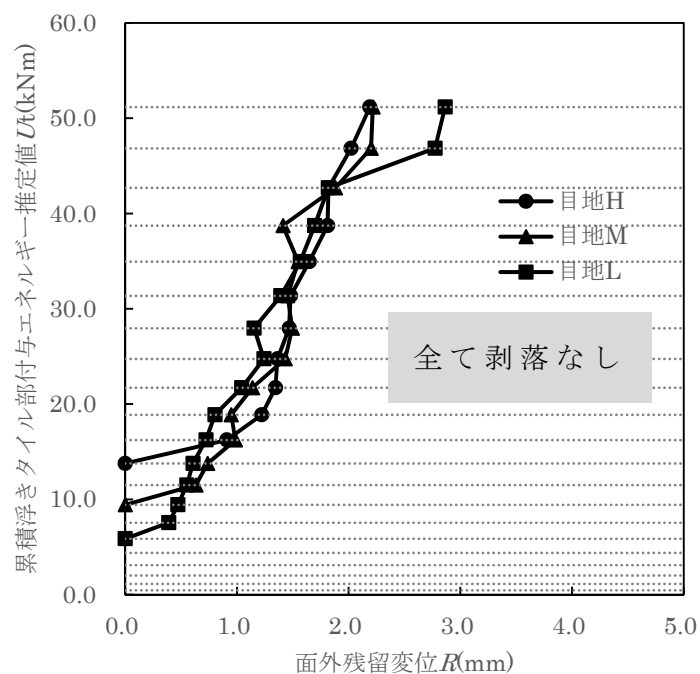


図 5-13 累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と面外残留変位 R の関係
(C 試験体 (ピンネット工法) ・浮 3×3)

B試験体（アンカーピン固定工法）においては、中央の浮きタイルにアンカーピンにて固定していることから、浮 1×1 についてはどの目地の場合においても面外残留変位 R は小さい値となっている。また浮 1×1・目地 H については、落下高さ 110cm において浮タイルの剥落が生じず、目地 M、目地 L については剥落が生じた。

次に浮 2×1～浮 3×2 については、浮きタイルの枚数が多いほど剥離始めてから剥落するまでの面外残留変位 R が、小さい値となる傾向がある。これは、アンカーピンで浮きタイルを固定しているので浮きタイルの面外残留変位 R が抑制されていると考えられる。

浮 3×3 は、剥落するまでの累積浮きタイル部付与エネルギー Ut がその他の浮きタイプより比較的大きい値となっている。これは、浮きタイル 9 枚の中央部をアンカーピン固定されていることで均等に付与エネルギーが分散されているからと考えられる。

浮きタイルが剥落した浮きタイル部付与エネルギー推定値 Ut は、目地 H が最も高く、次に目地 M で目地 L が低い傾向になっている。この結果より目地強度が大きいと浮きタイルの剥落を防止することが出来ると考えられる。

A試験体（補修なし）でも見られたが、浮きタイルが剥落した時の面外残留変位 R は、目地 L > 目地 H > 目地 M となっている。目地について、剥落時の浮きタイル部付与エネルギー推定値 Ut は低いですが、面外残留変位 R については目地の強度と比例しない場合があることが確認された。

また B試験体（アンカーピン固定工法）の多くは、アンカーピンで固定された浮きタイルが、周囲の浮きタイルと比較して遅れて剥落する傾向にあった。また、その浮きタイルはアンカーピンの刺さった部分からひび割れが発生、落下高さを高くしていくにつれて割れて剥落する場合が多くみられた。これは動的荷重 F が大きくなるにつれて、浮きタイル自体に浮きタイル部付与エネルギー U が直接的にかかるため削孔している浮きタイルは、その他の浮きタイルよりタイル自体の強度が低下しているためではないかと考えられる。

一例として、B試験体（アンカーピン固定工法）の浮 2×2・目地 M の 4

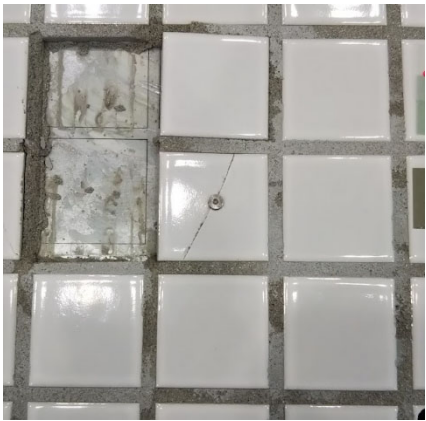
枚浮きの試験体におけるタイル剥落過程を写真 5-2 に示す。(a)35cm 落下時にアンカーピンで固定したタイルにひび割れた発生しているが、浮きタイルが一部剥落し始めた(b)40cm 落下時にはアンカーピンで固定していない浮きタイルから剥落し始めている。さらに(c)45cm 落下時には、アンカーピン固定していない浮きタイルが剥落する中でひび割れを発生し割れた浮きタイルの一部が剥落している。これは割れた浮きタイルの一部を支えていた目地が剥落したことによるものであると考えられる。さらに浮きタイル部付与エネルギーを加えた(f)70cm 落下時においてすべての浮きタイルが剥落している。このことより浮きタイルを目地が支えており、浮きタイルの剥落防止には目地の存在が重要であると考えられる。



(a) 35 cm 落下時



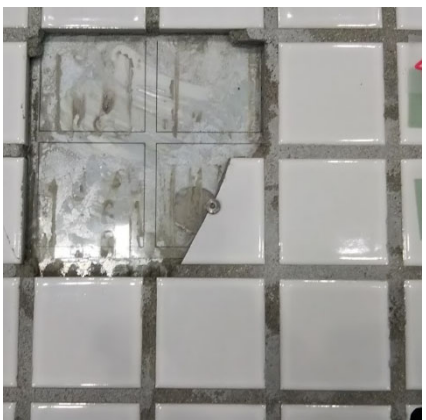
(d) 60 cm 落下時



(b) 40 cm 落下時



(f) 70 cm 落下時



(c) 45 cm 落下時

写真 5-2 タイル剥落過程

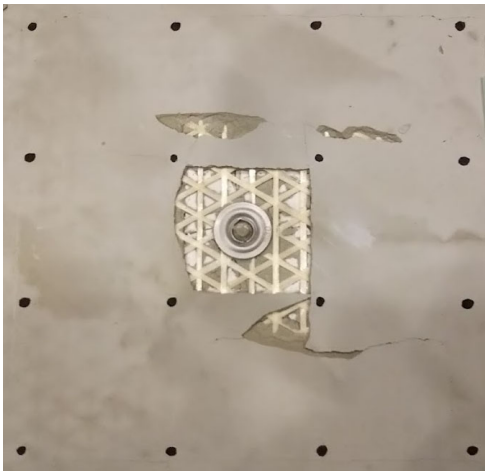
(B 試験体 (アンカーピン固定工法)・浮 2×2・目地 M)

またC試験体（ピンネット工法）は、セメント系フィラーを用いてビニロン系ネットを埋め込み、その上からアンカーピンで固定したその上からセメント系フィラーにて仕上げるピンネット工法である。C試験体（ピンネット工法）の試験体の剥離・剥落の様子について考察する。

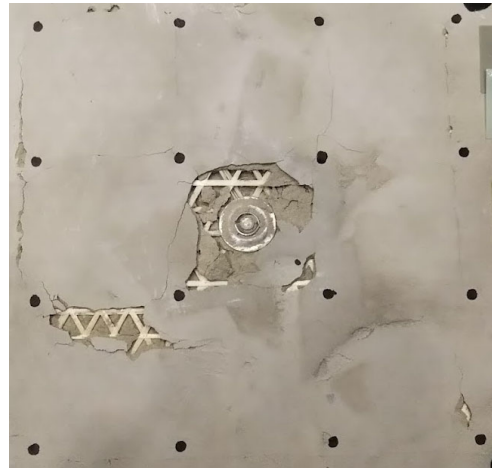
C試験体（ピンネット工法）について、浮きタイル枚数の少ない浮き1×1、浮き2×1については目地強度の違いにより面外残留変位 R に差が見られるが浮きタイル枚数が多くなれるほど、目地強度の違いによる面外残留変位 R に差が出なくなる傾向が見られた。これはネットで面的な繋がりが形成され付与エネルギーが均等に分散されることが要因と考えられる。全ての試験体において、最大落下高さである110cmから動的衝撃試験を行なっても浮きタイルが剥落することはなかったが、浮きタイル部分の面外残留変位 R には変化が見られた。また、表面の仕上モルタルにひびが入り一部が剥落した。表面の仕上モルタルは、アンカーピンの部分や各浮きタイルの周囲からひびが入る傾向にあり、その様子は、目地強度が最も弱い目地の試験体で特に顕著に見られた。C試験体（ピンネット工法）の各試験体においては、浮きタイル部分が全面的に浮き上がってきているがタイルの剥落はしていない。写真5-3に示すように浮きタイルが9枚である浮き3×3の試験体は、中央に近いほど浮きが大きく、山のような形になって剥落はしていないが面外残留変位 R が特に大きいことが分かる。



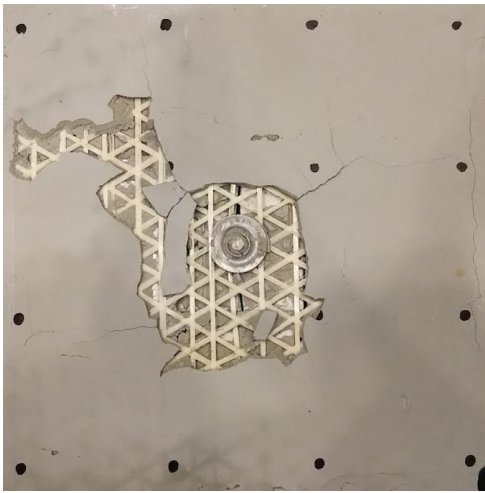
写真 5-3 C試験体・浮き3×3・目地Lの110cm落下後の表面



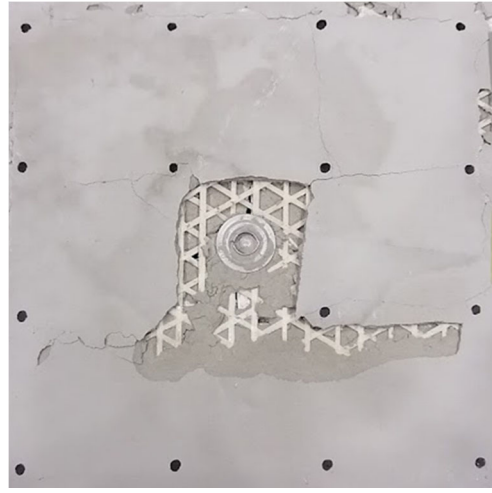
(a) 浮 1×1



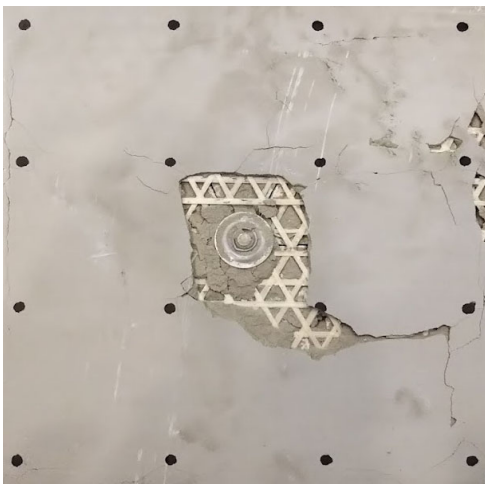
(d) 浮 2×2



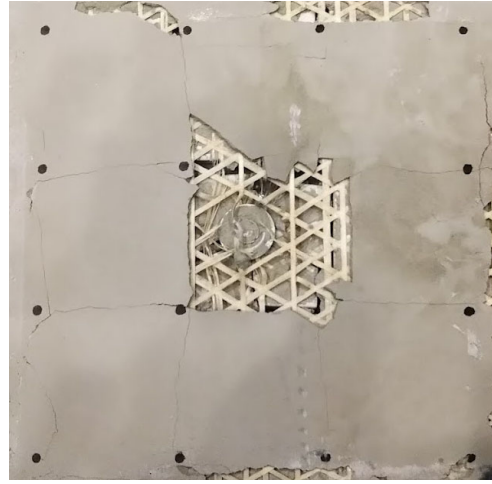
(b) 浮 2×1



(e) 浮 3×2



(c) 浮 3×1



(f) 浮 3×3

写真 5-4 C 試験体（ピンネット工法）の最大高さ 110cm 落下後の試験体

写真 5-4 に最大落下高さ 110cm から落下後の各浮きタイプの試験体の状況を示す。浮きタイプにおいても剥落は発生しておらず、浮きタイル部分の仕上モルタルが剥落している。

以上の結果から、C 試験体（ピンネット工法）であるピンネット工法では表面のモルタルが剥離・剥落することはあってもタイルの剥落は起こらず、特に剥落の起こりやすい浮き 3×3・目地 L の試験体においても大きな浮きが発生するのみで剥落には至らなかった。したがって C 試験体（ピンネット工法）はタイルの剥離・剥落が発生するのを防止するのに大きな役割を果たすと考えられる。

次に、A 試験体（補修なし）・B 試験体（アンカーピン固定工法）・C 試験体（ピンネット工法）の累積浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t と面外残留変位 R について考察する。累積浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t と面外残留変位 R との関係は、それぞれ線形比例的な傾向が見られた。先にも述べたように、C 試験体（ピンネット工法）はどの浮きタイプ・目地において剥落が生じていないことから、面外残留変位 R は小さく、累積浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t は大きい傾向が顕著に表れている。

表 5-1 タイル剥落直前の落下高さ

浮き形	A試験体			B試験体		
	目地a	目地b	目地c	目地a	目地b	目地c
1	90	85	45	110	100	65
2	65	50	40	95	85	50
3	75	70	45	70	60	40
4	60	45	35	55	40	35
5	55	35	30	50	35	35
6	40	30	30	45	35	30

単位(cm)

表 5-1 にタイル剥落直前の落下高さを示す。A 試験体（補修なし）と B 試験体（アンカーピン固定工法）の剥落直前の高さの結果を比較すると、目地 H より目地 M・目地 L の試験体で浮きタイルが多い場合は、あまり大きな差異が出ていないが B 試験体（アンカーピン固定工法）の方が大きい傾向となっている。B 試験体（アンカーピン固定工法）がタイルの剥離・剥落の防止策として有効な手段であると考えられる。

次に B 試験体（アンカーピン固定工法）・C 試験体（ピンネット工法）の剥落直前の面外残留変位 R の概要を 3D スキャナーで計測した結果について、図 5-14～図 5-17 に示す。3D スキャンで得られたデータから図 3-5 で示した各算出対象点の変位を求めて色付けしている。

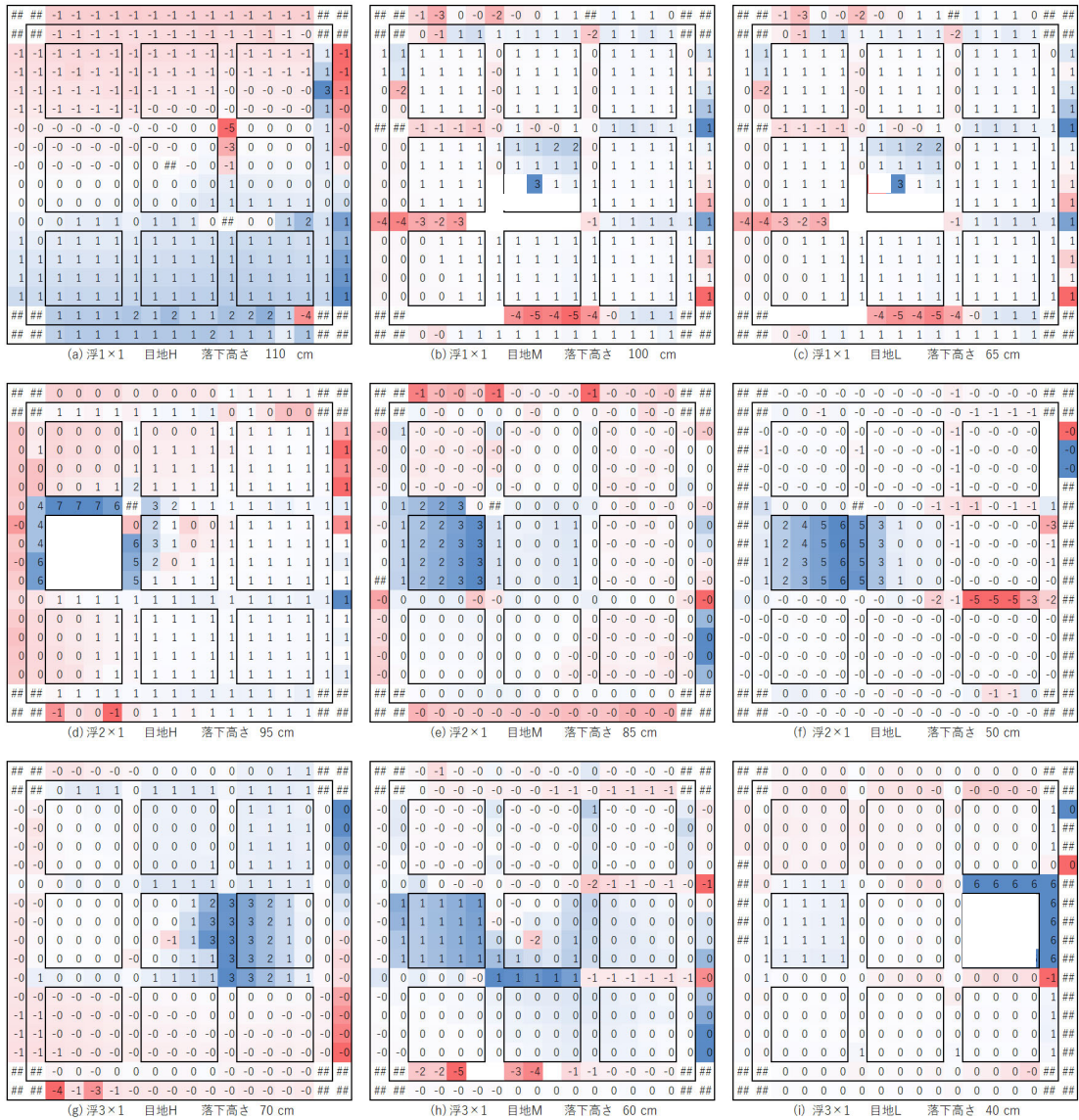


図 5-14 剥落直前の面外残留変位 R の概要(変位 1 mm 刻みで示す)
(B 試験体 (アンカーピン固定工法) - 浮 1×1~浮 3×1)

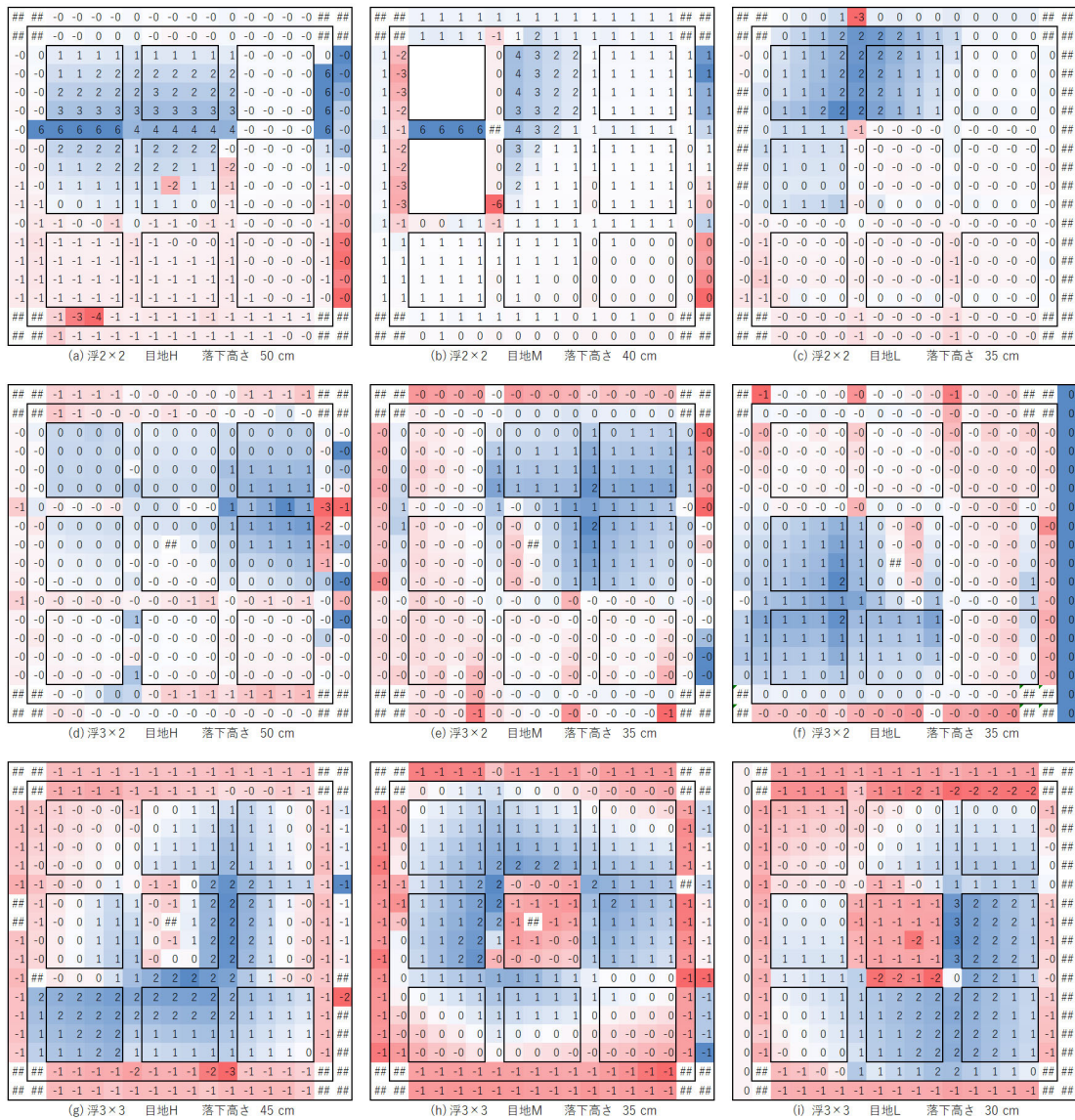
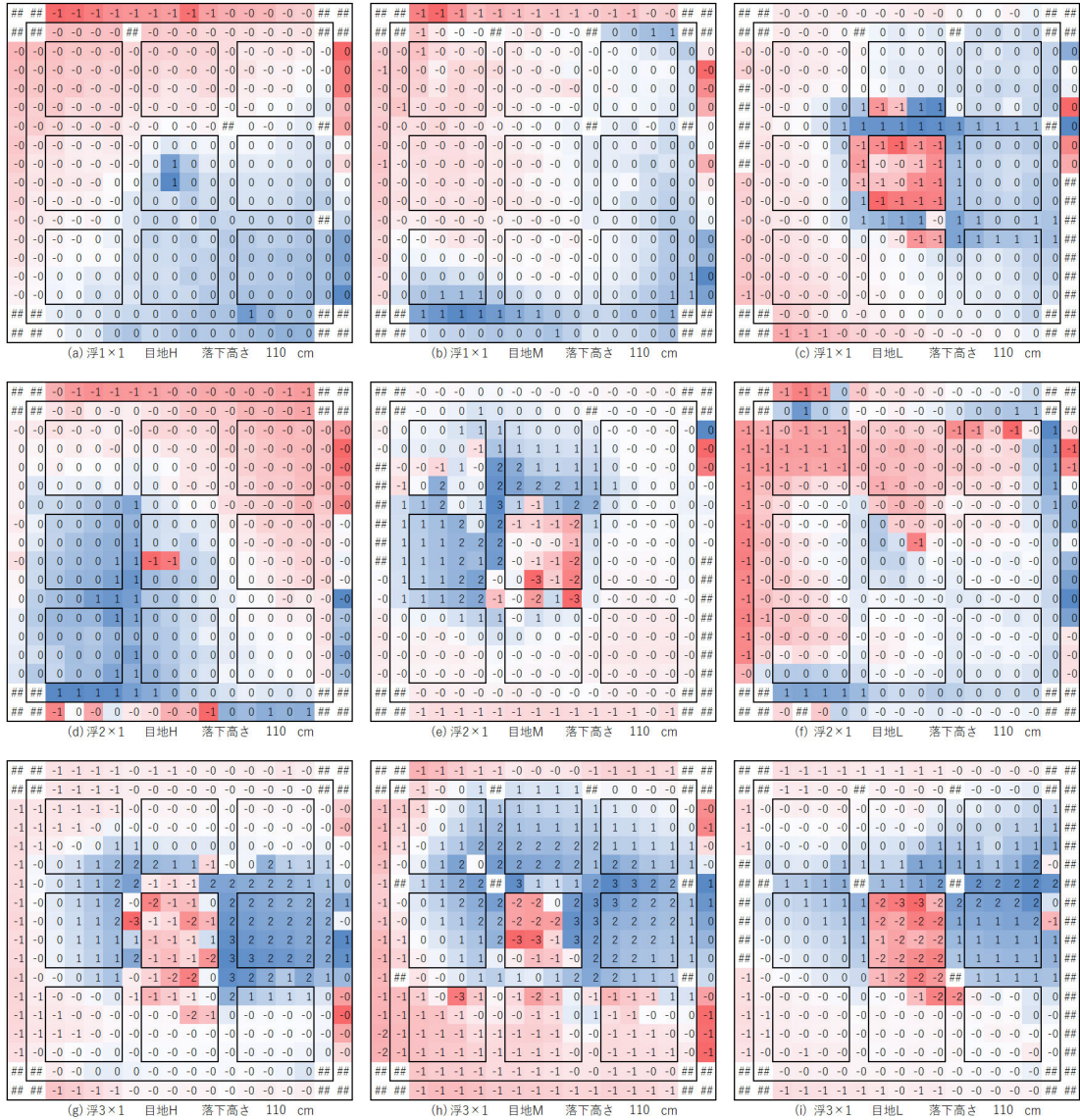


図 5-15 剥落直前の面外残留変位 R の概要(変位 1 mm 刻みで示す)

(B 試験体 (アンカーピン固定工法) - 浮 2×2~ 浮 3×3)



凡例 数字：0.5mm 四捨五入

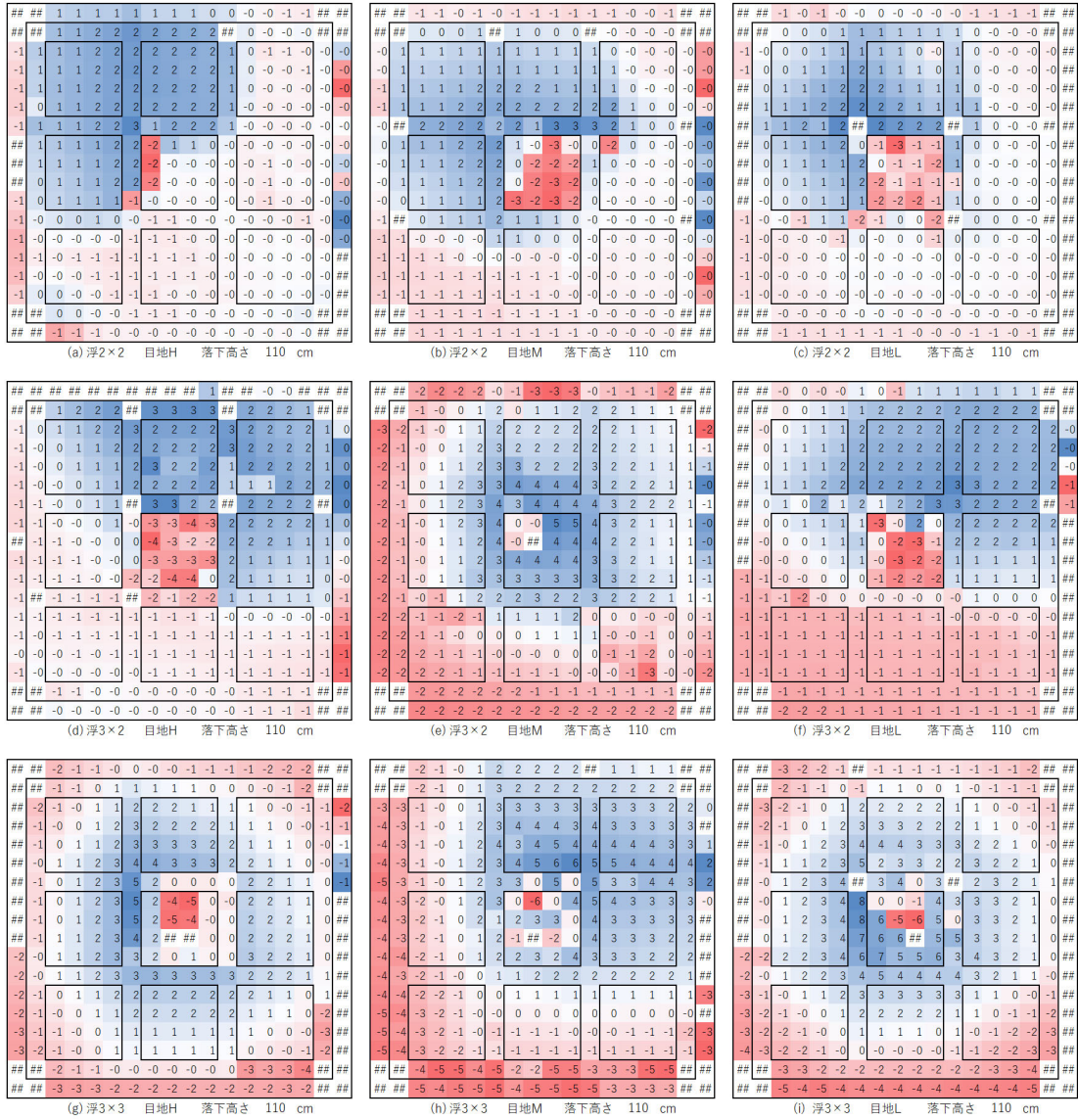
青色：面外残留変位プラス

赤色：面外残留変位マイナス

#：計測不可

図 5-16 剥落直前の面外残留変位 R の概要(変位 1 mm 刻みで示す)

(C 試験体 (ピンネット工法) - 浮 1×1~浮 3×1)



凡例 数字：0.5mm 四捨五入

青色：面外残留変位プラス

赤色：面外残留変位マイナス

#：計測不可

図 5-17 剥落直前の面外残留変位 R の概要(変位 1 mm 刻みで示す)

(C 試験体 (ピンネット工法) - 浮 2×2~ 浮 3×3)

5.2.2 破壊開始時付与エネルギー U_0 の比較

B試験体（アンカーピン固定工法）、C試験体（ピンネット工法）について3.1.4.2のA試験体（補修なし）と同様に、累積浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t と面外残留変形の関係の図より、面外残留変位 R が最初に発生した際の浮きタイル部付与エネルギー推定値 U_t を破壊開始時付与エネルギー U_0 と定義し検討する。

B試験体（アンカーピン固定工法）とC試験体（ピンネット工法）の破壊開始時付与エネルギー U_0 について表5-2、図5-18、図5-19に、それぞれの試験体の比較を図5-20示す。

表5-2 破壊開始時付与エネルギー U_0

浮タイプ	目地	破壊開始時付与エネルギー(Nm)	
		B試験体	C試験体
浮1×1	H	332.36	386.88
	M	277.20	350.60
	L	202.40	295.66
浮2×1	H	699.10	583.07
	M	504.83	504.83
	L	264.10	583.07
浮3×1	H	709.54	829.45
	M	588.19	769.66
	L	465.05	888.94
浮2×2	H	809.55	1141.61
	M	640.07	1141.61
	L	467.35	1059.32
浮3×2	H	844.26	1487.75
	M	711.98	1104.74
	L	577.94	1104.74
浮3×3	H	1285.88	2457.95
	M	672.71	2072.82
	L	880.25	1682.60

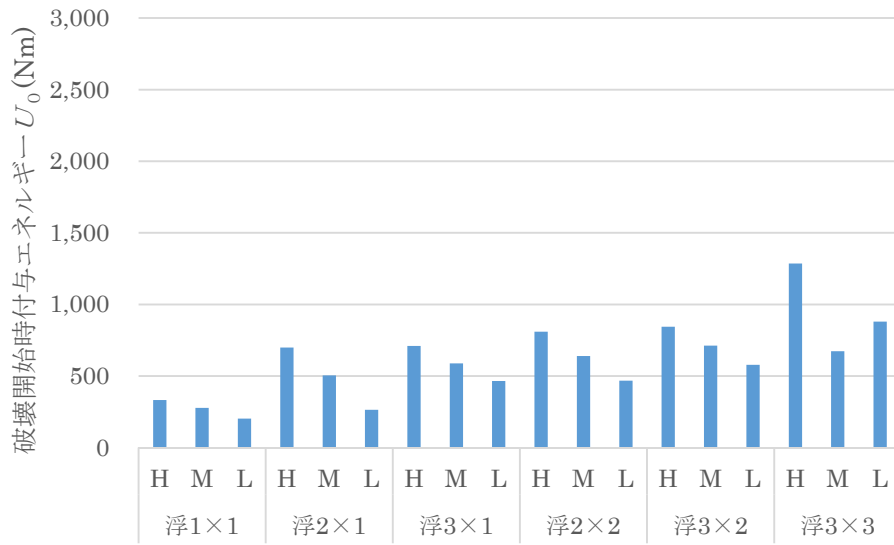


図 5-18 B 試験体(アンカーピン固定工法)の破壊開始付与エネルギー U_0

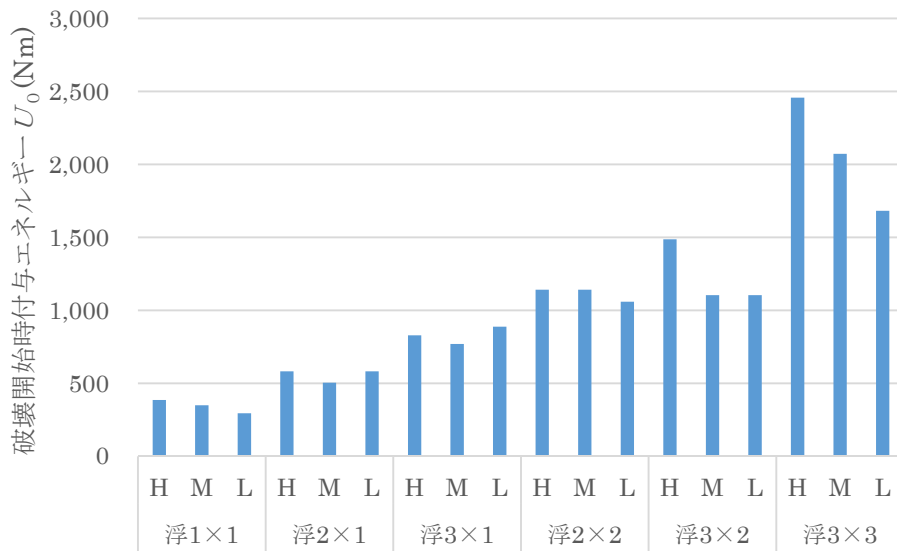


図 5-19 C 試験体(ピンネット工法)の破壊開始付与エネルギー U_0

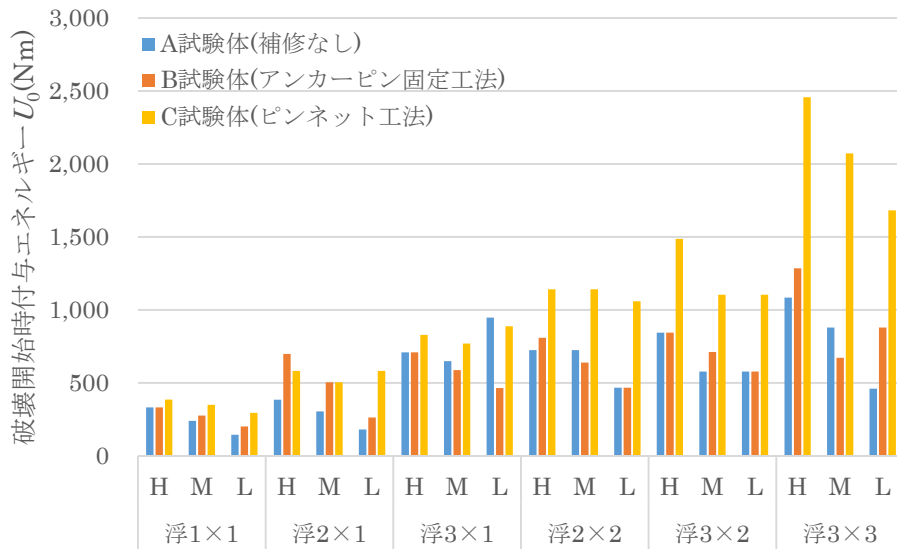


図 5-20 破壊開始時付与エネルギー U_0 の比較

破壊開始時付与エネルギー U_0 の結果を見ると、A 試験体（補修なし）と同様に B 試験体（アンカーピン固定工法）も C 試験体（ピンネット工法）についても浮きタイル枚数が多くなるほど、また目地強度が多きほど破壊開始時付与エネルギー U_0 が大きくなる傾向が見られた。

また図 5-20 に、それぞれの破壊開始時付与エネルギー U_0 について A 試験体（補修なし）、B 試験体（アンカーピン固定工法）、C 試験体（ピンネット工法）の比較の図を示す。比較すると、A 試験体（補修なし）と B 試験体（アンカーピン固定工法）はあまり顕著な差は見られなかった。C 試験体（ピンネット工法）については A 試験体（補修なし）と B 試験体（アンカーピン固定工法）より破壊開始時付与エネルギー U_0 が大きくなる傾向が見られた。また目地強度の違いについては、目地強度が大きいほど破壊開始時付与エネルギー U_0 が大きくなる傾向が見られた。

この比較結果からも、目地強度が大きいほど破壊開始時付与エネルギー U_0 が大きく、浮き枚数が多いほど破壊開始時付与エネルギー U_0 が大きくなる傾向が見られた。

次に B 試験体（アンカーピン固定工法）と C 試験体（ピンネット工法）の破壊開始時付与エネルギー U_0 と目地圧縮強度 F_c の関係を図 5-21、図 5-22 に示す。

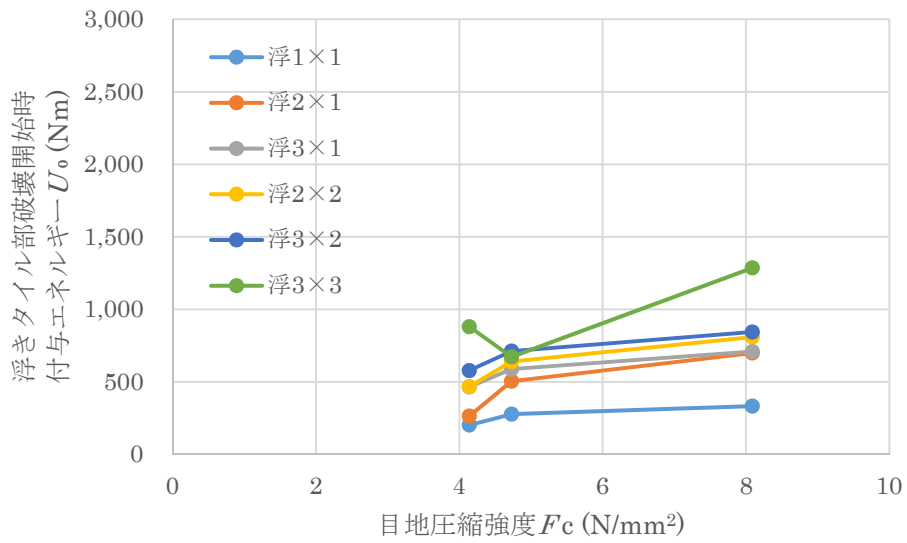


図 5-21 破壊開始時付与エネルギー U_0 と目地圧縮強度 F_c の関係
(B 試験体 (アンカーピン固定工法))

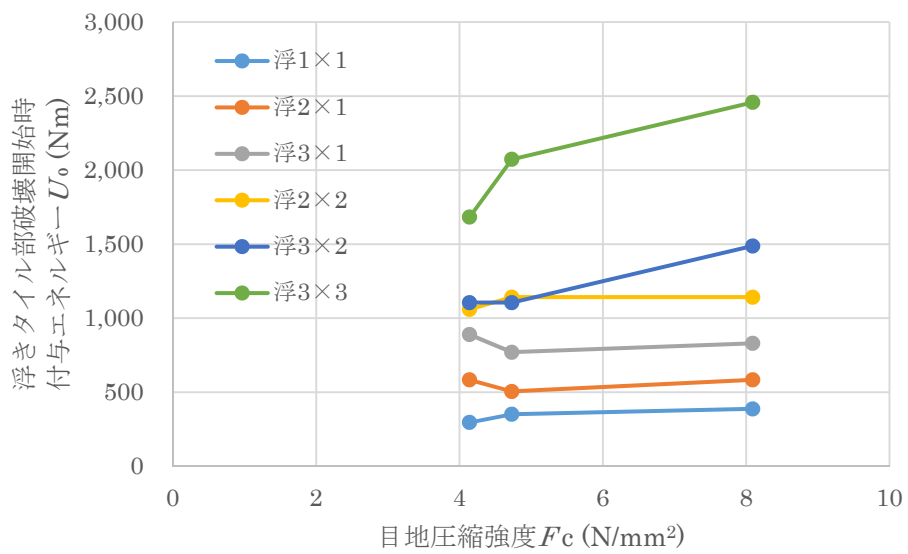


図 5-22 破壊開始時付与エネルギー U_0 と目地圧縮強度 F_c の関係
(C 試験体 (ピンネット工法))

この結果よりA試験体（補修なし）と同様に、目地圧縮強度 F_c が大きいほど破壊開始時付与エネルギー U_0 は大きくなる傾向となっている。また浮きタイル枚数が多いほど破壊開始時付与エネルギー U_0 が大きくなる傾向となった。これより目地圧縮強度 F_c が浮きタイルの破壊開始するとのに大きな影響を及ぼしていることが確認された。また破壊開始時付与エネルギー U_0 についてもA試験体（補修なし）よりB試験体（アンカーピン固定工法）とC試験体（ピンネット工法）のほう大きくなる傾向が見られた。

次に、B試験体（アンカーピン固定工法）とC試験体（ピンネット工法）の破壊開始時付与エネルギー U_0 と浮きタイル周辺目地長さ L との関係を浮きタイプが方形のもの（浮 1×1 ・浮 2×2 ・浮 3×3 ）と浮きタイプが長方形のもの（浮 2×1 ・浮 3×1 ・浮 3×2 ）にわけて図 5-23～図 5-26 に示す。

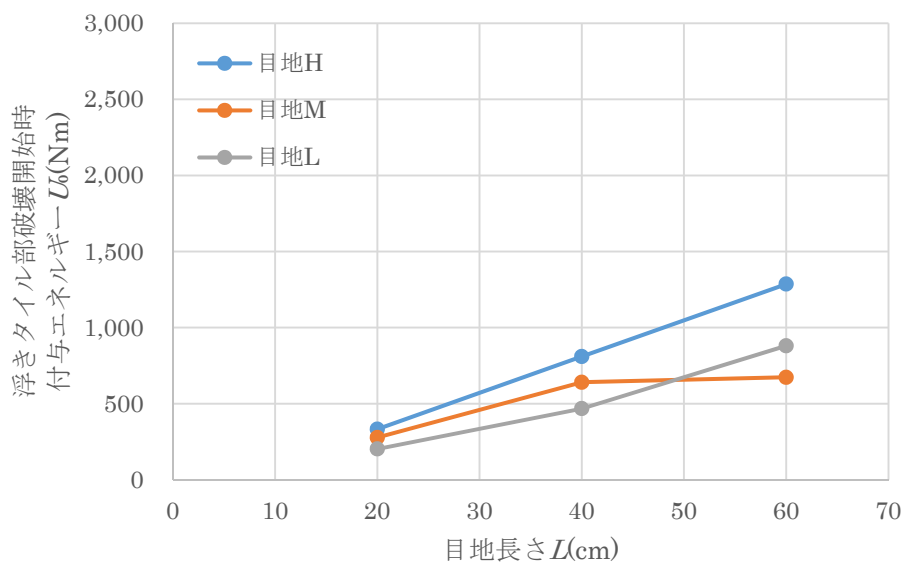


図 5-23 破壊開始時付与エネルギー U_0 と浮きタイル周辺目地長さ L の関係 (B 試験体 (アンカーピン固定工法))
(浮 1×1・浮 2×2・浮 3×3)

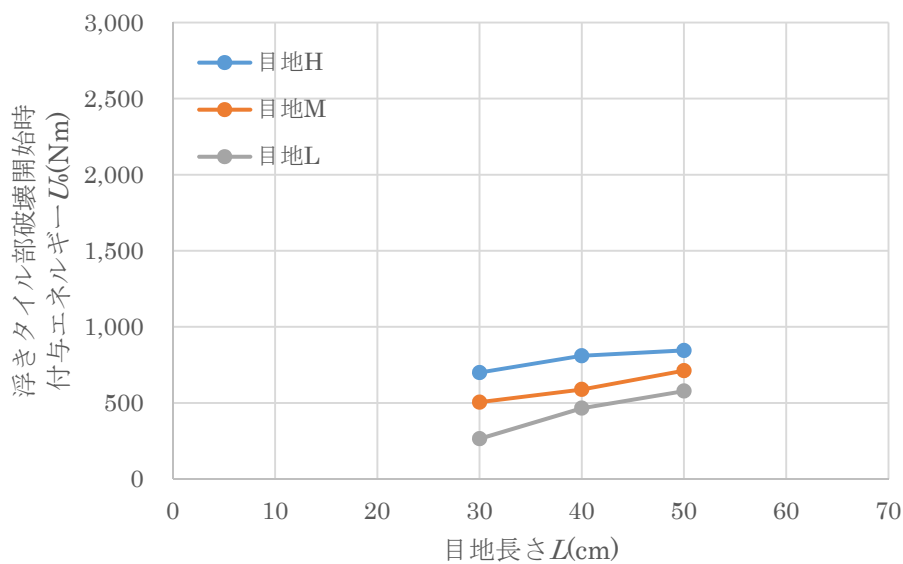


図 5-24 破壊開始時付与エネルギー U_0 と浮きタイル周辺目地長さ L の関係 (B 試験体 (アンカーピン固定工法))
(浮 2×1・浮 3×1・浮 3×2)

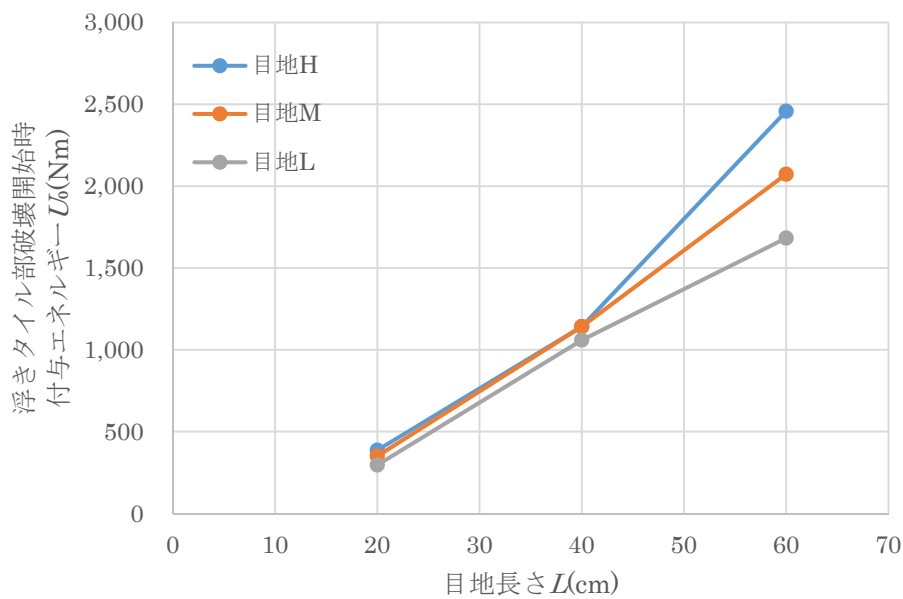


図 5-25 破壊開始時付与エネルギー U_0 と浮きタイル周辺目地長さ L の関係 (C 試験体 (ピンネット工法))
(浮 1×1・浮 2×2・浮 3×3)

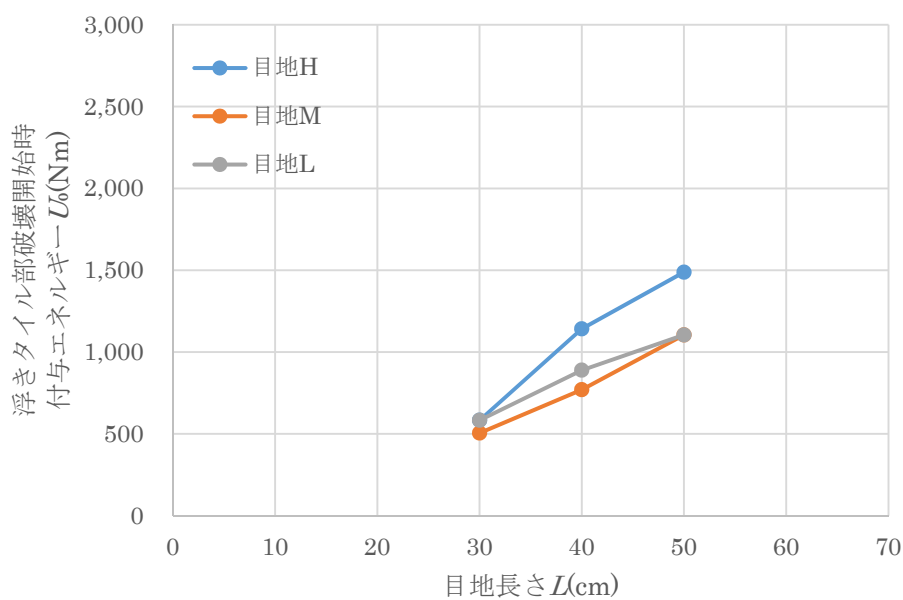


図 5-26 破壊開始時付与エネルギー U_0 と浮きタイル周辺目地長さ L の関係 (C 試験体 (ピンネット工法))
(浮 2×1・浮 3×1・浮 3×2)

B試験体（アンカーピン固定工法）並びにC試験体（ピンネット工法）における浮きタイプが方形も長方形に両方について、浮きタイル周辺目地長さ L が大きいほど、破壊開始時付与エネルギー U_0 が大きくなる傾向となった。A試験体（補修なし）では、浮きタイプが長方形の目地 $M \cdot$ 目地 L の場合において浮きタイル周辺目地長さ L が大きくなると破壊開始時付与エネルギー U_0 が小さくなる傾向が見られたがB試験体（アンカーピン固定工法）とC試験体（ピンネット工法）では大きくなった。これは補修を施すことが有効に作用したのではないかと考えられる。

次にA試験体（補修なし）と同様に累積浮きタイル部付与エネルギー Ut と面外残留変位 R の関係からB試験体（アンカーピン固定工法）とC試験体（ピンネット工法）について線形回帰により近似式 $y=ax+b$ を求め、傾き a を変形抵抗 Re として求めた。近似式による近似線を図 5-27～図 5-38 に点線にて表示している。図 5-39、図 5-40 に変形抵抗 Re を示す。また各試験体の比較を図 5-40 に示す。

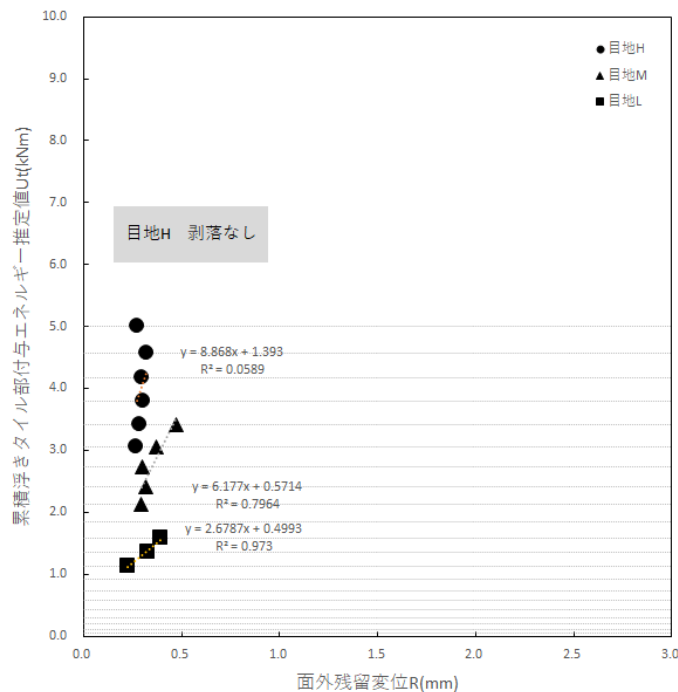


図 5-27 B試験体（アンカーピン固定工法）・浮 1×1 の線形回帰図

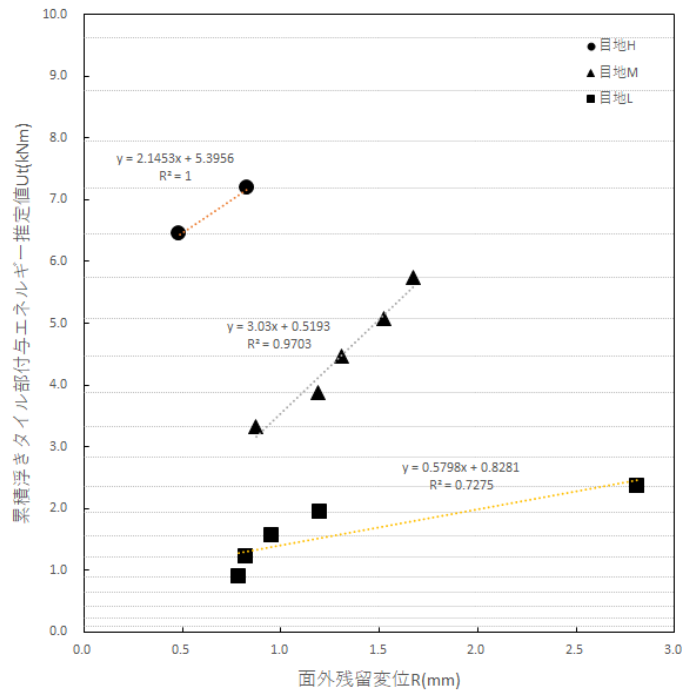


図 5-28 B 試験体（アンカーピン固定工法）・浮 2×1 の線形回帰図

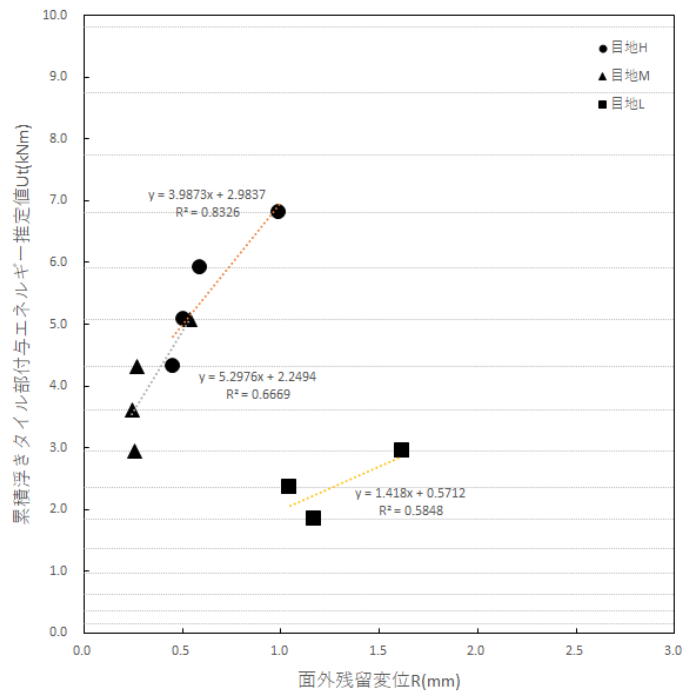


図 5-29 B 試験体（アンカーピン固定工法）・浮 3×1 の線形回帰図

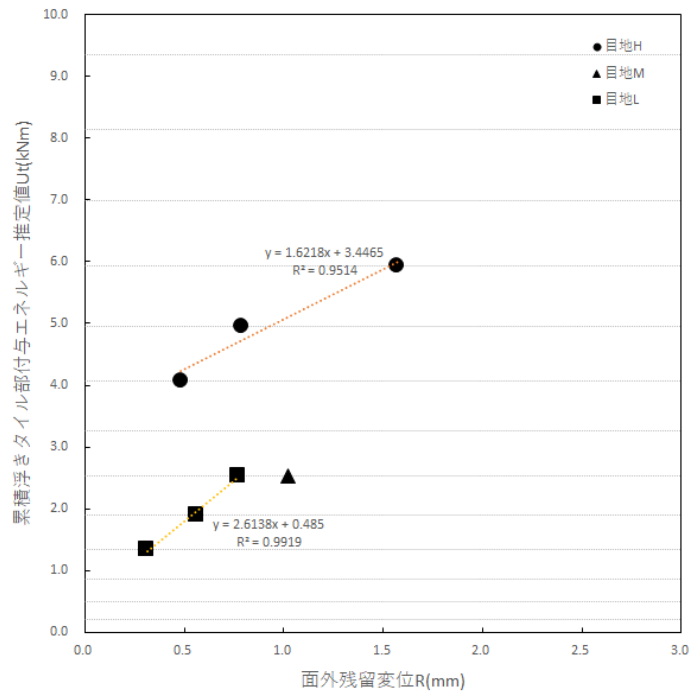


図 5-30 B 試験体（アンカーピン固定工法）・浮 2×2 の線形回帰図

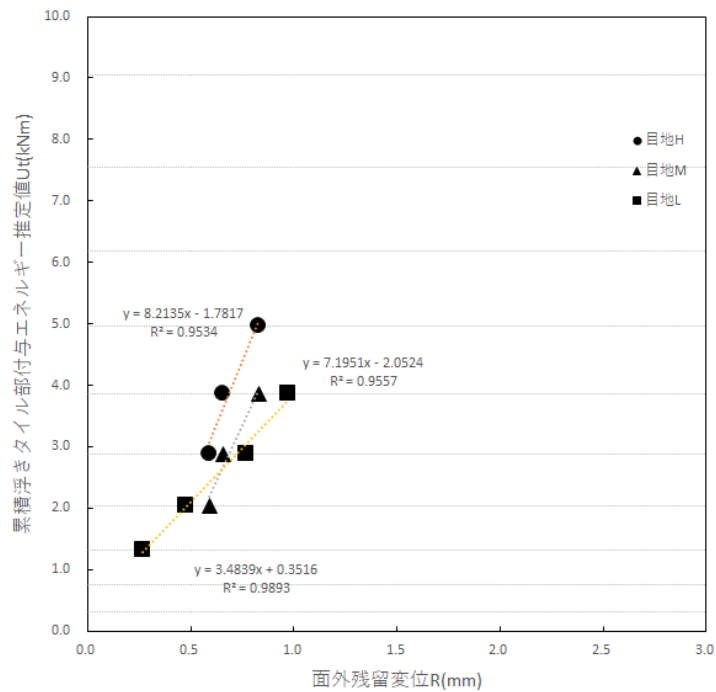


図 5-31 B 試験体（アンカーピン固定工法）・浮 3×2 の線形回帰図

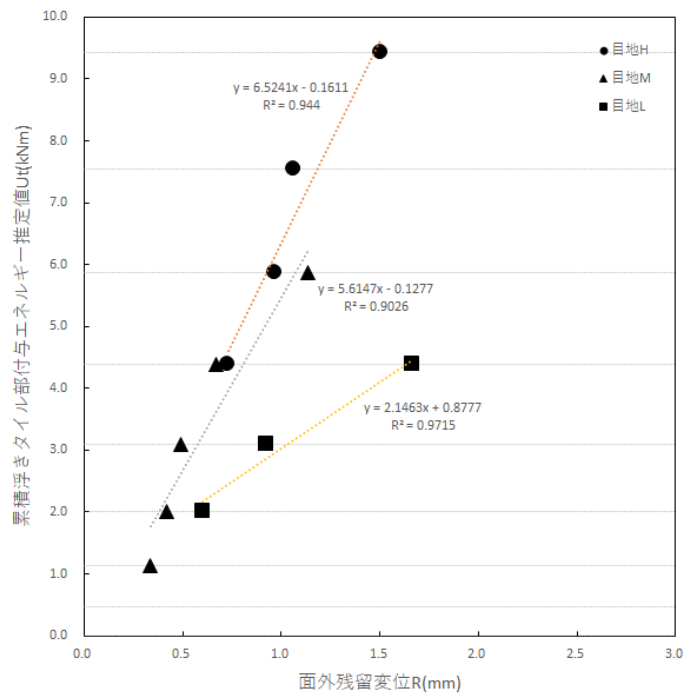


図 5-32 B 試験体（アンカーピン固定工法）・浮 3×3 の線形回帰図

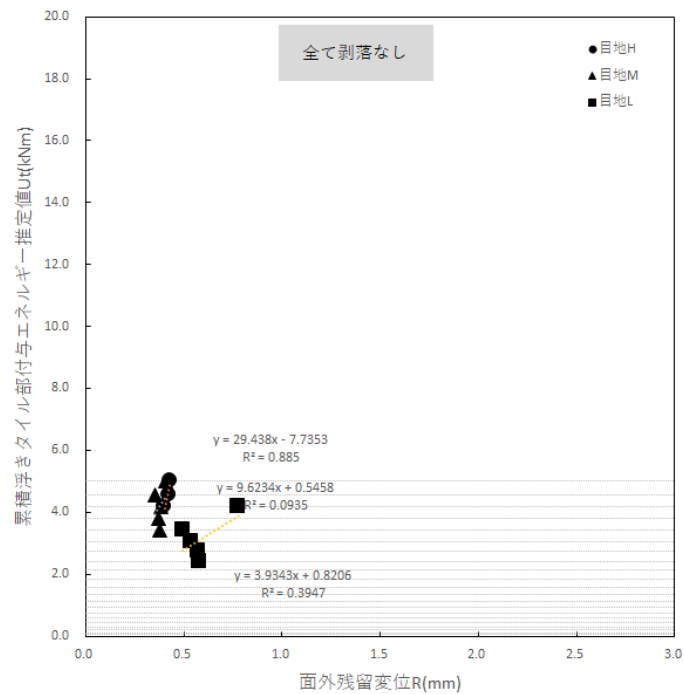


図 5-33 C 試験体（ピンネット工法）・浮 1×1 の線形回帰図

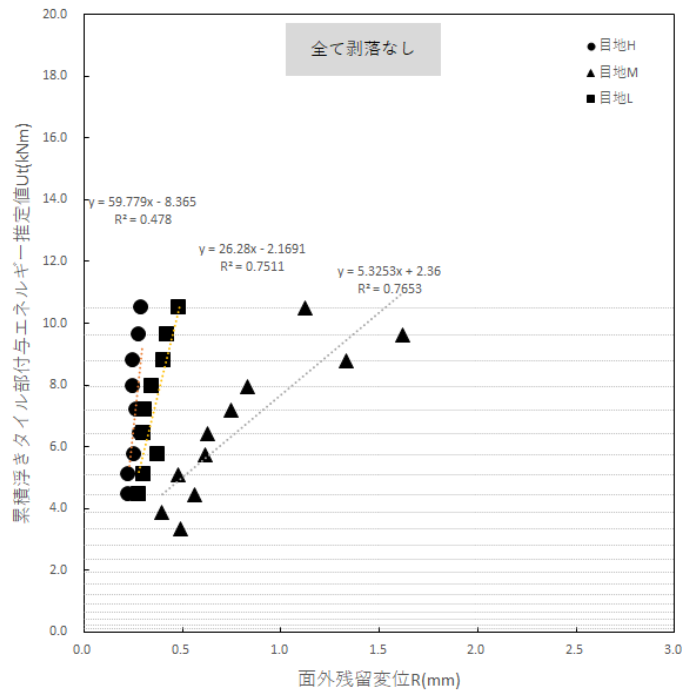


図 5-34 C 試験体（ピンネット工法）・浮 2×1 の線形回帰図

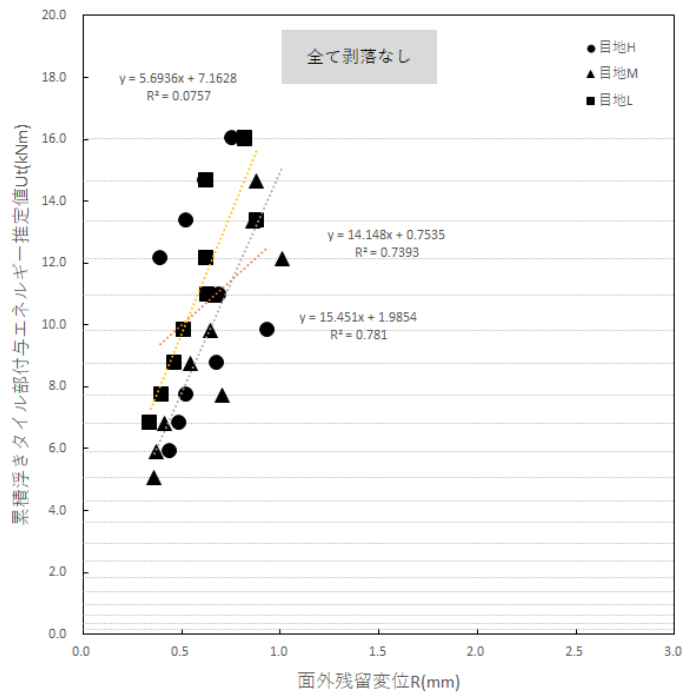


図 5-35 C 試験体（ピンネット工法）・浮 3×1 の線形回帰図

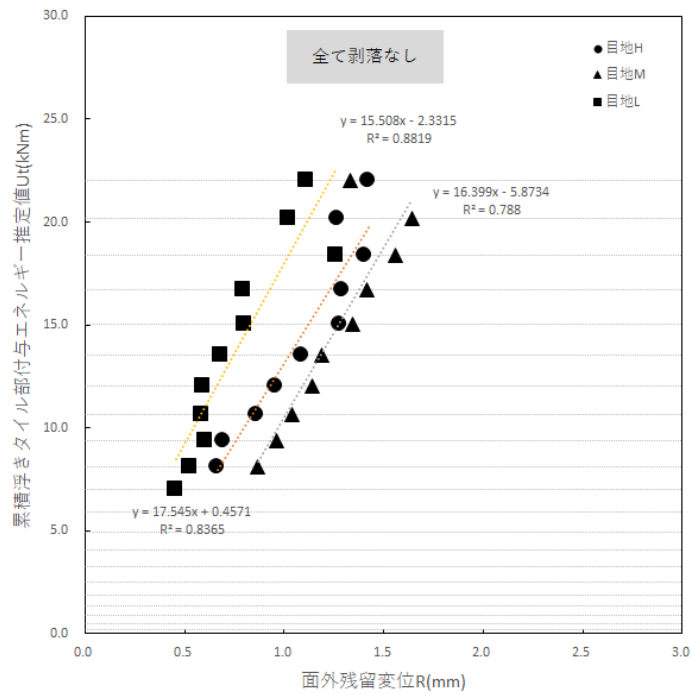


図 5-36 C 試験体（ピンネット工法）・浮 2×2 の線形回帰図

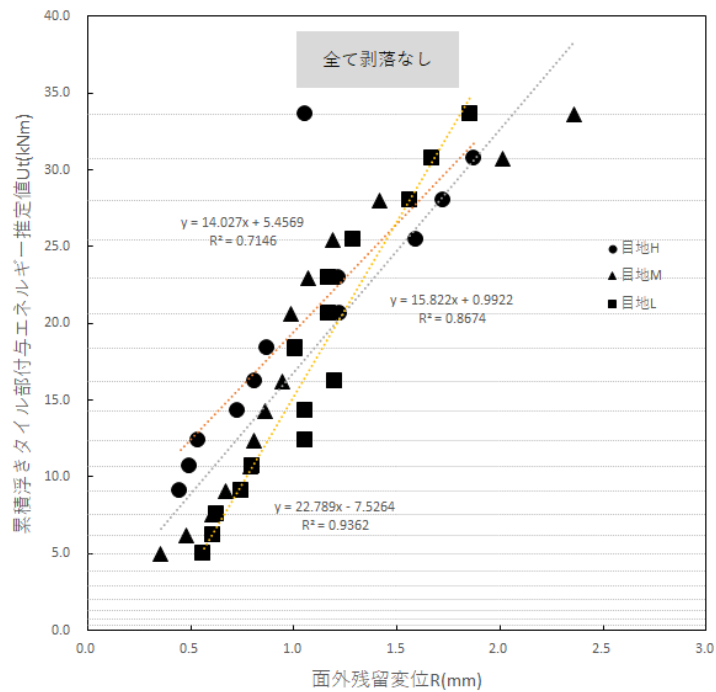


図 5-37 C 試験体（ピンネット工法）・浮 3×2 の線形回帰図

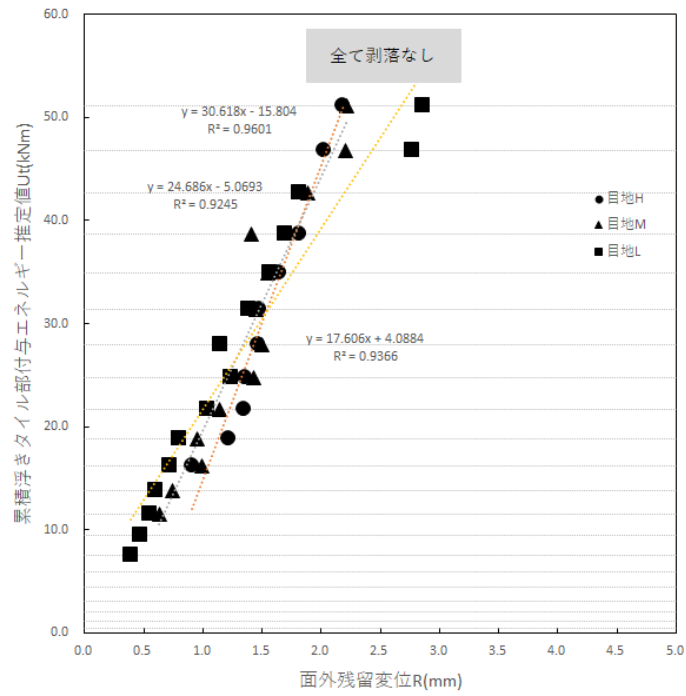


図 5-38 C 試験体（ピンネット工法）・浮 3×3 の線形回帰図

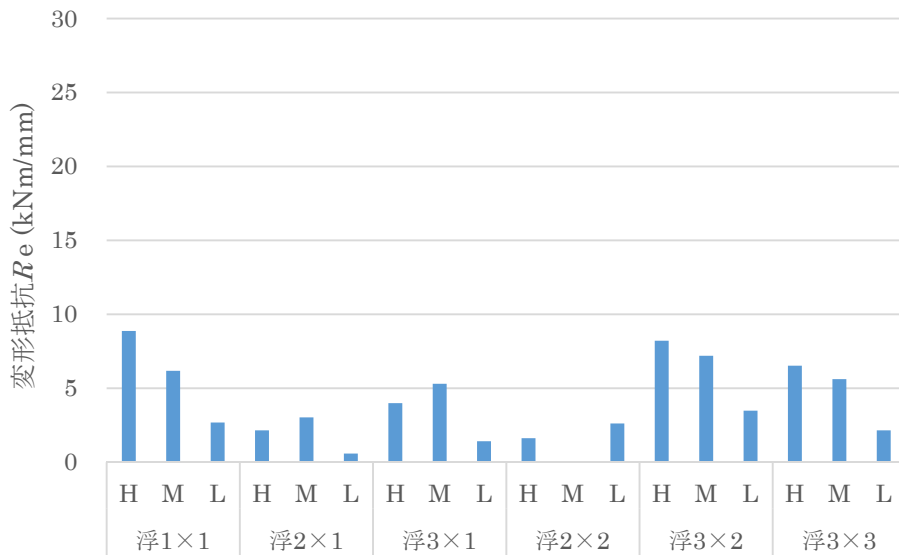


図 5-39 B 試験体（アンカーピン固定工法）の変形抵抗 R_e

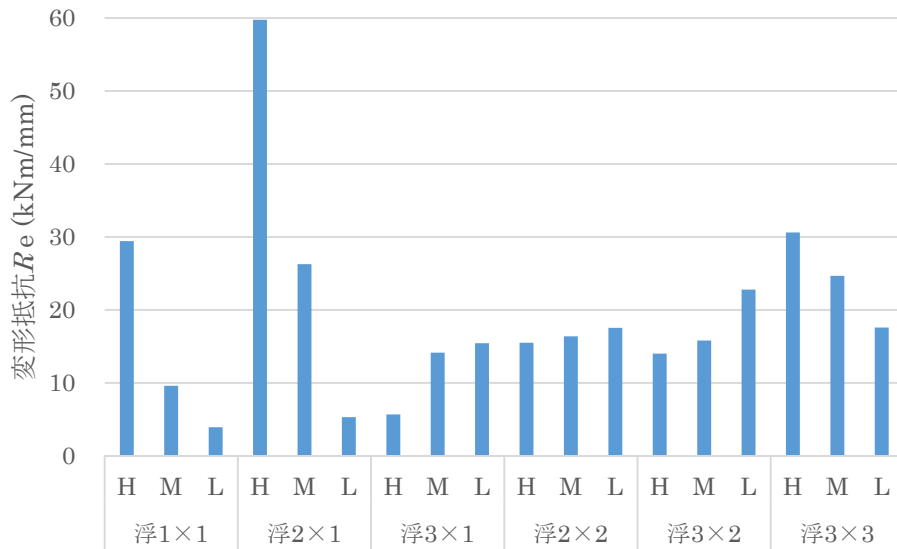


図 5-40 C 試験体（ピンネット工法）の変形抵抗 R_e

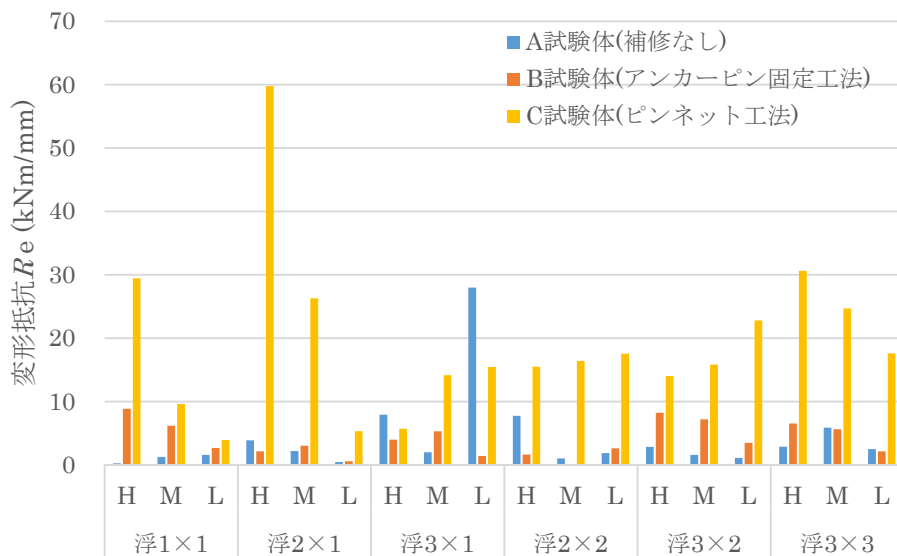


図 5-41 変形抵抗 R_e の比較

変形抵抗 R_e について、A 試験体（補修なし）の浮きタイプ・目地強度による大小関係は明確には傾向がなかったが、補修なしの A 試験体（補修なし）に比べ、B 試験体（アンカーピン固定工法）のほうが、目地強度が大きい目地 H において変形抵抗 R_e は大きくなり剥落防止につながることを確認できた。アンカーピン固定と目地強度の関係が重要であると考えられる。

またC試験体（ピンネット工法）は、浮きタイル部の剥落は生じていないが補修方法であるピンネット工法内部においては、表層の仕上げモルタルが一部剥がれてネット層が見えたことから、浮きタイルが剥落した状態になっていたと推測できる。C試験体（ピンネット工法）は面的な補修補法であり変形抵抗 R_e もA試験体（補修なし）、B試験体（アンカーピン固定工法）に比べて非常に大きくなったと考えられる。

これよりB試験体（アンカーピン固定工法）とC試験体（ピンネット工法）は、剥落防止に有効な補修方法であることが確認された。

5.2.3 浮きタイル剥落時の累積浮きタイル部付与エネルギー U_t と

動的荷重 F の比較

B試験体（アンカーピン固定工法）における、破壊し始めてから最終的に浮きタイル部分が剥落する落下高さまでの累積浮きタイル部付与エネルギー U_t について目地圧縮強度 F_c との関係を図 5-42 に示す。

C試験体（ピンネット工法）については、剥落が生じなかったため比較対象としていない。

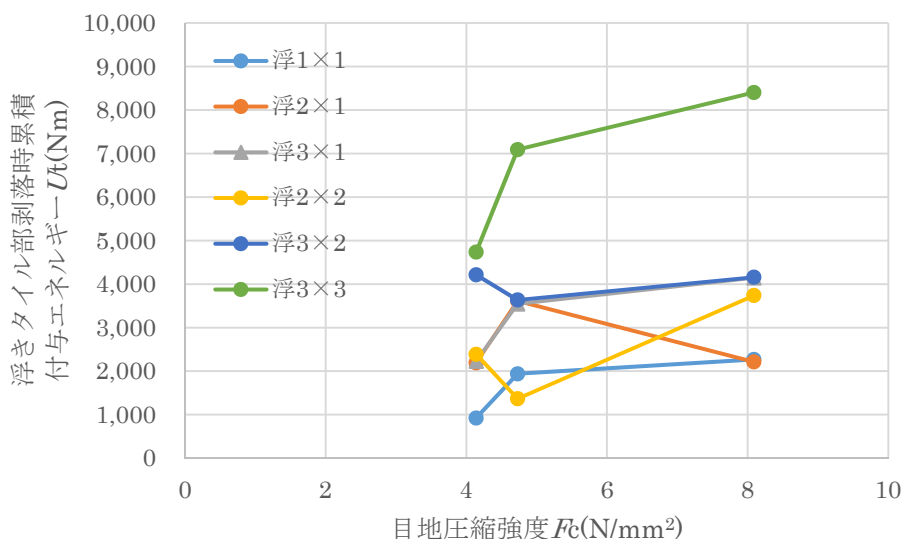


図 5-42 剥落時累積付与エネルギー U_t と目地圧縮強度 F_c の関係
(B試験体（アンカーピン固定工法）)

図 5-42 の B 試験体（アンカーピン固定工法）の浮きタイル部剥落時累積付与エネルギー U_t と目地圧縮強度 F_c の関係において浮きタイルをアンカーピンにて固定していることで浮きタイル枚数が多いほど剥落に必要な累積付与エネルギー U_t が大きくなる傾向は顕著には見られなかった。またアンカーピンにて固定していることで目地圧縮強度 F_c が大きくなっても浮きタイル部剥落時累積付与エネルギー U_t が増加しない傾向が見られた。

ただし浮 3×3 の場合においては、浮きタイル部剥落時累積付与エネルギー

一 U_t が増加する傾向がある。これはアンカーピンが浮きタイルの中央部に施してあることで付与エネルギーの偏心が発生していないため均等に変位したためと考えられる。

次にB試験体（アンカーピン固定工法）の累積浮きタイル部付与エネルギー Ut と浮きタイル周辺目地長さ L の関係を、浮きタイプが方形のもの（浮 1×1・浮 2×2・浮 3×3）を図 5-52 に、浮きタイプが長方形のもの（浮 2×1・浮 3×1・浮 3×2）を図 5-53 に示す。

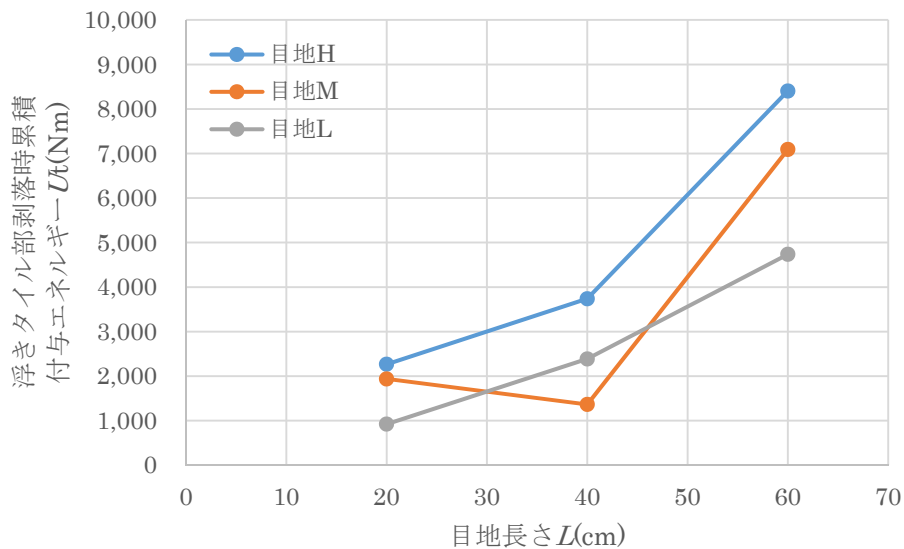


図 5-52 剥落時累積付与エネルギー Ut と目地長さ L の関係
 (B試験体 (アンカーピン固定工法)・浮 1×1・浮 2×2・浮 3×3)

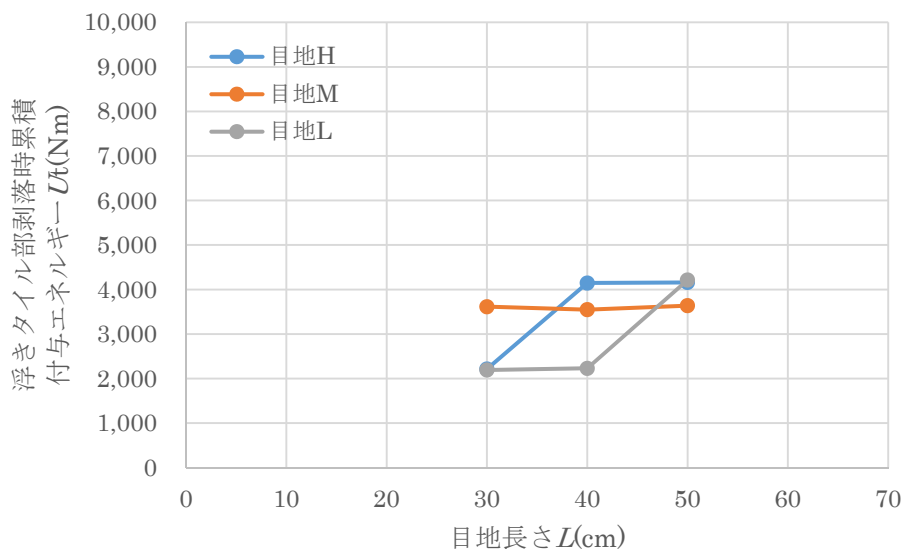


図 5-53 剥落時累積付与エネルギー Ut と目地長さ L の関係
 (B試験体 (アンカーピン固定工法)・浮 2×1・浮 3×1・浮 3×2)

B試験体（アンカーピン固定工法）の浮きタイプが方形の場合、A試験体（補修なし）と同様に浮きタイル周辺目地の長さ L が大きいほど、浮きタイル部剥落時累積付与エネルギー U_t が大きくなる傾向となった。

また浮きタイプが長方形の場合においては、目地長さが大きくなるとA試験体（補修なし）の場合はタイル部剥落時累積付与エネルギー U_t が小さくなる傾向が見られたが、B試験体（アンカーピン固定工法）の場合は同じかもしくは大きくなる傾向が見られた。これはアンカーピン固定工法の効果であると考えられる。

これより浮きタイルの周辺目地の長さ L が破壊開始に大きな影響を及ぼすことまた浮きタイプによって違いがあること、アンカーピン固定工法の効果が確認された。

次にB試験体（アンカーピン固定工法）の浮きタイルが剥落する直前直後の動的荷重 F と目地圧縮強度 F_c との関係を図 5-54 に示す。また浮きタイルが剥落する直前直後の動的荷重 F と浮きタイル周辺目地長さ L との関係を図 5-55 に示す。図の●印は剥落直前の動的荷重 F 、×印は剥落直後の動的荷重 F を示している。

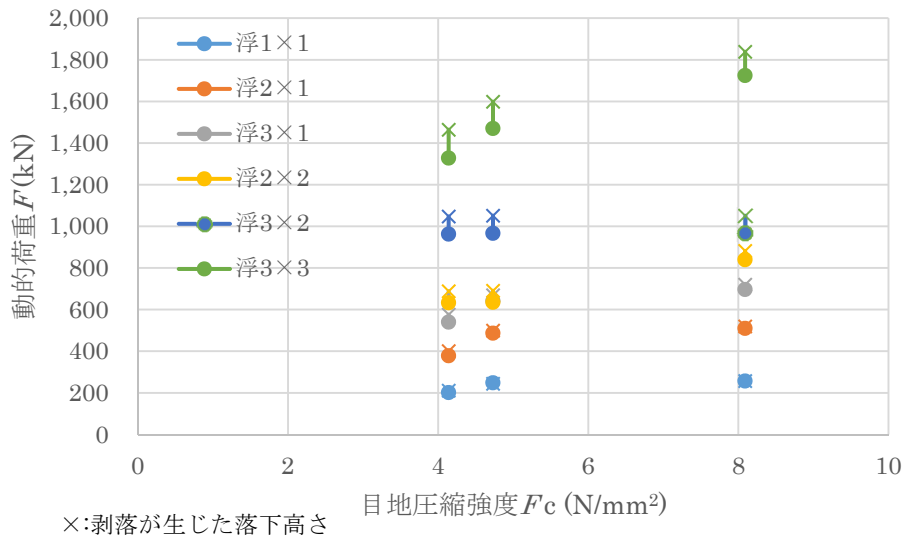


図 5-54 剥落直前直後の動的荷重 F と目地強度 F_c の関係
(B試験体（アンカーピン固定工法）)

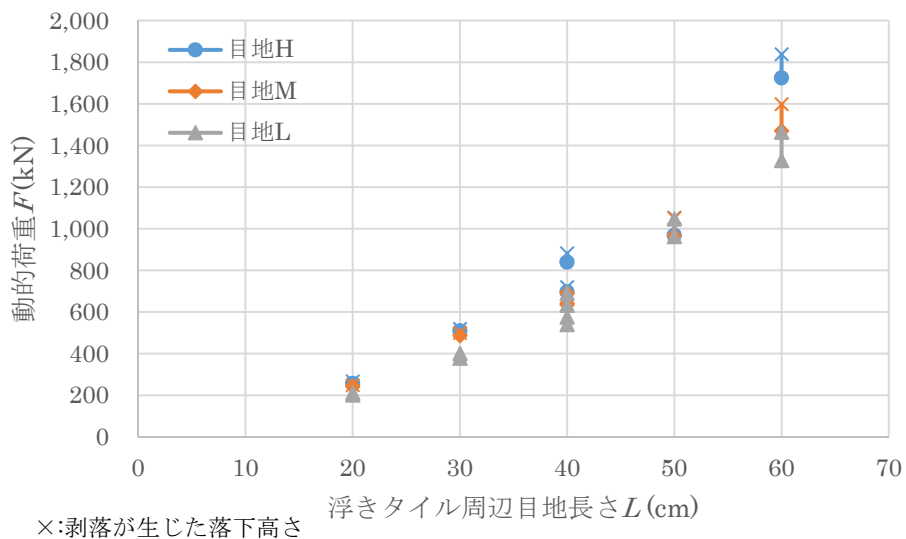


図 5-55 剥落直前直後の動的荷重 F と目地長さ L の関係
(B試験体（アンカーピン固定工法）)

図 5-54・図 5-55 より B 試験体（アンカーピン固定工法）についても A 試験体（補修なし）と同様に、目地強度 F_c が大きくなるほど、タイル周辺目地長さ L 大きくなるほど剥落直前直後の動的荷重 F は大きくなり、剥落直前と剥落直後の動的荷重 F の差が大きくなる傾向がある。

次に浮きタイル剥落直後の動的荷重 F について A 試験体（補修なし）と B 試験体（アンカーピン固定工法）の比較を図 5-56 に示す。

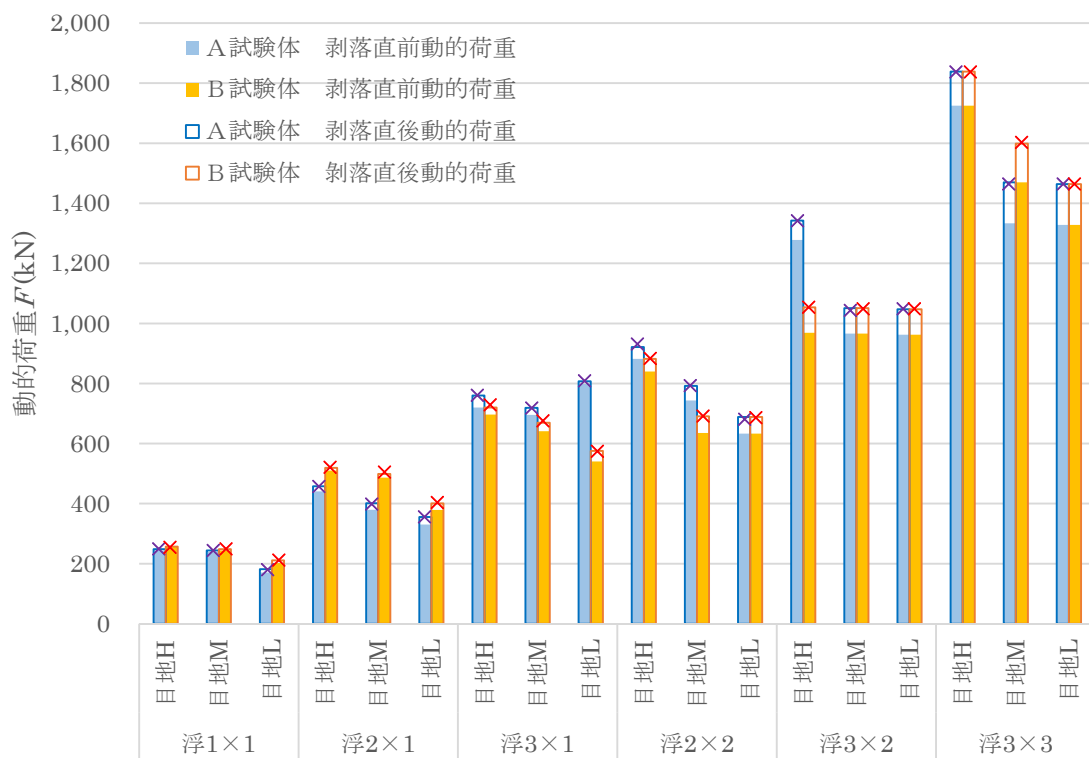


図 5-56 浮きタイル剥落直前直後の動的荷重 F の比較

浮きタイル剥落直前直後の動的荷重 F について A 試験体（補修なし）と B 試験体（アンカーピン固定工法）を比較するとはほぼ同じ結果となった。

この理由として、B 試験体（アンカーピン固定工法）のアンカーピンに関しては今回の目地の強度が低く、中央固定の効果があまり出ていないためと考えられる。

5.2.4 剥落直前の計測結果と解析結果との比較

B試験体（アンカーピン固定工法）・C試験体（ピンネット工法）における動的衝撃試験により浮きタイルが剥落する直前又は一部剥落し始めた際の落下高さとその1つ前の落下高さにおける計測結果と解析結果を比較したものを図5-57～図5-91に示す。

解析で得られる面外残留変位 R のデータは全ての数値が0以上であるため、計測結果における目地の面外残留で数値が0未満であるものは全て0表記に一部目地の剥落が発生した部分はマイナス数値の絶対値をとして修正して比較した。残留変位の大きい位置を試験結果においては赤色で、解析結果においては青色で示している。また、浮きタイル剥落開始直前までのデータで比較しており、動的衝撃試験で取得できたデータ数は試験体によって異なる。

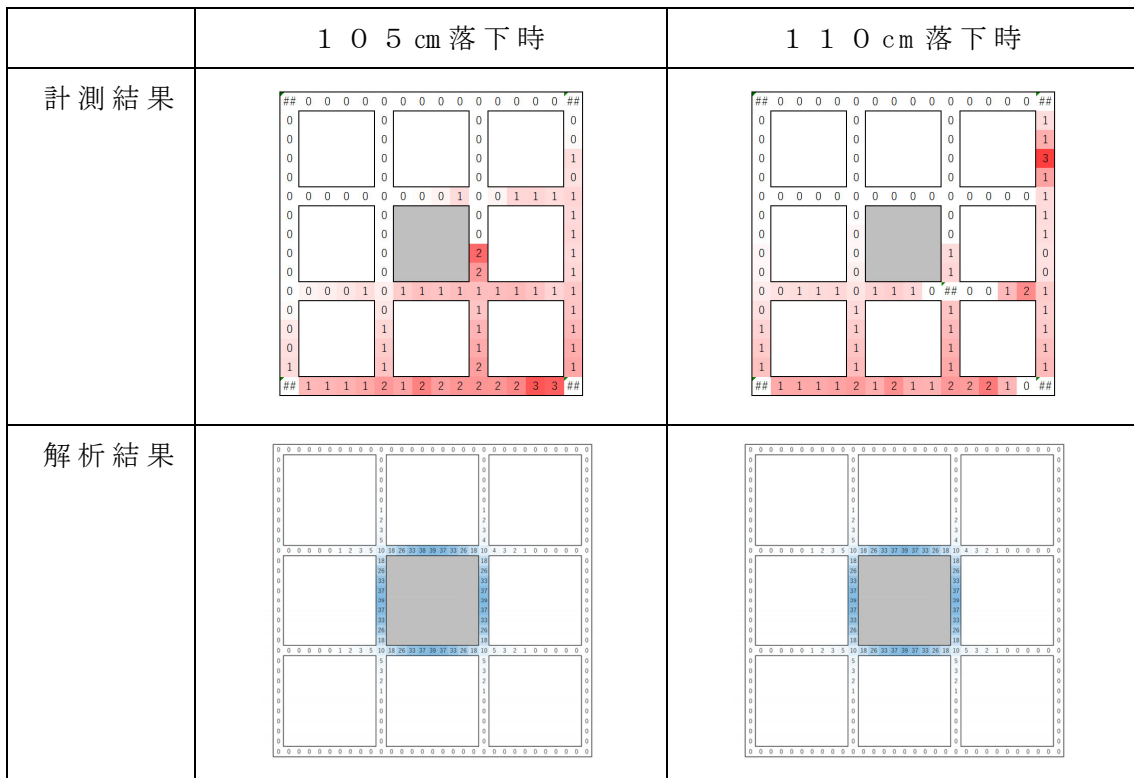


図 5-57 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 1×1・目地 H)

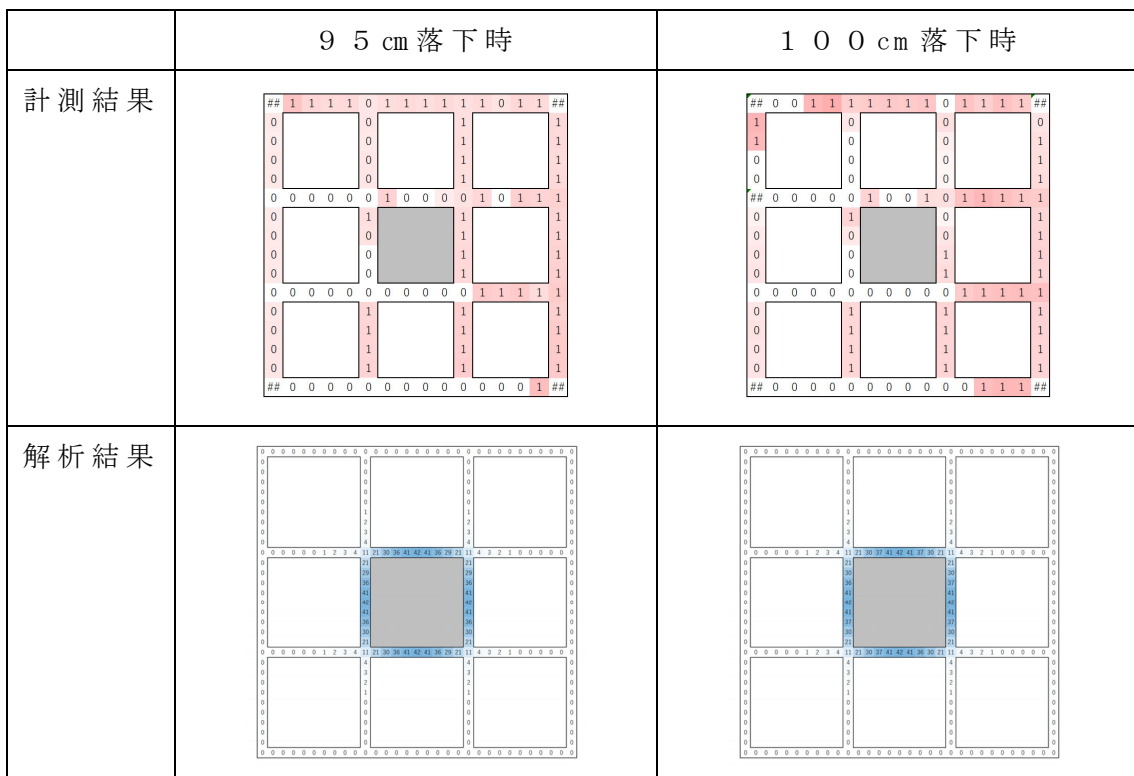


図 5-58 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 1×1・目地 M)

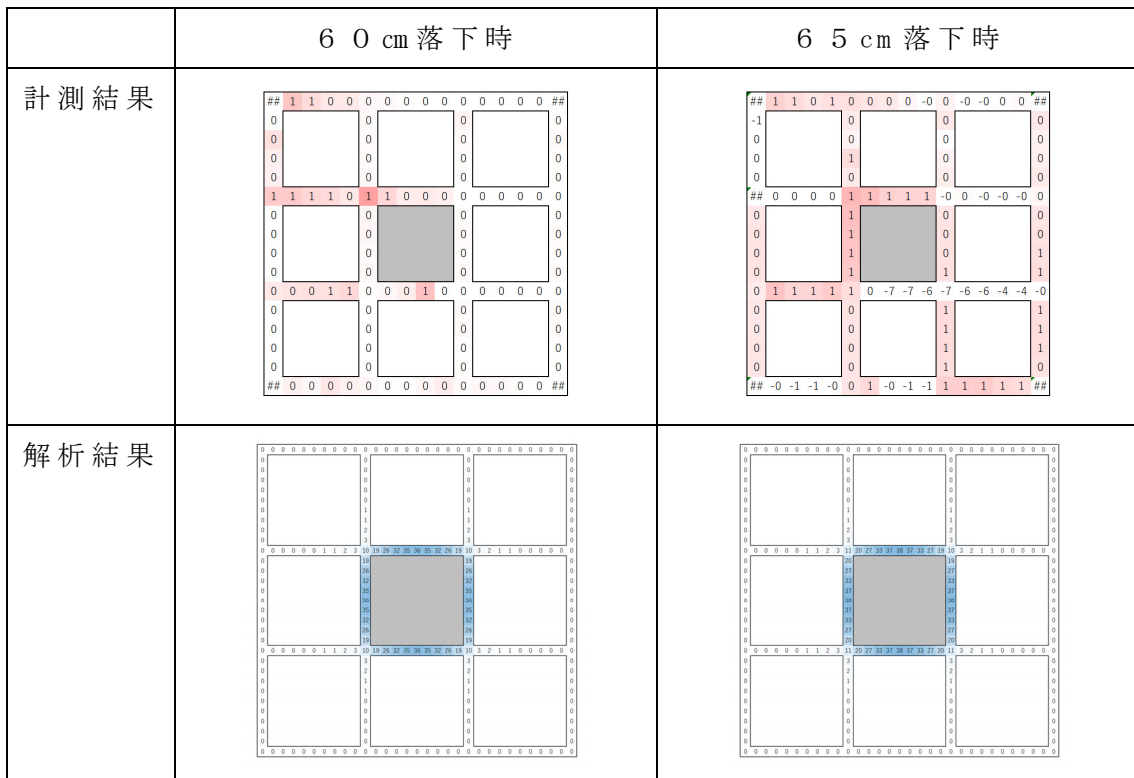


図 5-59 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 1×1・目地 L)

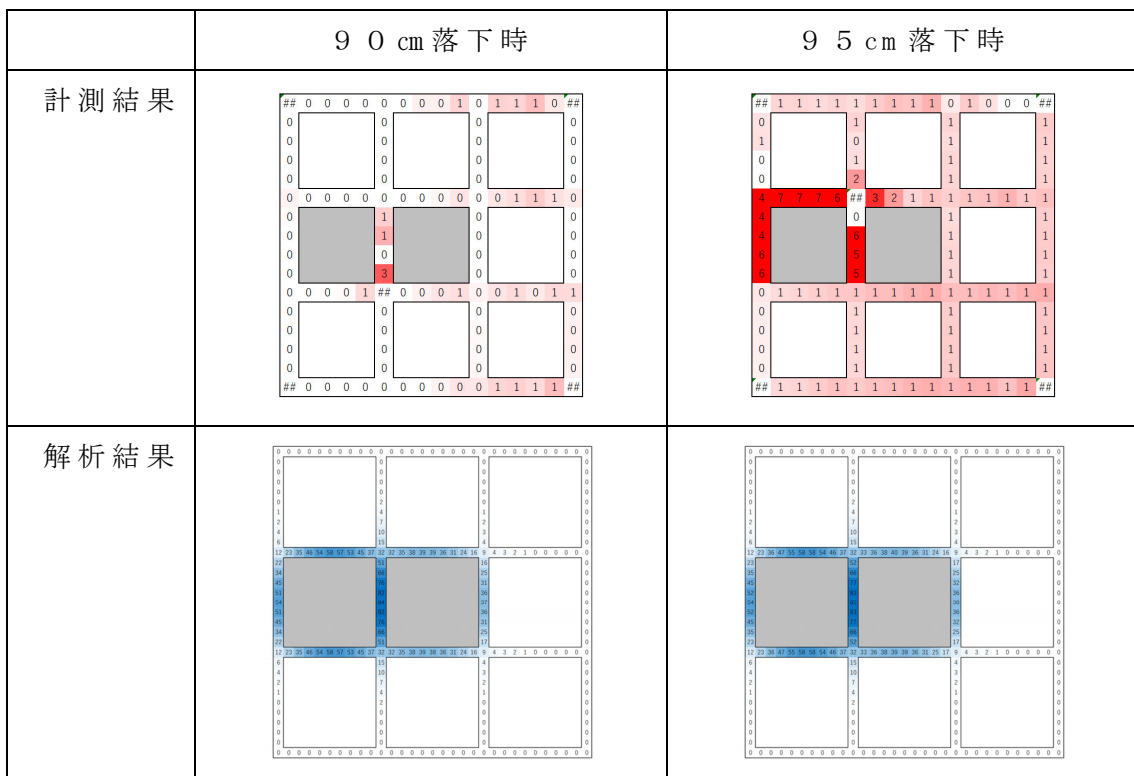


図 5-60 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 2×1・目地 H)

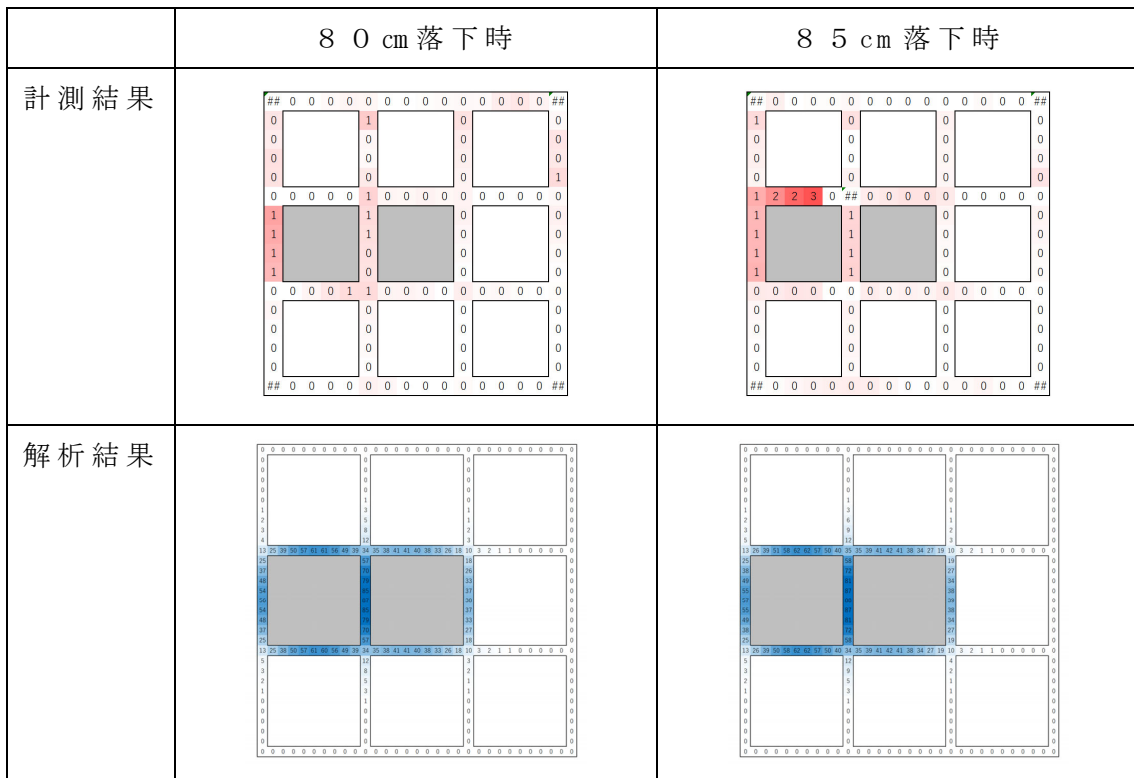


図 5-61 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 2×1・目地 M)

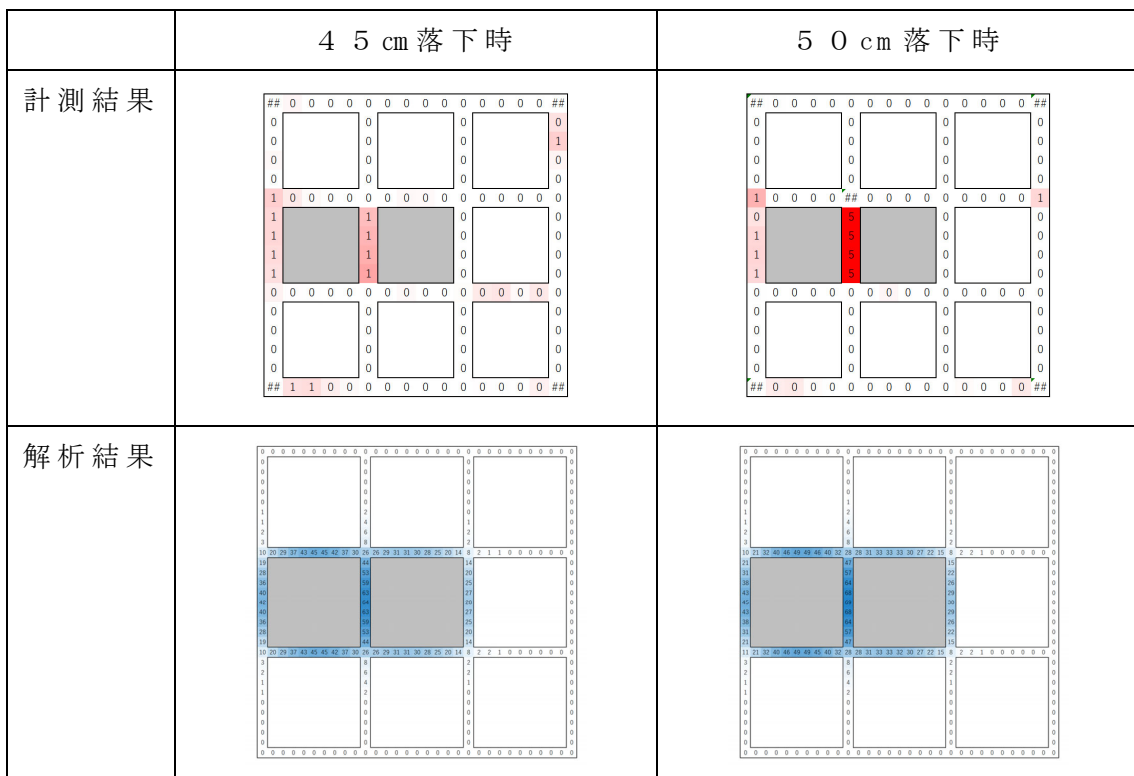


図 5-62 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 2×1・目地 L)

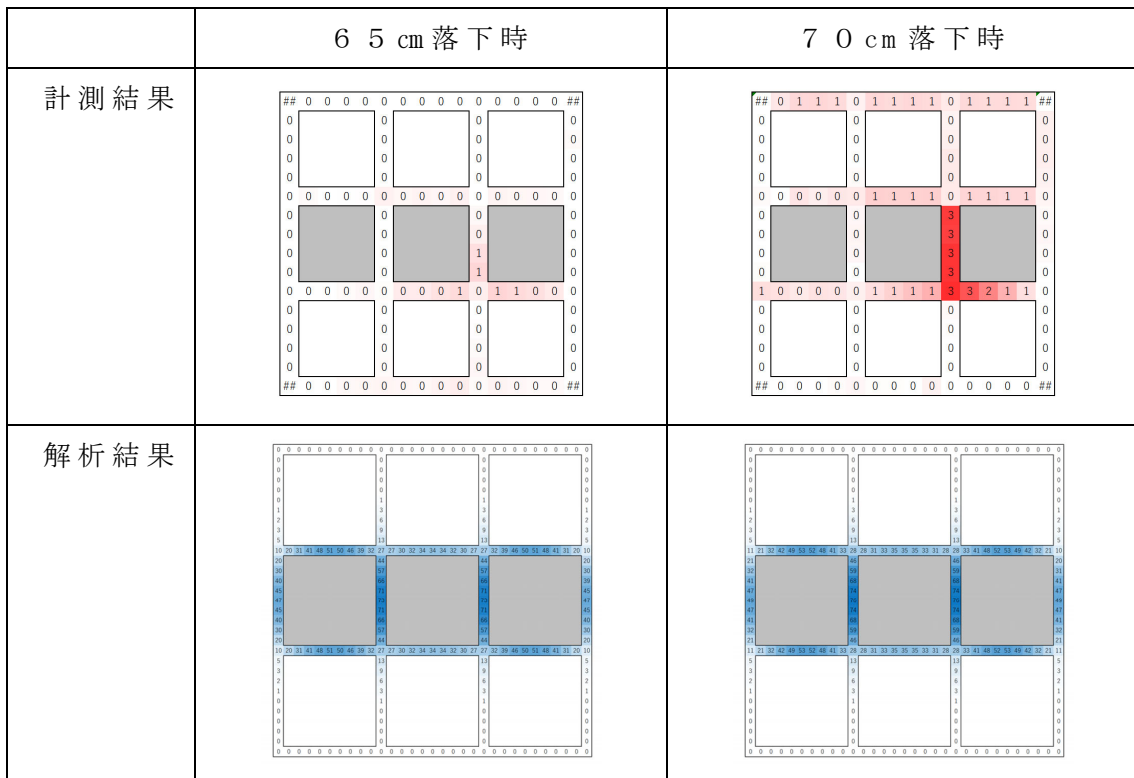


図 5-63 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 3×1・目地 H)

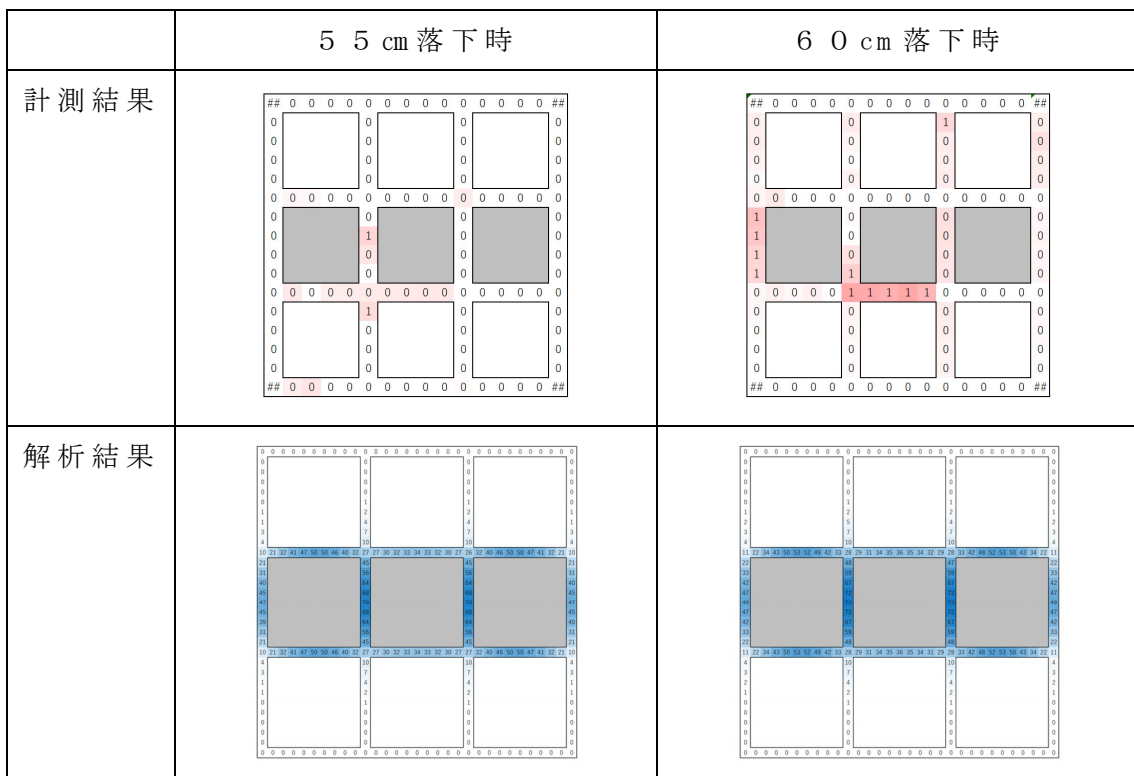


図 5-64 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 3×1・目地 M)

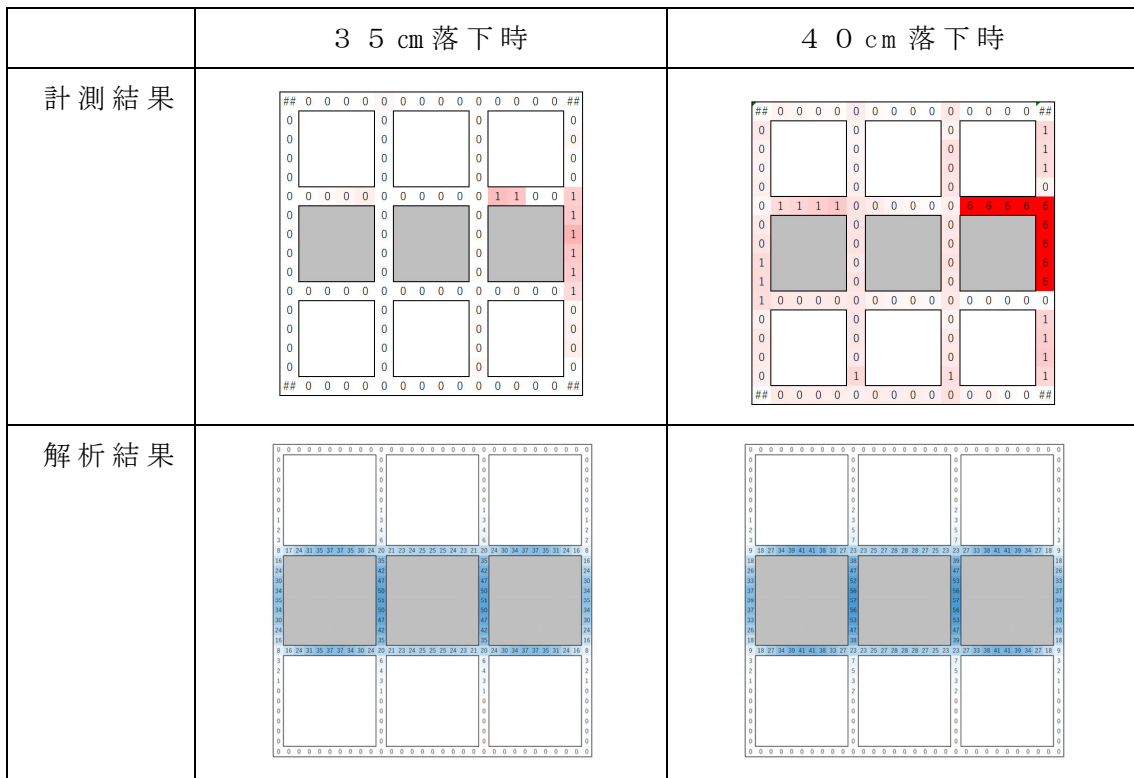


図 5-65 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 3×1・目地 L)

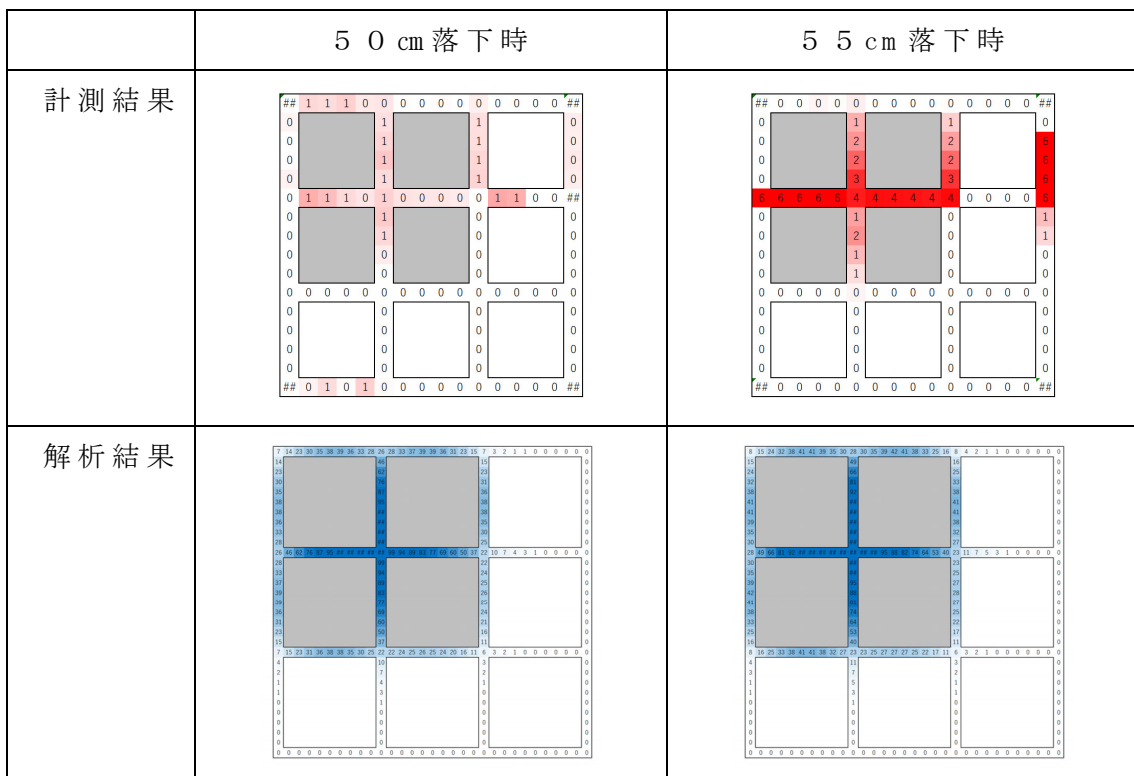


図 5-66 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 2×2・目地 H)

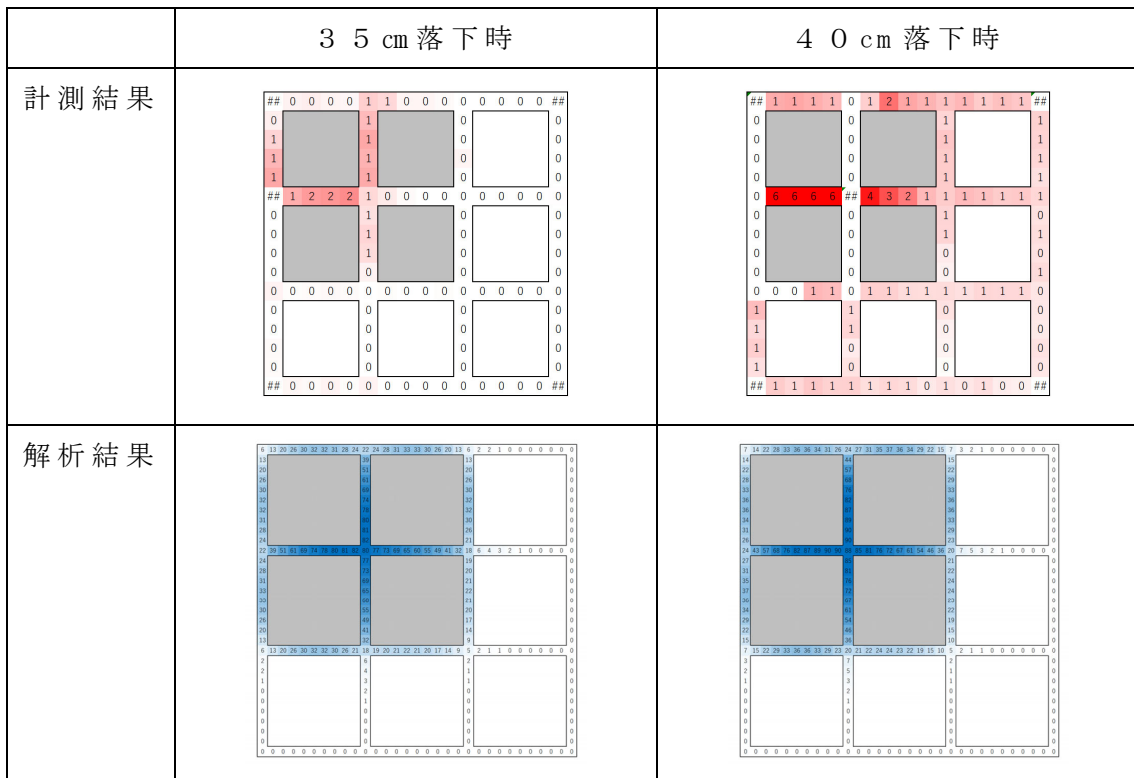


図 5-67 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 2×2・目地 M)

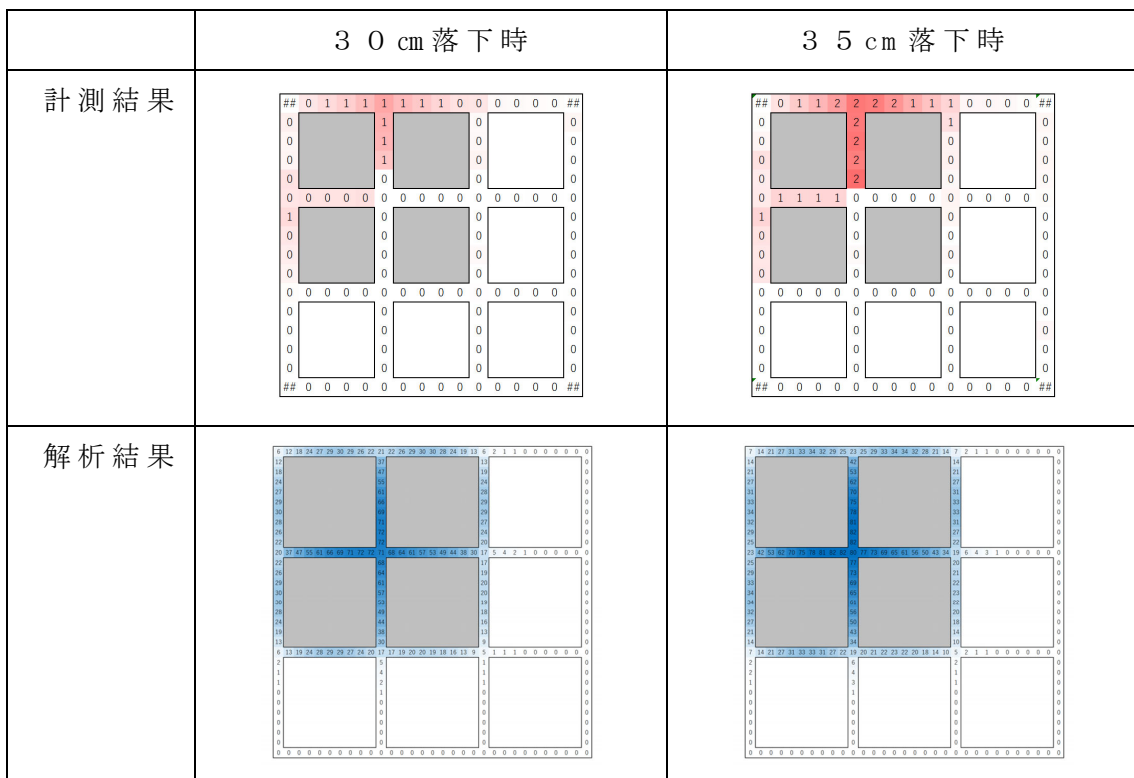


図 5-68 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 2×2・目地 L)

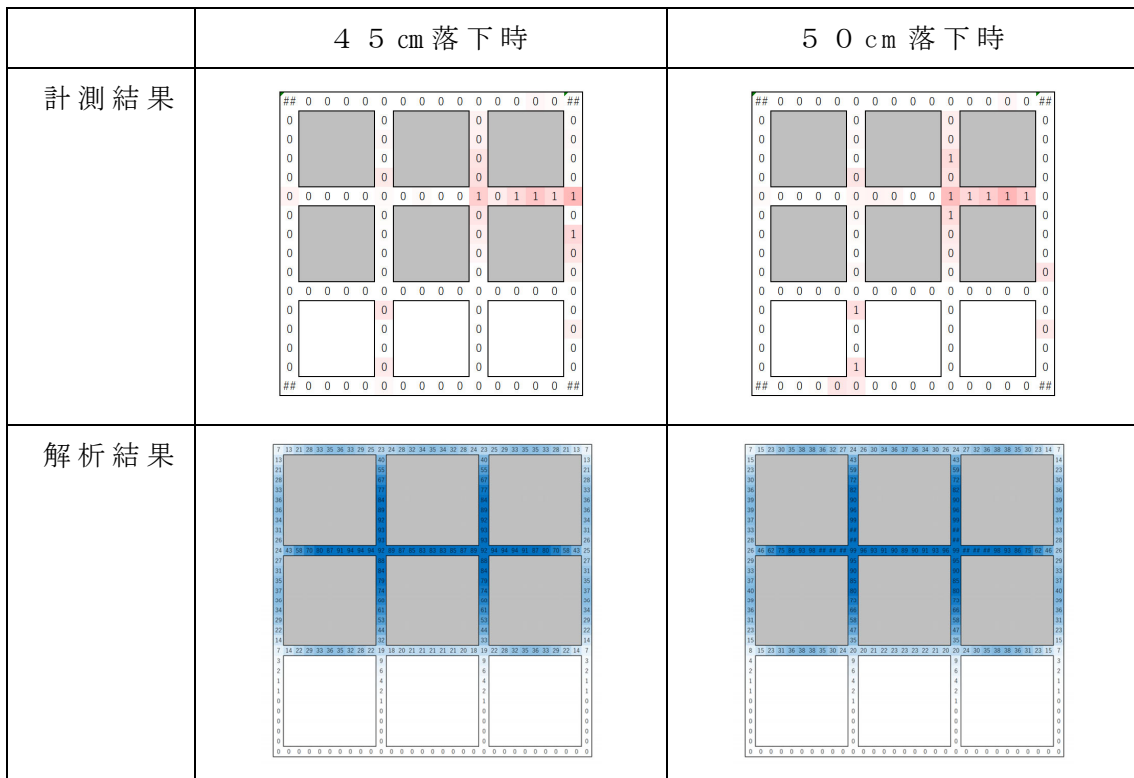


図 5-69 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 3×2・目地 H)

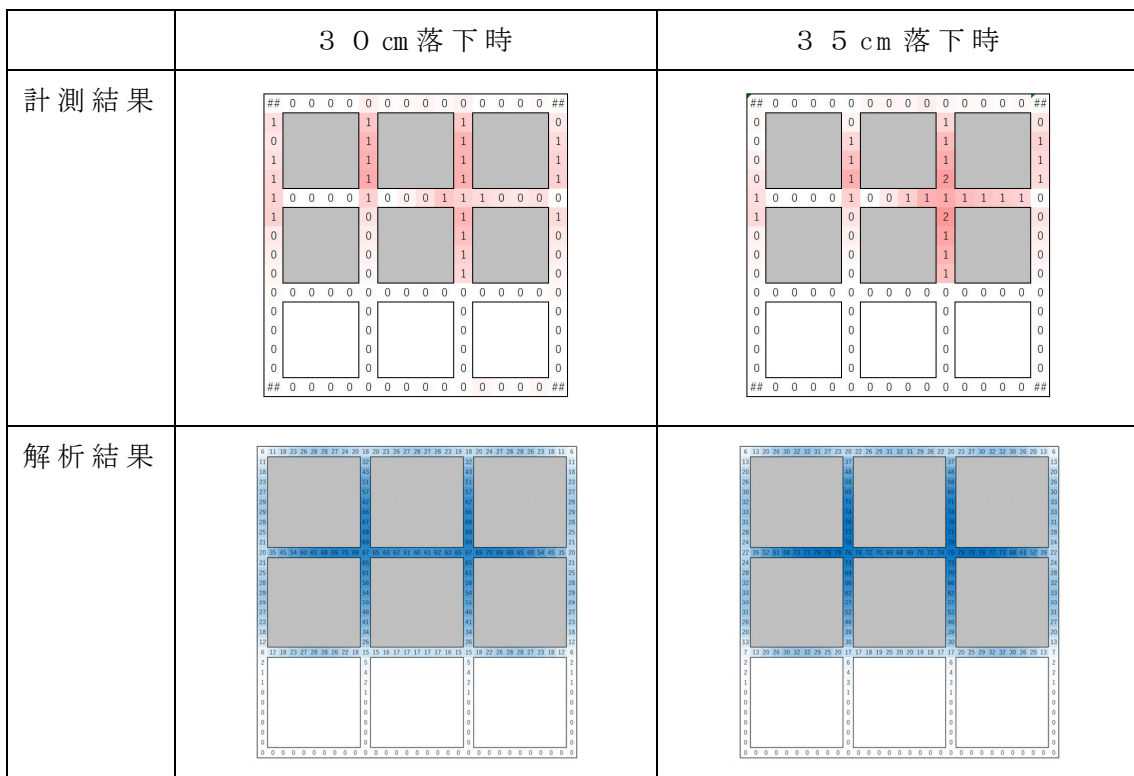


図 5-70 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 3×2・目地 M)

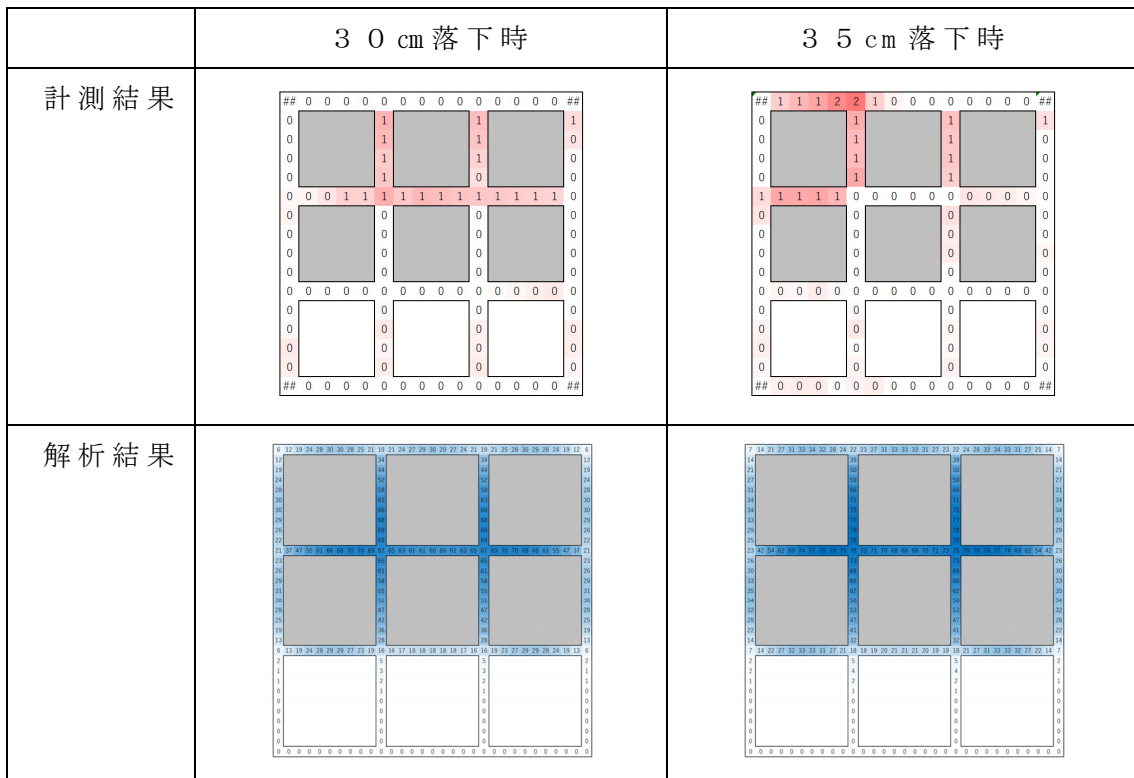


図 5-71 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 3×2・目地 L)

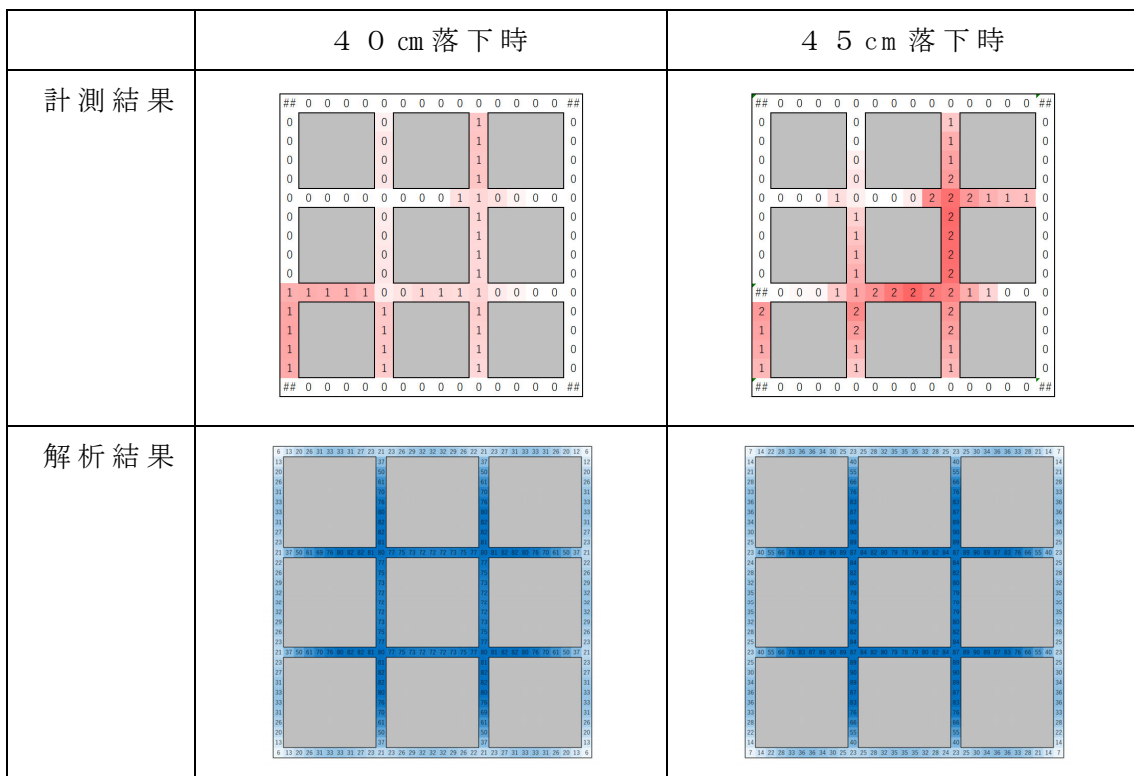


図 5-72 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 3×3・目地 H)

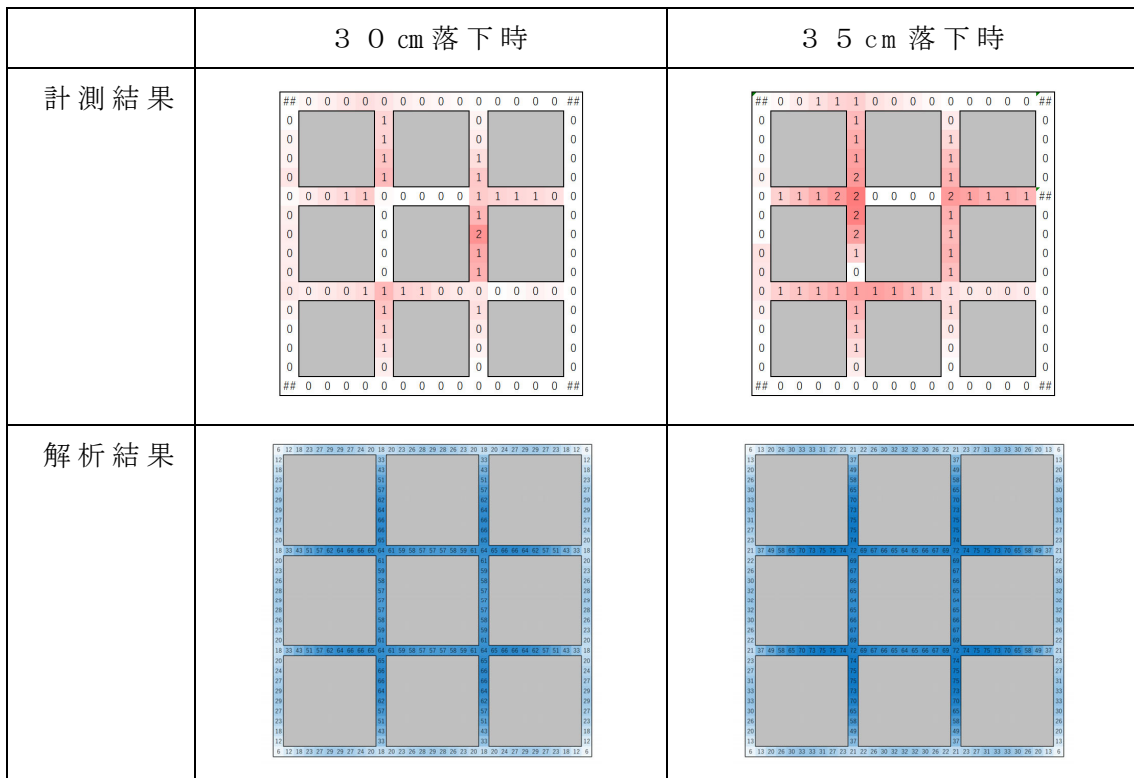


図 5-73 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 3×3・目地 M)

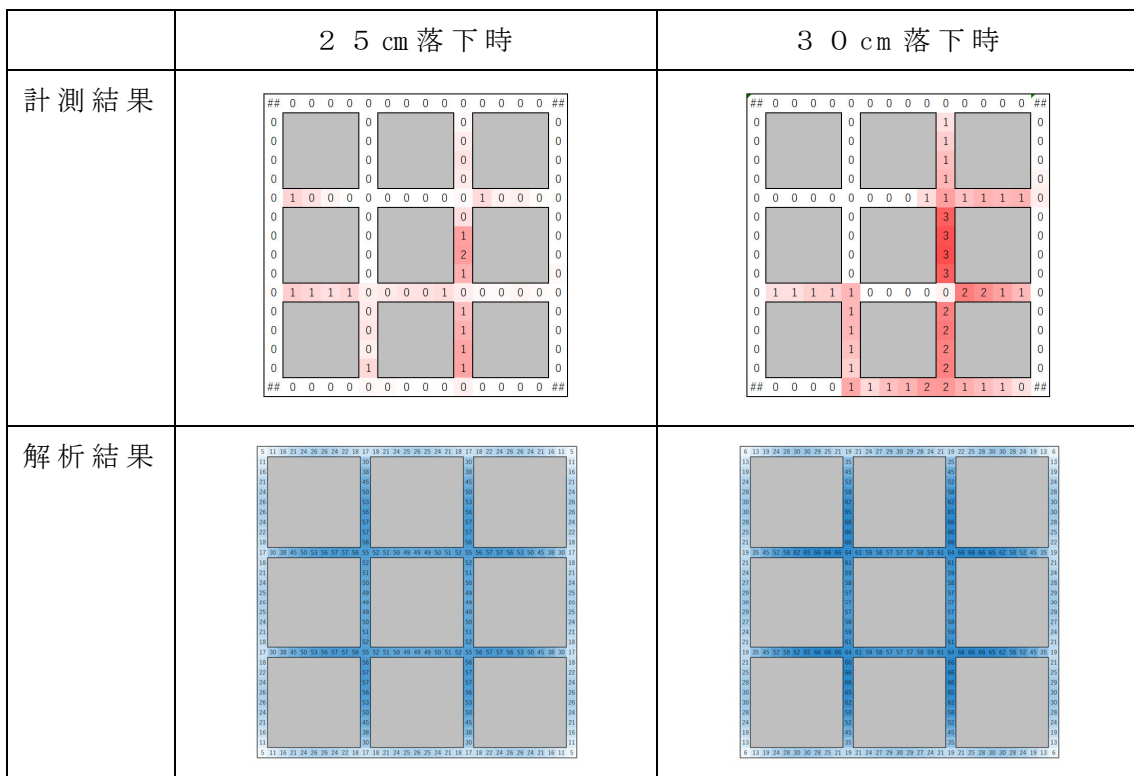


図 5-74 面外残留変位の計測結果と解析結果 (B 試験体・浮 3×3・目地 L)

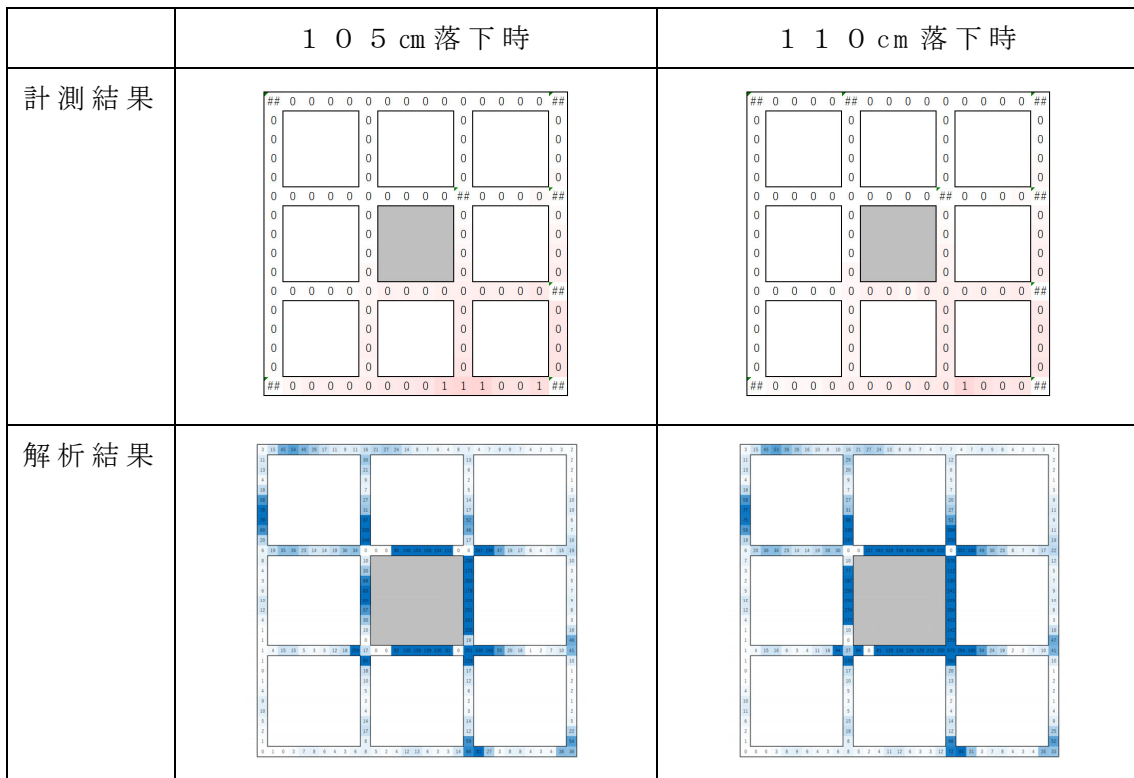


図 5-75 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 1×1・目地 H)

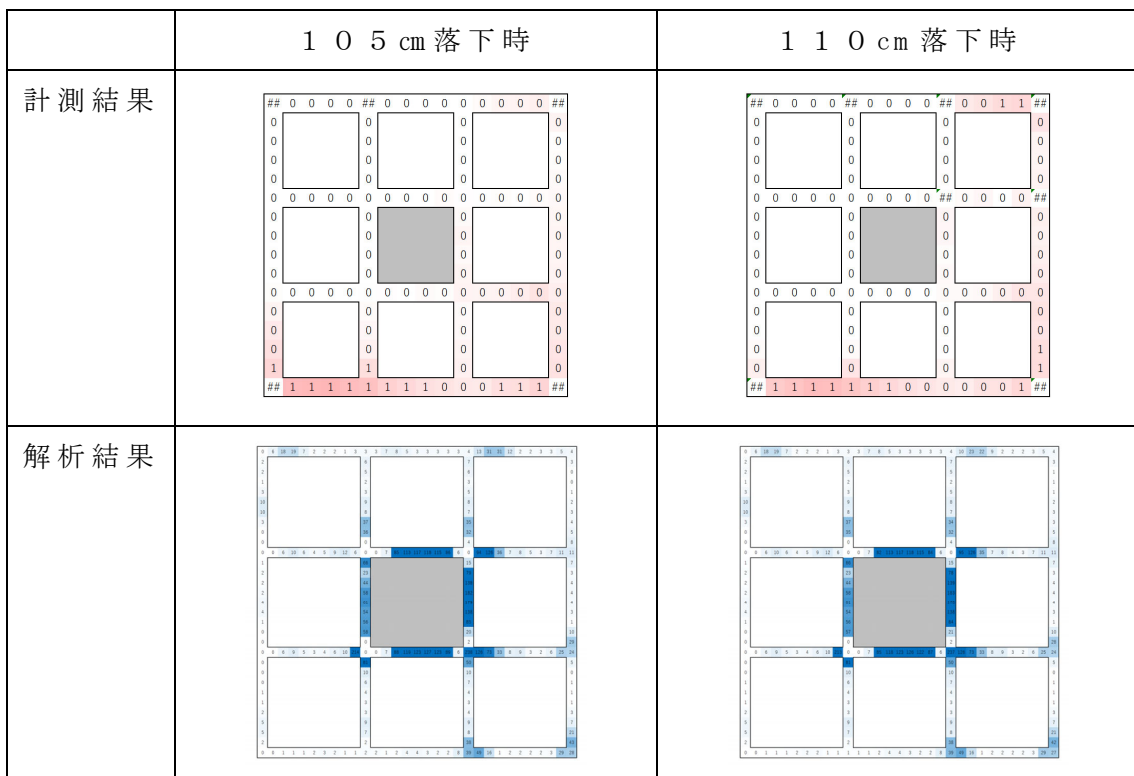


図 5-76 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 1×1・目地 M)

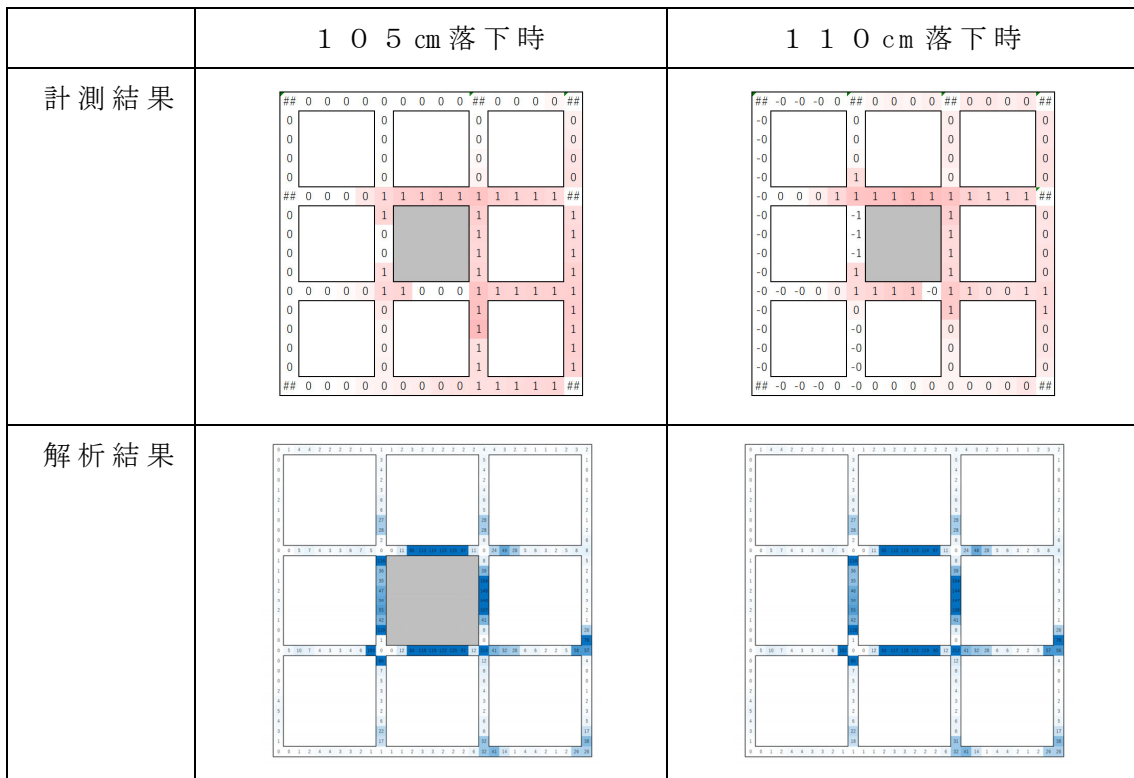


図 5-77 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 1×1・目地 L)

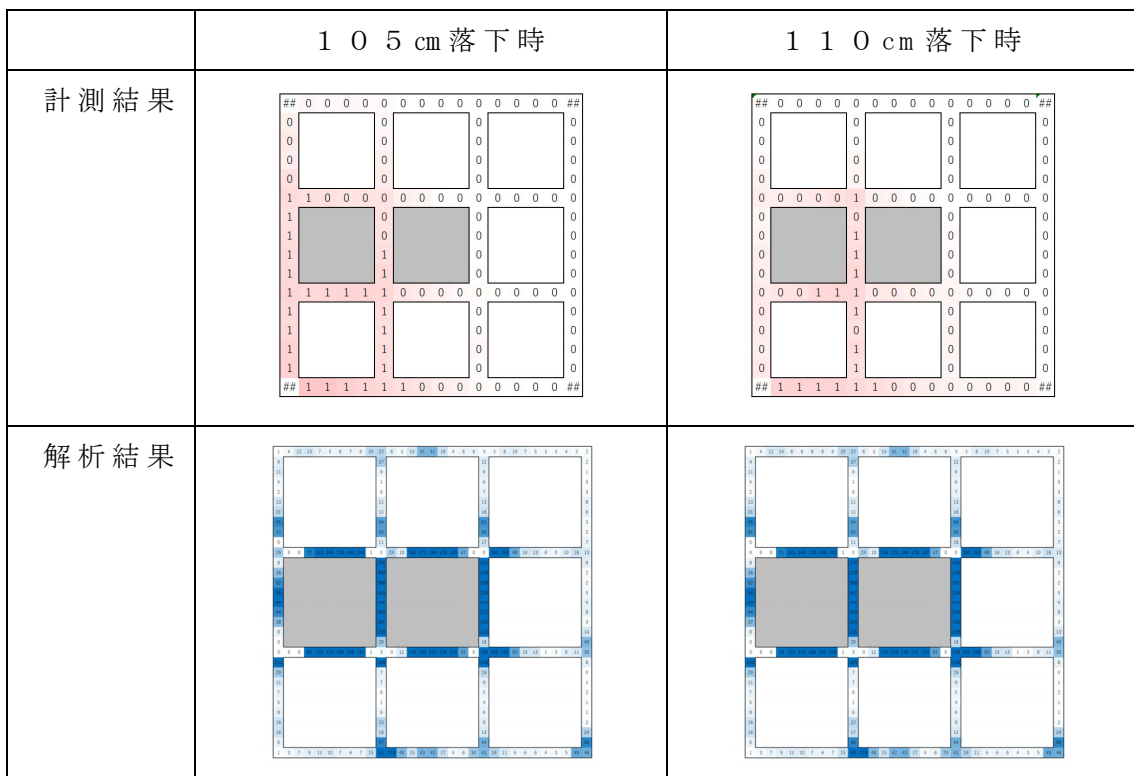


図 5-78 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 2×1・目地 H)

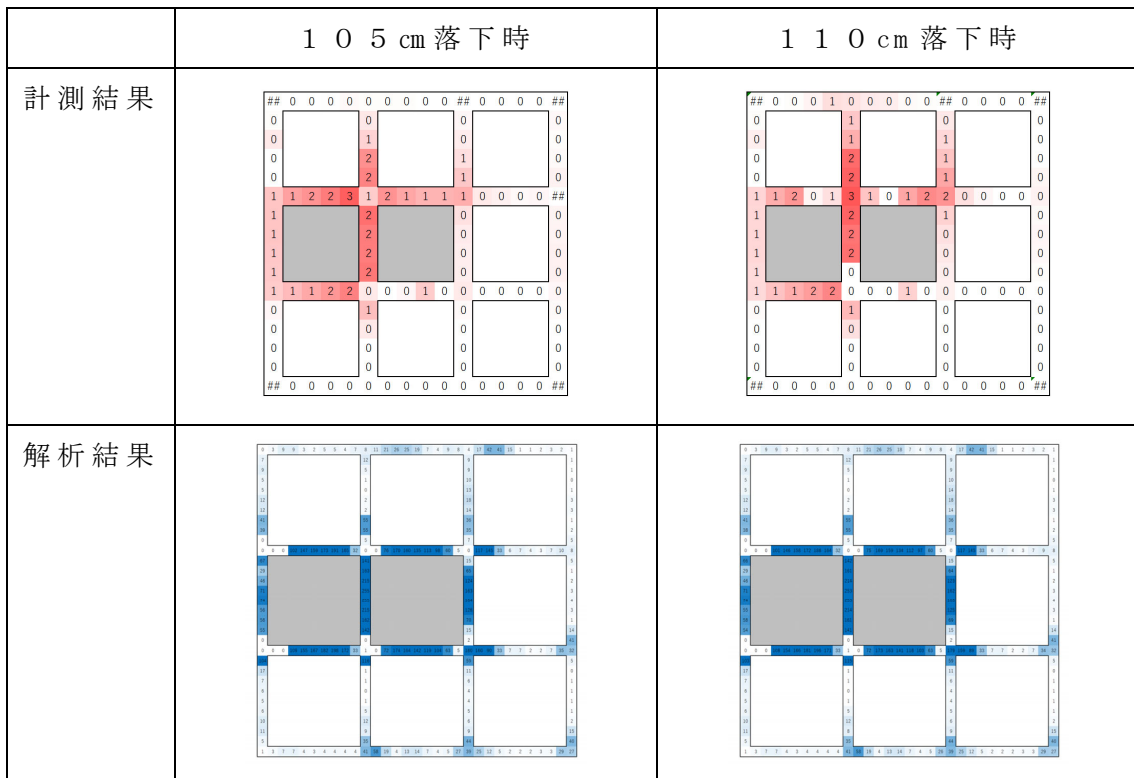


図 5-79 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 2×1・目地 M)

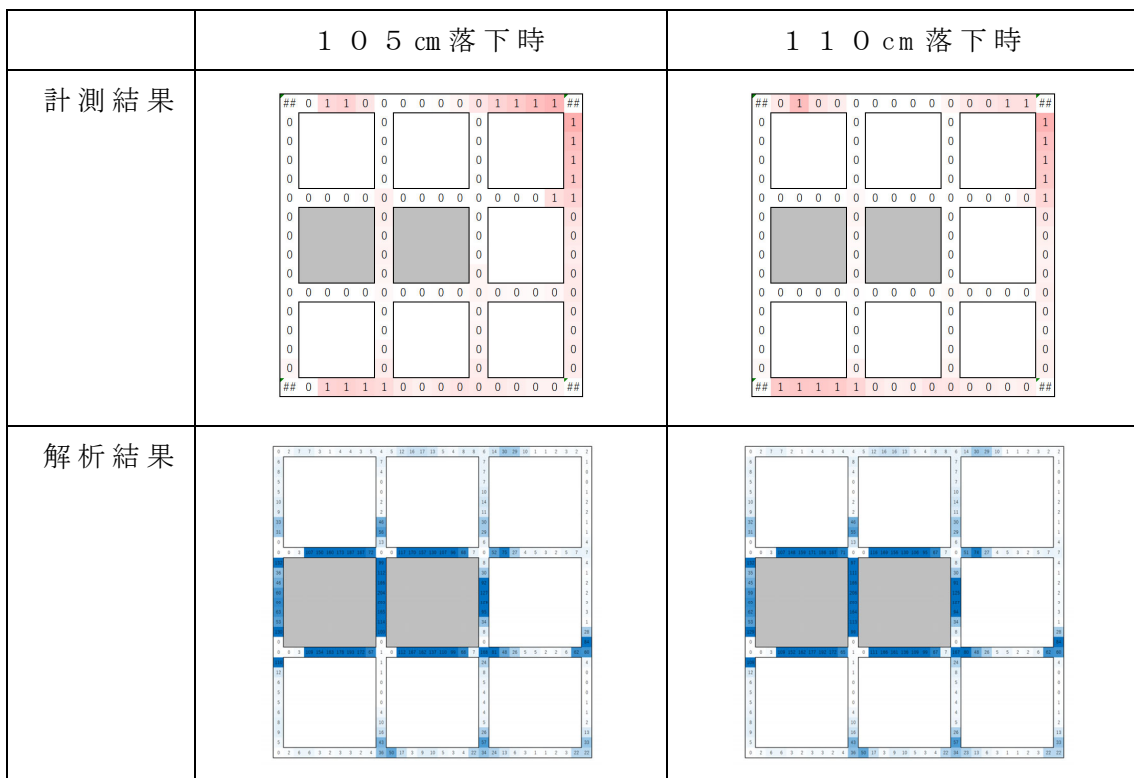


図 5-80 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 2×1・目地 L)

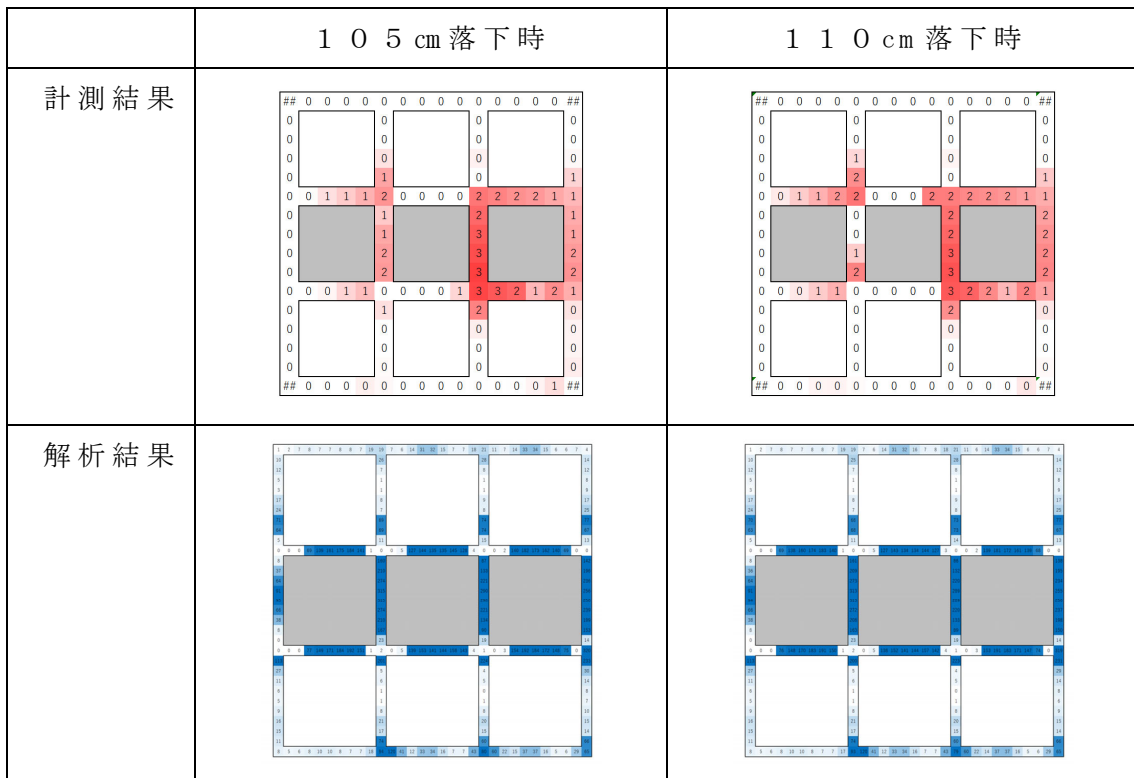


図 5-81 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 3×1・目地 H)

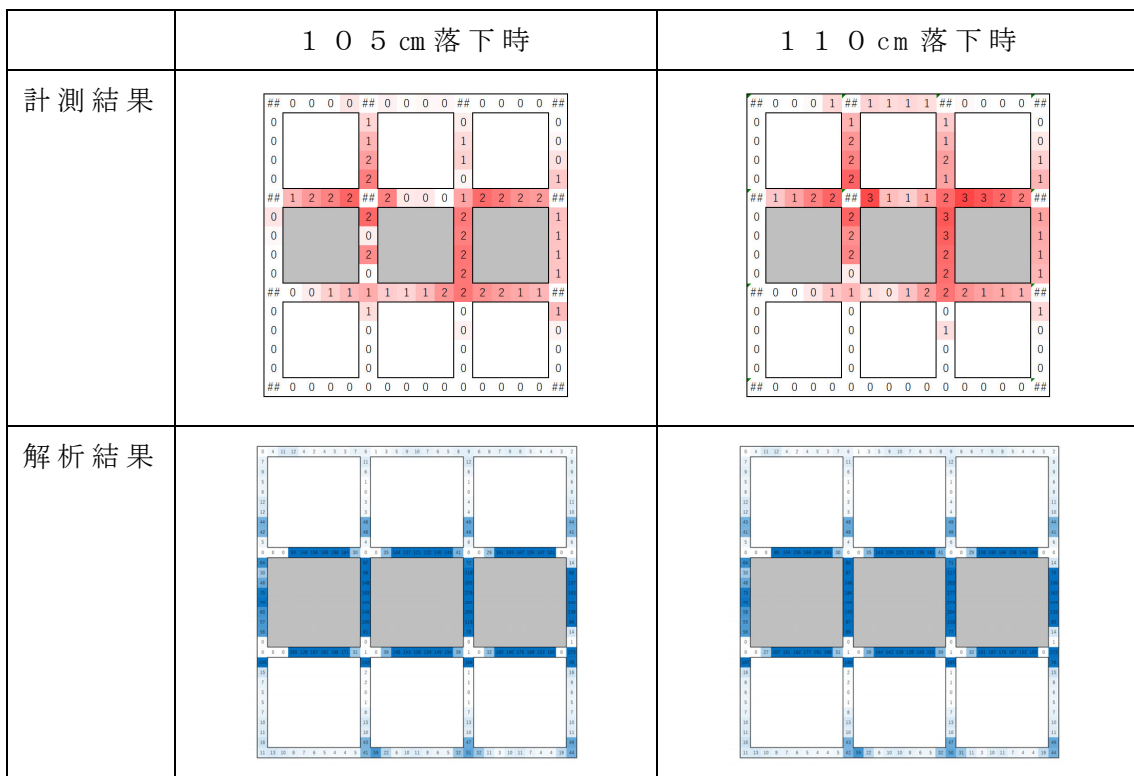


図 5-82 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 3×1・目地 M)

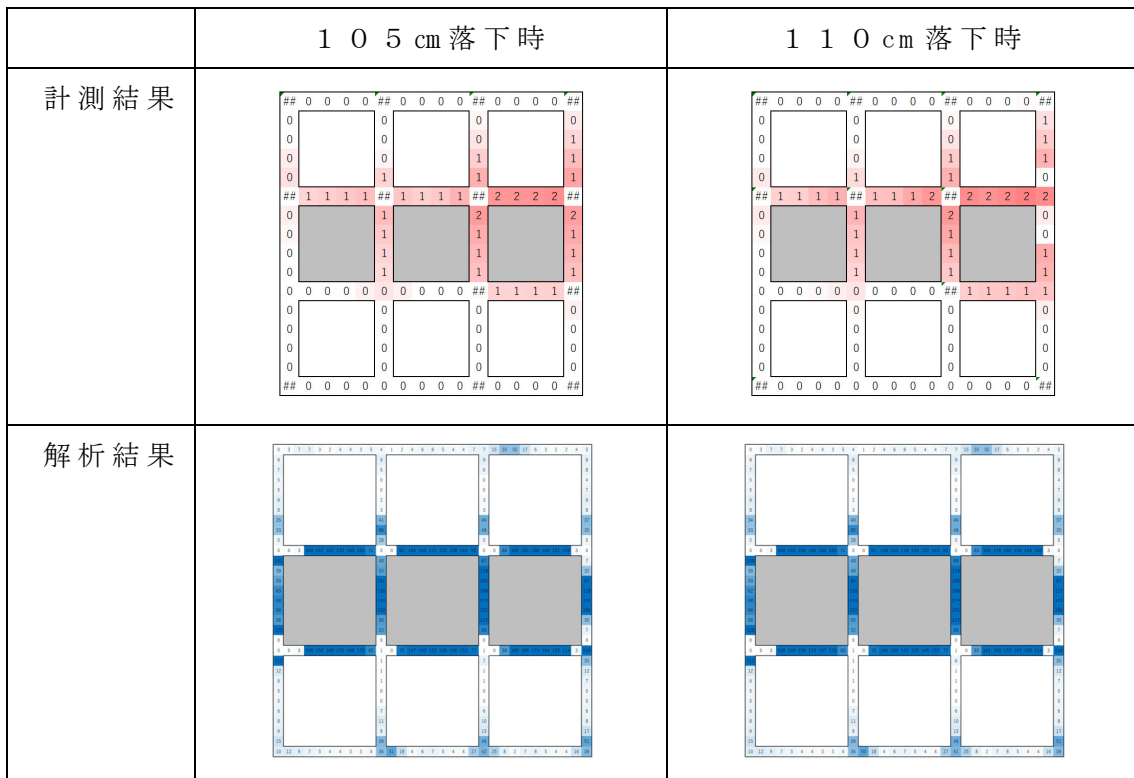


図 5-83 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 3×1・目地 L)

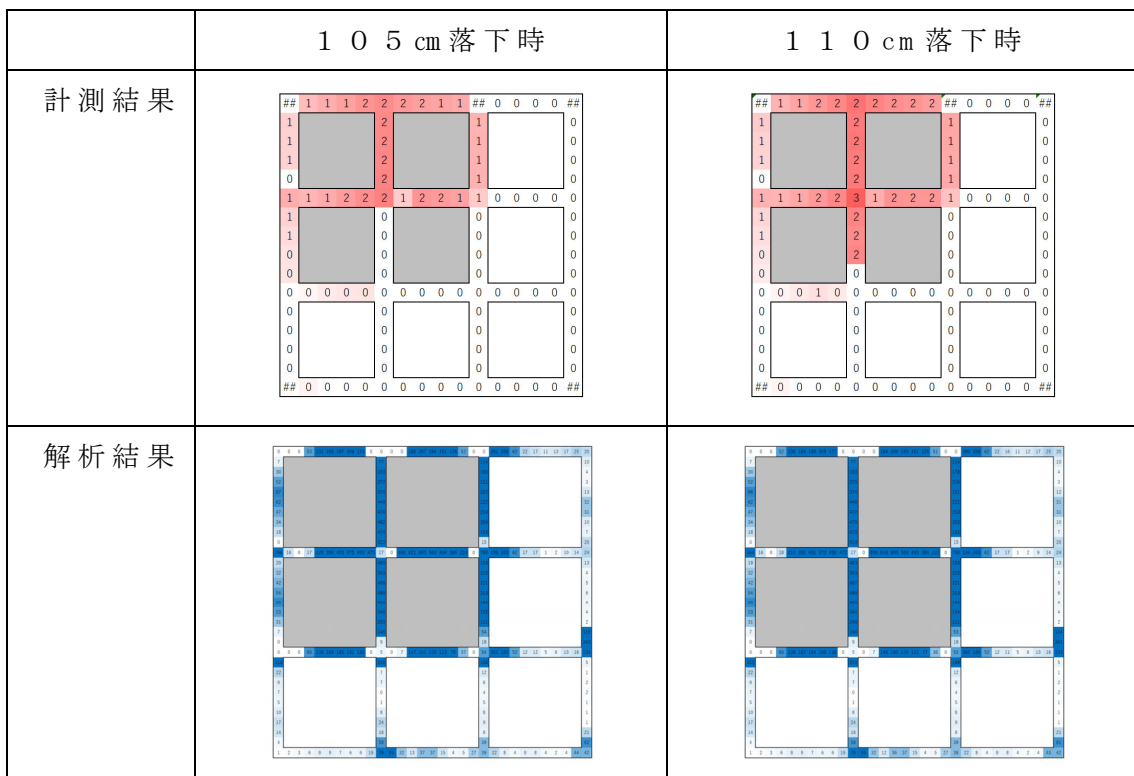


図 5-87 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 2×2・目地 H)

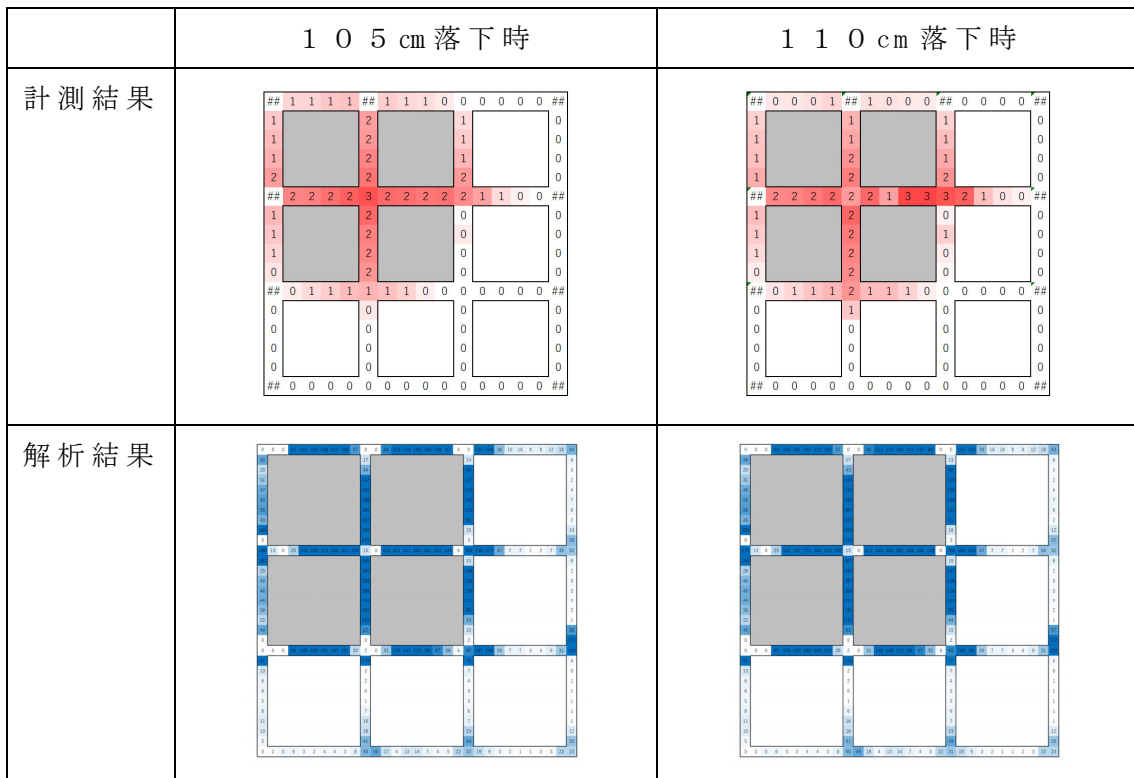


図 5-84 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 2×2・目地 M)

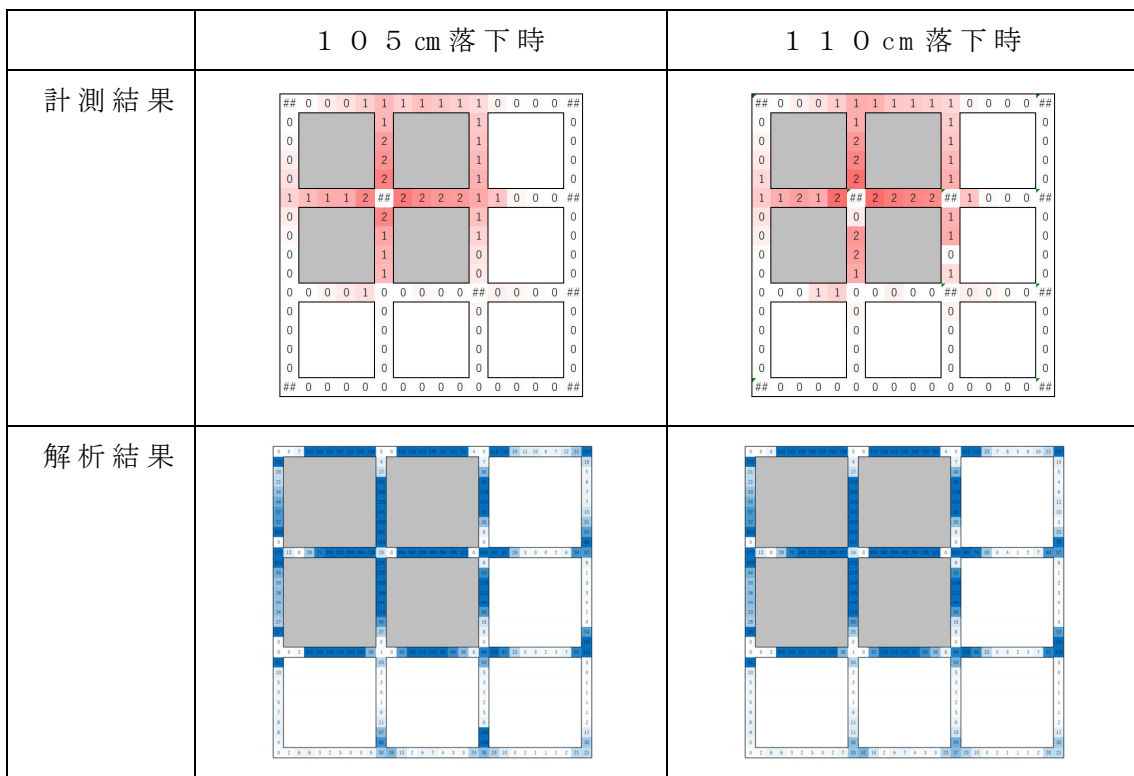


図 5-85 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 2×2・目地 L)

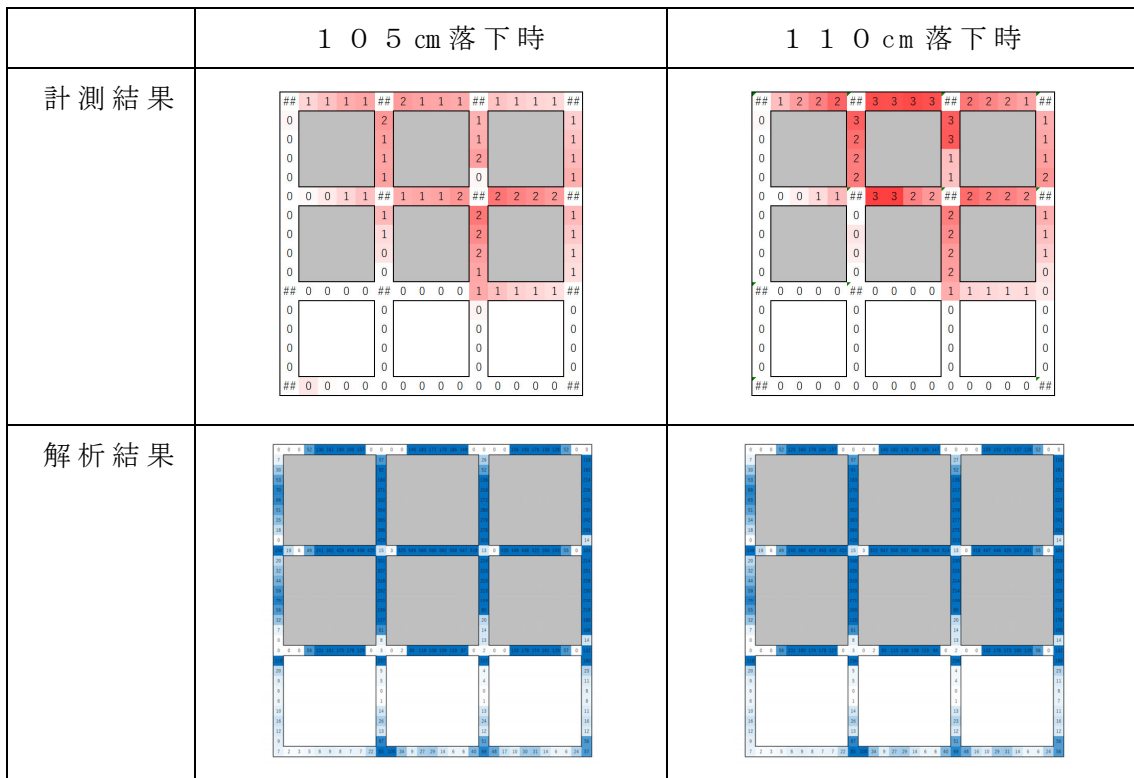


図 5-86 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 3×2・目地 H)

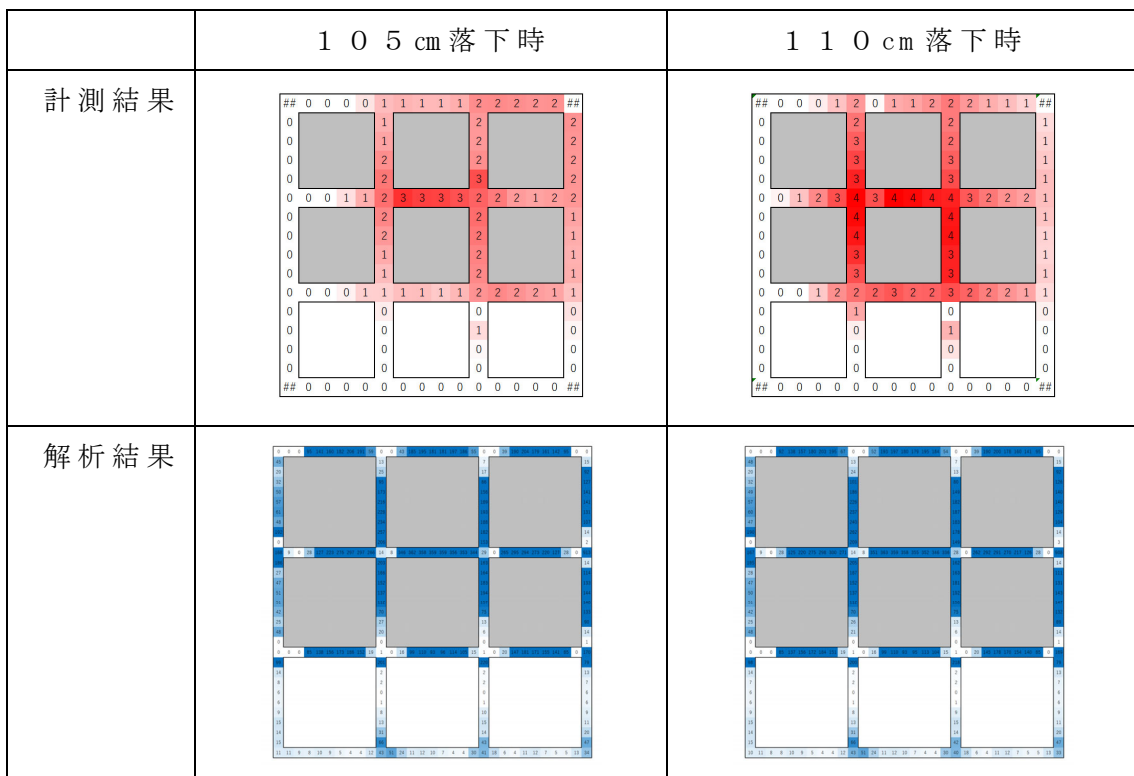


図 5-87 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 3×2・目地 M)

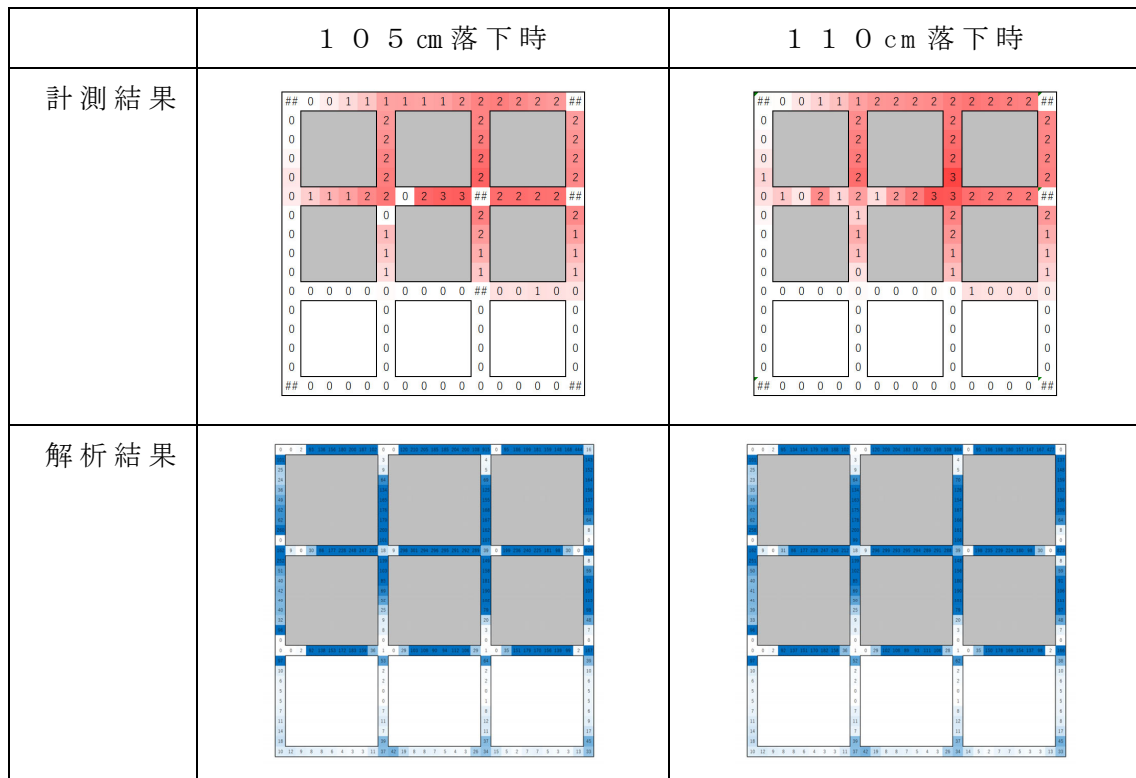


図 5-88 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 3×2・目地 L)

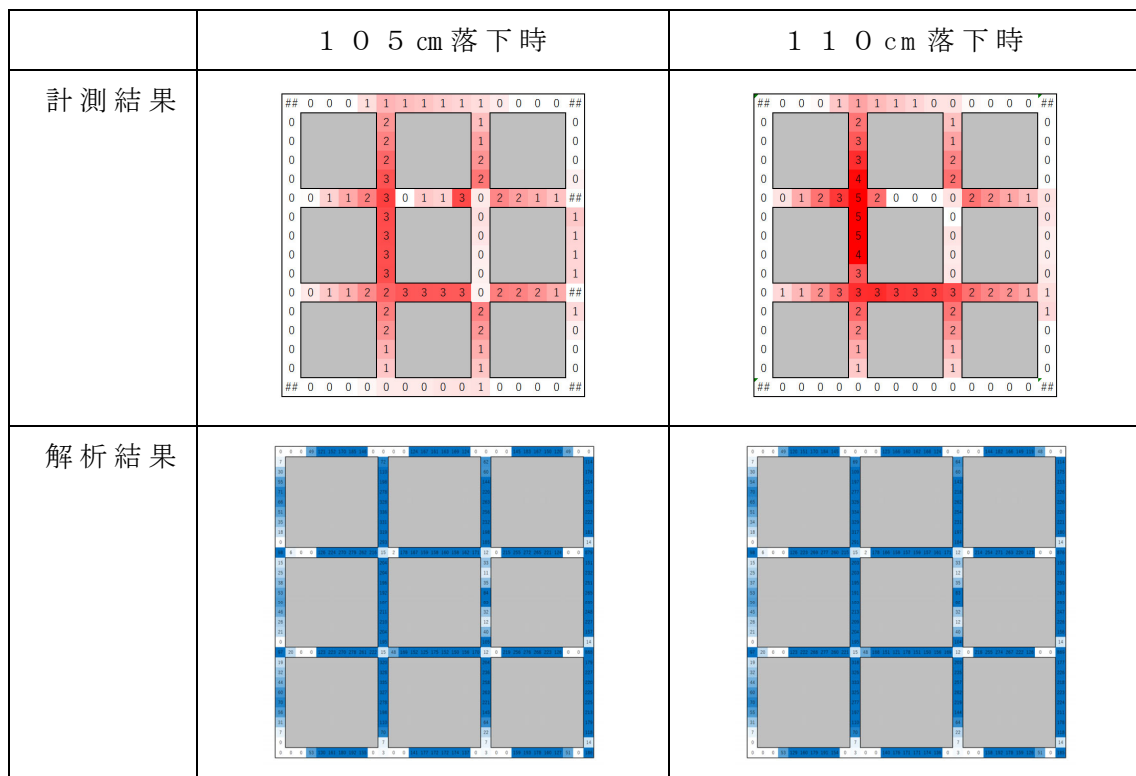


図 5-89 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 3×3・目地 H)

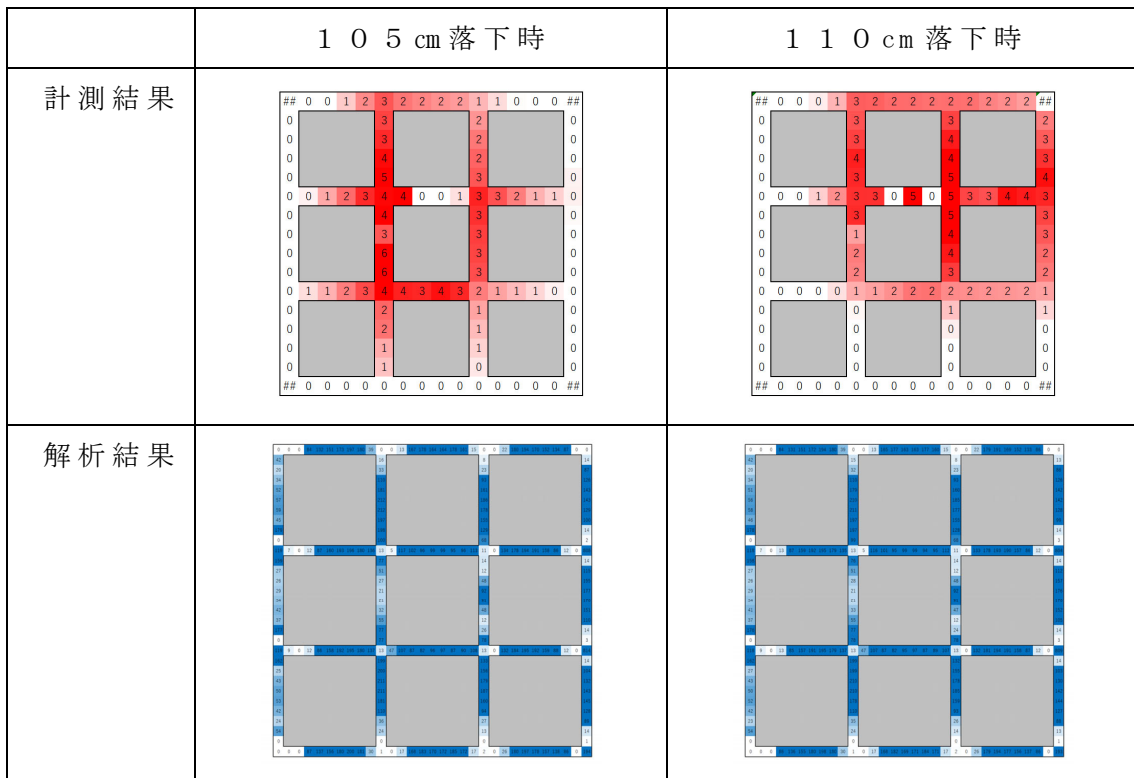


図 5-90 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 3×3・目地 M)

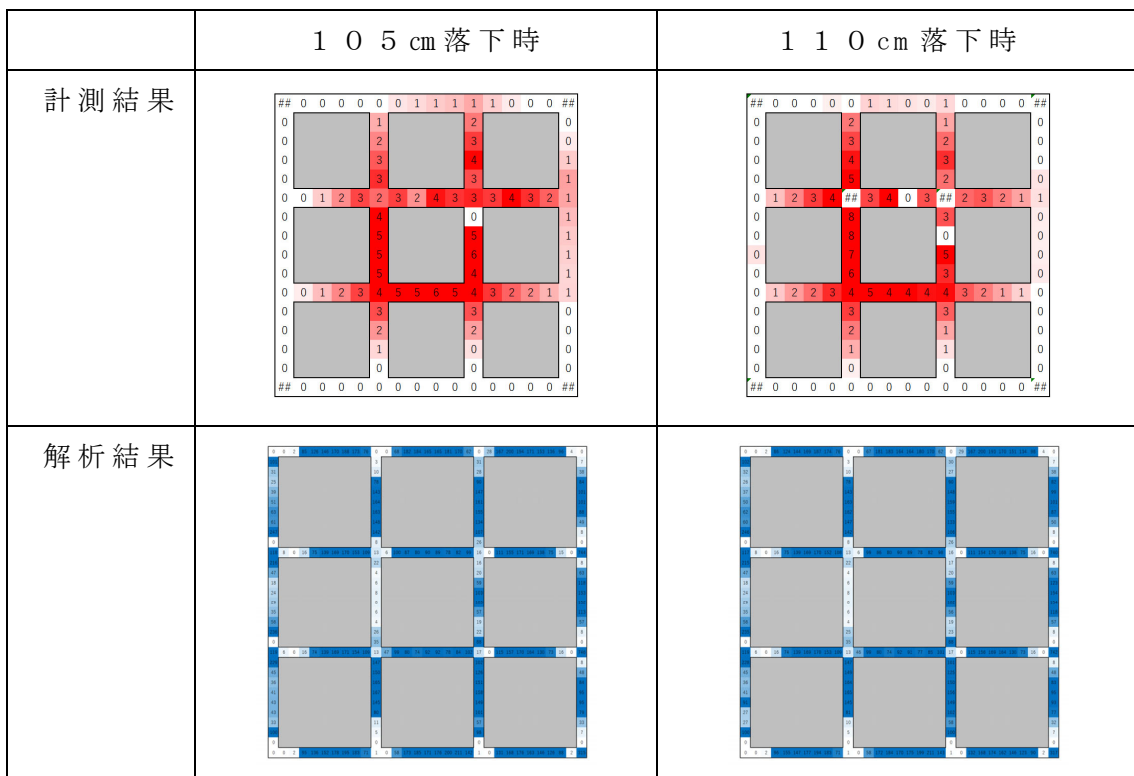


図 5-91 面外残留変位の計測結果と解析結果 (C 試験体・浮 3×3・目地 L)

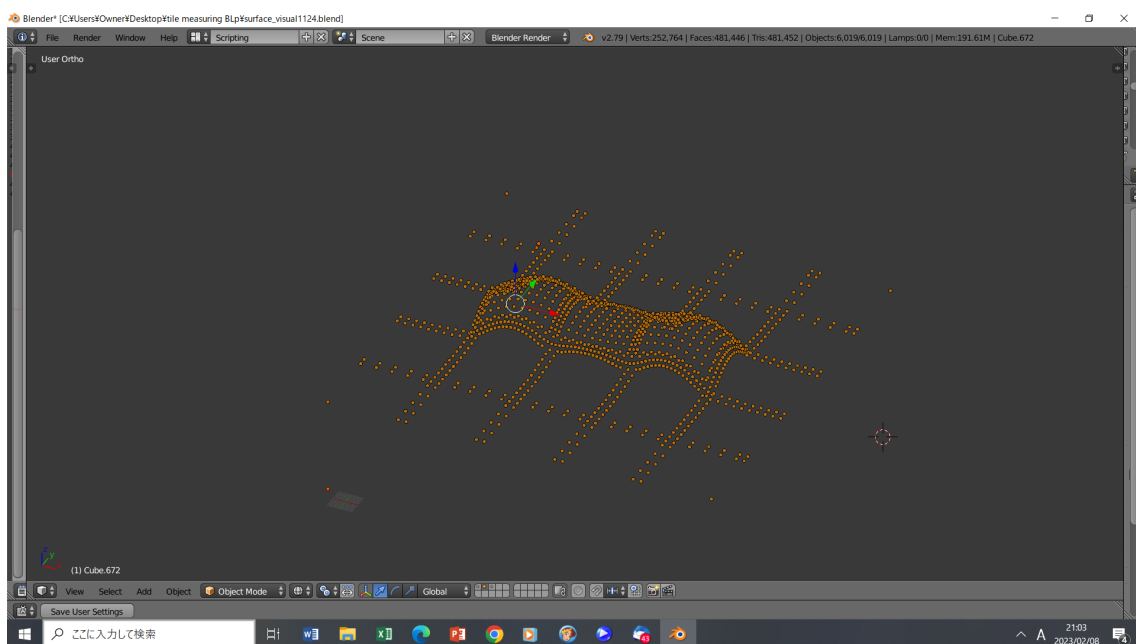


図 5-92 解析結果

(B 試験体 (アンカーピン工法)・浮 3×1・目地 L・落下高さ 110cm)

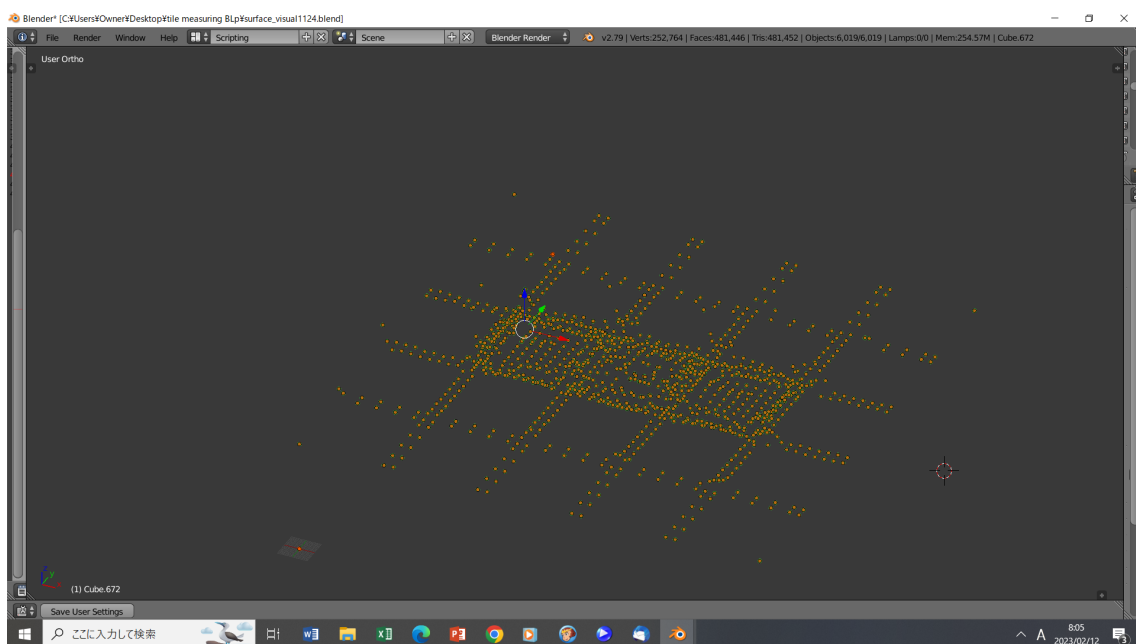


図 5-93 解析結果

(C 試験体 (ピンネット工法)・3×1・目地 L・落下高さ 110cm)

B試験体（アンカーピン固定工法）において、A試験体（補修なし）と同様に浮 1×1～浮 3×3 のどの場合においても面外残留変位 R の形状は線対象となっており、動的衝撃試験の測定結果とは相違が出た。これは浮きタイルはが剥離を起こすと目地モルタルに連結することにより剥落を防止しているため目地モルタルに依存度が高いと考えられる。そこで、実際のタイル施工の場合、特に目地モルタルについては施工時の均一性に欠けることや初期欠陥がある場合が考えられ、これにより結果に相違が出たと考える。B試験体（アンカーピン固定工法）のシミュレーションをした解析結果のの図 5-92 に、C試験体（ピンネット工法）のシミュレーションをした解析結果のの図 5-93 に示す。

しかしながら各浮きタイプにおいて解析結果と動的衝撃試験の計測結果を比較すると大きな違いはなく、相似した剥落形状になっている。浮きタイルをアンカーピンにより固定していることにより、固定された浮きタイルの面外残留変位 R が小さい値となり、その影響が目地にも伝達して隣り合う浮きタイルの面外残留変位 R に影響を及ぼしていると考えられる。これは解析結果と計測結果に同様にみられる傾向である。また、目地材の違いによるタイル剥落高さについて、どの浮きタイプにおいても目地強度の強い目地材のほうが高い値となっている。

C試験体（ピンネット工法）において、面的つながりが強いため浮きタイルの剥落は発生していないが浮きタイル部分の目地に解析結果と同様に面外残留変位 R が大きい値を示している。解析結果において目地交差部分について面外残留変位 R が低い値となっているが、これは今後検討しなければいけない問題点である。

したがって、本研究で提案した推定手法は、実際に荷重を受けた浮きタイルや目地モルタルの浮きの形状と解析結果が近いものであったため有効な手法であると考えられる。

5.3 まとめ

浮きタイルの剥落防止を抑制する補強方法として、アンカーピン固定工法（B試験体）とピンネット工法（C試験体）の有効性を、浮き補修なし試験体（A試験体）の試験結果との比較より検討した結果以下の知見がえられた。

- (1) B試験体（アンカーピン固定工法）・C試験体（ピンネット工法）において落下高さごとに求めた浮きタイル部分に生じる累積浮きタイル部分付与エネルギー推定値と、目地部分の残留変形との関係を求めた結果、それらには比例的な傾向があった。本試験により動的荷重に対する各種補修方法の、浮き剥離抵抗性評価の試験方法として有効と考えられる。
- (2) 破壊開始時付与エネルギーはA試験体（補修なし）、B試験体（アンカーピン固定工法）、C試験体（ピンネット工法）において、各目地強度、目地長さについて大きな差は見られない。この理由として、初期の微小な目地変形にはアンカーピン、およびピンネットにおいても浮きに対する変形追随性が小さいためと考えられる。
- (3) 浮きタイル部分付与エネルギー推定値と目地部分の残留変形により、破壊開始時付与エネルギーを求めた結果、各目地強度、目地長さについて、変形に対する抵抗性はA試験体（補修なし）とB試験体（アンカーピン固定工法）はほぼ同じ結果となり、C試験体（ピンネット工法）については抵抗性が大きくなった。この理由として、B試験体（アンカーピン固定工法）のアンカーピンに関しては今回の目地が強度が低く、中央固定の効果があまり出ていないためと考えられる。またC試験体（ピンネット工法）のピンネットでは目地面を面的に補強し、ずれ剛性を向上させているためと考えられる。
- (4) 浮きタイル部分付与エネルギー推定値と目地部分の残留変形に関する線形評価式の傾きより変形抵抗性を評価した結果、A試験体（補修なし）< B試験体（アンカーピン固定工法）< C試験体（ピンネット工法）の順に大きくなり、浮き補修としてのアンカーピン工法および

ピンネット工法の効果を示されるとともに、今回の動的試験のずれ変形測定結果から変形抵抗性を評価することの有効性が示された。

- (5) 浮きタイル剥落前後の動的荷重推定値により各試験体の剥落危険度を評価した結果、各目地強度、目地長さについて、A試験体（補修なし）とB試験体（アンカーピン固定工法）はほぼ同じ結果となった。この理由として、B試験体（アンカーピン固定工法）のアンカーピンに関しては今回の目地が強度が低く、中央固定の効果があまり出ていないためと考えられる。C試験体（ピンネット工法）については、今回の動的な荷重の範囲では剥落は生じなく、さらに安全性の高い工法であることが示された。

第6章 まとめ

6.1 本研究の総括

本研究の結論は以下のとおりである。本研究では、タイルと下地との間に一定面積の浮きを生じている場合での付与エネルギーと動的荷重に対するタイルの剥落性状に及ぼす目地の影響を検討することを目的とした。疑似的に浮きを再現したタイル張付け試験体を作製し、動的衝撃試験と面外残留変位の計測から外壁仕上タイルの剥落性状を評価する方法を提案し、各種浮き状態のタイル、アンカーピンおよびネットなどでの面的補強効果を把握した。

また剥落に要するエネルギー量について推定した。実際のタイルの剥落性状についての推定手法を提案した。以下にまとめる。

- (1) 浮きタイルなど面材に対する、地震、風力などの面外の動的引張荷重の試験方法を提案した。
- (2) 浮きタイルなど面材の面外の変位分布を計測する手法として 3D スキャナーの有効性を示した。
- (3) 人為的に浮きを生じさせた複数枚のタイルについて、面外の動的荷重より付与エネルギーを求め面外残留変位との関係図によりタイルの剥離、剥落の性状を評価する方法を提案した。
- (4) 目地材の強度が大きいほど、累積浮きタイル部付与エネルギーが大きくなる傾向があった。
- (5) 今回の試験体での複数浮きタイル周辺の目地の総長が大きいほど累積浮きタイル付与エネルギーが大きくなる傾向があった。
- (6) 今回の試験体で複数枚タイルが連続的に浮く場合、動的荷重により、周囲の浮きを生じていないタイルとの目地部での破壊に先行し、浮きタイル部分を連結する目地から剥離が始まり浮きタイル全面が剥落に至る場合がある。
- (7) 下地材から浮いた状態の複数枚タイルの剥落を防止するためには各タイル間の目地材の強度を確保する必要がある。

- (8) アンカーピンによる浮きタイル中央部のアンカーピン固定工法において目地が健全であれば、動的荷重に対する複数枚タイルの剥落強度は大きくなる。
- (9) ピンネット工法は全面連続繊維を表面付着させることで面的なつながりにより、動的荷重に対する浮きタイルの面外残留変位も抑えられ剥落強度は大きくなる。
- (10) 3D解析による浮きタイルの変形シミュレーション方法を提案した。浮きタイル周辺部分の残留変形の分布の解析結果は実験結果と類似した分布形状となった。
- (11) 剥落開始時の累積浮きタイル部付与エネルギーは、水セメント比が小さく浮きタイル枚数が少ない試験体が小さくなる傾向がある。
- (12) 共通した特徴を持つ浮きタイプ同士は剥落直前の形が似ており、剥落開始直前の累積浮きタイル部付与エネルギーにも規則性が見られる。
- (13) 実験結果との比較から、提案した推定手法は有効であったと考えられるが、施工不良や初期欠陥、荷重の偏りなどの要素も取り入れることで精度の向上が期待できる。

6.2 各章のまとめ

第1章では、本研究の背景と目的について述べ、本論文の構成を示した。

第2章では、動的衝撃試験による浮きタイルの動的荷重とタイル面の剥離性状との関係性を評価する手法を検討した。まず、落下衝撃試験機により浮きタイル試験体に動的な面外変形を生じさせるとともに、ハイスピードカメラを用いた非接触加速度計測による動的荷重の評価を行った。また、衝撃試験後の浮きタイルの剥離性状の評価方法として、剥離タイル面の面外塑性変形を3次元レーザー反射光を用いて多数点評価する方法を検討し、動的荷重に対するタイル面の剥離性状を定量的に評価する方法を確立した。本章より得られた知見は以下のとおりである。

- (1) ダイヤルゲージの実測値と3Dスキャナーの計測値の結果より、それぞれの落下高さでのダイヤルゲージを用いた実測値と3Dスキャナーを用いたスキャン計測値の相関関係(R)は0.993となった。
- (2) 計測結果から、3Dスキャン計測でダイヤルゲージと近い精度での計測が可能として、残留変位に分布がある場合の多点計測には、3Dスキャナーによる計測が同等の精度を有することが確認された。今後、本研究の動的衝撃試験における面外残留変位計測に使用することとした。
- (3) 動画解析ソフトウェアDIPP-Motion(共にDITECT社)を用いて、加速度を求め落下高さとの関係において、近似式により本実験での加速度を求めた。近似式は、 $y = -0.819x^2 + 167.11x$ で、決定係数は $R^2 = 0.9092$ であった。したがって、今回得られた最大加速度の近似式を本研究の動的衝撃試験における動的荷重の算定に使用することとした。
- (4) 加速度と落下高さとの関係性をを用いて、試験体に付与するエネルギーを求めた。

第3章では、浮きを生じたタイル試験体の動的衝撃試験による剥離性状を把握した。種々の条件により浮きを生じさせたタイル試験体に対して動

的衝撃試験を行い、累積浮きタイル部付与エネルギーとタイルの面の剥離性状との関係を、目地部の塑性変形量、剥離が生じ始める降伏荷重、剥落が生じるまでの塑性変形エネルギーなどにより評価する方法を提案した。実験要因として、タイルの浮き面積6条件、劣化目地を想定し目地強度3条件など設定し、それらがタイルの剥離性状に及ぼす影響を明らかにした。本章より得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 浮きタイルの面外残留変位の分布は各試験条件とも目地部の局所的な部分から残留変異が発生し、その後、落下高さの増加にしたがって残留変位が増加し最終的には剥落に至る傾向があった。
- (2) 浮きタイル部分付与エネルギー推定値と、浮きタイル部分の残留変形の平均値との関係を求めた結果、それらには比例的に増加の傾向があった。
- (3) 各浮きタイル試験体の条件との関係を求めた結果、破壊開始時付与エネルギーは、目地の長さが大きいほど、また、目地強度が大きいほど大きくなる傾向があった。
- (4) 最大加速度から求めた動的荷重 F 推定値について、最終的に浮きタイル部分が剥落する落下高さの動的荷重推定値を示し、目地の長さが大きいほど、また、目地強度が大きいほど大きくなる傾向があった。

第4章では、浮きを生じたタイル試験体の剥離性状を数値解析によるシミュレーションにより推定する方法を検討した。数値解析には FEM プログラム FrontISTR¹⁾を用い、目地部の塑性変形とタイル面全面の変形を変位増分手法により算出する方法を試みた。実験結果と解析結果との整合性についてタイルの部分的な剥落率を用いて検討し、タイル剥落の推定方法を示した。本章より得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 構造解析プログラムソフトウェア『FrontISTR』を用いることで、目地接点間の応力まで考慮して目地の変位を推定でき、要素間の応力のつり合いから変形や応力分布を再現できる解析手法を提案した。

- (2) 浮きタイル試験体（A試験体（補修なし））において各浮きタイプにおいて解析結果と動的衝撃試験の計測結果を比較すると破壊開始時は比較的良い相関があった。
- (3) 残留変形の計測結果は解析結果よりも小さくなった。その理由は静的な解析に対して実験では動的荷重が大きく見かけの剛性が大きくなり変形が小さくなったためと考えられる。

第5章では、浮きタイル仕上に対する有効な補強方法の検討を行った。浮きタイルを生じさせた試験体の補強方法として、タイル中央をアンカーピンにより固定化するアンカーピン固定工法と、タイル全面を繊維補強面材で補強するピンネット工法に着目し、それらの工法を施工した浮きを生じたタイル試験体について動的衝撃試験を行い、目地部の塑性変形量、剥離が生じ始める降伏荷重、剥落が生じるまでの塑性変形エネルギーなどについて未補修試験体での実験結果との比較を行なった。また数値解析によるシミュレーションにより剥落抵抗性の評価を行なった。それらの結果に基づき、浮きを生じたタイル面の有効な補修工法を提案した。本章より得られた知見は以下のとおりである。

- (1) B試験体（アンカーピン固定工法）・C試験体（ピンネット工法）において落下高さごとに求めた浮きタイル部分に生じる累積浮きタイル部分付与エネルギー推定値と、目地部分の残留変形との関係を求めた結果、それらには比例的な傾向があった。
- (2) C試験体（ピンネット工法）においては、動的衝撃試験により浮きタイルの剥落が発生しなかったことよりタイルの剥離・剥落の防止策として有効な手段であると考えられる。
- (3) 破壊開始時付与エネルギーはA試験体（補修なし）、B試験体（アンカーピン固定工法）、C試験体（ピンネット工法）において、各目地強度、目地長さについて大きな差は見られない。
- (4) 浮きタイル部分付与エネルギー推定値と目地部分の残留変形に関する線形評価式の傾きより変形抵抗性を評価した結果、A試験体（補修なし）< B試験体（アンカーピン固定工法）< C試験体（ピンネ

ット工法)の順に大きくなり、浮き補修としてのアンカーピン工法およびピンネット工法の効果が示された。

- (5) 浮きタイル剥落前後の動的荷重推定値により各試験体の剥落危険度を評価した結果、各目地強度、目地長さについて、A試験体(補修なし)とB試験体(アンカーピン固定工法)はほぼ同じ結果となった。C試験体(ピンネット工法)については、今回の動的な荷重の範囲では剥落は生じなく、さらに安全性の高い工法であることが示された。

6.3 今後の課題

今後の課題としては、以下に整理する。

- (1) 今回は45角(45×45mm、厚み6mm)のタイルを使用した。45二丁掛けタイルやその他の寸法の異なるタイルについても検討する必要があると考える。
- (2) 目地モルタルが劣化している場合の対処方法について検討していくことが必要であると考え。
- (3) 目地モルタルやタイル貼りの施工不良や初期欠陥、荷重の偏りなど、浮きタイル形状以外の要素を取り入れることで推定の精度の向上が期待できる。

参考文献

- 1) 吉田 慧悟, 橘高義典, 國枝陽一郎, 佐々木聡: 浮きを生じた矩形タイル仕上げ部の目地破壊による剥落について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, No.1699, pp521-522, 2020.9
- 2) 佐々木聡, 橘高義典, 國枝陽一郎: タイル仕上げの目地強度と剥離性状に関する研究 その1 浮きタイル目地の剥離性状定量化手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, No.1469, pp937-938, 2021.9
- 3) 矢島わかな, 佐々木聡, 橘高義典, 國枝陽一郎: タイル仕上げの目地強度と剥離性状に関する研究 その2 浮きタイル目地の剥離性状に関する解析手法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, No.1470, pp939-940, 2021.9

謝辞

本論文の執筆にあたり、東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 建築学域 橘高義典教授には、ご多忙にも関わらずいつも丁寧なご指導ならびにご助言を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

本論文の審査におきましては、東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 建築学域 壁谷澤寿一准教授、東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 建築学域 多幾山法子准教授には、貴重なお時間をかけて本論文をご精読いただき、ご指導とご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 建築学域 助教國枝陽一郎先生には、日頃より本研究の実験の実施、解析などの多岐にわたりご指導ならびにご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

また本研究を実施するにあたり、東京都立大学卒論生・修論生の皆様に多大なご協力をいただきました。心より感謝申し上げます