

論文 界面の発生状況の違いが骨材周囲の変形挙動に与える影響に関する実験的研究

平岩 陸^{*1}

要旨：本研究では、近年様々な分野で用いられるようになった画像相関法によって、モルタル供試体と、それにモデル骨材を入れた供試体の変形挙動を観察した。モデル骨材供試体を作製する際に载荷方向に対して直角方向に2方向および平行方向の計3方向の打込み方向を設定し、界面の発生状況を変化させて骨材周囲の変形挙動に与える影響を検討した。その結果、界面の発生位置によって、また圧縮力を受けるか引張力を受けるかによって、その変形挙動は大きく異なることが明らかとなった。

キーワード：界面、弱化層、変形挙動、载荷方向、画像相関法

1. まえがき

コンクリートはセメント、水、細骨材、粗骨材からなる複合材料であるため、変形・破壊状況は複雑である。特に寸法の大きい粗骨材については、モルタルとの界面に遷移帯と呼ばれる弱い層ができ、そこから変形・破壊が生じる¹⁾。さらに、コンクリートの打込みの際にはブリージングが生じるため、粗骨材や鉄筋の下面に空隙のような弱化層ができることが知られている。これは、粗骨材周囲の界面の性質が上下左右の場所によっても異なることも意味している。また、この粗骨材周囲の上下左右の位置は打込み方向を基準とした位置であり、通常は载荷方向と同方向であるが、载荷方向が変われば、通常下部にある弱化層は左右どちらかの側面に位置することになり、これによっても変形・破壊挙動が変化する²⁾。

コンクリートの変形挙動を観察するには、これまでは多くの場合ひずみゲージが使用されてきた。また、変位計を用いて、供試体の縁の変位や、供試体に治具を取り付けてその治具の変位を測定するといった方法も一般的である。しかし、いずれにしても測定部位は、それらの測定機器を設置した一部分に限られる。測定部位を多くしたいところであるが、それにはひずみゲージや変位計の数を増やすための費用や接続するデータロガーのチャンネル数などからも限界がある。しかし、近年、デジタルカメラの解像度の向上やコンピュータの画像処理技術

の向上により、デジタル画像を用いて前後の画像の変化から変位やひずみを測定するデジタル画像相関法が実用化に至っており、コンクリートに適用した例も増えている^{3)~5)}。

本研究では、このように様々な利点のある画像相関法を用いて、コンクリートの変形挙動に関する基礎的な検討として、コンクリート供試体の表面変位を観察する。今回は、モルタル供試体と、それにモデル骨材を入れた供試体の変形挙動を観察する。モデル骨材を入れた供試体については、作製する際に载荷方向に対して直角方向に2方向および平行方向の計3方向の打込み方向を設定し、载荷方向に対する界面の発生状況を変化させた。このようにモルタルーモデル骨材界面の発生状況を変化させた場合に、骨材周囲の変形挙動がどのように変化するか、画像相関法によって検討した。

2. 実験方法

2.1 供試体の作製

本研究では、全体がほぼ均一と見なせるモルタル供試体および中央にモデル骨材を配置したモデル骨材供試体を作製した。モデル骨材供試体については、打込み後の硬化時に静置方向を変えた3種類の供試体を作製した。

図-1にモルタル供試体の作製方法を示す。ここに示すように、100×100×400mmの曲げ試験用の角柱供試

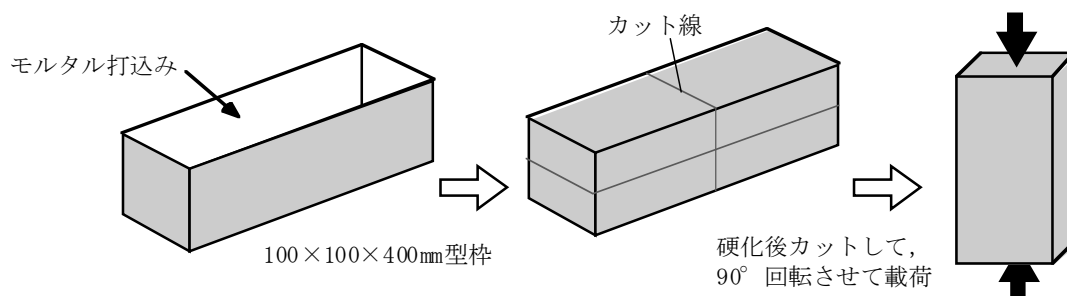


図-1 モルタル供試体の作製方法

*1 名城大学理工学部建築学科 准教授 博士（工学）（正会員）

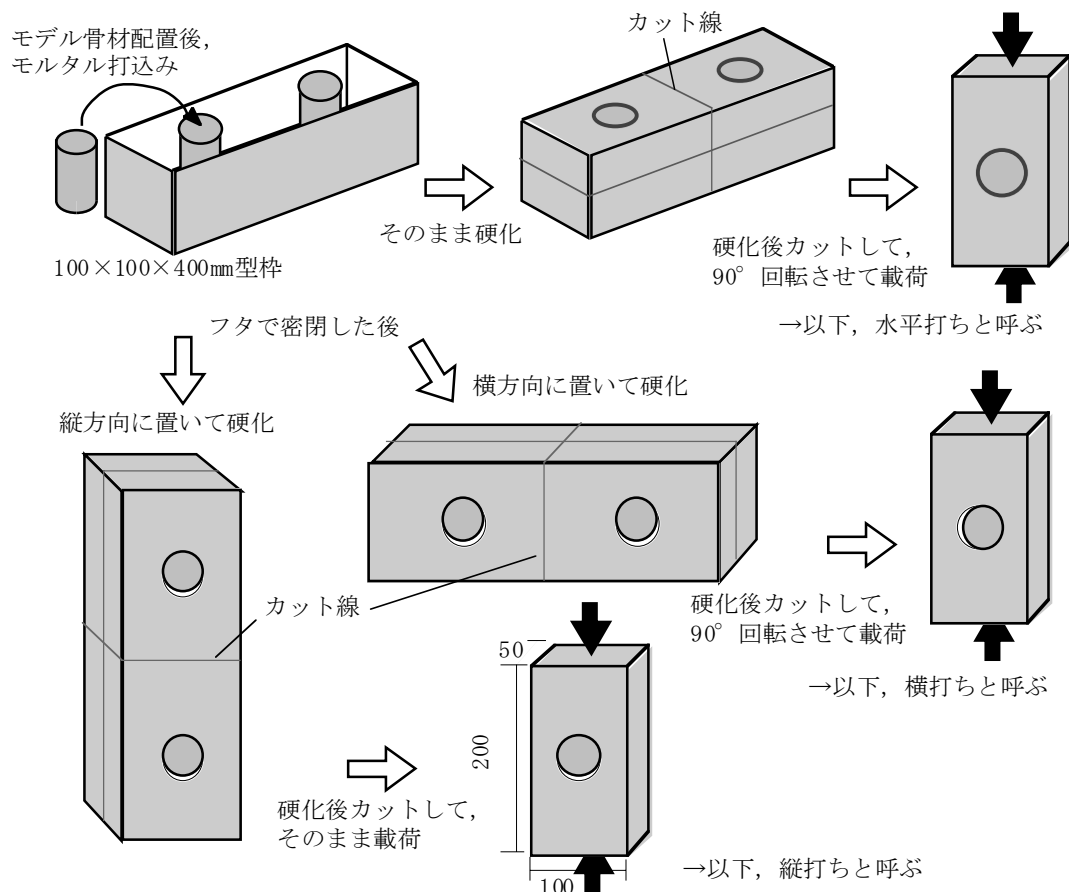


図-2 モデル骨材供試体の作製方法
(3種類：水平打ち、縦打ち、横打ち)

体を作製し、それを4等分して100×200×50mmとした直方体供試体を作製した。モデル骨材供試体については、図-2に示すように作製した。まず、100×100×400mmの曲げ試験用の角柱型枠に、別途作製し表乾状態としたφ50×100mmの円柱供試体のモデル骨材を2つ配置し、モルタルを打込む。その後、硬化させる際の静置方向について、3種類の方法で行った。まず、曲げ試験用の角柱型枠をそのまま静置して硬化させたものである。以下ではこれを水平打ちと呼ぶ。次に、フタをして400mmの長手方向に立てて静置し、硬化させたものである。以下ではこれを縦打ちと呼ぶ。最後に、フタをして横向きに静置して硬化させたものである。以下ではこれを横打ちと呼ぶ。いずれの方法も、硬化後に4週間の水中養生を行い、コンクリートカッターを用いて図中にあるカット線でカットし、50×100×200mmの直方体の供試体を4つ作製する。その後、載荷面である50×100mmの面を端面研磨機で平滑とし、圧縮試験を行うものである。

このように打込み後に静置する方向を変えることで、界面の発生状況が図-3に示すように3種類できる。水平打ちでは、図-3(1)に示すように打込み方向下部の弱化

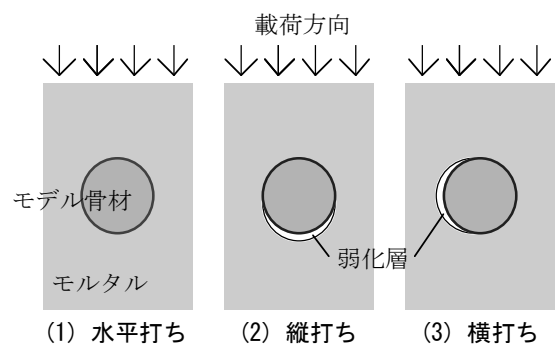


図-3 モデル骨材周囲の界面の状況

層はできないが、モデル骨材側面周囲に均一に界面ができると考えられる。一方、縦打ちと横打ちでは静置時の重力方向の骨材下部に弱化層ができるものの、圧縮試験時にはその位置が異なることになる。縦打ちでは、図-3(2)に示すように載荷方向に対して骨材の下側に、横打ちでは、図-3(3)に示すように載荷方向に対して骨材の左側にできる。同時に、打込み時の上側や左右側の界面の位置も、縦打ちと横打ちで異なることになる。

このようにして界面の発生状況の異なる供試体を作製し、もっとも面積が広く、またモデル骨材が露出する100×200mmの面に、後述する画像相関法によってひず

みの観察を行った。モルタルおよびモデル骨材の調合表および力学的性質を表-1に示す。今回は、界面の状況に影響を与えるであろうブリーディング量が多めとなるように、水セメント比を60%とした。また、通常骨材は、モルタルに比較して圧縮強度や弾性係数などの物理的性質が高いが、今回はモデル骨材、モルタルともに同じ調合とし、界面の存在の有無および発生状況の影響のみを検討できるようにした。

2.2 画像相関法

2.1に示したように、直方体供試体の100×200mmの面を画像相関法によって観察した。打込み後、4週間の水中養生ののちにカットを行った。カットはコンクリートカッターによる水冷で行っており、カットの後に1日乾燥させて塗装の準備を行った。その後下地となる白塗装を行い、塗料の乾燥のため1日おいて、翌日模様となる黒斑点を塗装する。黒斑点の乾燥のためさらに1日おいた後、圧縮試験を行った。圧縮試験時にデジタルカメラ（1920×1080pixels、タイムラプスによる1/2秒間隔）によって塗装面の撮影を行い、実験後にデジタル画像相関用のソフトウェアGOM Correlateに取り込んで画像相関法による観察を行った。画像相関法の原理そのものについては、既報³⁾⁵⁾を参照されたい。

図-4に縦方向のひずみの測定位置を、図-5に横方向の測定位置を示す。これらに示すように、縦方向のひずみを5ヶ所、横方向のひずみを5ヶ所測定している。モルタル供試体では全てモルタル部分であり、同じ性質の部分測定していることになるが、モデル骨材供試体では、1はモルタル部分、2は界面部分、3は骨材部分、4は界面部分、5はモルタル部分をそれぞれ測定していることになる。これらの各部位の変形挙動が、供試体作製方法の違いによって、つまり界面の発生状況の違いによってどのように変化するかを検討した。なお、以下の図では、供試体全体の縦ひずみを画像相関法によって測定し、それを横軸としている。ここでいう供試体全体の縦ひずみは、図-4に示す中央縦黒線の供試体縦方向全域のひずみのことである。

3. 観察結果および考察

3.1 モルタル供試体

図-6は、画像相関法によって測定したモルタル供試体表面のひずみの結果を示したものである。本実験では、それぞれの条件で4つの供試体を用いて試験を行っているが、傾向はそれぞれ似通ったものであったため、以下では代表的と思われる1つの結果を示している。

縦方向のひずみを示した図-6(1)によれば、画像相関法の精度の問題か、上下へのぶれが生じ、値に差はある

表-1 調合表および力学的性質

	W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	Fc (MPa)	Ec (GPa)
モルタル, モデル骨材	60	327	545	1300	51.7	20.9

[Note] W/C：水セメント比，W：水，C：セメント，S：細骨材，Fc：圧縮強度，Ec：弾性係数

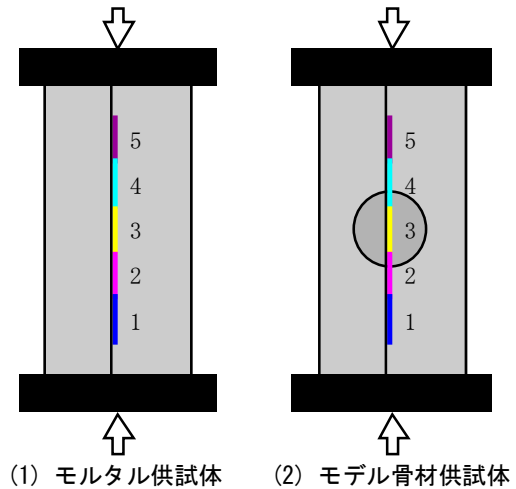


図-4 縦方向のひずみの測定位置

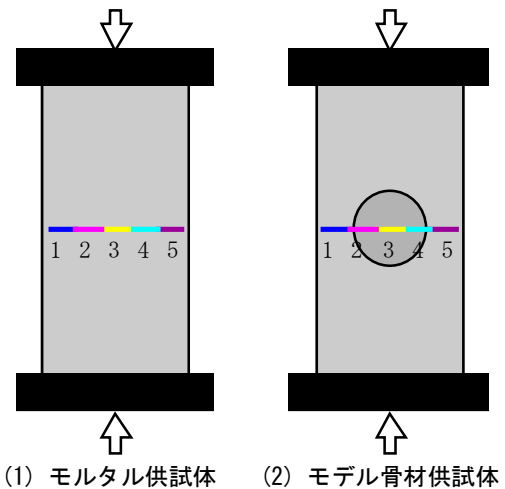


図-5 横方向のひずみの測定位置

ものの、後ほどのモデル骨材を入れた場合のように、どれかが突出して大きくなるという傾向は見られない。これはモルタル供試体は全体がほぼ均一であるため、圧縮载荷を受けると全体にほぼ同じ割合でひずみが増加していくことを示していると考えられる。

図-6(2)は横方向のひずみを示しており、こちらも場所によって大きな差のない結果である。この理由も、モルタル供試体がほぼ均一であるためと考えられる。

以上のように、供試体全体がほぼ均一であれば、圧縮時に生じる縦方向のひずみも、それに伴う引張力によって生じる横方向のひずみも、ほぼ同じ割合で増加していくことが示された。以下では、供試体にモデル骨材を入

れ、さらに界面の発生状況を変えた場合にどのようにひずみが増えるか検討する。

3.2 モデル骨材供試体

(1) 水平打ち

図-7は、モデル骨材供試体を水平打ちで作製した場合の結果である。図-7(1)は縦方向のひずみを示しており、2と4のひずみの増加が大きくなり、値も大きくなっていることがわかる。この2つは界面を含む測定位置であり、界面部分で大きく変形していることを示している。一方で、その他の1,3,5のひずみについては、図-6(1)のモルタル供試体で生じているひずみよりも小さく、さらにこれらの3つではほとんど差は生じていないことがわかる。水平打ちの場合、モデル骨材の全周にモルタルとの界面が均等にできると考えられ、この界面において変形が大きく生じるとともに、それ以外のモルタルおよび骨材の部分でのひずみが減るものと考えられる。

図-7(2)は横方向のひずみを示しており、こちらでもひずみ2と4が途中から大きく変化し、値も大きくなって

いることがわかる。これも縦方向のひずみと同様、界面の存在によるものと考えられる。

(2) 縦打ち

図-8は、モデル骨材供試体を縦打ちで作製した場合の結果である。図-8(1)は縦方向のひずみであり、界面を含む2のひずみのみが突出して変化しており、図-7(1)の水平打ちで大きくなっている2,4のひずみよりもさらに大きくなっていることがわかる。一方で、同じく界面を含む4のひずみは、1,3,5のひずみと比べて全体的に大きいものの、2のひずみに比べれば小さく、1,3,5のひずみとあまり変わらない。2は骨材下面で弱化層がある界面であり、4は骨材上部の界面である。同じモルタルと骨材の界面であっても、骨材の下面に生じている弱化層は、圧縮時に非常に変形しやすいことを示している。一方で、骨材上部に生じる界面は、圧縮に対してそれほど変形しないことを示しており、同じ界面でもその性質に差があることを示している。

図-8(2)は、縦打ちの横方向のひずみを示したものである。この図では、2,4のひずみが突出して大きく、

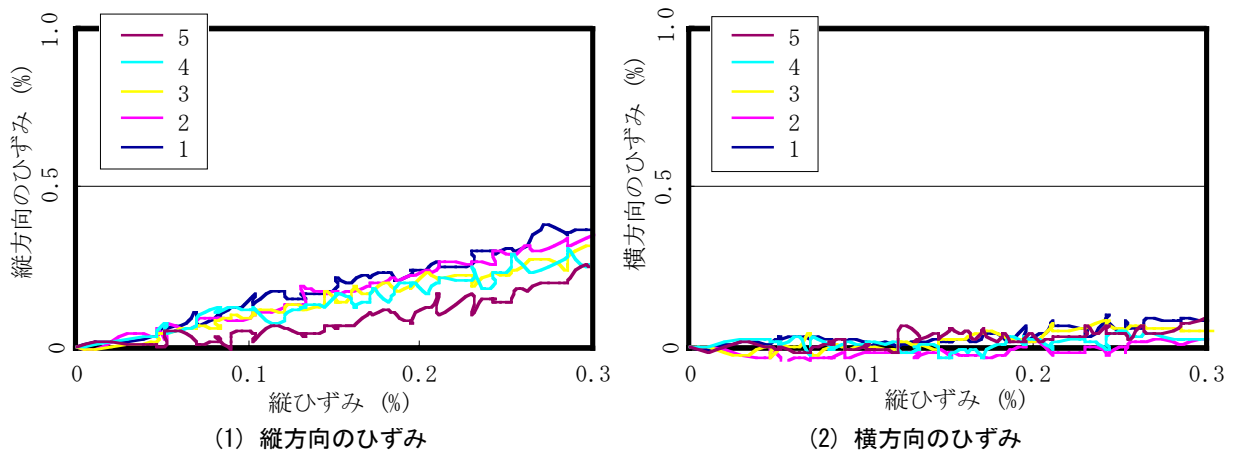


図-6 表面のひずみ-縦ひずみ関係 (モルタル供試体)

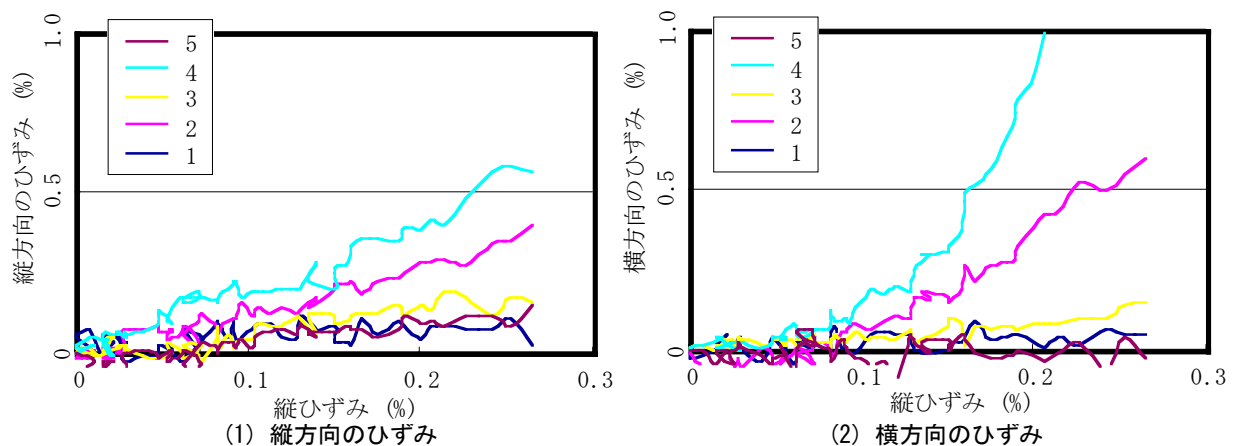


図-7 表面のひずみ-縦ひずみ関係 (モデル骨材供試体：水平打ち)

1,3,5のひずみが小さいなど、図-7(2)の水平打ちの横方向のひずみとほぼ同じ状況と言える。2,4には側面の界面があり、引張を受ける横方向へは変形が生じやすく、水平打ちの周囲の界面と近い性質を持つと考えられる。

(3) 横打ち

図-9は、モデル骨材供試体を横打ちで作製した場合の結果である。図-9(1)は縦方向のひずみである。界面を含む4のひずみが全体的に大きいように見えるものの、突出して大きくなっているわけではなく、また同様に界面を含む2のひずみについては特に大きくもなく、全てのひずみがほぼ同様の増加割合を示す変形挙動である。全体的には、図-6(1)のモルタル供試体の縦方向のひずみの変形挙動に近く、界面でのひずみの増大があまり見られないと言える。

図-9(2)は横打ちの横方向のひずみである。この図では、界面を含む2のひずみが突出して大きくなり、同じく界面を含む4のひずみについては、1,3,5のひずみとそれほど変わらないことがわかる。2のひずみは、打込み時に骨材下部となって弱化層を生じる界面であり、その部分のみのひずみが大きくなったと言える。一方で、打

込み時に骨材上部であった4のひずみについては、横引張力を受けてもそれほどひずみの増大を生じないと言える。

(4) 界面の発生状況が変形挙動に及ぼす影響

これまでの結果から、界面の発生位置が変形挙動に及ぼす影響を考察する。

まず、打込み時に骨材の下部にできる界面については、弱化層と呼ばれるとおり、圧縮力を受ける縦方向のひずみも、引張力を受ける横方向のひずみもその部分でひずみは大きく増大した。これは、図-8(1)の縦打ちの条件での2の縦方向ひずみ、図-9(2)の横打ちの条件での2の横方向ひずみの結果から明らかである。

一方、打込み時に骨材の上部にできる界面は、圧縮力を受ける場合も引張力を受ける場合も、その部分でのひずみはモルタル部分とそれほど変わらなかった。これは、図-8(1)の縦打ちの条件での4の縦方向ひずみ、図-9(2)の横打ちの条件での4の横方向ひずみの結果から明らかで、骨材上部は、骨材の上にモルタルが沈降しつつ硬化するため、界面ではあるものの付着力が向上し、モルタル部分とあまり変わらない変形挙動を示すものと

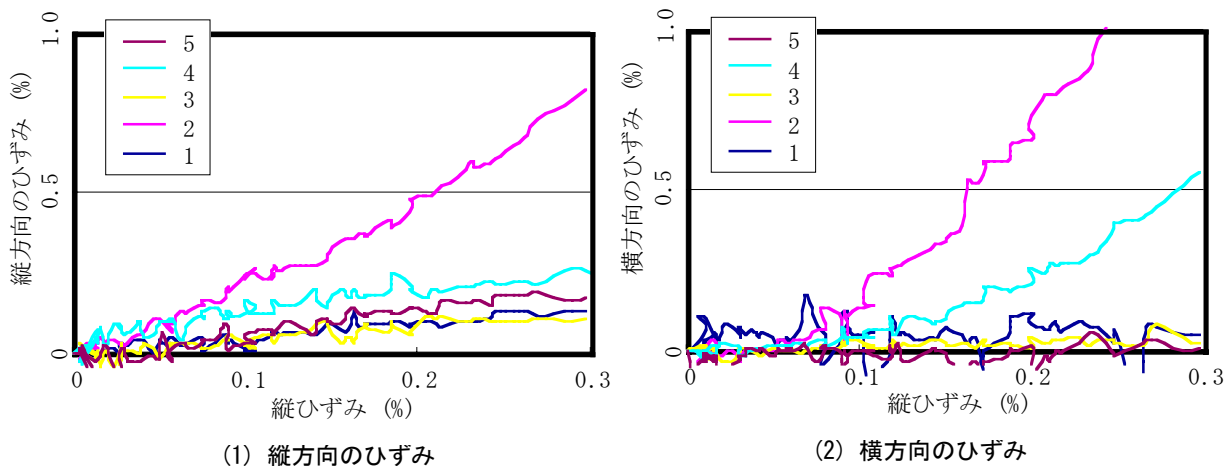


図-8 表面のひずみ-縦ひずみ関係 (モデル骨材供試体：縦打ち)

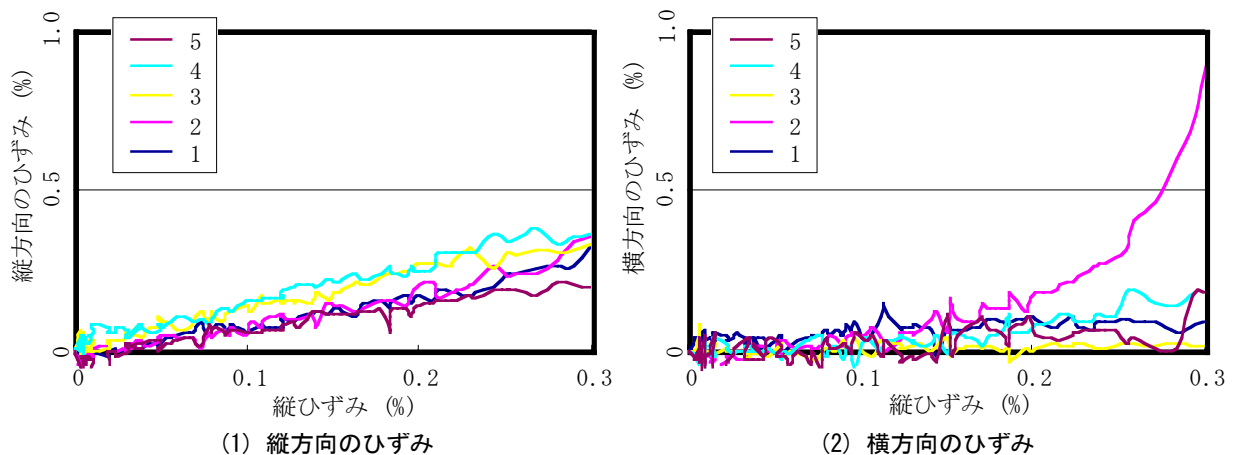


図-9 表面のひずみ-縦ひずみ関係 (モデル骨材供試体：横打ち)

考えられる。

さらに、打込み時に骨材の左右側面にできる界面については、圧縮力を受ける場合は、それほどひずみが増大しないが、引張力を受ける場合はひずみが大きく増大する結果となった。これは、図-9(1)の横打ちの条件での2,4の縦方向ひずみと図-8(2)の縦打ちの条件での2,4の横方向ひずみの結果から示され、圧縮力を受ける場合と、引張力を受ける場合でその変形挙動が異なる結果といえる。骨材の左右側面で界面ができる場合、側面の上部側と下部側で界面のでき方が異なると考えられる。結果として性質は上部の界面と下部の界面の間になるのではないかと考えられる。

なお、水平打ちにおいて発生する界面は、通常の骨材では考えにくい状況である。しかし、図-7の結果からすると、縦ひずみ、横ひずみともに界面を含む部分のひずみは大きくなっており、圧縮力、引張力ともに影響が大きいことがわかる。これは骨材下部の弱化層に近い結果であり、ブリーディングによる沈下がモデル供試体の円柱の側面に沿って生じる場合、長くまっすぐ生じることになるため、付着強度が低下しやすかったのではないかと考えられる。

4. まとめ

本研究では、画像相関法によって、モルタル供試体と、内部にモデル骨材を配置し、硬化時の静置方向を変えた3種類のモデル骨材供試体の圧縮載荷時の各部位のひずみを観察した。その結果、下記の知見を得た。

- 1)モルタル供試体では、縦方向のひずみや横方向のひずみがそれぞれほぼ同じ変化を示しており、ほぼ均一に変形していることが観察できた。このような変形挙動は、モルタルがほぼ均一と見なせるために生じると考えられる。
- 2)モデル骨材供試体のうち、水平打ちの結果は、縦方向のひずみも横方向のひずみも、界面を含む部分のひずみが突出して大きかった。
- 3)モデル骨材供試体のうち、縦打ちの結果では、縦方向のひずみについては、弱化層を含む骨材下部の界面の

ひずみが突出して大きかったものの、骨材上部の界面のひずみはそれほど大きくなかった。また、横方向のひずみは、水平打ちと同様に、界面を含む部分のひずみが突出して大きくなった。

- 4)モデル骨材供試体のうち、横打ちの結果では、縦方向のひずみは、モルタル供試体と同様に、部位によるひずみの変化に差がほとんどない結果となった。一方、横方向のひずみについては、打込み時に骨材下部に発生する弱化層が骨材側面に位置しており、その部分のひずみが突出して大きくなった。しかし、その反対側の界面のひずみはモルタル部分と大きな差がなかった。
- 5)これらのことから、モルタルと骨材の界面であっても、発生位置によって、また圧縮力を受けるか引張力を受けるかによって、その変形挙動は大きく異なることがわかった。

参考文献

- 1)小阪義夫・谷川恭雄・太田福男：コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響 第1報：モデル解析法による検討、日本建築学会論文報告集, No.228, pp.1-11, 1975.2
- 2)十代田知三：力学的性質に見られるコンクリートの異质性、コンクリートジャーナル, Vol.10, No.10, pp.1-12, 1972.10
- 3)大野又稔・渡辺健・野間康隆：デジタル画像相関法を用いたモルタルの収縮による応力発生の評価、コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.508-513, 2014.7
- 4)川端康平・山本悠人・村田裕志・畑明仁：曲げ破壊するRC柱部材におけるDICによる詳細な変形挙動評価 コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.2, pp.529-534, 2021.7
- 5)大野又稔・渡辺健・野間康隆：デジタル画像相関法を用いたコンクリートの工学的全視野変形計測、コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.85-90, 2014.7