

論文 載荷方向の違いがコンクリート内部のひずみ・変形挙動に及ぼす影響に関する検討

平岩 陸^{*1}

要旨：本研究では、載荷方向の違いが骨材周囲のひずみ・変形挙動に及ぼす影響を検討するため、内部にモデル骨材を1つ配置したモデル供試体を作成し、載荷方向が打設方向に対して平行方向および鉛直方向と変えて圧縮試験を行うとともに、画像相関法によって骨材周囲のひずみ・変形挙動を実験的に観察した。その結果、本研究で用いたモデル供試体においては、載荷方向が打設方向に対して平行方向の供試体では骨材下部の弱化層に圧縮ひずみが集中し、骨材側面界面にせん断力が生じていることを確認できた。

キーワード：載荷方向、打設方向、ひずみ、変位、せん断力

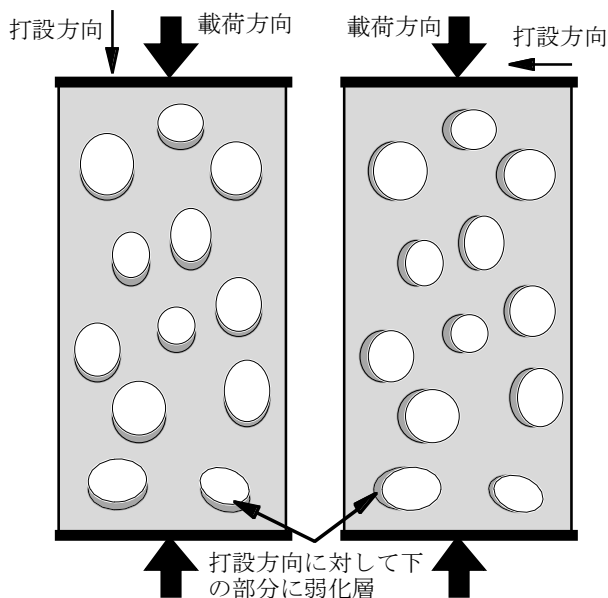
1. まえがき

コンクリートは打込みの際にブリージングが生じ、骨材や鉄筋の下面に弱化層が生じることが知られている。このため、載荷方向が打設方向に対して平行の条件と鉛直の条件ではコンクリートの内部構造が異なることになる。載荷方向が打設方向と平行方向の場合、図-1(1)に示すように弱化層は載荷方向に対して直角に、骨材の下面にできていくことになる。しかし、載荷方向が打設方向と鉛直方向の場合、図-1(2)に示すように弱化層は載荷方向に対して平行に、骨材の側面に存在することになる。このような骨材周囲の構造の変化がコンクリートの強度に影響を与えると考えられている。

しかし、その影響に関する知見は引張強度と圧縮強度で異なっている¹⁾。まず、引張強度については、ほぼ平

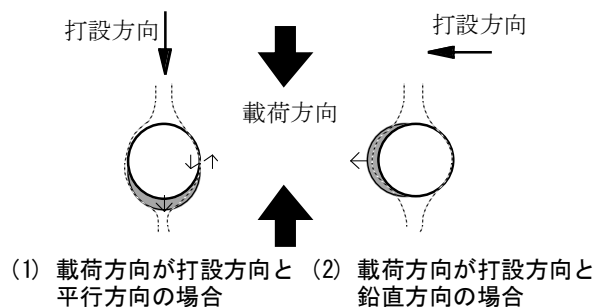
行方向<鉛直方向で一致している。これは、載荷方向が打設方向と平行の場合、引張に対して弱化層が鉛直方向にあり、その部分がほとんど応力を伝達しないため、その部分からクラックが生じて強度が低下すると説明されている。

一方、圧縮強度については鉛直方向<平行方向の結果が多く得られているものの、逆の知見やほとんど影響しないとの知見も得られている¹⁾。これらは図-2に示すような骨材周囲の破壊機構の解釈の違いによるものと考えられている。まず、鉛直方向<平行方向の結果の理由については、以下のように説明されている。載荷方向が打設方向に対して鉛直の条件では、図-1(2)に示すように骨材側面に弱化層が存在する。通常、圧縮載荷時には骨材側面の界面からボンドクラックが生じるため、骨材側面に弱化層があれば、図-2(2)に示すようにボンドクラックの発生が容易になる。その結果としてその後のクラックの進展も容易となり、強度が低下するというものである。逆に、鉛直方向>平行方向の結果については、以下のように説明されている。載荷方向が打設方向に対して平行の状況下では、骨材下部に弱化層が存在し、載荷時に骨材は下部に移動しやすくなり、図-2(1)に示すように、骨材側面に局部的にせん断破壊が生じてボンドクラックが発生しやすくなり、強度が低下するというものである。どちらの影響が大きくなるかによって結果が変



(1) 載荷方向が打設方向と平行方向の供試体 (弱化層は骨材下面)
(2) 載荷方向が打設方向と鉛直方向の供試体 (弱化層は骨材側面)

図-1 載荷方向が異なる場合の供試体の内部の概念図



(1) 載荷方向が打設方向と平行方向の場合
(2) 載荷方向が打設方向と鉛直方向の場合

図-2 骨材周囲の破壊機構¹⁾

*1 名城大学 理工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

わるものと考えられるものの、打設時に生じる骨材下部の弱化層の位置が変わることで、骨材周囲から生じるボンドクラックの発生機構が変わり、強度差が生じると考えられていることは一致している。このため、材料分離が少なく、骨材下部に弱化層が生じない場合には、ほとんど影響しないとの考察もなされている。

本研究では、荷重方向の違いによって骨材周囲のひずみ・変形挙動がどのように変化するか、実験的に検討する。今回は、内部にモデル骨材を1つ配置したモデル供試体²⁾を用い、荷重方向が打設方向に対して平行方向の供試体および鉛直方向の供試体を作成し、圧縮試験を行う。この際、供試体をカットしてモデル骨材が表面に表れるようにし、その表面の変形を画像相関法によって観察することで、荷重方向の違いが変形挙動、特に骨材周囲の変形挙動にどのような影響を与えているか検討するものである。

2. 実験方法

2.1 供試体の作成

図-3に供試体の作成方法を示す。図-3(1)に示すように、100×100×400mmの曲げ試験用の角柱供試体に対して、φ50×100mmの円柱供試体のモデル骨材を2つ配置し、モルタルを打設する。モデル円柱供試体については、打設後4週間以上の水中養生を行った後、使用している。その後フタをして密閉し、図-3(2)に示すように、縦方向にして硬化させるものと、横方向にして硬化させるものの2種類を作成する。このため、正確には、打設方向ではなく、打設後の存置方向が異なる2種類の供試体を作製したことになる。硬化後、4週間の水中養生の後、コンクリートカッターを用いて図-3(2)に示すカット線でカットを行って50×100×200mmの直方体の供試体を4つ作成する。硬化時に縦方向にしたものが、図-3(3)に示すように荷重方向が打設方向と平行方向になるもので、硬化時の骨材下部の弱化層が骨材下面にできるものである。一方、硬化時に横方向にしたものが、図-3(4)に示すように荷重方向が打設方向と鉛直方向になるもので、硬化時の骨材下部の弱化層は骨材側面にできることになる。いずれも荷重面は端面研磨機で平滑としている。

このようにして打設方向に対して荷重方向が異なる供試体を作成し、カットしてモデル骨材を露出させた面に後述する画像相関法によるひずみの観察を行う。モデル骨材およびモルタルの調査表および力学的性質を表-1に示す。モデル骨材は強度を高めるためW/Cを25%とし、モルタル部分についてはW/Cを60%とした。

2.2 画像相関法

画像相関法によって、モデル骨材が表面に露出する面

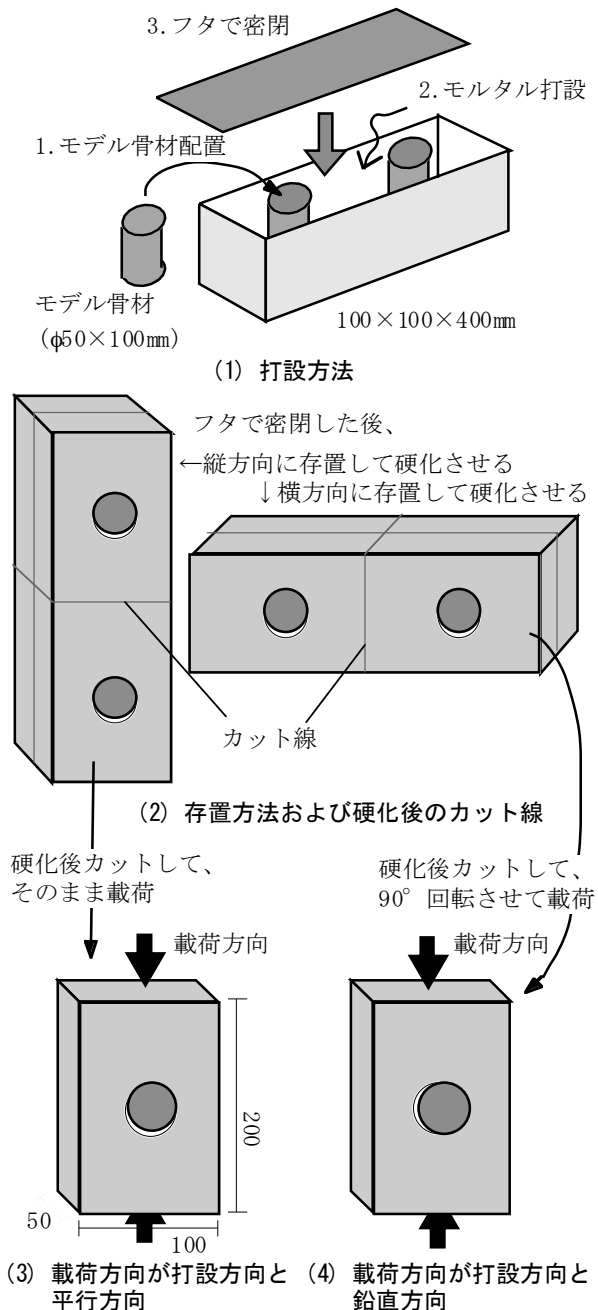


図-3 供試体の作成方法

表-1 調査表および力学的性質

	W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	HAE/C (%)	Fc (MPa)	Ec (GPa)
モデル骨材	25	220	881	1300	0.3	124.6	35.5
モルタル	60	327	545		-	51.8	20.9

[Note] W/C: 水セメント比、W: 水、C: セメント、S: 細骨材、HAE: 高性能AE減水剤、Fc: 圧縮強度、Ec: 弾性係数

を観察した。カットは水冷で行っており、カットの後に1日乾燥させて下地となる白塗装を行い、白塗装の乾燥のため1日おいて模様となる黒斑点を塗装する。なお、いずれもラッカースプレーによった。黒斑点の乾燥のためさらに1日おいた後、圧縮試験を行うこととした。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う。実験後，画像処理ソフトGOM Correlateに取り込んで画像相関法による表面ひずみの観察を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重方向と直角方向（横方向）の変形挙動

図-4は，画像相関法によって観察した平面内の荷重方向と直角方向（横方向）のひずみを，圧縮荷重時の供試体全体の縦ひずみ ϵ に対応させて示したものである。供試体全体に黄色の筋状の引張ひずみが散見される。これは，荷重進展とともに徐々に増えることなく，各所に現れては消えるように観察されるため，画像相関法のソフト的な誤差によるものと考え，ここでは検討の対象としない。荷重方向が変わっても，骨材左右部の界面に赤色の引張ひずみが生じ，それが上下に進展していく変形状況は同様であることがわかる。

図-4(1)の荷重方向が打設方向と平行の場合，左右で界面の状態は変わらないと考えられるため，ほぼ左右対称に引張ひずみが生じることが予想される。しかし，左

側の方が引張の赤部分が広く，ひずみが大きくなっている。一方，図-4(2)の荷重方向が打設方向と鉛直の場合，打設方向は右からであるため，骨材界面の弱化層は左にあり，この左側に大きくひずみが生じることが予想され，わずかに左側の方がひずみが大きく見える。これらを詳細に検討するため，図-5に示す位置の骨材左右部の界面部分のひずみ変化を図-6に示す。この図によると，いずれの条件でも骨材左側の方がひずみが大きくなっている。これだけ見ると，左側面のひずみが大きくなる傾向がありそうだが，他の観察結果では，荷重方向が打設方向と鉛直の場合においても差のない結果もあり，荷重条件による明確な傾向が見られなかった。この理由として，骨材位置のずれや荷重時の偏心などが挙げられる。荷重方向が打設方向と鉛直の場合は，ブリージングによる打設面の沈降で骨材が中央部からやや右に配置される傾向がある。また，荷重方向が打設方向と平行の場合，ブリージングで打設面が沈下し，相対的に骨材が上部に配置される傾向があり，さらに骨材の沈下時に左右に多少ずれる可能性もある。これらが骨材左右のひずみに影響を与える可能性がある。

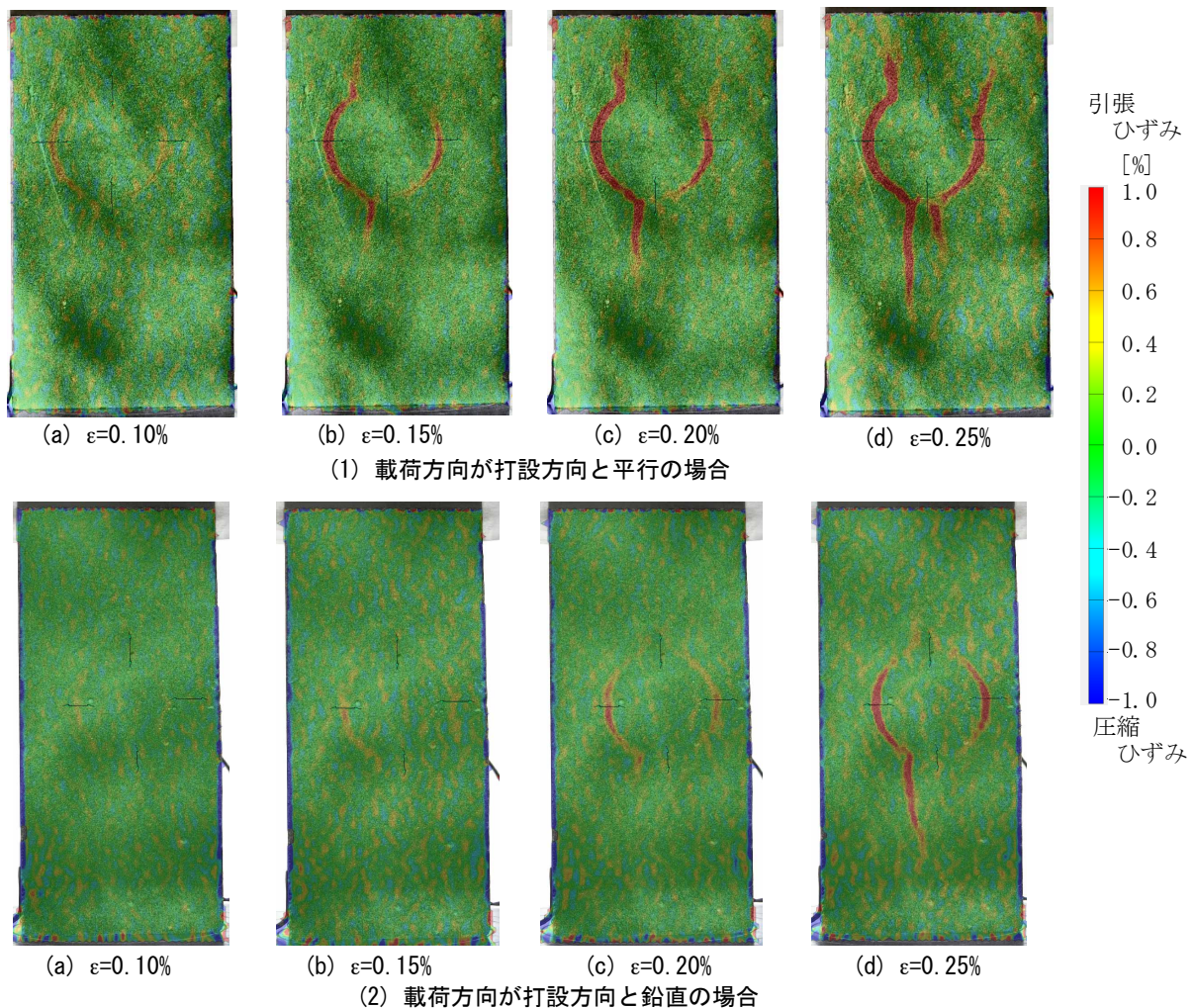


図-4 画像相関法による横方向のひずみ変化

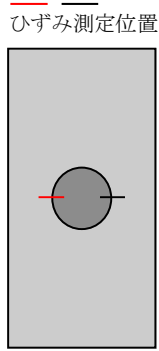
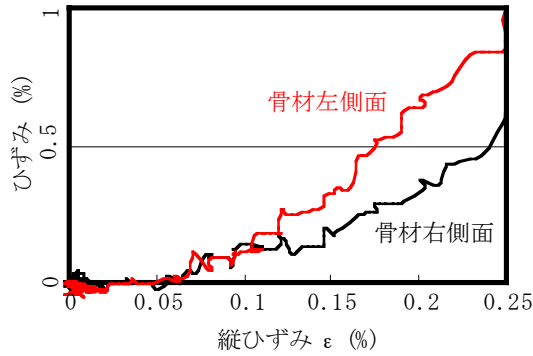
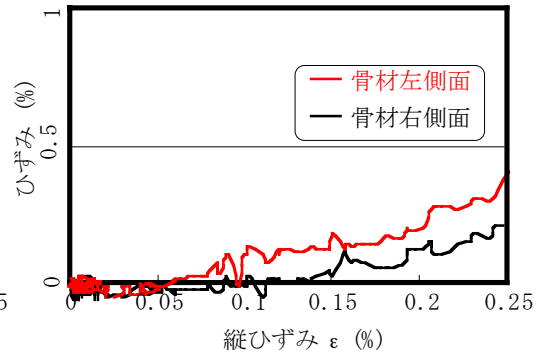


図-5 ひずみ測定位置



(1) 荷方向が打設方向と平行の場合



(2) 荷方向が打設方向と鉛直の場合

図-6 骨材左右界面のひずみ変化

3.2 荷軸方向(縦方向)の変形挙動

図-7は、画像相関法によって観察した平面内荷軸方向(縦方向)のひずみを、圧縮荷時の供試体全体の縦ひずみ ϵ ごとに示したものである。骨材上下面に青色の圧縮ひずみが生じているが、その生じ方が荷方向によって異なっていることがわかる。まず、図-7(1)の荷方向が打設方向と平行の場合、骨材下部に弱化層があるため、骨材下部に圧縮ひずみの青色が集中しており、

骨材上部はわずかであることがわかる。一方、図-7(2)の荷方向が打設方向と鉛直の場合、骨材上下でほぼ同程度に青色が生じており、骨材上下において圧縮ひずみの生じ方に差がないことがわかる。これについて、横方向の場合と同様に、図-8に示す位置の骨材上下の界面部分のひずみ変化を示したものが図-9である。図-9(1)では、骨材下部のひずみが骨材上部のひずみと比較して明らかに大きく生じている。これは、骨材下部

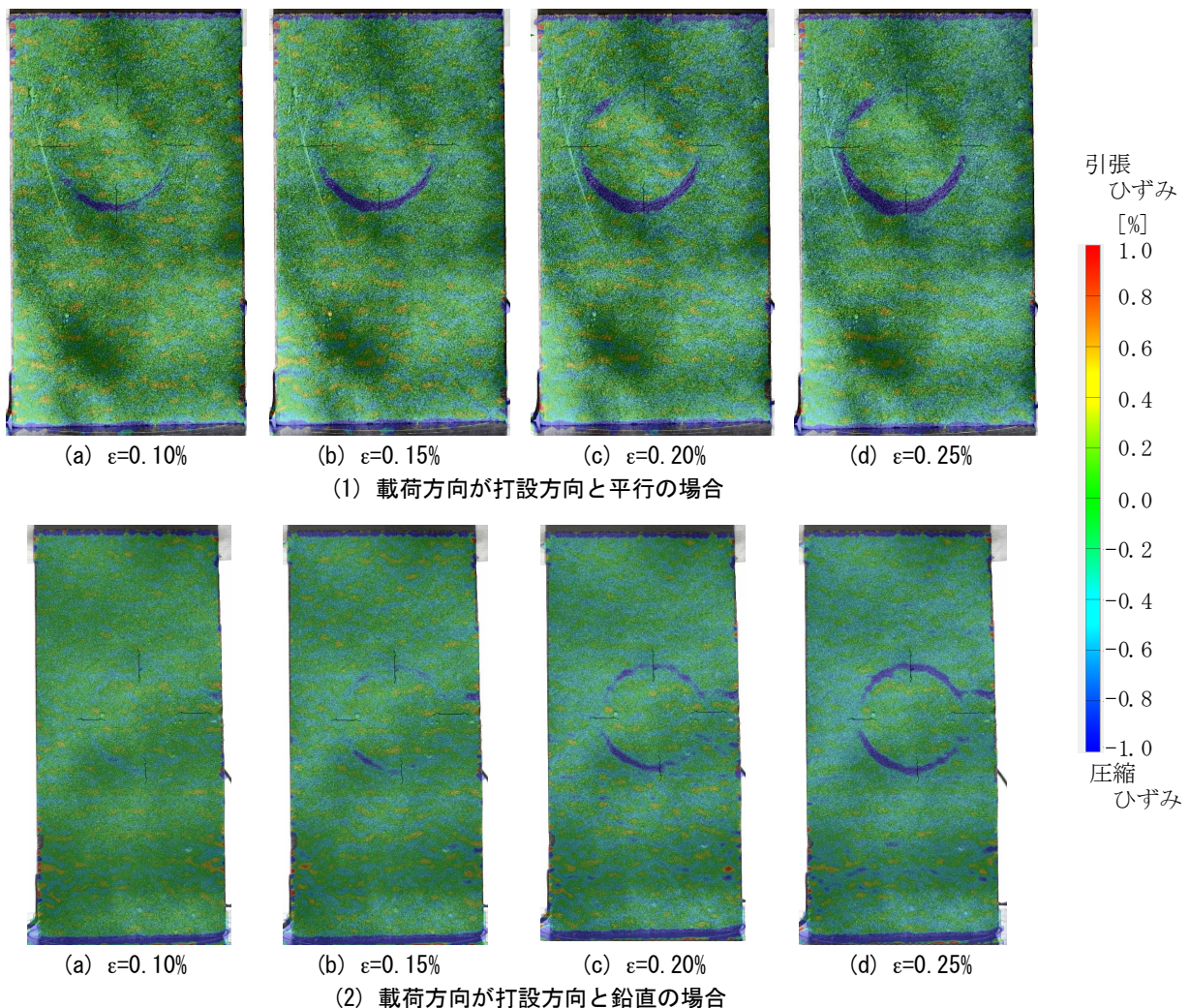


図-7 画像相関法による縦方向のひずみ変化

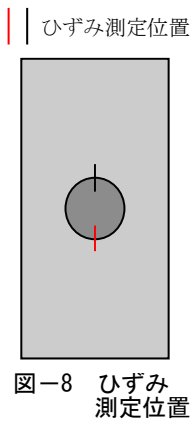
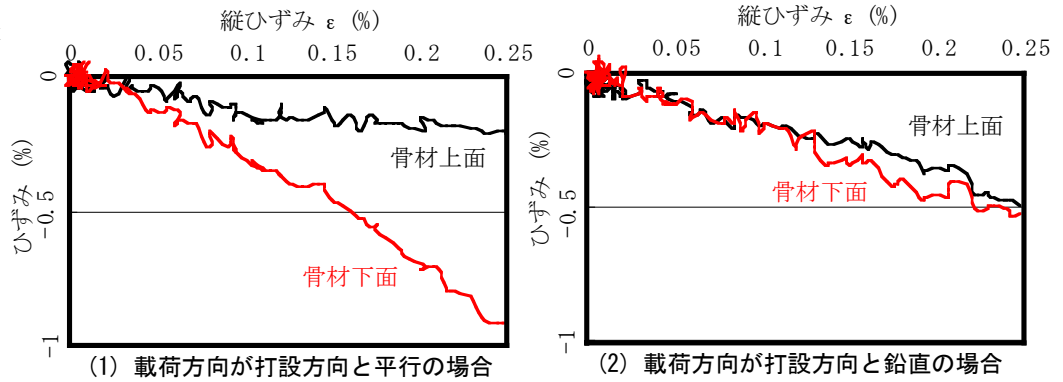


図-8 ひずみ測定位置



(1) 荷重方向が打設方向と平行の場合

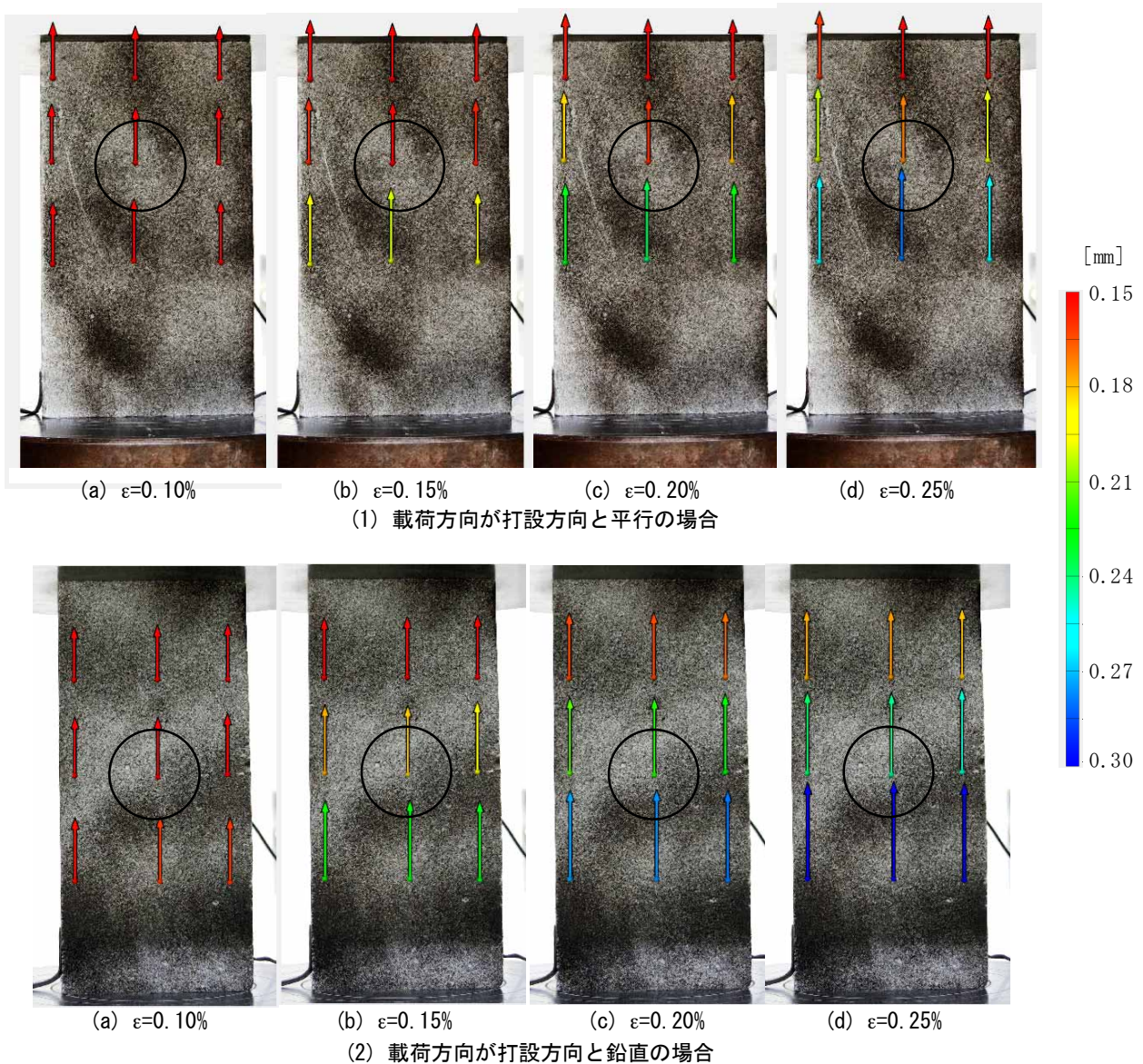
(2) 荷重方向が打設方向と鉛直の場合

図-9 骨材上下界面のひずみ変化

の弱化層にひずみが集中していることを示しており、この傾向は、荷重方向が打設方向と平行の条件では全ての結果で得られた。一方で図-9(2)では、ほとんど骨材上下部分でひずみが同一であることがわかる。こちらもこの条件では全てこの傾向が得られており、縦方向のひず

みについては明確に骨材上下界面でひずみに差が生じることが観察された。

このようなひずみの偏りが骨材周囲の変形挙動にどのような影響を与えるか検討するため、骨材周囲の9点について縦方向の変位を画像相関法によって測定した。こ



(a) $\epsilon=0.10\%$

(b) $\epsilon=0.15\%$

(c) $\epsilon=0.20\%$

(d) $\epsilon=0.25\%$

(1) 荷重方向が打設方向と平行の場合

(a) $\epsilon=0.10\%$

(b) $\epsilon=0.15\%$

(c) $\epsilon=0.20\%$

(d) $\epsilon=0.25\%$

(2) 荷重方向が打設方向と鉛直の場合

図-10 画像相関法による各部位の縦方向の変位

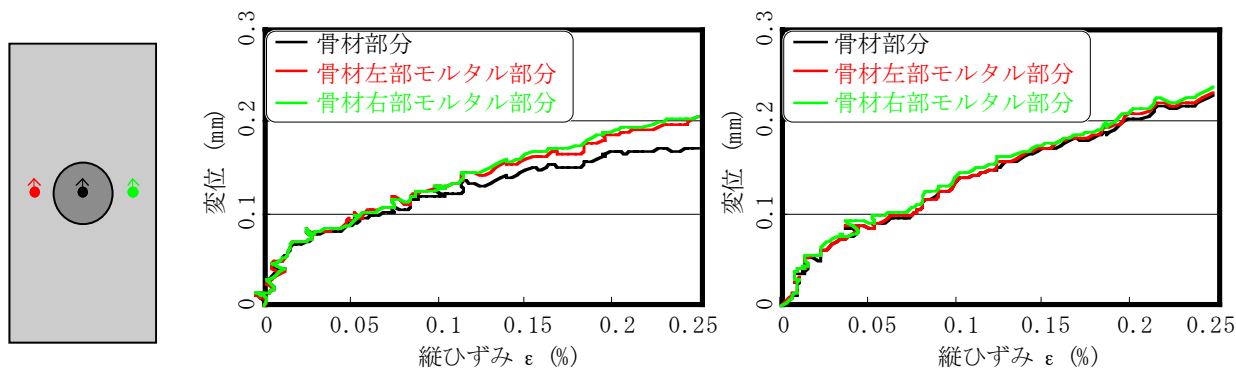


図-11 変位測定点

(1) 荷重方向が打設方向と平行の場合

(2) 荷重方向が打設方向と鉛直の場合

図-12 骨材部分および骨材左右モルタル部分の変位

れを示したものが図-10である。圧縮荷重は下面の荷重板が上方へ移動して行われるため、全ての点は上方へ変位する。荷重対象が均一であれば、その変位量は下部で大きく、上部で小さくなり、さらに左部と右部では差が生じないと予想される。実際に図-10(2)の荷重方向が打設方向に対して鉛直の場合、予想のように変位が生じていることがわかる。一方、図-10(1)の荷重方向が打設方向に対して平行の場合、荷重初期の(a)(b)では予想のように変位が生じるが、(c)(d)では、中央部の骨材部分の変位がその左右のモルタル部分よりも小さくなっていることがわかる。図-11に示す中央部の点について荷重軸方向の変位を示したものが図-12である。この図からもわかるように図-12(2)では差が生じていないのに対して、図-12(1)では骨材部分の変位が小さくなり、左右のモルタル部分と差が生じている。これは、下部荷重板が上昇して圧縮荷重を行う際に、骨材下面の弱化層が先に変形したためと考えられ、このように変位に差が生じれば骨材側面界面にはせん断力が生じるものと考えられる。

3.3 強度結果

図-13に、今回の供試体による強度の結果を示す。この図によれば、荷重方向が打設方向と平行の場合の強度が低下している。この理由として説明されている骨材側面界面にせん断力が生じることは、図-12からも明らかであり、今回はこの影響が出て強度が低下したものと考えられる。ただし、まえがきに示したように、これまでの知見では荷重方向が打設方向と鉛直の場合に強度が低下する結果も多く、今回の結果は、今回用いたモデル供試体の特性によって得られた結果である可能性があり、これについては今後の検討が必要である。

4. まとめ

本研究では、荷重方向がコンクリートのひずみ・変形挙動に及ぼす影響について検討するため、荷重方向が打設方向と平行の場合と鉛直の場合と比較した。モデル骨材を使用した2次元モデルについて画像相関法で観察

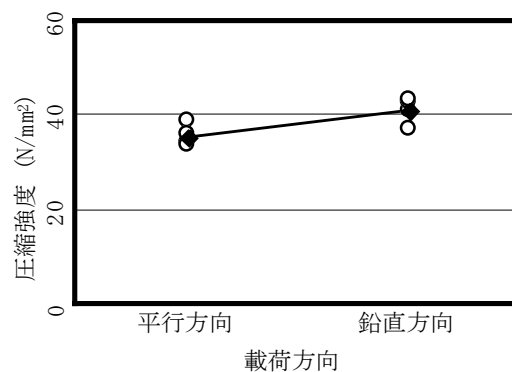


図-13 強度結果

し、モデル骨材周囲の界面および骨材部分・モルタル部分のひずみ・変形挙動を検討した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 荷重方向に対して直角方向のひずみ挙動を検討した結果、モデル骨材左右界面のひずみについて、荷重方向の変化にかかわらず、差が生じるものもあれば、差が生じないものもあり、一定の傾向は見られなかった。
- 2) 荷重軸方向のひずみ挙動を検討した結果、荷重方向が打設方向と平行の場合、モデル骨材下部界面へのひずみの集中が観察できた。一方、荷重方向が打設方向と鉛直の場合、モデル骨材上下界面に生じるひずみに差が観察できなかった。
- 3) 荷重方向と打設方向が平行の場合、荷重によるモデル骨材の変位が小さく、その左右のモルタル部分との変位差が生じることが観察された。これにより骨材側面界面においてせん断力が生じると考えられる。
- 4) 強度については、荷重方向が打設方向と平行の場合に低下した。今回の実験方法において、骨材側面界面にせん断力が生じたことの影響と考えられる。

参考文献

- 1) 十代田知三：力学的性質に見られるコンクリートの異方性，コンクリートジャーナル，Vol. 10, No. 10, pp. 1-12, 1972. 10
- 2) 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