

メソスケール解析を想定した コンクリート表面応力の測定

学生氏名 松本朋士
指導教員名 吉川弘道

本研究ではメソスケール解析の精度向上のための基礎データを収集する目的で、骨材強度が骨材周辺のモルタル部に及ぼす影響について検討した。赤外線応力画像システムにより測定した表面応力、静的載荷時の荷重 - ひずみ関係のひずみ値から算出した応力、弾性学に基づく理論解から算出した応力をそれぞれ比較した結果、荷重 - ひずみ関係のひずみ値から算出した応力が大きくなり、表面応力が最も小さくなった。また、骨材強度の弾性係数とモルタルの弾性係数の違いが骨材周辺領域の応力分布に影響を及ぼすことが判明した。

Key Words : stress ,stress distribution , young's modulus

1. はじめに

コンクリートはセメント・水・混和材料・骨材で構成される複合材料であり、安価で施工しやすく用途に応じて性質を変化できる等の利点があるため、建設構造物には欠かせない材料となっている。しかし、不均一に骨材が存在するため、脆性的で複雑な破壊形式を示す。

コンクリートの強度を構成するものは大別すると

モルタル強度

骨材強度

骨材 - モルタル界面の付着強度

である。コンクリートの破壊はこれらが複雑に絡み合い、その破壊強度に達した時点で破壊が生じる。中でも骨材 - モルタル界面における剥離やコンクリート中の気泡や養生終了時に生じる初期ひび割れ等が発端となって破壊が進展していく。

構造物レベルや部材レベルで解析を行う場合、コンクリートを一様な材料として扱うマクロスケール解析がある。マクロスケール解析ではコンクリートを均質材料として扱い要素サイズの試験により得られた構成モデルを用いて材料の挙動を表現しているため、コンクリートの平均的な挙動およびコンクリート構造の平均的な挙動に関する情報が得られる。そのスケールレベル(図-1)を一段階下げたメソスケール解析¹⁾は、コンクリートを骨材、モルタル、その界面から構成される3相材料として捉え、材料特性を考慮した解析が行えるようになる。これによりコンクリートの挙動をミクロの挙動からマクロの挙動まで解析できるため微視的な破壊から巨視的な破壊に至るメカニズムを解明するのに有効な手段である。コンクリートのマ

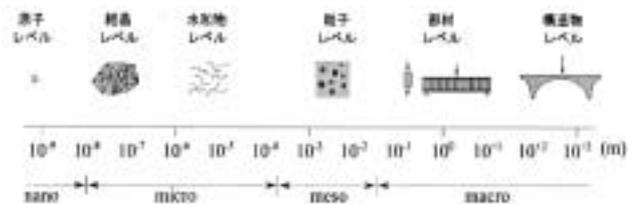


図-1 各スケールの定義

クロな引張、圧縮、せん断等の複雑な破壊挙動を、3種の構成材料の単純なモデルの組み合わせによって表現することが可能になると考えられる。また、コンクリートの非均質性の影響を考慮することが可能であり、各構成要素のパラメータを入力することでコンクリート全体の挙動を解析でき、要求されるコンクリートの性能を満たすために必要な配合を効率的に決定できる。メソスケール解析によってコンクリートの非均質性が及ぼす影響や相互作用などについての特性を把握できるようになる。

以上のような成果を確実なものとするには、メソスケール解析の確立及び精度の向上が必要である。しかし、現在その有用性は認められつつあるが、メソスケール解析の有効性を検証するための実験データは少ない。

本研究ではコンクリートの割裂引張破壊を対象に、メソスケール解析の精度向上のための基礎データを収集することを目的に以下の3テーマに関して実験的に検討する。

割裂引張破壊時の骨材周辺の表面応力状態
物体に断熱変形が生じた場合に微弱であるが温度変

化が生じる。その温度変化を赤外線応力画像システムで捉え応力に変換し、応力分布を把握することで骨材強度および骨材形状が骨材周辺のモルタル部に及ぼす影響を視覚的に捉えて検討する。

模擬骨材周辺の荷重-ひずみ関係

コンクリートの破壊は骨材 - モルタル界面およびコンクリート中の劣化部でひび割れが発生し、ひび割れ先端部に応力が集中することで進展していくと考えられている。応力分布を捉える上でひずみ分布状況を把握することは有効である。

各種測定方法で取得した応力の相互比較

で取得した赤外線による応力分布、で取得した荷重-ひずみ曲線から算出した応力及び弾性学に基づく理論解から算出した応力の 3 者を比較することで測定データの信頼性を検討する。

2. 割裂引張破壊時の骨材周辺の表面応力状態

2.1 使用材料及び配合

供試体の種類として モルタル、断面中央部に単一模擬骨材(石、空洞、木、石膏、鉄筋)を配置したモルタル(5種類)の計6種類を作製した。配合は水セメント比 W/C=55%, スランプ=10±2cm, 空気量=4.5±1.5% となるように決定した(表-1)。供試体は 100×50mm の円柱供試体であり、特に の供試体には模擬骨材(20mm)を中央部に配置した。模擬骨材には強度・剛性の異なる4種類の棒状の模擬骨材(石、木、石膏、鉄筋)を使用した。また、供試体の中央部が空洞のものも作製した。使用した各模擬骨材の強度を表-2に示す。なお、モルタルの圧縮強度については、コンクリート標準示方書²⁾の引張強度と圧縮強度の関係式から割裂引張試験結果を用いて算出し、モルタルのヤング係数については日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算基準」³⁾による関係式を用いて算出した。出設後28日間標準水中養生した後、気中養生することで供試体中の水分を十分に逸散させた。

表-1 配合表

水セメント比 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		水 W	セメント C	細骨材	混和剤	
					AE減水剤	AE助剤
55	45	159	300	807	0.749	0.030

表-2 骨材強度

	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
モルタル	32.4	29.3
石	28.2	11.2
木	55.4	17.4
石膏	6.92	4.85
鉄筋	295	200

2.2 試験概要

本研究では赤外線応力画像システムを使用した。これは物体に急激な外力が作用した場合に生じる温度変化に対して、材料の各種係数を入力することで応力分布を主応力の和として可視化する⁴⁾。各種供試体に対して本学構造実験棟のサーボパルサー式試験機にて繰返し荷重による割裂引張疲労試験を行った。周波数は5Hz、測定時間は2時間とした。繰返し荷重下の上限荷重は各種供試体をアムスラー型試験機で静的に割裂引張破壊させたときの最大荷重を参考にして、上限荷重を最大荷重の60~70%、下限荷重を10%程度とした。繰返し疲労試験にて測定終了後、同供試体に対して割裂引張試験を行い、割裂引張破壊させる。その後、応力分布図と供試体を比較し、骨材分布による影響およびひび割れ位置を検討することでコンクリートの骨材周辺の応力状況について検討する。

2.3 試験結果

2.3.1 モルタル

図-2、写真-1に赤外線応力画像システムにより得られたモルタルの応力分布図と破壊後の供試体の一例を示す。緑色の部分が無負荷(応力0)の部分であり、赤色部分が圧縮領域、青色部分に近づくに従って引張領域となっている。

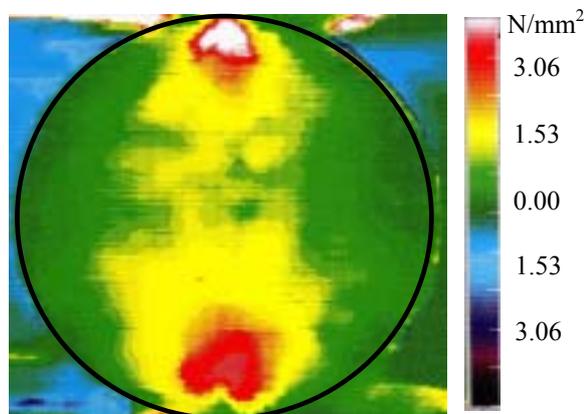


図-2 応力分布図(モルタル)



写真-1 破壊後の供試体(モルタル)

モルタル供試体の応力分布は荷点付近に圧縮応力が集中し、荷点軸上に若干であるが圧縮応力が確認できた。割裂引張試験は2軸応力下で行われる試験であり、荷点を結ぶ方向では圧縮応力が作用し、水平方向では引張応力が働く⁵⁾ことが知られている。本システムでは、応力分布は主応力の和として表れており、方向を示すことができない。

光弾性試験による円板での割裂引張試験時の画像と同様な結果⁶⁾であるため、モルタルを均質材料として扱うことが可能であると確認できた。

2.3.2 試験結果(石)

図-3、写真-2 に断面中央部に石を配置したときの応力分布図及び破壊後の供試体を示す。なお、モルタル部と石が同色であるため、目視状態での確認を容易にするため骨材表面に黄色の蛍光塗料を塗布し、応力画像における単一模擬骨材の位置を明確にするため、応力画像中に供試体及び骨材の輪郭部分を黒線で記入した。

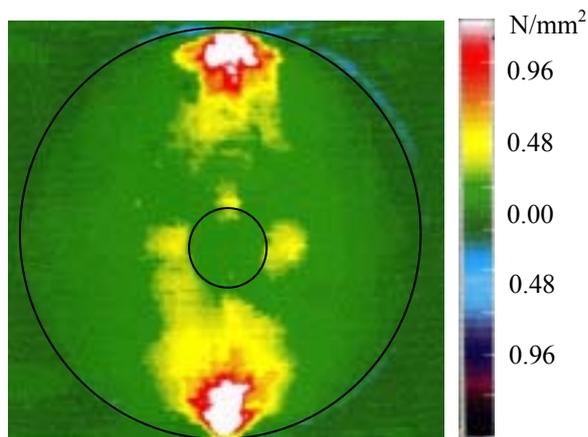


図-3 応力分布図(中央:石)

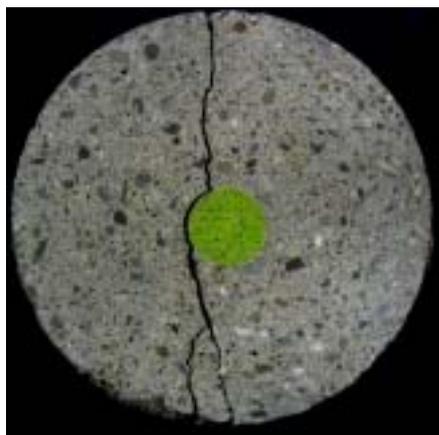


写真-2 破壊後の供試体
(中央:石)

模擬骨材周辺に応力分布が確認できた。模擬骨材部とモルタル部の強度差がほとんどないため荷点による模擬骨材周囲のモルタル部に及ぼす影響はないものと考え

えられる。また、破壊後の供試体よりひび割れは模擬骨材周囲に沿って生じていることが確認できる。模擬骨材とモルタル部よりも界面の付着強度が弱かったため、破断時に界面に沿ってひび割れが進展していると推測できる。

2.3.3 試験結果(空洞)

図-4、写真-3 に断面中央部に空洞を配置した供試体の応力分布図及び破壊後の供試体を示す。

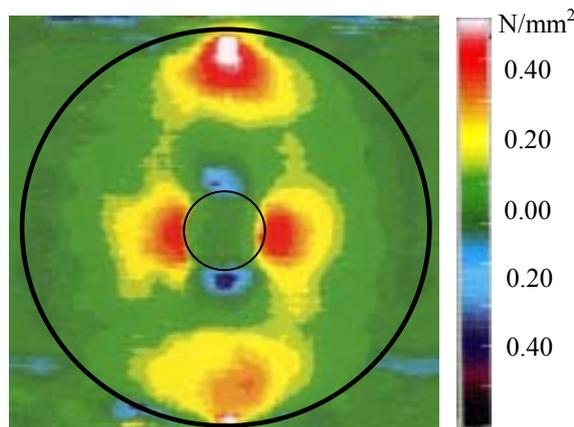


図-4 応力分布図(中央:空洞)



写真-3 破壊後の供試体
(中央:空洞)

中央部が空洞の場合、空洞部の上下で引張領域、左右部で圧縮領域が確認できた。供試体中央の空洞により、その周囲のモルタル部は拘束されない。よって、応力の伝達が荷点からモルタル部を通じて空洞上下部に達するが、空洞とモルタル部の境では断面中心部に向かって変形しようとするため、空洞部に歪みが生じる。この歪みから空洞部が楕円形に変形しようとして、空洞上下部で水平方向の引張が生じる。さらに、空洞上下部へ作用する力は耐力力の存在する空洞左右部に流れ、その結果、空洞左右部での迂回した応力の衝突によって圧縮領域が生じたと考えられる(図-6 (b))。

2.3.4 試験結果(木)

図-5, 写真-4 に断面中央部に木材を配置したときの応力分布図及び破壊後の供試体を示す。

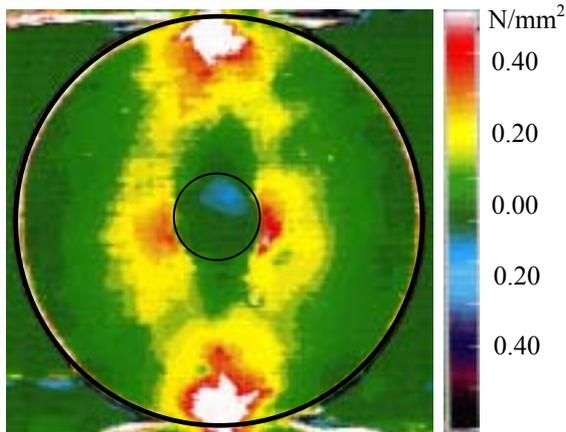


図-5 応力分布図 (中央：木)

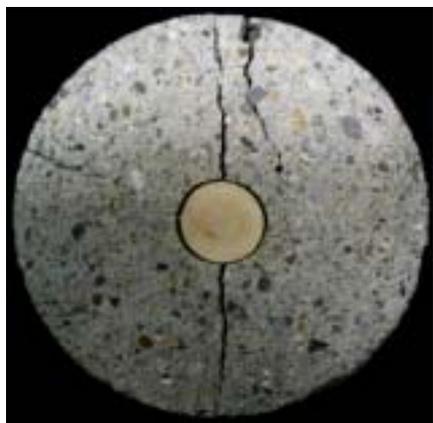


写真-4 破壊後の供試体
(中央：木)

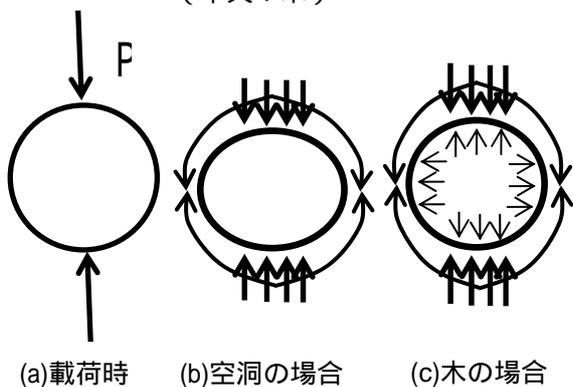


図-6 骨材周辺の応力状態

これより、応力分布図は骨材上下部での応力集中は異なるが、断面中央部に空洞を配置した場合と同様の傾向が見られた。模擬骨材として木材を使用した場合では木材の弾性係数がモルタルの弾性係数よりも小さいために荷重によるモルタルの変形に対して木材が追従した結果、断面中央部が空洞の場合と同様に模擬骨材が歪んだと考えられる。しかし、木材の上下部で引張の応力集中が見られないのは、供試体上下部の荷重点か

ら中央部へ伝わる荷重に対して模擬骨材である木材が抵抗するため若干の圧縮応力が生じる。その結果、模擬骨材上下部での水平方向の引張応力と合わせ、圧縮応力と引張応力が相殺されることで無応力に見えると考えられる(図-6(c))。

破壊後の供試体を観察すると木材とモルタルの接着面が完全に剥離していることが確認できた。これは、供試体を気中養生中に模擬骨材としている木材部分の水分が蒸発したため、模擬骨材の乾燥収縮によってモルタル部との収縮量に差が生じることに起因している。応力分布図計測後に供試体を確認してみたところ、割裂引張破壊に達していない状態でも付着切れが生じている供試体を確認されたことから、付着力は乏しく、中央部が空洞部と類似した挙動を示したと考えられる。

2.3.5 試験結果(石膏)

図-7, 写真-5 に断面中央部に石膏を配置したときの応力分布図及び破壊後の供試体を示す。

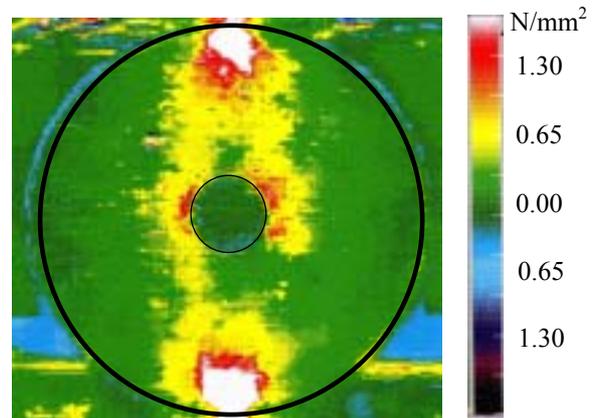


図-7 応力分布図 (中央：石膏)



写真-5 破壊後の供試体
(中央：石膏)

図-7 では、模擬骨材上部から側面にかけて圧縮領域が確認できる。これは骨材とモルタルが完全に一体化しているため、モルタルが応力によって変形しようとする時に骨材とモルタルの弾性係数の違いから石膏との境界

に応力が集中したと考えられる。一般にコンクリートでは、硬化時に骨材-モルタル界面に水酸化カルシウムの薄い皮膜が形成される。それが付着力低下の原因となる⁷⁾。しかし、石灰石の場合、セメントペーストの液相と接触すると水酸化カルシウムを析出し、骨材界面での付着力は強固になる⁸⁾ことがわかっている。そのため石膏でも同様のことが生じていると考えられる。以上より、最終的には骨材界面で剥離したが、この石膏を用いた供試体では付着力が良好であり、模擬骨材の付着力も骨材周辺の応力場に影響を及ぼす。

2.3.6 試験結果(鉄筋)

図-8、写真-6 に断面中央部に鉄筋を配置したときの応力分布図及び破壊後の供試体を示す。

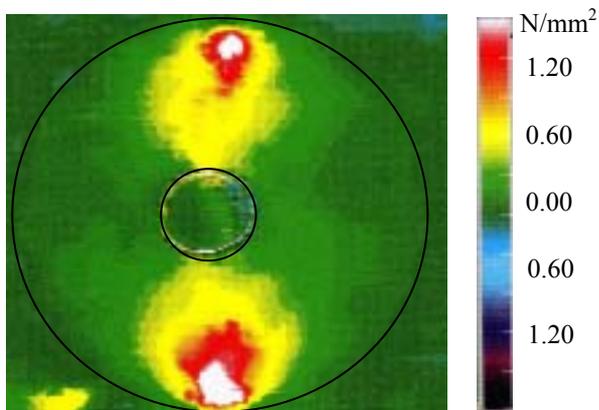


図-8 応力分布図(中央:鉄筋)



写真-6 破壊後の供試体
(中央:鉄筋)

鉄筋を配置した場合、模擬骨材周囲の応力は模擬骨材上下部で圧縮領域だけしか見られなかった。骨材とモルタルの弾性係数の差が大きいほど骨材-モルタル界面での応力集中が大きくなる⁹⁾ことから、鉄筋を用いた場合にはこのことが顕著に現れたと考えられる。また、鉄筋と載荷板間の母材モルタルのひずみ度は応力集中により平均ひずみ度よりも大きくなる¹⁰⁾。このことが鉄筋と載荷板間を放射状に圧縮領域が確認できることを示している(図-9(a))。なお、模擬骨材の弾性係数がモルタル部よ

りも大きいことから骨材上下部からの荷重に対して模擬骨材は変形しないため、骨材左右部に応力が迂回することもなかったと考えられる。ひび割れ経路は、模擬骨材周辺では骨材界面に沿ってひび割れが生じている。一般に付着が無い場合には骨材界面に沿ってきれいに剥離し、モルタル部分は載荷軸上を直線的にひび割れが生じる¹²⁾。一方、付着がある場合には骨材界面でひび割れが生じるが、骨材の中心から水平方向になす角が $35\pm 5^\circ$ の範囲でひび割れが生じ、そこから載荷点に繋がるように進展するとの報告¹³⁾がある。本研究では破壊後の供試体から、付着切れを起こしている木材は骨材界面に沿ってきれいに剥離し、石や鉄筋では前述したような付着力のある場合のひび割れが確認できた。

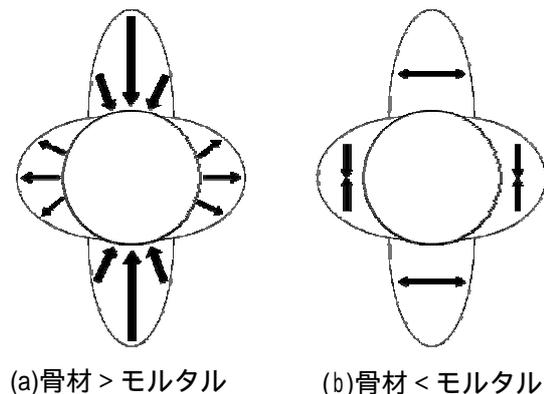


図-9 骨材周辺の弾性係数の影響¹¹⁾

3. 模擬骨材周辺の荷重-ひずみ関係

3.1 使用材料及び配合

使用材料及び配合については 2.1 と同様のものを用いた。

3.2 試験概要

割裂引張試験時の模擬骨材周辺における荷重-ひずみ関係を把握するために、以下の 2 通りの実験を実施した。第 1 にモルタルについて載荷点を結ぶ直線上の荷重-ひずみ関係を捉える。割裂引張試験時のひび割れが進展していくと考えられる載荷点を結ぶ直線上に、ひずみゲージを等間隔に配置(中央部から 20mm 間隔で計 5ヶ所貼付(ゲージ長:30mm))することで破壊時の荷重-ひずみ関係(以降:P-ε)について検討する。また、最大荷重までの荷重を 5 分割して各時点におけるひずみ量の変化を検討する。第 2 に骨材周辺の荷重-ひずみ関係を捉えるために骨材輪郭部から 5mm 離れた上下左右部にクロスゲージ(ゲージ長:5mm)を貼付して割裂引張破壊時の骨材周辺の P-ε について検討した。

3.3 試験結果(載荷軸上の荷重-ひずみ関係)

写真-7 に破壊後の供試体とひずみゲージの位置(上部から 1~5)を, 図-10 に各地点の P-ε を, 図-11 に各段階におけるひずみ量を示す. この際, 図-11 の縦軸は供試体載荷軸方向の供試体(1.0d) 下端からの距離を表す. なお, 圧縮ひずみを正, 引張ひずみを負で表記した.

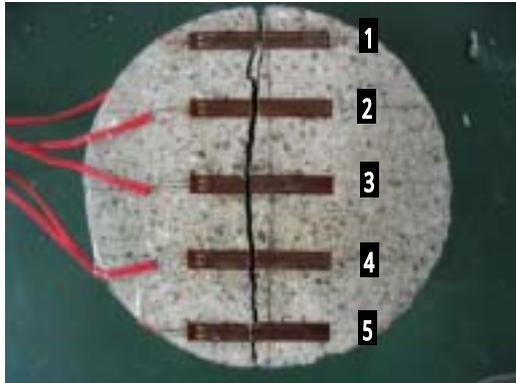


写真-7 破壊後の供試体

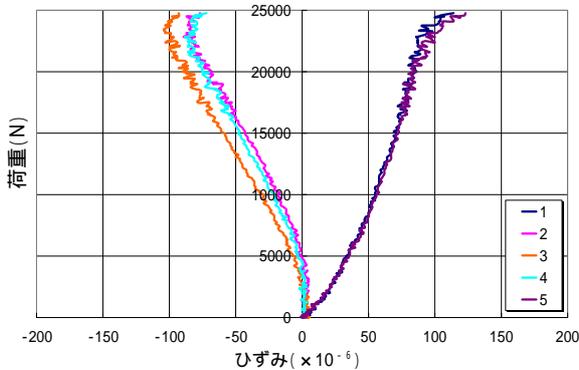


図-10 荷重 - ひずみ曲線

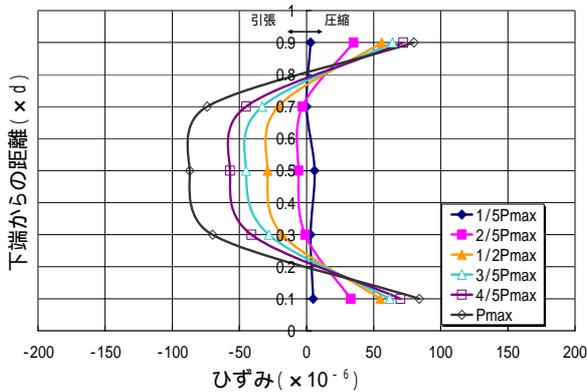


図-11 各位置でのひずみ変化量

図-10 から分かるように中心部で最も引張ひずみが大きくなり, 次に中心から 0.2dほど離れている位置(位置番号 2,4)で引張ひずみが大きくなった. また, 載荷点付近では, 圧縮力が作用している. 最大荷重に近づくにつれ, 載荷点付近の圧縮ひずみの増加量は小さいのに対して, 中央部付近の引張ひずみは荷重の増加に伴って大きくなっている.

図-11 より, 最大荷重時の最大圧縮ひずみと最大引張ひずみが同程度であると確認できる. 引張ひずみは載

荷が進むにつれて増加量が大きくなる一方で, 圧縮ひずみの増加量は小さくなっていくことがわかる. これは載荷の進行に伴って供試体内部の骨材界面で付着ひび割れ等が生じ始め, 徐々に引張ひずみの伸びが大きくなる⁸⁾ことを示している. 圧縮ひずみは載荷に伴ってモルタル中の自由水および空隙などの隙間が縮小することで密度が濃くなり, その後ひび割れ発生によって緩やかに増加する. 割裂引張試験では引張ひずみが限界に達することで破断に至る. しかし, その時の圧縮力および圧縮ひずみは弾性域にあると考えられる. 載荷点付近は 2 軸圧縮状態であり, 中央部では 2 軸応力状態となることが知られている. 供試体中央部では上下端からの圧縮応力に対して中央部ではそれらが衝突し, 左右方向へと応力が作用している. 供試体の破断は, 供試体中央部から発生しひずみ量が多い順にひび割れが進展していき, 載荷点に向かって進展すると考えられる. ひび割れの先端にかかる集中応力は非常に大きいと考えられるため, 載荷点付近でも最終的に破断する.

3.4 試験結果(骨材周辺の荷重-ひずみ関係)

写真-8 にひずみゲージ配置例を示す. ゲージ番号は骨材上下部では水平方向となり, 骨材左右部では鉛直方向となるように貼付したゲージに対して骨材上下部の水平方向のものから骨材周囲を時計回りに 1~4, そのゲージに対して垂直方向に配置したものを時計回りに 5~8 とした. また, 図-12~17 に各供試体の試験結果を示す.

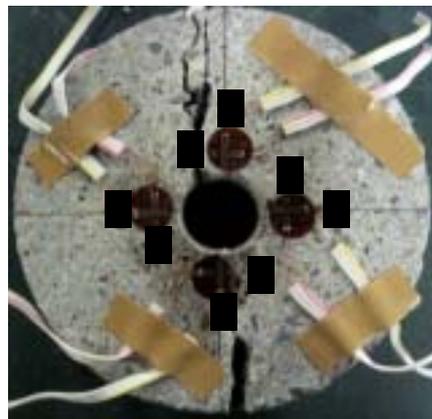


写真-8 ひずみゲージ配置例

3.4.1 モルタル

図-12 にモルタルにおける P-ε 曲線を示す. モルタルの場合は計測面の中央部から 15mm 離れた上下左右部に貼付した. 試験結果より, 上下部の水平方向に貼付した位置(番号: 1,3)では引張ひずみが, 載荷軸方向に貼付した位置(番号: 5,7)では圧縮ひずみが確認できた. 番号 5, 7 は載荷軸上であるため応力伝達も大きくなっていることから, 最もひずみ量が大きくなっている. また, 番号 1, 3 と 2, 4 は中央部から対称に配置してある

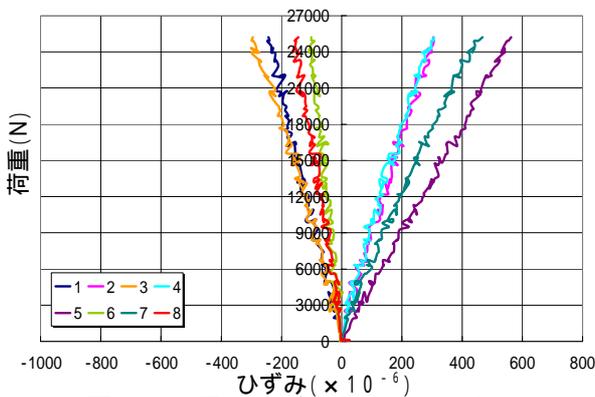


図-12 荷重 - ひずみ曲線 (モルタル)

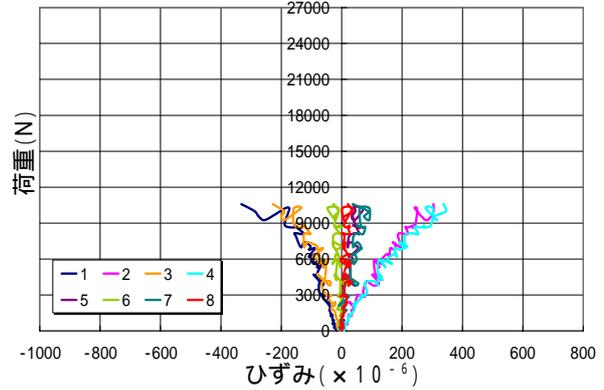


図-14 荷重 - ひずみ曲線 (中央：空洞)

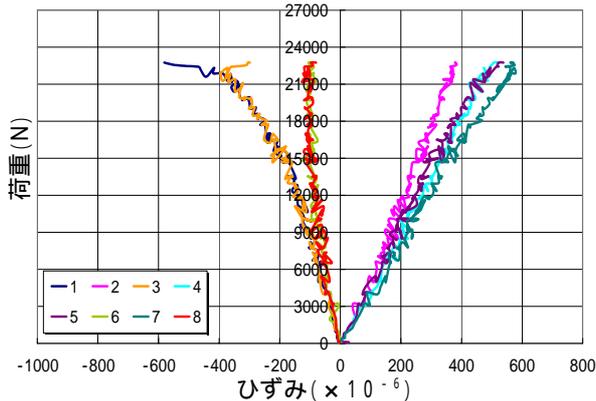


図-13 荷重 - ひずみ曲線 (中央：石)

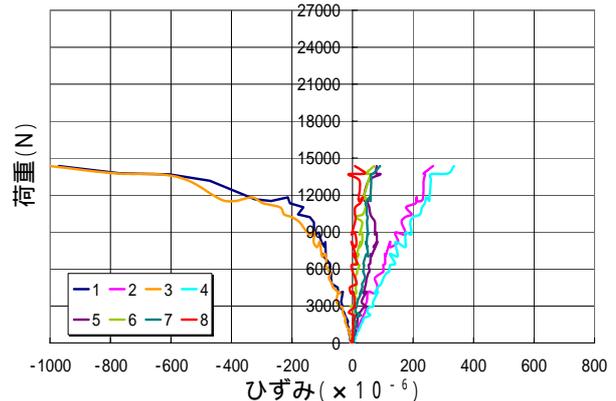


図-15 荷重 - ひずみ曲線 (中央：木)

ためひずみ変化量はほぼ同じ値を示している。番号 6, 8 は水平方向に引張ひずみが生じていることが確認できる。これは、上下端の載荷点に圧縮応力が生じるのに対して、載荷軸上の点が最も圧縮力が作用するが、その載荷点から放射状に応力が分散する。そのため、今回の測定位置でも圧縮応力が生じ、これに伴って水平方向に膨張しようとして引張ひずみが生じる。

3.4.2 石

図-13 に石を断面中央部に配置した場合の P-ε 曲線を示す。モルタルに比べて最大荷重は 1 割程度小さく、引張ひずみが大きくなり、圧縮ひずみが小さくなった。引張ひずみが 200×10^{-6} 付近から徐々に増加していることが確認できる。モルタルと比べて載荷軸上での引張ひずみ量の違いは中央部に骨材が存在するからであり、骨材界面での剥離ひび割れに伴って緩やかに引張ひずみが増加していると考えられる。また、番号 6, 8 では、荷重が増加してもひずみ量に大きな変化は見られなかった。番号 1, 3 の引張ひずみが増加しても変化が見られないことから、引張応力によって骨材上下部に附着ひび割れや微細ひび割れが生じても骨材左右部に及ぼす影響は小さいと考えられる。

3.4.3 空洞

図-14 に断面中央部に空洞を配置した場合の P-ε 曲線を示す。空洞の場合、空洞横部の番号 2, 4 の圧縮ひずみ量が大きくなった。また、載荷軸方向に配置している番号 5, 7 のひずみ量が一定で小さいことがわかる。このことより、載荷軸上の圧縮ひずみは中心部が空洞であるために圧縮応力が生じず、空洞左右部で圧縮応力を負担していると考えられる。空洞により載荷軸上の拘束力が無いため、水平方向の引張ひずみを抑制する応力が存在しないので低荷重で破壊に至ると推測できる。

3.4.4 木

図-15 に断面中央部に木を配置した場合の P-ε 曲線を示す。木の場合は、載荷軸上の最大荷重時水平方向引張ひずみが極端に大きくなった。骨材上下部とも水平方向引張ひずみが大きくなった。しかし、その位置での鉛直方向圧縮ひずみは変化していないことから木の弾性係数がモルタルよりも小さいことでモルタルの変形に追従していることが再確認できた。

3.4.5 石膏

図-16 に石膏を中央部に配置した場合の P-ε 曲線を示す。これより、石を中央部に配置した場合と同様の挙動を示した。しかし、石に比べて骨材左右部での圧縮ひずみ量が小さくなっている。破壊後の供試体を見ると、模

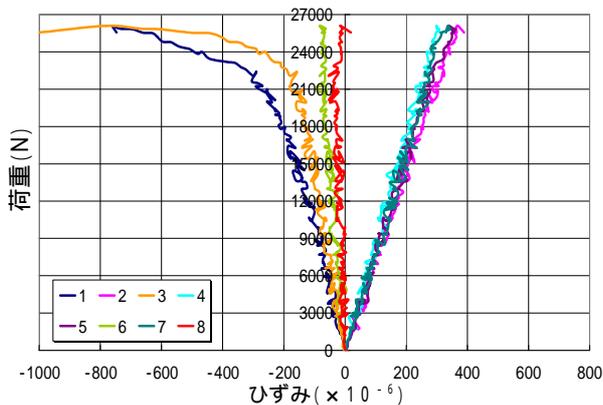


図-16 荷重 - ひずみ曲線 (中央：石膏)

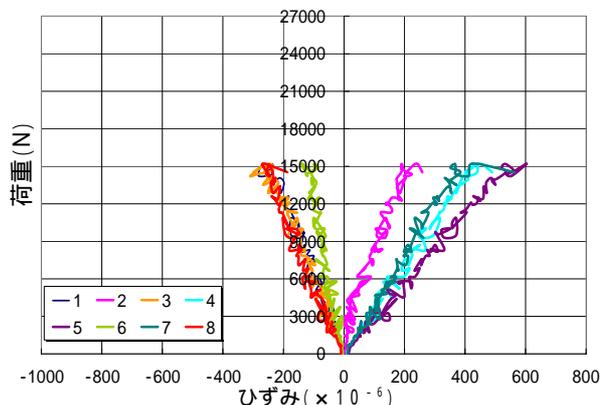


図-17 荷重 - ひずみ曲線 (中央：鉄筋)

擬骨材の破断とモルタルとの界面で剥離が見られる。このことから骨材強度の違いが影響したと考えられる。

3.4.6 鉄筋

図-17 に断面中央部に鉄筋を配置した場合の P-ε 曲線を示す。鉄筋を配置した場合、他の骨材を配置した場合と比べて載荷軸上の鉛直方向の圧縮ひずみ (番号 5, 7) が明らかに大きくなり、軸上の水平方向引張ひずみ (番号 1, 3) よりも大きい値となっている。骨材部とモルタル部の弾性係数の差が大きいほど応力集中することが確認できる。このことは、既往の研究¹³⁾と同様の結果となった。また、全体的に引張ひずみよりも圧縮ひずみが大きくなっていることから、弾性係数が大きい骨材の周辺では圧縮応力が強く作用することが確認できた。

4. 各種測定方法で取得した応力の相互比較

4.1 理論解について

円柱の直径に比してその長さがある程度長いと、その両端傍を除いて、中央部では平面ひずみ状態と考えられるため、次に示すような平面問題として取り扱うことができる。図-18 に示すような直径 d の円板に対して、鉛直方向に作用する一対の荷重 P が作用した場合について、線分 CD 上の N 地点での単位幅当りの水平及び鉛直方向応力 σ_x, σ_y は次式で表すことができる。一般に最大主応力 (圧縮) を負で表し、最小主応力 (引張) を正の値で示す。

$$\sigma_x = -\frac{4P}{\pi} \cdot \frac{\sin^2 \theta \cos \theta}{r} + \frac{2P}{\pi d} \quad (1a)$$

$$\sigma_y = -\frac{4P}{\pi} \cdot \frac{\cos^3 \theta}{r} + \frac{2P}{\pi d} \quad (1b)$$

ここで、 θ : 点 N と線分 AB のなす角、r: 線分 AN、d: 円板の直径、P: 荷重

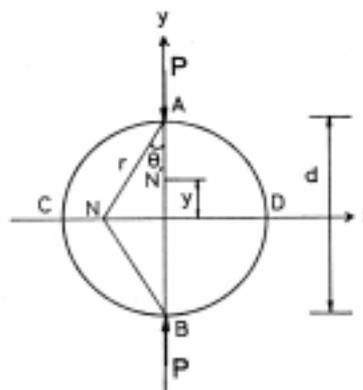


図-18 理論解での円盤の定義¹⁴⁾

この、 σ_x は直径 AB 上において一様な引張応力を示すことから割裂引張試験における破壊荷重 P_{max} を用いて、 $\sigma_t = 2P_{max}/\pi d l$ が利用されている。

4.2 応力算定法

以下に示す 3 通りの方法により表面応力を算出し、赤外線による応力分布図の妥当性と実験データの信頼性について検討する。応力算出方法は (1) 赤外線応力画像システムによる応力分布からのもの、(2) ひずみ量から算出するもの、(3) 弾性学の理論式より算出するものとした。

方法 (1) は、2 で取得した応力画像について、3 で計測したひずみゲージ貼付位置での応力値を読み取ったものである。

方法 (2) は、赤外線応力画像システムによる表面応力測定時に作用させた上限荷重と同等の荷重時におけるひずみを P-ε 曲線より読み出し、式 (2) を用いて応力値を算出する。写真-8 に示すゲージ貼付位置のひずみ量は供試体中央部を対称にしてほぼ等しい値を示していることから、上下部及び左右部のひずみ量の平均値 (表-3) を使用した。

P-ε より応力を算出する場合、割裂引張試験は 2 軸応力下で行われているため、ひずみは x の水平方向と y の鉛直方向成分の双方を考慮しなければならない。x 方

表-3 計算位置の名称

	ゲージ番号	名称
載荷軸上	+ の平均値	A
	+ の平均値	B
水平軸上	+ の平均値	C
	+ の平均値	D

向に σ_x, y 方向に σ_y の軸方向応力が作用している平面部材を考え、 x 方向のひずみ ε_x と y 方向のひずみ ε_y を別々に求めて、両方向のひずみを重ね合わせることでひずみを表すことができる。

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y)}{1 - \nu^2} \\ \sigma_y &= \frac{E(\nu\varepsilon_x + \varepsilon_y)}{1 - \nu^2} \end{aligned} \right. \quad (2a)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y)}{1 - \nu^2} \\ \sigma_y &= \frac{E(\nu\varepsilon_x + \varepsilon_y)}{1 - \nu^2} \end{aligned} \right. \quad (2b)$$

方法(3)は、弾性学の理論式より、応力を式(1a)、(1b)から算出する。模擬骨材部の真横に位置するゲージ位置で σ_x と σ_y は式(1a)、(1b)より

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1.69P}{\pi dl} \\ \sigma_y &= -\frac{5.37P}{\pi dl} \end{aligned} \right. \quad (3a)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1.69P}{\pi dl} \\ \sigma_y &= -\frac{5.37P}{\pi dl} \end{aligned} \right. \quad (3b)$$

と表される。

また、載荷軸上のひずみゲージ貼付位置における σ_x と σ_y は

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{2P}{\pi dl} \\ \sigma_y &= -\frac{6.79P}{\pi dl} \end{aligned} \right. \quad (4a)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{2P}{\pi dl} \\ \sigma_y &= -\frac{6.79P}{\pi dl} \end{aligned} \right. \quad (4b)$$

と表される。

赤外線応力画像システムによって取得した応力分布図は主応力の和で表されている。主応力の和 I とは x 成分の応力 σ_x と y 成分の応力 σ_y と z 成分の応力 σ_z を用いて、次式で表すことができる¹⁵⁾。

$$I = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (5)$$

ここで、供試体の表面応力成分を計測しているの、 z 成分である σ_z は 0 とみなすことができる。

主応力の和 I について、以下、応力分布図より取得したものは I_1 、ひずみ量から算出したものは I_s 、理論解より算出したものは I_a で表記する。

表-4 表面応力値

	赤外線 I_1	単位: N/mm ²				
		P		理論解		
		番号	応力値	主応力の和 I_s	応力値	主応力の和 I_a
モルタル	骨材上下	A	2.81	-4.46	$\sigma_x = 1.73$	-4.13
		B	-7.27		$\sigma_y = -5.86$	
	骨材左右	C	-4.49	-3.26	$\sigma_x = -4.63$	-3.17
		D	1.23		$\sigma_y = 1.46$	
石	骨材上下	A	4.76	-5.96	$\sigma_x = 2.12$	-5.08
		B	-10.72		$\sigma_y = -7.20$	
	骨材左右	C	-9.54	-8.63	$\sigma_x = -5.70$	-3.91
		D	0.91		$\sigma_y = 1.79$	
空洞	骨材上下	A	4.14	4.01	$\sigma_x = 1.0$	-2.39
		B	-0.13		$\sigma_y = -3.39$	
	骨材左右	C	-6.07	-6.71	$\sigma_x = -2.68$	-1.84
		D	-0.64		$\sigma_y = 0.84$	
木	骨材上下	A	4.37	3.41	$\sigma_x = 1.25$	-2.99
		B	-0.96		$\sigma_y = -4.24$	
	骨材左右	C	-5.41	-5.89	$\sigma_x = -3.35$	-2.3
		D	-0.48		$\sigma_y = 1.05$	
石膏	骨材上下	A	2.10	-1.65	$\sigma_x = 1.37$	-3.29
		B	-3.75		$\sigma_y = -4.66$	
	骨材左右	C	-4.20	-4.20	$\sigma_x = -3.69$	-2.53
		D	0		$\sigma_y = 1.16$	
鉄筋	骨材上下	A	4.59	-7.09	$\sigma_x = 1.75$	-4.21
		B	-11.68		$\sigma_y = -5.96$	
	骨材左右	C	-8.06	-4.69	$\sigma_x = -4.71$	-3.23
		D	3.37		$\sigma_y = 1.48$	

*: 鉄筋では破壊荷重を用いた

4.3 P- と理論解の応力値の検討

表-4 に各方法による各応力の算出結果の一覧を示す。模擬骨材上下部の応力 σ を σ_{x1} 及び σ_{y1} とし、模擬骨材左右部の応力を σ_{x2} 及び σ_{y2} で表記する。

モルタルで両者を比較してみると模擬骨材上下部の応力 σ_{x1}, σ_{y1} は両方とも方法(2)の値が理論解を上回った。方法(2)で算出した場合は材料特性を用いた算出方法である。一方、方法(3)は荷重 P の関数であることから材料特性を考慮しない結果であると考えられる。また、模擬骨材左右部では両者の応力値は近い値をとった。載荷軸上でない場合には荷重による応力の影響が小さくなるため、大きな差は見られない。

模擬骨材が断面中央部に存在する場合は、方法(2)で求めた σ_{x1} が理論解よりも大きくなり、数値が倍以上になった。これは載荷軸方向の圧縮応力に対して生じる水平方向引張力は模擬骨材が近くに存在することで、モルタルに比べて変形を拘束されないためであると考えられる。また、その応力値は空洞や木といった模擬骨材外部を覆っているモルタルよりも弾性係数の小さいもので大きくなり、弾性係数の大きな鉄筋ではその影響は見られない。以上より、弾性係数が小さい場合はモルタル部の変形に追従しようとし、モルタルと同等以上の弾性係数の場合にはその影響が見られないと考えられる。模擬骨材上下部の σ_{y1} は、 σ_{x1} と逆の傾向が見られた。つまり、空洞や木などの弾性係数が小さいものでは圧縮ひずみ量も極端に小さくなる。これは上下から伝達される荷重に対して、模擬骨材の弾性係数が小さい場合には応力が分散してしまうため、結果として圧縮応力が集中荷重に対して、模擬骨材の弾性係数が小さい場合には応力が分散してしまうため、結果として圧縮応力が集中しないと考えられる。これに対して鉄筋は弾性係数が大きい、鉄筋と載荷板を結ぶ直線上では圧縮応力が集

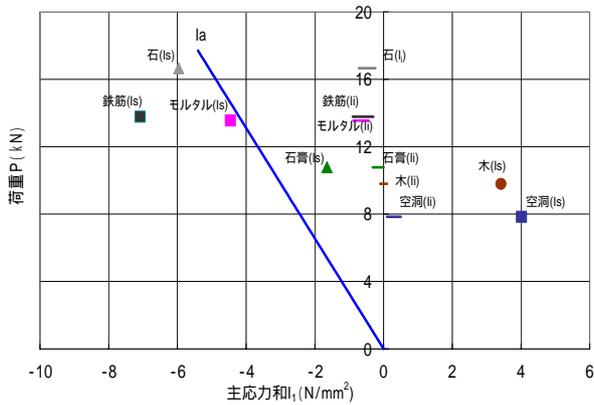


図-19 主応力と荷重の関係（骨材上下部）

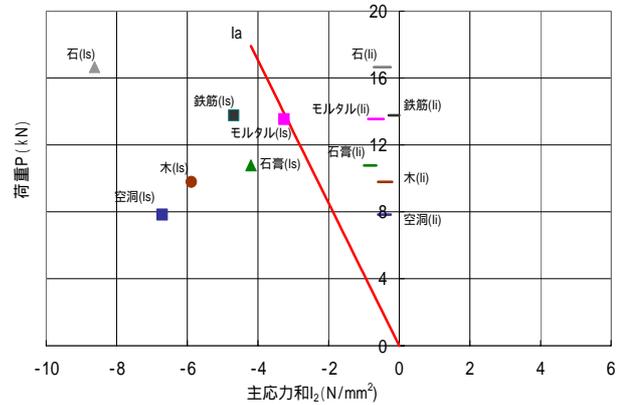


図-20 主応力と荷重の関係（骨材左右部）

中し易い。模擬骨材左右部の方法(2)より求めた応力 σ_{y2} は全体的に理論解よりも大きくなった。これは載荷軸上の模擬骨材上下部の σ_{x1} と同様の理由である。

4.4 各種取得したデータの検討

図-19, 20 に模擬骨材上下部及び左右部の主応力合を示す。模擬骨材上下部の主応力合を I_1 とし、左右部の主応力合を I_2 とする。図中にプロットしてある点は方法(2)より算出した I_s であり、短線で示してあるのは方法(1)で取得した主応力合の範囲である。方法(1)で取得した I_1 と方法(2)で算出した I_s と方法(3)で算出した I_a について検討した。

図-19 より骨材上下部の主応力合 I_1 では、モルタルの I_s は理論解 I_a と近い値となった。これは応力値で検討した時でも同様の結果となっている。この理論解 I_a を境にして模擬骨材の弾性係数が大きなものは左へ、小さいものは右へ分布していることが確認できる。空洞や木といった弾性係数の小さなものは主応力合 I_s が引張の値として示され、 I_1 はそれぞれ I_s に比べて 1/10 程度となっている。また、主応力合 I_s が大きいほど、応力分布図で圧縮、引張領域が鮮明になると考えられる。

図-20 より骨材左右部の主応力合 I_2 について、石の I_s は大きい値をとったが I_1 は小さく、図-3 で高い圧縮領域が確認できなかった。次いで主応力合の大きい鉄筋でも高い圧縮領域が見られなかった。これに対して石膏や空洞などでは圧縮領域が確認できる。これは応力分布の範囲を選定する際に応力の可視範囲を統一していないことによる影響であると考えられる。

赤外線応力画像システムは非接触・非破壊で応力分布を捉えられる性質上、コンクリートの放射率や熱弾性係数等を入力する必要がある。コンクリートは不均質材料であるため、これらの入力値は構成材料を変化させただけで変化し、パラメータの選定が難しい。また、コンクリートは熱伝導率が小さいため、このことも測定データが大きくばらつく原因であると考えられる。P-ε の測定方法では静的載荷であり、応力分布図取得のための測定方

法は繰返し載荷である。同じ荷重レベルで載荷しても同じ値になることは無い。しかし、繰返し荷重によって取得したデータは平均化して応力分布図として表示されているため、定量的には困難な部分があるが、定性的には評価可能であると考えられる。

5. まとめ

(1) 模擬骨材を配置した場合、模擬骨材の弾性係数とモルタルの弾性係数の大小関係によって模擬骨材周辺の応力状態は異なる。模擬骨材の弾性係数がモルタルよりも小さい場合には鉛直方向からの荷重に対して、模擬骨材が模擬骨材周辺のモルタル部に追従してしまうため骨材上下部に水平方向の引張領域が生じ、引張りひずみ量も大きくなった。鉛直方向では模擬骨材中を応力が伝達するため、圧縮ひずみ量が小さくなる。これに対して、模擬骨材の弾性係数がモルタルの弾性係数よりも大きい場合、模擬骨材上下部の鉛直方向圧縮応力が大きくなり圧縮ひずみ量が増大した。また、模擬骨材の付着力も模擬骨材周辺のモルタルに及ぼす影響は大きい。

(2) 応力画像と実験データと理論解を比較すると、応力画像と実験データで数値が大きく異なるものの、応力分布(応力領域)は同じ傾向を示しているため、載荷時の応力領域を把握する方法としては有効である。

本研究では、模擬骨材の弾性係数がモルタルの弾性係数との違いによって骨材周辺領域に及ぼす影響が確認できた。また、赤外線応力画像システムによって取得した応力分布図は供試体に負荷した時の応力分布を示しており、コンクリートの破壊性状を把握する上で有効的に利用できることがわかった。しかし、応力分布図の示す応力値は実測値とかけ離れているため、今後入力パラメータを改善することで、実現象に近づけることは可能で

あり、メソスケール解析の基礎データとして有効であると
考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、吉川弘道教授、栗原哲彦講師、
斉藤秀夫技士、仲宗根茂技士には多大なご指導及びご
協力を頂きました。また、構造材料工学研究室の皆様方
に支えられてきたことに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 川井忠彦: 離散化極限解析法概論, 培風館, 1990
- 2) 土木学会: 「コンクリート標準示方書[施工編]」
2002 制定
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準
- 4) 増喜彰久: 赤外線応力画像システムの原理と応用,
計測技術, pp.71-78, 1997
- 5) 村田二郎: コンクリート技術 100 講, 山海堂, 1990
- 6) 浅井貞重: 割裂引張試験法についての考察, コンク
リート工学年次論文報告集, Vol5, No1, pp.447-
452, 1993
- 7) 岩崎訓男, 富山泰全: セメントペースト-骨材界面の
結合・破壊機構と強度-, セメント技術年報 30 巻,
pp.354-358, 1976
- 8) 鈴木鉄也, 水上国男: 骨材とペーストの付着強度に
ついて, セメント技術年報 29 巻, pp.139-142, 1975
- 9) 和泉正哲, 三橋博三, 佐々木達夫: コンクリートの圧
縮破壊発生機構に関する基礎的研究, 日本建築
学会論文報告集, 第 289 号, pp.11-23, 1980
- 10) 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, 日本建築学会論文
報告集, pp.1-11, 1975
- 11) 岡田清: 最新コンクリート工学, 国民科学社, p23,
1986
- 12) 上田稔, 長谷部宣男, 佐藤正俊, 奥田宏昭: コンク
リートの割裂試験における破壊メカニズムの破壊力
学的研究, 土木学会論文集, V-21, pp.61-70,
1993
- 13) 榎場重正, 河村満紀, 斉藤満: 圧列試験におけるコ
ンクリートの破壊挙動に関する基礎的研究, 土木
学会論文報告集, pp.69-76, 1975
- 14) 平修二: 現代弾性学, オーム社, pp.126-130, 1974
- 15) 後藤学: 塑性学, コロナ社, p24, 1982

MEASUREMENT OF SURFACE STRESS OF CONCRETE FOR MESOSCALE ANALYSIS

Tomohito MATSUMOTO

In this research, the influence of the aggregate on the stress distribution of mortar around the aggregate is investigated on the mesoscale level. Two experimental methods are introduced to measure the surface stress of mortar section with model aggregate. The first is the method of using the stress measurement system by the infrared ray. As the second method, the electrical resistance strain gauges are used to directly obtain the load-strain curve under the static loading.

The theoretical equation based on the elasticity is then applied to experimentally observed data. The stress distribution obtained by the first method is much smaller than those calculated by the theoretical equation. However, measured or calculated three stress distributions of specimen section are quite close. Moreover, it is confirmed that difference between Young's modulus of the mortar and that of the aggregate influences on the stress distribution of specimen section.