

論文 繰り返し伸長疲労過程にあるポリマーセメント系塗膜防水層の引張性能の評価

塚越 雅幸*1・良永 大知*2・本田 悟*3・古澤 洋祐*4

要旨: ポリマーセメント比が 100%~200%で厚さが 2.0mm のポリマーセメント系の塗膜材料の、伸び性能と耐伸長疲労性について実験的検討を行った。最大伸び率については、材料分離の生じにくい高 P/C また低 W/B ほど大きくなる傾向にあったが、最大引張応力については不規則な傾向を示した。ここで、引張荷重と伸び変形量からひずみエネルギーを求めた結果、P/C=150%・W/B=60%の供試体が最も大きくなった。ただし、繰り返し引張を与えた場合、W/B によらず高 P/C ほど 1 回目の伸長時のひずみエネルギーの値を、繰り返し伸長後も保持しており、高 P/C の調査は耐引張疲労性確保のためには有効であると考えられる。

キーワード: 伸長疲労, ポリマーセメント, 塗膜防水層, 材料分離, ひび割れ

1. はじめに

ポリマーセメント系塗膜防水材(Polymer-modified cement water proofing membrane: 以下 PCWM)は、ポリマーと水を混練したポリマーエマルジョンとセメントで構成される材料である。一般的な断面修復材用のポリマーセメントは、ポリマーセメント比(以下 P/C)が 5~10%程度^{1,2)}であるの対して、100%~200%とすることで高い防水性と伸び性能を向上させ、建築物の屋根・壁等の防水材料として利用される。

PCWM はエマルジョン中の水分がセメントの水和に利用されることと、表面から乾燥することの同時作用により内部の水分が減少し、最終的にポリマー同士が融着することによって造膜³⁾する。しかし、セメントの密度はポリマーの密度より 3 倍ほど大きいので、水平面に施工する場合、調査条件によってはセメント成分がポリマーエマルジョン内で沈降する、材料分離が生じてしまう可能性があり、これが引張性能の低下に繋がるのが報告⁴⁾されている。コンクリートは様々な理由でひび割れが生じるが、その際、塗膜に破断が生じると漏水の恐れがあるため、防水層にはひび割れなどに対して追従し、破断しないための伸び率が求められる。

そこで著者らは、断面でのポリマーとセメントの分布と引張性能との関係⁴⁾について検討した結果、P/C が 25% から 200%の範囲では総じて P/C が大きいほど耐下地ひび割れ抵抗性が高くなる傾向にあることを明らかにした。しかし、これは PCWM のひび割れ拡大縮小により生じる亀裂の進展過程の検討に留まっている。そこで本研究では、PCWM の材料の不均一性と耐下地ひび割れ抵抗性の関係について、機械的な引張性能の変化に着目し検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体作製

試験体には市販の普通ポルトランドセメントを使用するが、PCWM は塗膜厚さが 2.0mm 程度と薄いため、ふるいを用いて粒子径 100 μm 以下に調整したものを使用した。また、ポリマーは市販のアクリル系エマルジョンを使用した。なお本エマルジョンは体積割合で 45%が水分でありこれが失われたときのアクリルポリマー硬化物の密度は 1.01g/cm³であった。

試験体の調査は、P/C を 100, 125, 150, 200%, W/B (W: 水, B:セメント+ポリマー樹脂)を 55, 60, 65%とした。試験体の構成を表-1 に示す。試験体は、防水層のシート状試験体を作製した。

試験体はポリマーと水を混練したポリマーエマルジョンにセメントを加え、5 分間混練したものを離型剤を塗ったガラス板に、硬化後の塗膜厚さが 2.0mm になるように材料の密度と質量、蒸発する水分量を考慮した上で塗布し、シート状試験体を作製した。なお、ポリマーセメント系塗膜防水工事施工指針や仕様書によれば、PCWM は造膜後の平均厚みを確保するように 2 層に分

表-1 ポリマーセメント供試体の調査

| | | W/B (%) | | |
|---------|-----|---------|----|----|
| | | 55 | 60 | 65 |
| P/C (%) | 100 | ○ | ○ | ○ |
| | 125 | ○ | ○ | ○ |
| | 150 | ○ | ○ | ○ |
| | 200 | ○ | ○ | ○ |

※○印は試験を実施、グレー塗りつぶしは目視により明らかな材料分離を確認

*1 福岡大学 工学部 建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 福岡大学 工学部 建築学科 学部 4 年

*3 福岡大学 工学部 建築学科 講師 (正会員)

*4 AGC ポリマー建材 博士(工学)

けて施工される場合もあるが、本研究では材料の密度差による厚さ方向での不均一性の検討を行う事を目的としているため1層を一回で施工し、23℃、60%R.H.の試験室環境下で14日間養生した。

2.2 力学試験方法

(1) 引張試験及び引張疲労試験

シート状試験体から図-1に示す形状のダンベル1号型に切り出したものを試験体とした。引張試験は23℃、60%R.H.の環境下で、引張速度50mm/minで行った。繰返し引張疲労試験でも、引張試験と同様の試験体を用いて、引張・除荷・再引張の繰返しを与えた。疲労の与え方については、連続で20回繰返し疲労を与えた。なお、疲労試験では引張試験で求められた最大伸び率の3割の伸び率を与えることとした。

(2) 耐下地ひび割れ追従試験

耐下地ひび割れ抵抗性能試験では、図-2に示すような中央に模擬ひび割れを有する鋼製の下地板に予め作製した縦横100mm×100mm×厚さ2.0mmのPCWMシートを接着剤で固定した。なお、接着剤はPCWMへの浸透量を抑制するため、空気中や被着体表面の水分と反応し、数秒で硬化するシアノアクリレートモノマーを用いた。接着後、ひび割れ拡大時のPCWMの膜厚さの変化と、破壊性状を観察した。

なお、引張試験は3体、その他の試験は2体ずつ試験を行っており、特に断りがない場合は試験結果はそれらの平均で示す。

3. 実験結果と考察

3.1 引張試験結果

3体ずつ行った引張試験の結果を図-3にまとめて示す。なお、装置の都合上、伸び率は最大750%までしか測定できていない。また、3体ずつ行った試験体のバラつきは比較的小さかった。

P/Cが高いものほど、すなわちポリマー量の多い割合ほど、柔軟な力学的性質を発揮し、最大伸び率は大きく

なった。しかし、最大引張応力については不規則な傾向となった。W/Bについて見ると、P/C=125%と150%ではW/Bの大きい割合の方が伸び率は低下する傾向にあったが、P/C=100%と200%ではあまり差が見られなかった。

ここで、全試験体の最大引張応力と最大伸び率についてまとめて図-4に示す。なお、図中黒○マーカーは次節で行った目視による断面方向の観察で材料分離が生じた試験体であり、緑○は材料分離が生じていないことを表す。最大伸び率についてはP/Cが大きいものほど、またW/Bが小さいものほど大きくなる傾向にあるが、最大引張応力については不規則な傾向を示し、P/Cが125%以下では、W/Bが低いものほど高いが、P/Cが150%以上では逆にW/B=55%と低いものの方が低い値を示した。

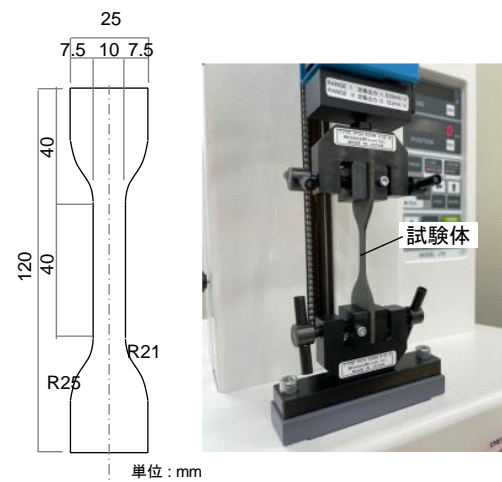


図-1 ダンベル1号型供試体形状と寸法と引張試験時の状況

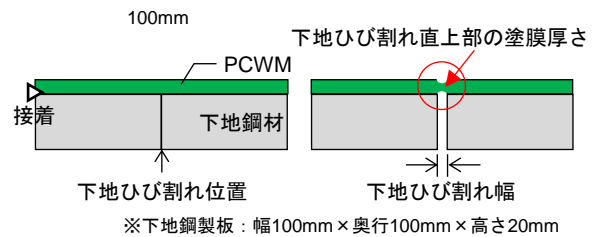


図-2 防水層の下地ひび割れ追従試験

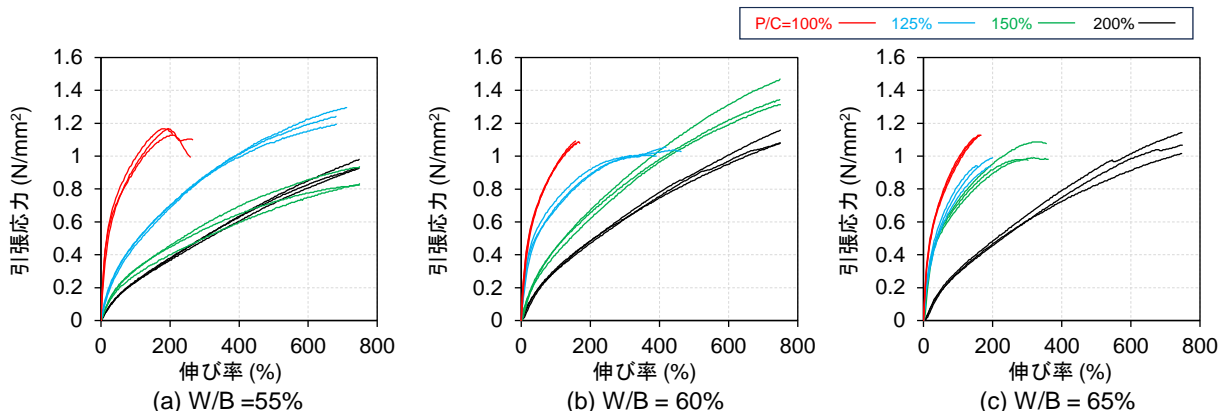
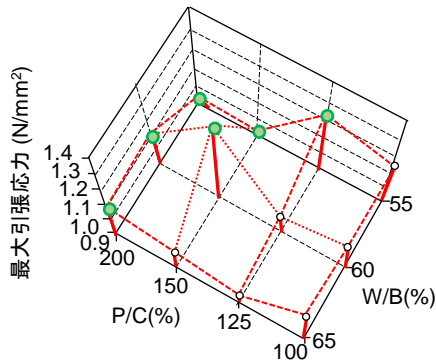


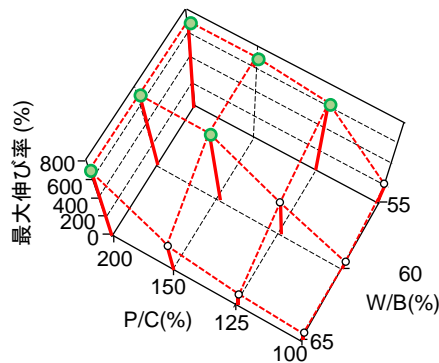
図-3 PCWMの引張試験結果

3.2 断面方向の材料分離状況の観察

断面方向での材料分離は単純な引張性能にも影響を及ぼしているものと思われる。既往研究等¹⁾では断面方向でのポリマーやセメント成分量の分布状況を測定装置



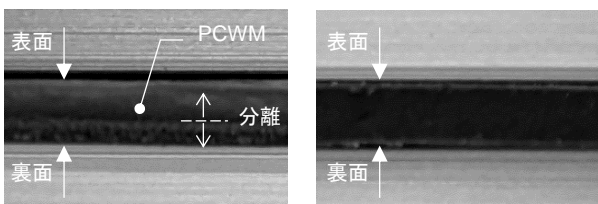
(a) 調査と最大引張応力の関係



(b) 調査と最大伸び率の関係

● 目視により明らかな材料分離が確認された調査
● 目視では材料分離が確認されなかった調査

図-4 引張試験時の伸び率と塗膜厚さの関係



(a) P/C=125, W/C=65%

(b) P/C=200, W/C=65%

写真-1 PCWMの材料分離状況

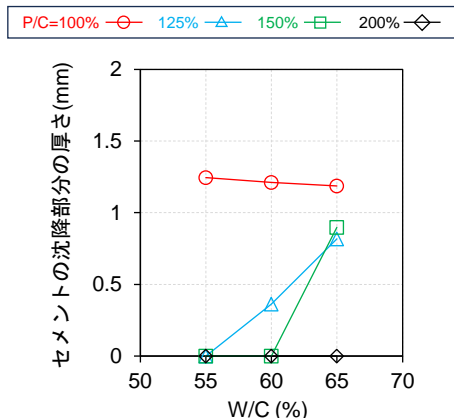


図-5 目視確認できるセメントの沈降部分の厚さ

を用いて分析を行っているが、ここでは簡便な方法での材料分離状況の確認を目的に、目視による観察を行った。

目視結果の一例として P/C=125%と 200%, W/B=65%の断面方向からの観察結果を写真-1 に示す。P/C=200%では均一な断面の様子がうかがえるが、P/C=125%では明らかにセメント成分が施工時の裏面（型枠側）方向に沈降し、上部にはポリマー成分が浮いているような分離状態が確認できる。そこで、目視による材料分離の状況を図-5 に示す。P/C が低くセメント量が多いもの、また、W/B が高く水分量の多いものほど、材料分離が生じており、また P/C が低くセメント成分が多いものほど、セメントの沈降厚さが厚くなる傾向にあった。

ここで、改めて引張試験結果を見ると、低 P/C ではセメント量が多いため伸び率に対する引張り応力が高く、硬く破断しやすい性質となっている。また、低 W/B の方が材料分離が生じにくく均質に材料が分散して造膜しているため伸び率は大きくなる傾向にあった。ただし、P/C が 200%の場合、W/B=60%以上でも目視による材料の分離は確認されなかったが、高 W/B では僅かにセメントの沈降が生じており下部ではセメントの性質が発揮され高強度となったものと考えられる。

3.3 水分の蒸発量の影響

養生中の供試体の重量変化、すなわち水分の蒸発量か

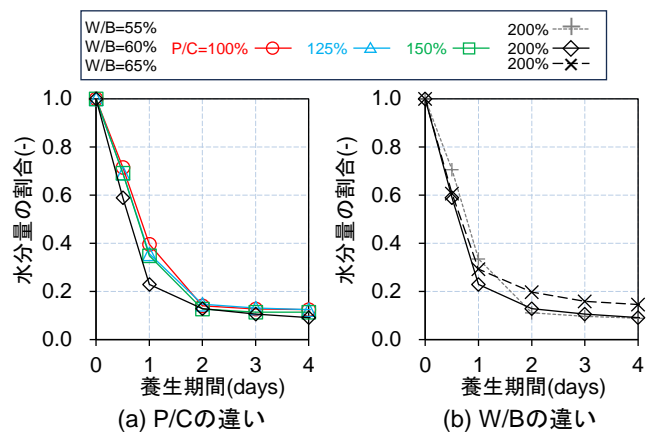


図-6 養生期間中の供試体の質量変化から求めた水分量の割合の変化

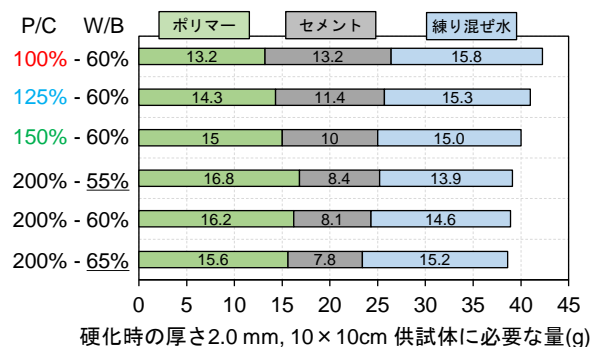


図-7 硬化時の厚さ2.0mmの供試体作製に必要な材料の量

ら、水分量の割合を求めた結果を図-6に示す。また、造膜時の塗膜厚さが2.0mmとなる100×100mmのシート状の供試体を作製する際に必要なポリマーとセメント、水の混合量について図-7に示す。

水分量の変化割合を見ると、図-6(a)より低P/Cほど蒸発速度が緩やかになる傾向にあり、特にP/C=200%ではP/C=150%以下と比べて水分の蒸発速度が大きい。これは、図-7より高P/Cほど必要なセメント量が少なくなるため、セメントによる吸水量が減少し見掛け上の保水力が低くなったのではないかと考えられる。また、図-6(b)より、同一のP/C=200%であっても、最終的な水分の保持率はW/B=65%が最も高くなった。これは高W/Bの方が練り混ぜ時の水分量が多いためセメント成分と水和反応がより進行したため、水分量がその分だけ多く保持されたのではないかと考えられる。

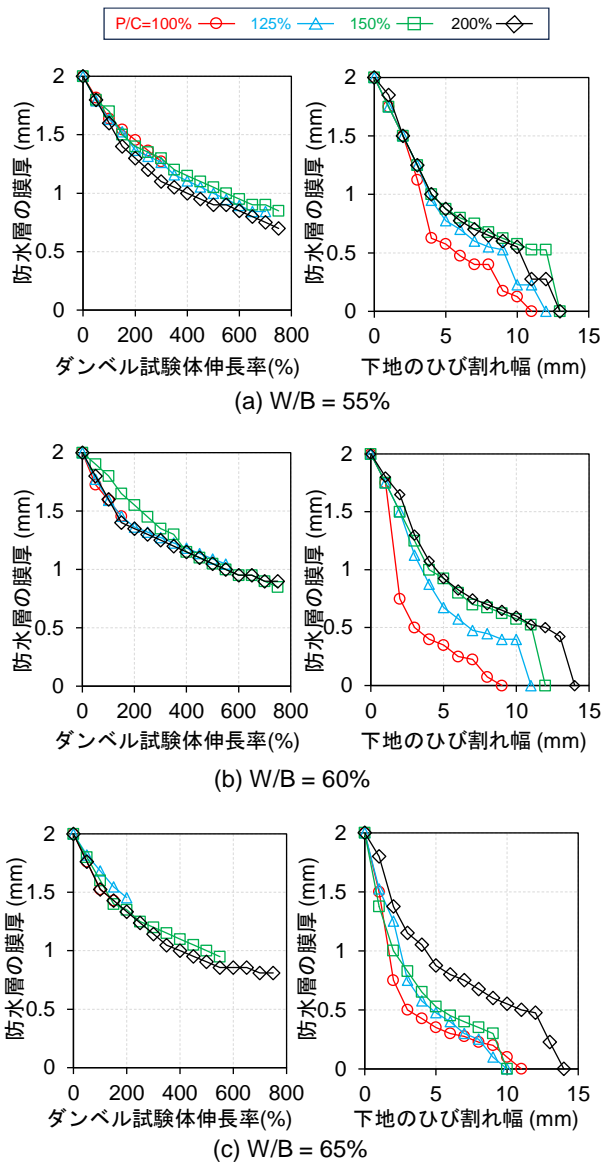


図-8 ダンベル試験体の伸長および下地ひび割れ幅とPCWMの厚さの関係

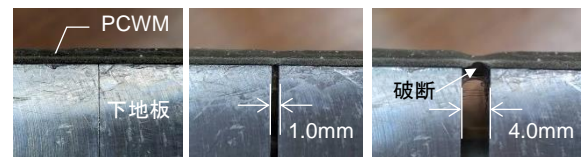
3.4 下地ひび割れ追従性能

下地鋼製板の模擬ひび割れを1.0mm間隔で拡大し、そのひび割れ直上部の防水層位置の膜厚さの変化を測定した結果と、ダンベル状試験体を用いて行った引張試験時の試験体の防水層の膜厚さの変化を併せて図-8に示す。

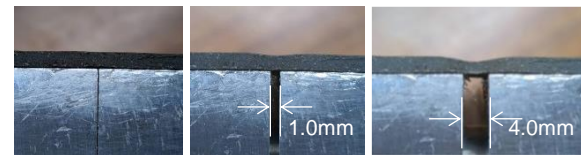
まず、ダンベル試験体の伸長時の膜厚さとの関係についてみると、P/CやW/Bの影響は比較的小さく、概ね伸び率が200%で0.6mm程度、500%で1.0mm程度膜厚が減少した。

次いで、下地ひび割れ幅の拡大に伴い、ひび割れ直上部の防水層は徐々に薄くなり最終的に破断した。この時、防水層が破断するまでの挙動はダンベル試験体とは異なり、P/CやW/Bにより一定の傾向があった。これは、ダンベル試験体を用いた引張り試験は、伸長方向のみに試験体が固定された単純1軸伸長であるのに対し、ひび割れ直上部の防水層の伸長は、ひび割れ幅の拡大方向のみではなく、ひび割れ幅と垂直方向の変形も拘束された2軸伸長⁵⁾となっているからであると思われる。

ひび割れ直上部の防水層の破断までの膜厚の減少量についてみると、低P/Cの方がひび割れ幅が小さい段階大きく減少する傾向にあった。一方で、高P/Cでは最終的に0.3~0.5mm程度の膜厚の状態から一気に破断が生



(a) P/C=125, W/C=65%



(b) P/C=200, W/C=65%

写真-2 ひび割れ直上部のPCWMの状況

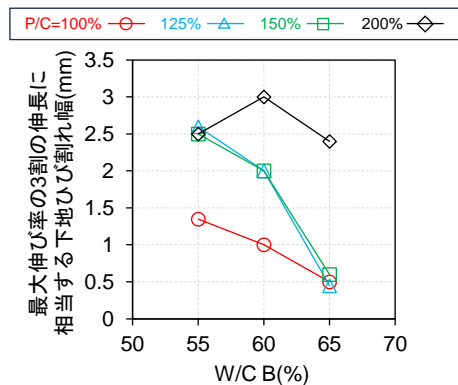


図-9 ダンベル試験体に最大伸び率の3割の伸長を与えた時の膜厚に相当する下地ひび割れ幅

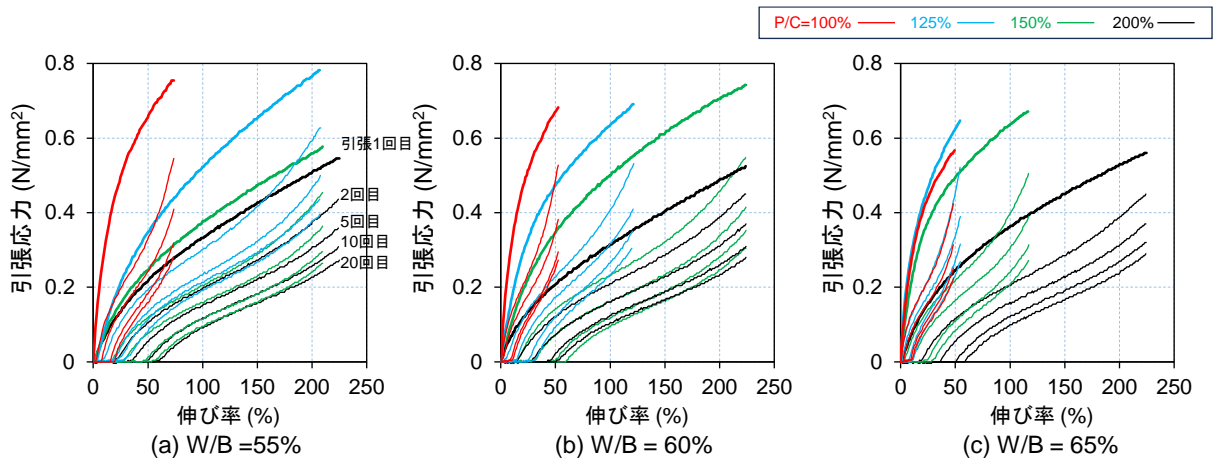


図-10 20回の繰返し引張疲労試験時の応力と伸び率の関係

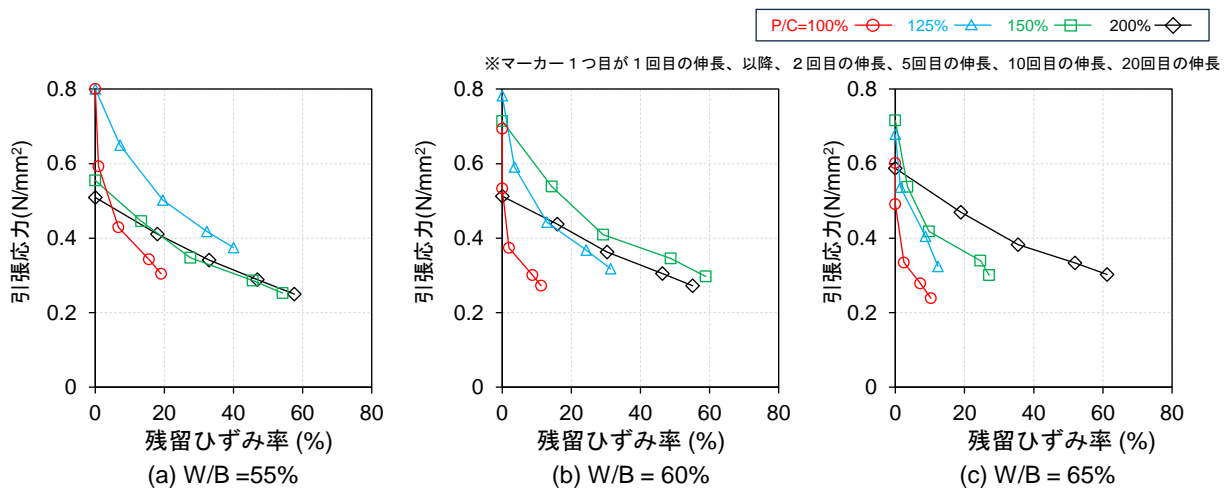


図-11 繰返し疲労時の応力と伸び率の関係(W/B=60%)

じた。また、W/Bの影響も大きく、W/B=55%の場合は、概ね下地ひび割れ幅 12~13mm 程度で破断したが、W/B=65%の場合は P/C が 150%以下の調合では下地ひび割れ幅 10mm 程度で破断した。これは、写真-2 に示すように、低 P/C かつ高 W/B の場合、下部にセメントが沈降しており、この部分がセメントペーストのように脆性的に破壊したため、その上部に応力が集中して破断したためではないかと考えられる。

3.5 引張疲労試験

PCWM の伸び性能は、図-4 に示した引張試験結果より、最大伸び率は 200~750%以上と非常に幅広い性能を有する。そこで、疲労試験では調合ごとに引張り試験時の最大伸び率の 3 割の伸長率を繰り返す、最大 20 回まで与えた。ここで図-8 より、ダンベル試験体の最大伸び率の 3 割分の伸長を与えた時の防水層の膜厚と、下地ひび割れ直上部の膜厚さが同等となる時の下地ひび割れ幅を求め図-9 に示す。最大伸び率の 3 割の伸長は、P/C=100~150% で W/B=65% の場合では下地ひび割れ幅が 0.5mm 程度、P/C=200% の場合は 2.5~3.0mm 程度と比較的大きなひび割れの負荷に相当する。このような繰返し伸長試

験を行った時の引張応力と伸び率の関係を図-10 に示す。なお、試験体数は 2 体で行っているが、ここでは 1 体分の結果を示している。与えた伸び率は調合により 50~225% と大きく異なるが、引張応力でみると概ね 0.6~0.8N/mm² の範囲での繰返し伸長量を与えたことになった。また、残留ひずみ変形量は、与えた伸び率に依存するが、繰返し伸長の増加と共に徐々に増加した。

引張伸長回数による、引張応力と残留ひずみ率の変化の関係を図-11 に示す。また、目視による材料分離が見られなかった調合では、最大引張応力と残留ひずみ率は概ね線形の関係にあった。これに対し、材料分離が確認された試験体では、伸張回数が少ない時期では応力は低下するが残留ひずみ率は小さく、一定の伸長回数を超えると残留ひずみ率が急に大きくなる傾向にあった。これは、材料分離が確認された試験体では、1 回目の伸長時に、目視では確認することは出来なかったが、セメント部分の破壊が生じて引張応力が低下し、その後、ポリマー部分に残留変形が生じ、引張応力の低下が生じたものと考えられる。

ここで、PCWM に引張荷重を与えると伸び変形が生じ、

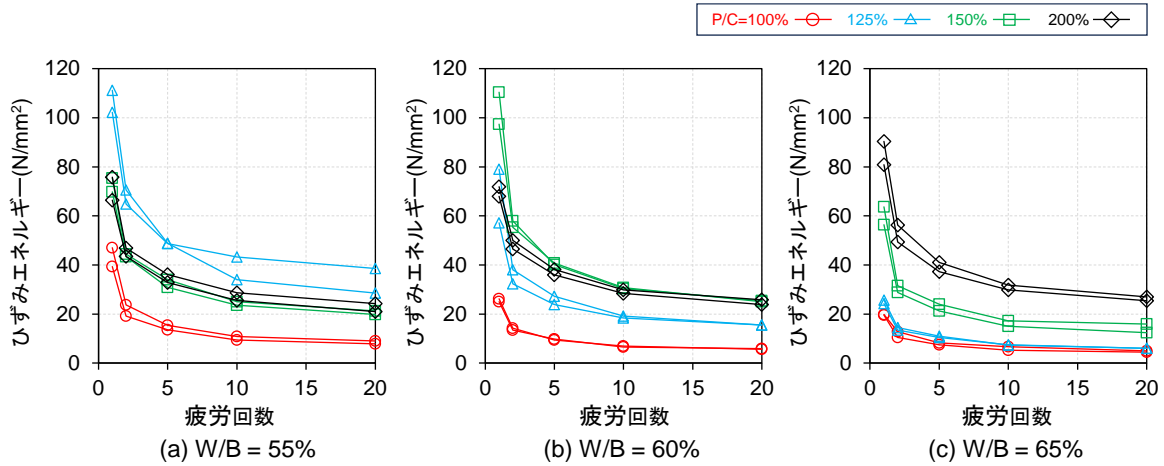


図-12 疲労回数とひずみエネルギーの関係

ひずみエネルギーが蓄積され、このひずみエネルギー E_ε は、図-10 に示す応力ひずみ曲線の下面積で表され、式(1)で求められる。

$$E_\varepsilon = \int_0^a \sigma d\varepsilon \quad \text{式(1)}$$

ここで、 E_ε :ひずみエネルギー (N/mm²)、 a : 伸び率(%), σ : 引張応力(N/mm²)、 ε : 伸び率(%)

式(1)で求めたひずみエネルギーを2体の試験結果をまとめて図-12 に示す。1 回目の伸長時のひずみエネルギーを見ると、W/B によらず図-12(a) ~ (c) 全て P/C=100%が最も小さい値となった。これは引張応力では W/B=55%の場合では P/C=100%が最も高くなるが、セメント量が多く脆性的な破壊挙動を示す材料では、伸び率の影響も含めるひずみエネルギーは小さくなるためである。

また、P/C と W/B それぞれの影響を受けてひずみエネルギーは大きく変化し、W/B=55%の場合では P/C=125%が最も大きく、次いで 200, 150, 100%の順となった。

W/B=60%では P/C=150, 200, 125, 100%の順となった。P/C=150%の調合では、1 回目の伸長時のひずみエネルギーは最も高い値をしているが、伸長 5 回目以降は P/C=200%とほぼ同程度の値まで低下している。また、P/C=125%の 1 回目の伸長時のひずみエネルギーは P/C=200%と同程度であるが、2 回目以降の伸長を与えた場合は、大きく低下している。これらの結果より、P/C=200%の調合では、W/B によらず最も 1 回目の伸長時のひずみエネルギーの値を繰り返し伸長後も保持していることから、また、疲労試験時に与えた伸長率（相当ひび割れ幅）は、伸び性能の高い材料ほど厳しい条件で与えていることから、P/C の高い調合は耐引張疲労性能確保のためには有効であると考えられる。

4. まとめ

PCWM の最大伸び率は、材料分離が生じにくい高 P/C で低 W/B の調合ほど大きくなる傾向にあった。しかし、最大引張応力については不規則な傾向を示しており、沈降したセメント部分の強度や、PCWM が保持する水分とセメントの水和量が関係しているものと考えられる。

20 回の疲労試験を行った結果、高 P/C のものほど、1 回目のひずみエネルギーを保持しており耐引張疲労性能が高くなる傾向にあった。

参考文献

- 1) 趙 榮國, 大濱 嘉彦, 出村 克宣, 硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの力学的性質, 日本建築学会構造系論文集, Vol.59, No.464, pp.1-6, 1994
- 2) 山口 信, 村上 聖, 武田 浩二, 角野 嘉則, 下田 誠也, 久部 修弘, 高靱性ポリマーセメントモルタルと連続繊維補強材との併用による鉄筋コンクリート梁の曲げ補強工法に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.671, pp.121-130, 2012
- 3) 塚越 雅幸, 鴻上 嘉延, 田中 享二, ポリマーセメント系塗膜防水層の力学的性質に及ぼす水分蒸発速度の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.652, pp.1057-1064, 2010
- 4) 塚越 雅幸, 中森 正基, 上田 隆雄, 田中 享二, ポリマーセメント系塗膜防水層の材料分離とそれが耐下地ひび割れ疲労性能に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.86, No.781, pp.353-360, 2021
- 5) 藤川 正毅, 二軸引張試験による高精度なゴムの応力-ひずみ関係の計測, 日本ゴム協会誌, Vol.90, No.4, pp.221-226, 2017