

V-28 高炉スラグ組成物を利用した モルタルの水中疲労

室蘭工業大学 学生員 信太 一人

室蘭工業大学 正 員 菅田 紀之

室蘭工業大学 正 員 尾崎 詔

1. はじめに

製鉄所から排出される産業副産物の一種である高炉スラグのうち、水冷方式で冷却処理された高炉水滓スラグは、潜在水硬性を有していることから、高炉セメントの原料として古くから用いられてきた。また、コンクリート用細骨材としての使用が1981年にJIS化され、コンクリート用高炉スラグ微粉末が1986年にJSCCにより規格化されてからは、細骨材あるいは混和材としても広く使用されるようになった。

高炉水滓スラグの水和は、一般的にはポルトランドセメントクリンカーの OH^- と石こうの SO_4^{2-} イオンの刺激作用による潜在水硬性といわれている。また、長期的には、ポルトランドセメントの水和により遊離した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ により、スラグ中の主成分である CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 が溶出し、反応した結果、カルシウムシリケート水和物を生成し、空隙を充填することになる。つまり、ポゾラン反応を兼備しているのである。しかしながら、高炉スラグ粒子の水和層は、ポルトランドセメント粒子の $1/5 \sim 1/10$ とごく薄い層に限られている¹⁾。このことから、高炉スラグ微粉末の水和特性を最大限に活用する一方法として、高炉スラグの高微粉末化があげられる。このように、高炉スラグを高微粉末化することにより、コンクリートの早期水和による初期強度の増加や、比較的早期材令でのポゾラン反応が開始されることにより、緻密な組織構造が得られるのである。

一方、コンクリートの疲労に関しては、大気中の疲労強度に比べて水中での疲労強度が低下することが明らかになっている²⁾。このような水中における疲労強度が低下する原因としては水のくさび作用によって説明しているものもあるが³⁾未だ説明されていない。そこで、本研究では、高炉スラグ微粉末などから構成される高炉スラグ組成物を利用することで空隙充填効果つまり緻密な組織構造を得る事によって、水中での疲労強度を改善しようとするものである。また、高炉スラグ組成物を利用したコンクリートでは、骨材界面において空隙が残り不十分であったと思われる空隙充填効果を、水和活性を有する高炉スラグ細骨材を用いたモルタルにすることにより、より緻密な組織構造を得ようとした。さらに、セメントペーストの水中における割裂引張疲労試験において疲労強度が低下しないことが報告されている⁴⁾。そこで、本研究においても、セメントペーストと同程度の緻密性があると思われる高炉スラグ組成物を利用したモルタルを用いて、水中における割裂引張疲労試験を行った。

以上より、本研究は高炉スラグ組成物を利用したモルタルで水中における圧縮疲労試験及び割裂引張疲労試験を行い、過去に行った研究結果と比較して検討、考察したものである。

2. 実験材料

使用した高炉スラグ組成物(NEM)は、工業生産した最大粒径 $10\mu\text{m}$ 以下でブレン比表面積 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ のスラグ高微粉末(α)と早強ポルトランドセメント(C)を配合した比重 3.03 のバインダーに、破碎加工した比重 2.80 のスラグ細骨材($\beta-1.2\text{mm}$ 以下)を加えた、比重 2.94 のプレミックスドライモルタル¹⁾である。この高炉スラグ組成物の構成百分率は、 $C=30\%$ 、 $\alpha=30\%$ 、 $\beta=40\%$ であ

り、固形分で0.4%の高性能減水剤がブレミックスされている。また、細骨材としては、より緻密な組織構造を得る事を目的としているので自然砂を使用せず、スラグ細骨材を使用することにした。

3. 配合および供試体

実験に用いたモルタルの配合は、表-1に示す通りである。練り混ぜ方法は、手練りで行い30リットルづつ2バッチに分けて、各バッチ40本づつ計80本 $\phi 7.5 \times 15 \text{ cm}$ の円柱供試体を製作した。各バッチにおけるフロー値の測定値は、それぞれ174と186であった。供試体は脱型後、20℃の恒温養生水槽内で、疲労試験を行うまで養生を行った。各バッチの材令28日における圧縮強度は、それぞれ604 kg/cm^2 および682 kg/cm^2 であった。

表-1 モルタルの配合

水結合材比 W/(C+ α) (%)	単位量(kg/m^3)		
	水 W	結合材 C+ α	スラグ細骨材 β
44.5	171	663	1307

4. 試験方法

疲労試験には、圧縮疲労の場合は材令91日以上供試体で、引張疲労の場合は材令282日以上供試体を用いて行った。疲労試験の静的基準強度はそれぞれ、圧縮強度(材令91日)で798 kg/cm^2 、引張強度(材令282日)で50 kg/cm^2 であった。それぞれの応力-ひずみ曲線を、図-1および図-2に示す。図-1より、体積ひずみが減少から増加へと移行する特異点が応力の95%程度で現れており、破壊寸前まで体積の収縮が行われている。このことより、圧縮試験では急激な破壊を起こすことがわかる。また、図-2より引張試験では非常に弾性的な挙動を示していることがわかる。また、引張強度と圧縮強度の比は、材令91日の圧縮強度を用いると(引張強度)/(圧縮強度) $\approx 1/16$ となり、引張疲労試験時には1/16以下となっていると思われる。このことより、引張疲労試験として割裂試験方法が適用できる範囲にあり⁵⁾、本研究においても割裂引張疲労試験を行った。

疲労試験では、常に水中に供試体があるように内径31 cm、高さ29 cmの透明な疲労試験水槽内で行い、疲労試験機としては構造物疲労試験機(島津サーボパルサ EHF-30型)を使用し、繰り返し荷重の形式を正弦波、載荷速度を圧縮疲労試験では4~7 Hz、引張疲労試験では10 Hzとした。繰り返し荷重は、供試体が破壊するまで連続的に載荷し、破壊までの繰り返し回数を測定した。ただし、繰り返し回数が200万回を超えるものに対しては疲労試験を打ち切った。繰り返し荷重の上限(最大)応力比 S_1 と下限(最

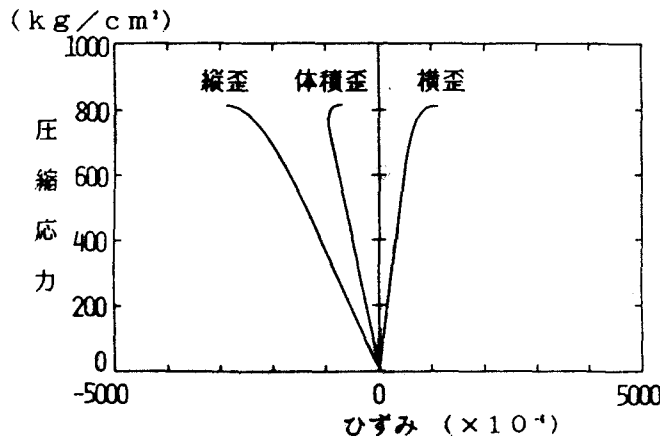


図-1 応力-ひずみ曲線(圧縮)

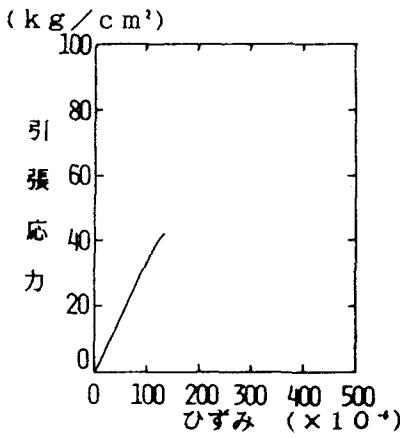


図-2 応力-ひずみ曲線(引張)

小)応力比 S_2 は、圧縮疲労試験の場合 S_1 は静的基準強度の70、60、50%の三応力段階とし、 S_2 は3%と統一した。一方、引張強度試験の場合 S_1 は静的基準強度の70、60、55%の三応力段階とし、 S_2 は10%と統一した。また、供試体からの水酸化カルシウム溶出によるpHの値を測定するために、疲労試験水槽とは別にpH検出用水槽を設けて、両水槽の水を循環させながら適当な繰り返し回数時に、pHメーターを用いてpHの値を測定した。さらに、繰り返し応力とひずみの関係を調べるために、あらかじめ圧縮疲労試験では縦方向と横方向に2枚ずつ計4枚のストレインゲージ(3cm)を、引張疲労試験では両面に1枚ずつストレインゲージ(2cm)をアルルタイトベースを用いて接着し、ハマタイトにより防水加工を施した。これらの供試体は乾かさずに水中に保存し疲労試験に用いた。なお、ひずみの測定にはシグナルコンディショナー、A/D変換機およびパソコンを用いた。

5. P-N線図およびS-N線図

各上限応力比ごとに、供試体の疲労寿命に対する生存確率の期待値を $P = 1 - r / (n + 1)$ で、また非破壊の供試体を含む場合には $P = 1 - r / (n + 2)$ によって求め、疲労寿命が対数正規分布に従うと仮定して、直線回帰を行ったものが図-3および図-4に示すP-N線図である。ここでは、本研究の圧縮疲労試験結果と引張疲労試験結果をそれぞれNCW、NTWとした。また、図中の縦軸には生存確率Pのほか、回帰直線を表すのに都合が良い基準正規分布の変数Tの値をあわせて記してある。これらの回帰直線における生存確率 $P = 50\%$ ($T = 0$)に相当する疲労寿命を求め、上限応力比との関係をS-N線図上で対数回帰し、これらの結果をさらに修正グッドマン線図

を利用して、下限応力 0 kg/cm^2 の完全片振りの場合の式に換算したものが図-5のようになる。ここでは、本実験結果(NCW、NTW)と比較検討するために、高炉スラグ組成物を利用したモルタルの大気中圧縮疲労(NCA)もあわせて記してある。この図より求めた、繰り返し回数200万回に相当する上限応力比はNCAで54%、本研究におけるNCWは36%、NTWは41%であった。これによると、高炉スラグ組成物による水中疲労強度の改善効果は、ほとんどなかったといえる。しかしながら、本研究でのS-N線図の回帰直線は疲労寿命が0(静的試験時)の場合、本来ならば上限応力比100%となるはずなのに圧縮・引張両疲労試験結果とも20%以上も大きくなっている。この結果、繰り返し回数1万回に相当する上限応力比はNCA=72%、NCW=69%、NTW=71%となっており、大気中と水中での疲労強度は、ほとんど同程度となっている。そこで、上限応力比と下限応力比を考慮した応力比： $(S_1 - S_2) / (1.0 - S_2)$ が1.0を通るようなS-N線を求めるために、改

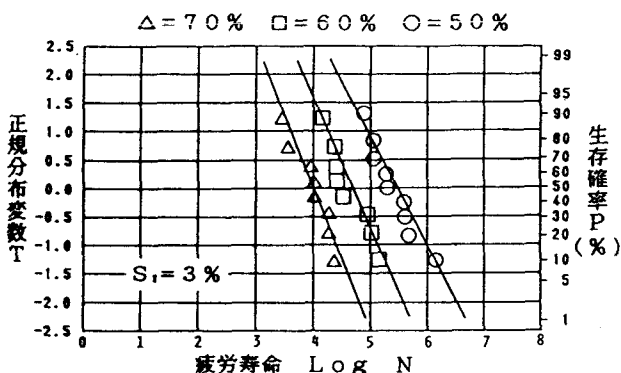


図-3 P(T)-N線図 (NCW)

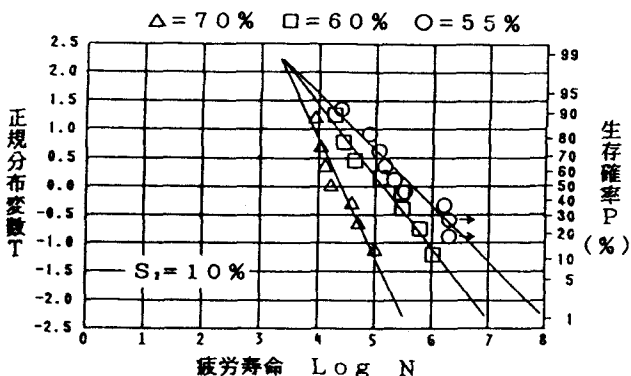


図-4 P(T)-N線図 (NTW)

めて最小二乗法を用いてS-N線図の回帰式を求めたものが図-6である。これより、繰り返し回数200万回に相当する応力比はそれぞれNCA=56%、NCW=47%、NTW=47%となり、水中疲労強度の改善は圧縮疲労・引張疲労試験結果ともに35%程度にとどまった。

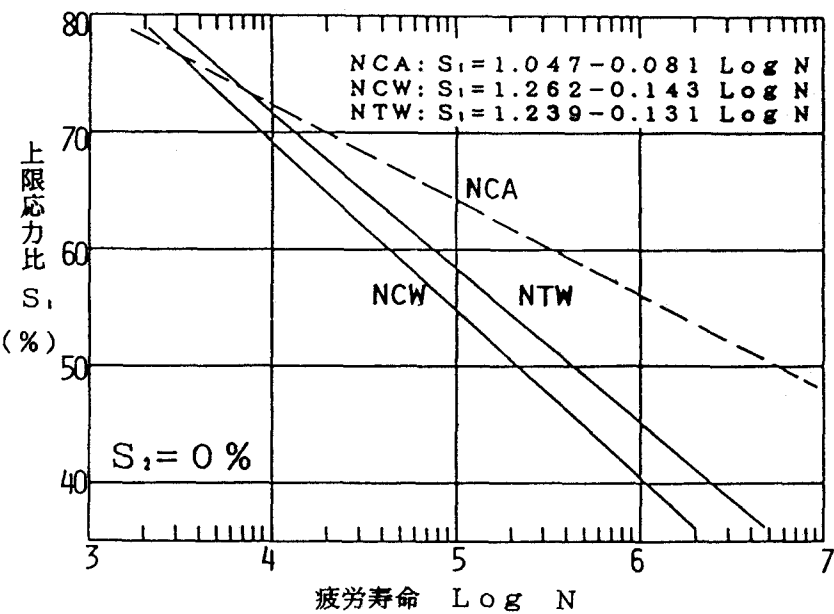


図-5 S-N線図（完全片振り）

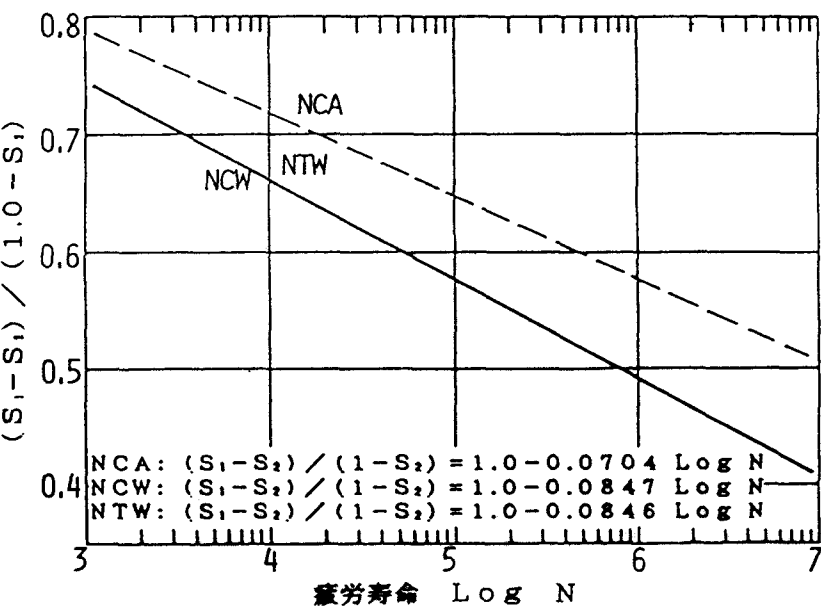


図-6 S-N線図（最小二乗法）

6. pH値の測定結果

疲労試験中に、供試体から溶出する水酸化カルシウムによって増加する疲労試験水槽内のpHの値を測定

した。pHの変化は圧縮疲労試験結果を図-7に、引張疲労試験結果を図-8に示した。これより、両疲労試験ともに、普通コンクリートよりもpH値は低い値を示している。このことは、高炉スラグ組成物を利用したモルタルでは当然のことといえるが、さらに、空隙が充填しモルタルの密実度が増したためともいえる。圧縮疲労試験においては、破壊直前にpH値が急速に増大している。このことは、ある程度、疲労損傷の開始は改善されているが、その後、ひび割れの拡大は促進され急速に疲労破壊に至っていることを示している。一方、引張疲労試験では、ほとんどpH値は増加しない。特に、高応力比の場合は、まったくといっていいほどpH値は増加しない。このことは、低サイクル時においては、ひび割れの発生を抑制していることを示している。

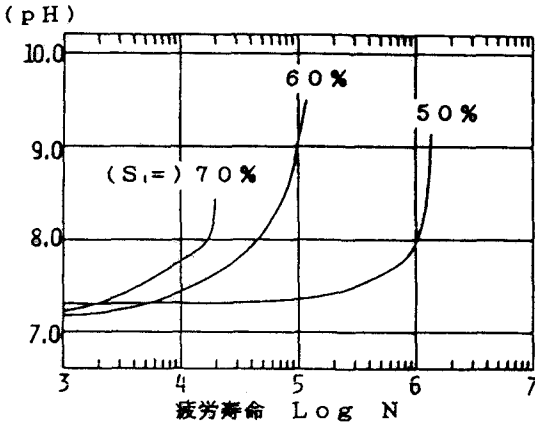


図-7 溶出物による水槽内のpH (NCW)

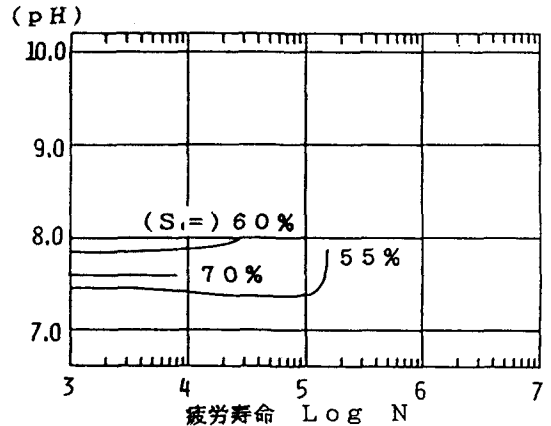


図-8 溶出物による水槽内のpH (NTW)

7. ひずみの測定結果

圧縮疲労試験における、(体積ひずみ) = (横ひずみ) × 2 + (縦ひずみ) で定義される体積ひずみの結果を、図-9に示した。これより、体積ひずみは圧縮(収縮)から破壊直前になって引張(膨張)に移行している。つまり、破壊直前に膨張するという水中疲労特有の挙動を示す。しかし、体積ひずみが膨張側へ移行する点は、より破壊直前となっている。一方、引張疲労試験における最大ひずみの結果を図-10に示す。この結果から、破壊直前に最大ひずみが増大し、疲労破壊に至っていることがわかる。

以上より、高炉スラグ組成物を利用することにより得た緻密な組織構造によって、ひび割れの発生が抑制されて疲労寿命が伸びたとしても、ひび割れの拡大は水の作用によって起こり、急速に破壊に至るといえる。

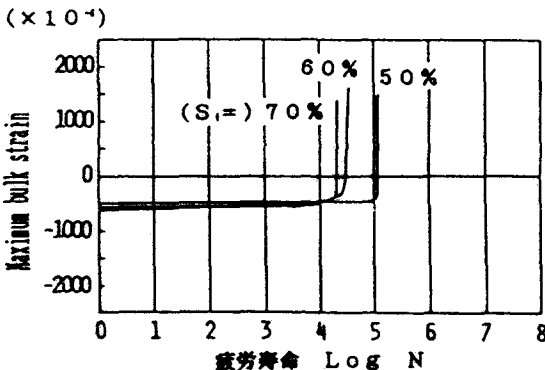


図-9 繰返し荷重による体積ひずみ (NCW)

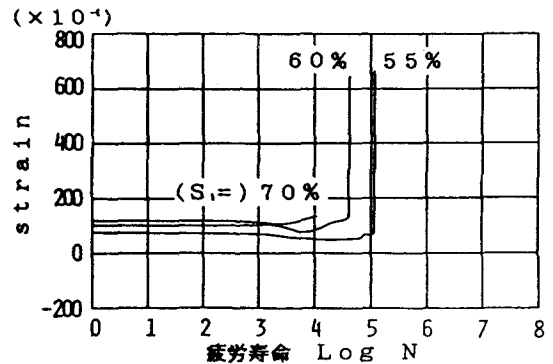


図-10 繰返し荷重による最大ひずみ (NTW)

8. ヒステリシスループ

コンクリートの応力-ひずみ曲線は、載荷時と除荷時では違う経路をたどり、曲線はヒステリシスループを描く。繰り返し荷重を受けるコンクリートのヒステリシスループは、初回のループの面積から減少して最小となるが、やがて増加して破壊時の最終面積は大きくなる。つまり、ヒステリシスループの描く面積とコンクリートの内部破壊とは密接な関係にある。図-11は、圧縮疲労試験における初回のヒステリシスループ A_1 に対する、各疲労寿命 $\log N$ におけるヒステリシスループ A_N の面積比 (A_N/A_1) の

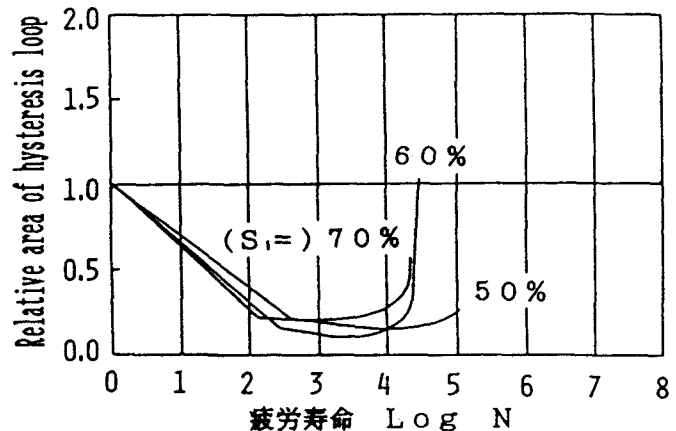


図-11 ヒステリシスループの面積比 (NCW)

関係である。これによると、繰り返し回数初期では、初回のヒステリシスループに比べて小さく推移しており、大気中におけるヒステリシスの挙動と似ているが、破壊直前には、再び大きくなっており、水中疲労特有の挙動を示している。このことより、破壊直前では、水の作用により、急激な内部破壊が起きていると思われる。

9. 結論

完全片振りを想定した場合、高炉スラグ組成物を利用したモルタルの200万回水中疲労強度は、圧縮の場合、静的強度の約36%となり、引張強度の場合、約41%となる。普通コンクリートの水中疲労強度が静的強度の約30%であることを考えると、静的強度に対する値でそれぞれ6%、11%程疲労強度が高められたことになるが、普通コンクリートの大気中疲労強度が静的強度の約56%であることを考慮すると、改善効果としては50%以下にとどまっている。しかしながら、1万回疲労強度は、圧縮の場合、静的強度の約69%、引張の場合、静的強度の約71%、普通コンクリートの大気中では静的強度の約71%となり、ほぼ同程度となっている。

pHおよびひずみの測定から、推測される改善の理由としては、空隙充填効果による緻密な組織構造にあると思われるが、高炉スラグ組成物を利用した結果、水中における疲労破壊の開始を遅らせる効果はあったが、水の作用による破壊力には抵抗できず、急激なひび割れ拡大を抑えるには至らなかった。

【参考文献】

- 1) 今井 益隆、大橋 猛、小出 儀治、下林 清一：高炉スラグ組成物を利用した高耐久性コンクリートに関する研究、土木試験所月報 No.404、1987、1
- 2) 尾崎 詔、志村 政雄：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度、土木学会第35回年次学術講演会講演概要集V、1980、9
- 3) 六車 熙、渡辺 史夫、張 耀凱、安井 雅明、小西 昭臣：水中でのコンクリート系部材の低サイクル疲労、セメント・コンクリート No.433、1983、5
- 4) 鈴木 嵩、尾崎 詔、志村 政雄：大気中および水中におけるコンクリート・モルタル・ペーストの引張疲労、土木学会第39回年次学術講演会、1984、10
- 5) 松下 博通、近田 考夫：割裂試験方法によるコンクリートの引張疲労強度に関する研究、セメント技術年報35、1981