

V-18

コンクリートの疲労強度低下に及ぼす水の影響について

室蘭工業大学 学生員 水吐 則行
 室蘭工業大学 正 員 尾崎 誠
 室蘭工業大学 正 員 菅田 紀之

1. はじめに

飽水状態のコンクリートの静的強度が、乾燥状態のコンクリートに比べて低下する原因として多くの理由が挙げられているが、一般的に次の二つが主なものとされている¹⁾。一つは「水のクサビ作用」と呼ばれているもので、荷重が載荷されたときにコンクリート内部の水がマイクロクラックの先端にクサビを打ち込むように入り、そこに分離圧を生じるため乾燥状態のものよりクラックの成長が顕著となり静的強度が低下するというものである。もう一つは、水の表面張力によるクラック面の表面エネルギーの低下である。これは、成長が止まっているクラックの周りに液体が吸着することにより、その固体部分の表面エネルギーが低下するため、新たに破壊面をつくり荷重に対して安定になろうとしてクラックがさらに成長し、破壊しやすくなるというものである。液体の表面張力が大きいほど固体部分の表面エネルギーが小さくなる。つまり、ある固体に表面張力の大きな液体が吸着するほど、より脆弱になるのである。堀²⁾、大岸等³⁾が表面張力の異なる数種の液体をモルタルなどのセメント材料に含浸させて静的強度試験を行っており、水より表面張力が小さい液体を含浸させると、静的強度がより大きくなることを報告している。

疲労強度は静的強度を基準としてその応力比であらわしているが、それにもかかわらず、飽水状態のコンクリートの疲労強度は乾燥状態のものに比べて著しく低下する。その原因として、一般に繰り返し載荷にともなうコンクリート中に存在する水の圧力の作用だけを取り上げることが多い。しかしながら、コンクリート中の水の挙動は微視的であるため、直接的にその圧力の作用を実験で示すことができないのが現状である。そこで著者等は、水の圧力の作用のほかに、前述したように水の表面張力が非常に高いためにコンクリートが脆弱になることも疲労強度低下の原因の一つではないかと考え、水よりも表面張力が小さいメタノール水溶液を含浸させたコンクリートで疲労試験を行った。その結果を乾燥状態と飽水状態のコンクリートの疲労強度と比較することにより、水の圧力の作用と水の吸着による表面エネルギーの低下、それぞれの影響の程度を考察しようというのが本研究の目的である。

2. 実験概要

2.1 使用供試体について

表-1 配合

本研究で用いたコンクリートの配合を表-1に示す。高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートで、2バッチにわけて円柱供試体を $\phi 7.5\text{cm} \times 15\text{cm}$ の型枠を用いて作成し、材令約1日で脱型した

水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (Kg/m ³)					
		水 W	セメント C	高炉スラグ BF	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 SP
30	46	165	274	274	822	896	4

後、20℃の恒温水槽内で養生した。使用材料は、結合材として普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末（ブレン値：8,000cm/g）、粗骨材として白老産砕石、細骨材として登別産陸砂、混和剤として高性能A E減水剤（ポリカルボン酸系）である。フレッシュコンクリートの性質は、スランプ 19.0cm、スランプフロー 59.0cm、空気量 1.9%（それぞれ平均値）で比較的流動性の高いものになっている。1バッチ目の

Effect of Water on the Reduction of Concrete Fatigue Strength

by Noriyuki MIZUHAKI, Shinobu OZAKI and Noriyuki SUGATA

供試体は飽水状態の疲労試験に、2 バッチ目は乾燥状態とメタノール水溶液含浸状態の疲労試験に用いており、それぞれの静的基準強度は飽水状態で 78.3MPa、乾燥状態で 84.8MPa、メタノール水溶液含浸状態では 72.9MPaであった。

2.2 メタノールの含浸方法

含浸させる液体には水との比較を容易にするため、表面張力以外の物性値が水と類似し、人体に対して悪影響をあまり与えず、爆発などの危険性も比較的少なく扱いやすいメタノールを選んだ。さらに引火などの危険性を考慮し、重量百分率70%の水溶液にして含浸させることにした。そのメタノール水溶液と水の各物性値を表-2に示す。供試体は3カ月水中養生後、室内で飽水重量に対して約1%乾燥させた後、乾燥器中で70℃まで温度を上げて約1週間乾燥させた。温度変化による供試体の欠陥を防ぐため、温度の変化率は3℃/hour以下にした。含浸前のコンクリートの飽水重量に対する乾燥率は絶乾状態では約6%であるのに対し、約3%である。これは、本研究室で乾燥率1%の空気乾燥状態におけるコンクリートの疲労強度が絶乾状態のコンクリートと同程度であるという結果を得ており、飽水状態のコンクリートの疲労強度が低下する原因となるのは、空気乾燥で蒸発するような水、つまり比較的大きな空隙中の水の影響が大半だと考えられるからである。含浸は、図-1のような含浸装置を用いて行った。まず鋼製密封含浸槽内で供試体を約760mmHgの負圧で二時間減圧脱気した後、メタノール水溶液を注入し、さらに約5kgf/cm²の窒素ガスの加圧下で一時間含浸を持続させ、供試体内部まで完全に浸透させた。

表-2 各物性値

物 性 値	水	メタノール水溶液
表面張力 (dyne/cm)	72.8	28.8
密度 (g/cm ³)	1.00	0.87
粘度 (10 ⁻³ Pa・s)	1.00	1.23

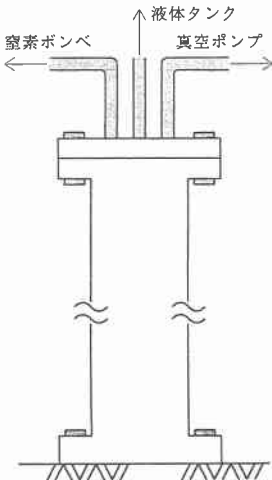


図-1 含浸装置

2.3 疲労試験方法

乾燥状態の供試体は3カ月水中養生後、メタノール含浸状態の供試体と同条件で飽水重量に対して乾燥率約3%まで乾燥させ、大気中で圧縮疲労試験を行った。飽水状態のものは水中養生3カ月以上のものをそのまま水中で、メタノール含浸状態のものは含浸時と同濃度のメタノール水溶液中で試験を行った。繰り返し荷重の載荷形式は載荷速度5Hzの正弦波とし、供試体が破壊するまでの繰り返し回数を測定した。ただし、200万回に達したものは試験を打ち切った。上限応力比S₁は乾燥状態では70%、飽水状態では50、および60%とし、メタノール水溶液含浸状態では50%とした。下限応力比S₂は、いずれも6%とした。また、供試体には対角に縦方向2枚、横方向2枚のストレインゲージを貼り、繰り返し荷重時のひずみの変化を測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 表面エネルギーの相違が静的強度におよぼす影響

まず、液体の表面張力の相違が静的強度にどのような影響を与えているかを、同条件で同じバッチの供試体を用いて確認するため、前述した方法でメタノールの代わりに水を含浸させた供試体の静的圧縮強度試験を行い、乾燥状態、メタノール含浸状態のものと比較した(表-3)。その結果、より脆弱になっていると思われる水を含浸させた供試体の方が、メタノール含浸状態のものよりも若干強度が上がっており、これまでに報告されている静的

表-3 静的強度試験結果

状 態	静的強度 (MPa)
乾 燥	84.3
水含浸	75.2
メタノール含浸	72.9

強度試験の結果とは異なるものになった。しかしながら、この種の実験において今回のような円柱供試体による圧縮強度試験が行われた例はなく、供試体の形状および試験方法による破壊メカニズムの違いがこのような結果をもたらしたものと推察される。つまり、円柱供試体の圧縮強度試験では、強度低下の原因として液体の吸着による固体部分の表面エネルギーの低下と異なる、載荷にともなう水の圧力の作用などの影響がより強いことが予想できるということである。

3.2 疲労強度

土木学会標準示方書⁴⁾に従った生存確率50%の回帰式と200万回疲労強度を表-4に、それぞれのS-N線図を図-2~4に示す。これによると、飽水状態の200万回疲労強度は乾燥状態のものとは比べ20%低下しており、これまでの各種コンクリートの圧縮疲労試験の結果に合致している。しかしながら、飽水状態の供試体よりも固体部分の表面エネルギーが高いメタノール含浸状態のコンクリートの疲労強度は、飽水状態のものよりさらに6%低下する結果となった。この原因として、乾燥過程における供試体内のクラック発生が考えられるが、液体の圧力の作用がより大きく影響しているものと思われる。つまり、メタノール水溶液は表面張力が水よりも小さいため、新しく発生したマイクロクラックの先端に入り込みやすく、水よりも早く圧力が作用するため、ひび割れの進行がより顕著になっているのではないかと考えられるからである。したがって、液体の吸着によって起こる固体部分の脆弱化の影響は、円柱供試体の圧縮疲労に関しては大きくないものと考えられる。

3.3 ひび割れの進行について

それぞれの試験における体積ひずみの経時変化を図-5~7に示す。体積ひずみの増加をひび割れの増大による膨張と考えると、乾燥状態のコンクリートは上限応力比が大きいせいもあり、初期の段階からひび割れが起り、かなりひび割れが増大した後に破壊していることがわかる。これに対して飽水状態およびメタノール含浸状態のものは、初期の段階ではほとんどひび割れが見られず、ひび割れが増大し始めると数千回の内に急激に破壊することがわかる。これは、円柱供試体の圧縮破壊はせん断破壊に近いものであるため、ある程度以上ひび割れが増加しそこに液体が存在すると、その潤滑作用により滑るように破壊面を作り、破壊に至るためと考えられる。

表-4 疲労試験結果

試験内容	回帰式	200万強度	K 値
乾燥	$(S_1-S_2)/(1-S_2)=1-0.066\cdot\log N_f$	58%	15.1
飽水	$(S_1-S_2)/(1-S_2)=1-0.099\cdot\log N_f$	38%	10.1
メタノール	$(S_1-S_2)/(1-S_2)=1-0.108\cdot\log N_f$	32%	9.3

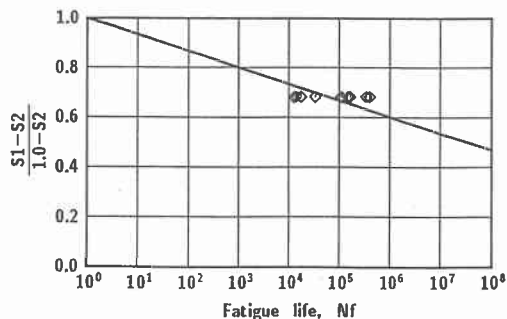


図-2 S-N線図(乾燥状態)

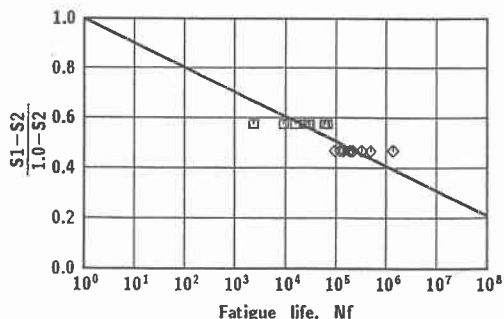


図-3 S-N線図(飽水状態)

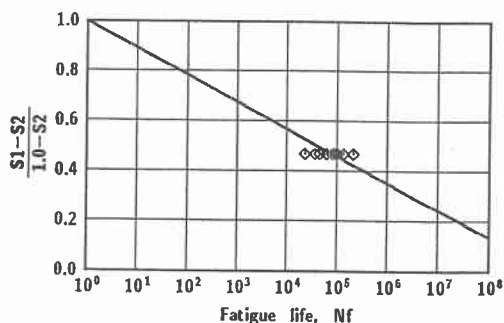


図-4 S-N線図(メタノール含浸状態)

4. おわりに

本研究によって得られる結果をまとめると、円柱供試体の圧縮疲労試験においては、乾燥状態ではひび割れが初期の段階から発生し、かなり増加した後に破壊に至る。これは、ひび割れ面での摩擦力が高いため、せん断力に対して抵抗しているためであろう。ところが、コンクリート中に液体が存在すると、試験の応力比が低いこともあり、初期の段階ではひび割れが生じないが、液体の圧力の作用によりある時点でひび割れが発生し始め、ある程度までひび割れが増大すると液体の潤滑作用により滑るように破壊面を作り数千回の内に破壊に至る。また、メタノール水溶液を含浸させたものは表面張力が低いため、マイクロクラックの先端に入り込みやすく水よりも早く圧力が作用するため、ひび割れの進行が顕著になり、疲労強度が下がったものと思われる。このことは、飽水状態になっているコンクリートの圧縮疲労試験における破壊直前のひび割れの増大の原因は繰り返し載荷にともなう水の圧力の作用が最も大きいということの裏付けであると考えられる。

コンクリート中に水が存在すると静的強度と疲労強度が低下することは、どのような供試体を用いても、どのような試験方法でも共通のことであるが、細かくそのメカニズムを追求して行くと、供試体の形状別または試験方法別に水の作用の仕方が異なるということが実験結果からわかった。例えば角柱供試体の曲げ試験などであったならば、クラックは広がるように成長して行くため、表面エネルギー的な要因が影響したのではないかと予想される。よって、今後疲労破壊のメカニズムを研究するにあたっては、破壊形態別により深く考察することが重要だと感じた。また今回の実験について言えば、飽水状態のコンクリートを乾燥させたものにもう一度水を含浸させて疲労試験を行ってれば、より条件が揃い、はっきりとした比較ができたのではないと思われる。

(参考文献)

- 1) 吉本 彰：コンクリートの変形と破壊 学献社 pp.45~47
- 2) 堀 素夫：表面エネルギーから見たセメント硬化体の強さ 窯業協会誌 Vol.70, pp.54~59, 1962
- 3) 大岸佐吉 小野博宣 棚橋 勇：数種の建設材料の強度と膨潤に及ぼす界面エネルギーの影響 材料 Vol.32, No.353, pp.67~73, 1983
- 4) コンクリート標準示方書（設計編） 土木学会 pp.20~21

