初期養生条件がモルタルの疲労およびそれに起因する中性化に及ぼす影響

EFFECT OF CURING CONDITION IN EARLY AGE ON FATIGUE OF MORTAR
AND CARBONATION OF FATIGUED ONES

田中享二*, 全振煥**, 名和豊春***, 橋田 浩****

Kyoji TANAKA, Jin-hwan JEON, Toyoharu NAWA
and Hiroshi HASHIDA

Mortar specimens cured at various conditions were first subjected to bending repeated loads, and it was made clear that insufficient cure reduced fatigue resistance of them. Next, fatigue tests that the stress levels are lower than the ones of fatigue rupture were carried out, and the improved scale based on the Gompertz curve was proposed for expressing fatigue of specimens. The effect of curing conditions in early age on carbonation was furthermore studied using the scale, and it was made clear that insufficient cure is also susceptible to their carbonation. Finally, the reason for rapid carbonation of fatigued mortars insufficiently cured was discussed from the view point of changes in pore structure of them.

Keywords : Repeated load test, Fatigue, Curing condition, Gompertz curve, Pore structure, Carbonation

繰返し試験、疲労、養生条件、ゴンペルツ曲線、細孔構造、炭酸化

1. はじめに

コンクリートやモルタルは、多数回の繰返し載荷を受ける部位に使用されることが多い。これら部位の設計では強度的に十分なゆとりがとられており、適切な施工と十分な養生がなされていれば、構造的に危険な状態になることはない。しかしこれら材料は脆性材料であり、多数回の繰返し載荷による疲労劣化が予想される。もちろん実際の建物ではこれらに対して十分なゆとりが持たされており、この面で問題になることはまれである。しかし力学的にはそれほど問題とならない場合でも、耐久性の面では重要となる。繰返し載荷により微細構造が変化することは、中性化等の劣化が進行しやすくなることが想定されるからである。これらに関してはすでに、養生期間を十分にとり十分硬化したコンクリートやモルタルについては前報¹⁾で検討した。

ところで現実の構造物の作られ方の実態をみると、厳しい施工期間の制約のなかでは、実験室で行われるような丁寧な養生ができていない場合もあり、そのような構造物が現実には多く作られているにも係わらず、養生条件を踏まえての繰返し載荷が耐久性に及ぼす影響については、ほとんど関心が払われていない。この観点から現実のコンクリート施工を考えると、避けることのできない問題であり、この点に着目した研究が必要である。何故ならば養生が十分

でない場合には、組織が強固ではなく、疲労の影響を受けやすくなり、急速な耐久性低下が懸念されるからである。そのためには、養生期間あるいは養生環境が望ましくないなどの、条件が十分ではない養生状態での試験体についても、疲労性や耐久性低下の諸点を明らかにしておく必要がある。本研究はこのことを踏まえ、疲労破壊には至らない範囲の疲労蓄積による耐久性低下について、繰返し載荷前の材齢や養生条件がどのような影響を与えるかを、明らかにしようとするものである。また前報¹⁾では十分養生した試験体についての疲労蓄積の評価を試みた。これは限定された実験の範囲では問題はないが、応力水準の低い条件での疲労試験を行った今回の結果の評価には不十分であることが判明したため、疲労蓄積の評価方法を見直し、さらに改善をはかることも目的とした。

既往の研究についてであるが、疲労の問題は構造材料として使用される材料の重要問題であり、古くから研究はなされている。しかし研究のほとんどは疲労破壊に対してなされたものであり、例えば繰返し応力の載荷条件に関する研究²⁾⁻⁴⁾、疲労強度、寿命に関する研究⁵⁾⁻⁸⁾である。疲労の影響を受けたものの物性変化に関しては、研究例はきわめて少なく、コンクリートの組織の変化、細孔構造の変化について研究⁹⁾⁻¹⁰⁾がなされている程度である。特に養生の影響にまで踏み込んだ研究は筆者の知る範囲ではほとんどない。

* 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

** 東京工業大学 大学院生・工修

*** 北海道大学大学院工学研究科 助教授・工博

**** 清水建設株式会社研究所 工修

Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Hokkaido University, Dr. Eng.

Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.

2. 試験体

2.1 試験体の形状と調合

試験体には水セメント比60%のモルタル角柱供試験体 (10×10×40cm) を用いた。実用的にはコンクリートが主体となるが、コンクリートには粗骨材が入っており、疲労試験後の分析のしやすさを考慮してモルタルとした。その調合と物理的性質を表1に示す。

2.2 養生

脱型後の養生についてであるが、その耐疲労性に及ぼす影響を調べるため、4種類の養生方法によった。まず十分養生された条件として、3ヶ月の水中養生、標準的な養生として28日水中養生、不十分な養生として、水中1日と、さらに実際の工事の状況を考慮し、材齢初期では型枠内で養生されることを想定した7日間の封かん養生とした。養生後は恒温室内 (温度:20±2℃、湿度:60±10% R.H.) に1ヶ月放置し、乾燥させた。これらの試験体の養生工程を図1に示す。ただし、この中には実験スケジュールの関係で、10日程度乾燥期間の延びたものもあるが、1ヶ月以上の乾燥では強度変化に及ぼす影響は少ないとされており¹⁾、ここではそれも含めて疲労試験を行った。

2.3 曲げ強度

所定の期間乾燥させた後で、静的曲げ強度試験を行った。試験はJIS A1106に準じた3等分点荷法によった。この時、試験体下面に貼り付けたストレインゲージにより伸びひずみも測定した。測定結果を図2に示す。養生条件、期間の影響は顕著であり、養生期間が長くなるに従って強度が高くなっている。

3. 破壊までを対象とした繰り返し試験

3.1 試験の概要

繰り返しは3等分点荷片振り曲げとした。試験には油圧制御型繰り返し試験機を使用した。負荷応力の上限値は静的曲げ強度の0.8、0.7、0.6の3段階とし(一部は0.9も追加)、下限値はゼロとした。周波数は10Hzとし、疲労破壊までの繰り返し回数を調べた。試験体数は原則として3本であるが、疲労試験は試験体の欠陥の影響が特に大きく、わずかな欠陥でも破壊までの繰り返し回数を激減させる。そのため極端な測定値はデータとして採用しなかった。

3.2 試験結果

繰り返し破壊試験の結果を図3に示す。ここでの実験では、負荷する応力比 (σ/f) を一定にしているため、曲げ強度の大きい試験体では負荷させる応力も大きくなっている。当然のことながら負荷応力のレベルが高くなるに従って、破壊までの繰り返し回数は減少している。この曲線群は関数を用いた実験式で表すことができそうであり、前報¹⁾では多くの疲労研究での数式化に利用されてる (1) 式で表される単純な指数関数式での表現を試みた。

$$\sigma/f = 1 - a (\log N)^b \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 σ : 曲げ応力 (N/mm²)

f : 最大曲げ応力 (N/mm²)

N : 繰り返し回数

a, b : 係数

この式は部分的には非常に適合性の良い数式であったが、適用上

表1 モルタル試験体の調合

水セメント比 (%)	セメント:砂	単位重量(kg/m ³)			フロー値 (mm)	空気量 (%)
		水	セメント	砂		
60	1:3.7	250	417	1544	183	5.3

・セメント: 普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm³)

・細骨材: 静岡県沢岡陸砂 (密度:2.62g/cm³、吸水率:1.27%、FM:2.8)

図1 試験体の養生条件

図2 各養生条件下での曲げ強度試験の結果

図3 破壊までの疲労試験結果

の限界があった。すなわち応力レベルの高い領域での疲労試験のみ限定すれば問題は生じないが、低応力レベルにまで拡張すると、適合性の低下が予想されるからである。例えば応力の生じていない $\sigma = 0$ の場合を考えると、全く疲労していないにもかかわらず、破壊までの繰返し回数を持ち、必ず疲労破壊するという論理的矛盾をもつからである。このことは低応力時の近似性がないことを予想させるものであり、ここで行った低応力レベルも含む疲労現象を検討するためには、これらの矛盾を持たない数式化を図る必要がある。

この条件を満たす、すなわち応力レベルが低い時には繰返し回数が急速に増加し、そして $\sigma=0$ の時、 N が無限となる性質をもつ代表的な関数式として、ゴンペルツ曲線とロジスティック曲線があり、ここではこの2つの曲線を利用して、疲労曲線を作成し、その適用の可能性を調べた。両式を利用した疲労曲線は(2)、(3)式で表されるが、これを用いて近似した結果を図4に示す。

ゴンペルツ曲線を基にした時の疲労曲線

$$\sigma/f = 1 - C a^{b(\log N)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ロジスティック曲線を基にした時の疲労曲線

$$\sigma/f = 1 - C / (1 + a \exp(-b \log N)) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに σ ：曲げ応力 (N/mm²)

f ：最大曲げ応力 (N/mm²)

N ：繰返し回数

C, a, b ：係数

この係数の中で C についてはその値が養生条件の差が小さかったので平均値をとり同じ数値とした。図4に示すとおり両式とも比較的良く実験結果と適合しているが、比較するとゴンペルツ曲線を基にした疲労曲線の方が実験結果との適合性が多少良いように思われる。そのため以後はこの式を用いて検討を進めることとした。

4. 破壊に至らない範囲での疲労蓄積の評価

4.1 試験の概要

ここでは試験体を破壊までは至らせずに、疲労させることだけを目的として疲労試験を行った。試験は同じく片振り曲げである。負荷応力レベルは、前項の疲労破壊試験結果を参考とし、負荷応力レベルを破壊時の曲げ強度に対して、0.2、0.5、0.8の3段階とした。疲労試験は各々疲労破壊しない範囲とし、最大1000万回までの範囲で疲労の蓄積程度を変化させることを意図した、表2に示す繰返し回数で試験を行った。

4.2 疲労蓄積の評価

前報では疲労蓄積を、疲労進行度としてその評価を試みたが、これは先に述べたように応力レベルの高い範囲でのみ適用できた尺度であり、低応力繰返し負荷も含めた範囲での適用はできない。従って新たな評価尺度が必要である。そのためここではさらに、すべての応力レベルに対してもできる疲労評価尺度を検討した。

先のゴンペルツ曲線を基にした疲労破壊曲線は、各繰返し回数ごとに負荷しうる疲労破壊応力の限界値を表すものであり、その範囲内ならば疲労蓄積は負荷される応力の大きさの影響を受ける。これが負荷された応力に比例すると仮定すれば、各繰返し回数ごと

に疲労蓄積度を次式で計算でき、等価疲労度曲線(疲労の蓄積が同程度と推定される曲線)を求めることができる。

$$\sigma/f = m (1 - C a^{b(\log N)}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに N ：繰返し回数

m ：疲労度 (0~1)

C, a, b ：係数

表2. 繰返し試験における負荷応力レベルと繰返し回数

応力レベル (σ/f)	繰返し回数		
	10^3	10^5	10^7
0.2	○	○	○
0.5	○	○	○
0.8	○	—	—

○ 試験を実施

図4 ゴンペルツ曲線、ロジスティック曲線を基にした疲労破壊曲線

この考え方により計算された等価疲労度曲線を図5に示す。m=1の場合はゴンペルツ曲線を基にした疲労破壊曲線そのものであり、この値に到達した時には疲労破壊する。それに満たない領域においては、疲労が蓄積されているが破壊には至らない。そして疲労回数が増加、もしくは負荷される応力レベルが高くなれば、疲労度は上昇し疲労限界に近づくことになる。これにより応力レベルの低い場合の疲労蓄積が適性に評価されることになり、前報での疲労進行度では評価出来なかった低応力の疲労も含む、広い範囲での評価が可能となる。この式により計算された各繰返し試験条件ごとの疲労度を図6に示す。図中の数字が疲労度を表す。

5. 疲労の蓄積が中性化に及ぼす影響

5.1 中性化試験の概要

耐久性に及ぼす疲労の影響を調べる目的で、所定の繰返し回数の載荷を行った後で、促進中性化試験を行った。試験には図7に示すように、繰返し載荷を受けた試験体を中央部で二等分した一方（残り半分は細孔構造測定に使用）を用いた。上下の載荷面からのみ炭酸ガスを侵入させるようにするため、2面のみを開放面とし、他の4面をエポキシ樹脂パテで密封した。この試験体を中性化促進環境（CO₂ガス濃度10%、20℃、60%RH）に2週、4週、8週間暴露した。所定の時間経過後、試験体の中央部分にそって割裂させ、1%フェノールフタレイン液を噴霧した。試験体数は2本であり、測定は試験体の下面に沿って5mm間隔ごとに、赤色域までの深さを測定した。

5.2 中性化の測定結果

中性化深さは大きな引張り繰返し力が作用したと考えられる試験体2本の中央部分50mmの領域での平均値で、各養生条件ごとに図8に示す。全く繰返し載荷を受けていない健全試験体に比べて、疲労を受けたものでは中性化速度が大きくなっている。また中性化試験時間が長くなるに従って、中性化深さは深くなる傾向が見られる。この中性化促進時間と中性化深さとの関係を定量的に調べるため、促進材齢2、4、8週の結果を用いて中性化速度係数を求めた。中性化は一般に時間の平方根にほぼ比例する¹²⁾と言われており、ここでもその考えに従った(5)式により、材齢2、4、8週のデータを回帰して中性化速度係数を求めた。

$$D = K \sqrt{t} \quad \dots \dots \dots (5)$$

図5 等価疲労度曲線

ここで D：中性化深さ、mm

K：中性化速度係数

t：時間、week

図6 各繰返し試験条件ごとの疲労度(図中、数字が疲労度を示す)

図7 促進中性化用、細孔測定用試験体と試験片採取位置

図8 各繰返し試験条件での中性化深さ

5.3 中性化に及ぼす疲労と養生条件の影響

(1) 疲労の影響

各試験体ごとに得られた中性化速度係数を、疲労度ごとにプロットし、図9に示す。多少ばらつきのある部分もあるが、疲労が進行するに伴い、中性化速度が大きくなる傾向が見られる。

(2) 養生期間の差

養生期間の影響もやはり図9に示されるが、その中性化速度に及ぼす影響も明瞭である。養生期間が短い場合は中性化速度が大きくなり、十分な養生の場合は中性化速度が低下する。

またいずれも疲労が進行するに伴い中性化速度が上昇しているが、その傾きに注目すると、十分な養生の場合は多少緩くなっており、疲労の影響が少なくなる傾向が示されている。中性化は耐久性評価の基本尺度であり、この観点からは養生が不十分な場合には耐久性が低下していること、また疲労の影響も受けやすくなる傾向にあることが示されているものと考えられる。

6. 養生条件と疲労が中性化に及ぼす影響の考察

6.1 細孔構造の変化

疲労に及ぼす養生条件の影響を考察するために、それら試験体の細孔構造を調べた。繰返しを受けた試験体の中央部で二等分した残りの一方を用い、前述の図7に示すように、大きな引張り力が加わる試験体下側の中央付近から小片を採取した。

細孔の測定には、水銀圧入式ポロシメーター（マイクロメリテックス社製ポアサイザ9310）を使用し、細孔直径 $0.003 \sim 400 \mu\text{m}$ の範囲で細孔容積を測定した。測定結果は文献^{13) 14)}を参考として、とりあえず3つの領域、毛細管より小さい領域（ $0.003 \sim 0.01 \mu\text{m}$ ）、毛細管領域（ $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ ）、毛細管より大きい領域（ $10 \sim 400 \mu\text{m}$ ）に区分し、それらと疲労度との関係を調べた。図10に各養生条件ごとに疲労度と区間細孔ごとの累積細孔量の関係を示す。疲労の進行に伴い総細孔量はわずかではあるが増加する傾向が見られる。この場合も養生条件の影響が顕著であり、養生が不十分な場合は全空隙容積も大きく、また大きい細孔径領域の容積も多くなっている。一方十分な養生の場合は細孔量が少く、緻密な組織になっていることがうかがえる。

図9 疲労度と中性化速度係数の関係

6.2 中性化と細孔構造との関係

これらをさらに耐久性の観点から見た時、中性化がどの細孔領域の影響を強く受けているのかを検討する。そのため前述の各細孔径ごとの区間累積細孔量と中性化速度との関係を調べ、図11に示す。細孔領域別に見ると毛細管領域の細孔量と中性化速度との関係は、非常に高い正の相関が見られている。すなわち不十分な養生及び疲労の影響による中性化の上昇は、毛細管領域の空隙の増加に起因すると考えられる。

また毛細管より小さい領域では負の相関が見られているが、これはデータが養生条件に塊状に分散していることから判断して、十分な養生となるに従い組織が緻密化し（そのため毛細管より小さい領域の細孔が増加している）中性化速度が低下したものである。毛細管の大きい領域に関しては細孔量と中性化速度との関係はほとんどなく、この領域の細孔は中性化速度にはほとんど影響を与えていないと思われる。

7. 結論

耐久性の観点から、疲労およびそれに及ぼす養生条件の影響を調べた本研究の結論をまとめると以下の通りである。

1) 前報の疲労度の適用上の限界を拡張するために、ゴンペルツ曲線を基にした疲労曲線を用いて、低応力領域までに適用可能な疲

図10 各養生条件ごとの疲労度と区間累積細孔量の関係

労曲線及び疲労度を提案した。

2) 養生条件の影響は顕著であり、養生が不十分な場合には疲労の影響を受けやすくなること、また中性化速度も速くなり、耐久性上脆弱化することを明らかにした。

3) それらの原因は細孔構造の変化、特に毛細管領域の空隙の増加によると推定された。

本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究(c)「低応力繰り返し荷重を受けたコンクリートの細孔構造の変化と長期耐久性」によりました。

図11 細孔量と中性化速度との相関関係

参考文献

- 1) 田中享二、全振換、名和豊春、橋田 浩：繰り返し曲げ荷重を受けたコンクリートとモルタルの細孔構造の変化と中性化、日本建築学会構造系論文集、2000. 12、No.538、pp.15-19.
- 2) Kesler C.E.: Effect of Speed of Testing on Flexural Strength of Plain Concrete; HRB Proceedings, Vol.32, pp.251-258, 1953
- 3) Ballinger C.A.: Cumulative Fatigue Damage Characteristics of Plain Concrete; Highway Research Record, No.370, pp. 48-60, 1971
- 4) Hsu, Thomas. T. C., "Fatigue of Plain Concrete" ACI, *Proceedings* Vol.78, No.4, July-August pp. 292-305, 1981,
- 5) 松下博道：コンクリートの圧縮疲労寿命に及ぼす最小応力の影響；第32回土木学会年次学術講演梗概集、第5部、p.282, 1977
- 6) 松下博道、近田孝夫：コンクリートの疲労寿命分布とS-N曲線；セメント技術年報、XXX, pp.373-376, 1976
- 7) F.S.Ople and C.L.Hulsbos: Probable Fatigue Life of Plain Concrete with Stress Gradient; J. of ACI, Jan, Vol.63, No.1, pp.59-82, 1966
- 8) 坂田憲次、木山英郎、西林新蔵：統計的処理によるコンクリートの疲労寿命に関する研究、土木学会誌、第198号、pp.107-114, 1972
- 9) 小柳 拾、西谷幸男、六郷恵哲、日下部史明：載荷履歴を受けたコンクリートの組織変化について；セメント技術年報、XXVIII、pp.207-210, 1976
- 10) B.Zhang: Relationship between pore structure and mechanical properties of ordinary concrete under bending fatigue; Cement and Concrete Research, Vol.28, No.5, pp.699-711, 1998
- 11) W.H.Price: Factors Influencing Concrete Strength; Journal of ACI, Vol.47, pp.417-432, 1951
- 12) Kondo, R., Daimon, M., and Akitba, T. : Mechanism and kinetics of carbonation in hardened concrete; 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Vol.3, pp.402-408, Tokyo, 1968
- 13) H. Uchikawa, S. Uchida, S. Hanehara: ILCEMENTO. Vol.88, pp.67-90, 1991
- 14) P.Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro: Concrete, Structure, Properties and Material, 2nd, Prentice-Hall, pp.26-29

(2001年1月29日原稿受理、2001年5月22日採用決定)