

学位論文題名

Mesoscopic Analysis of Mortar Failure subjected to Time-dependent Loads

(剛体バネモデルによる時間依存荷重を受ける
モルタルの準微視的破壊解析)

学位論文内容の要旨

In the current design code for concrete structures, fatigue is arrested by the S-N curve and the Miner's law (cumulative damage law). Using these methods, we can examine safety which depends on the relationship between the applied load and the fatigue life. However, we cannot examine the structure's serviceability and durability because the other properties, such as deformation and cracking under the effects of fatigue are unknown. Additionally, we cannot examine the structure's restorability because the progression of damage during the service life of the structure is also unknown. In other words, the current design for fatigue is not suitable to performance-based design. To solve this problem, we need a new design method that can account for not only the fatigue life but also the changes in other properties over time due to fatigue. To fulfill the requirement, numerical simulation can be a powerful method that reduces the cost of experiment. Moreover, numerical simulation can give more detailed information in microscopic phenomena, which cannot be measured in experiments. Therefore, analytical study accelerates clarification of mechanism. Approach in this study dealt with the concrete fatigue problem by mesoscopically analyzing mortar failure under high stress creep and low cycle fatigue. Mortar was modeled as a heterogeneous material, and the fracture mechanism, which is explained as a process of micro crack generation, stress release-and-redistribution, and crack growth over time, was clarified.

Two-dimensional Rigid Body Spring Model (RBSM) is employed as an analytical method in this study. To extend it to time-dependent problem, time-dependent constitutive models of connected springs were developed. The mechanical model, which has elastic, visco-elastic, plastic and visco-plastic strain components, is based on macroscopic fatigue behavior of concrete. Where, based on the concept of mesoscopic analysis, the model has no compression failures, that is, macroscopic failure of the material is explained as an accumulation of mesoscopic tensile and shear fractures. The elastic, visco-elastic, plastic and visco-plastic components correspond to elastic behavior in uncracked part, creep behavior in uncracked part, time-independent cracking deformation and time-dependent cracking deformation, respectively. Each component in both normal and shear direction was modeled based on the mechanical characteristics.

In this study, a method to determine model constants from making condition of mortar was developed. That is, first, macroscopic mechanical properties are determined by mix proportions and curing time

of the mortar. Second, the macroscopic properties are translated to mesoscopic mechanical properties. Last, the mesoscopic properties are translated to model constants based on basic theory of RBSM or experimental data.

Moreover, a new method for determining failure under load-controlled analysis was developed in this study. A pseudo monotonic loading is given at certain interval, and it determines the failure state when the peak load obtained by pseudo monotonic loading analysis becomes less than the applied upper load or creep load.

Using the above scheme, mesoscopic analysis of mortar under high-stress creep and low-cycle fatigue was conducted. In the high-stress creep analysis, strain development over time was well simulated. In the low-cycle fatigue analysis, not only strain development but also basic characteristic of stress-strain behavior, such as stiffness reduction and transition of shape of the internal curve, was well simulated. Moreover, low-cycle fatigue analysis, in which the applied stress level is changed in midstream, was also conducted. Compared with Miner's law, the obtained fatigue life became longer when the applied stress is changed to higher level, and shorter when the applied stress is changed to lower level, as in the experiment. In addition, to clarify the failure mechanism under creep and fatigue loading, the failure process is verified in terms of mesoscopic approach. Through an investigation of stress-strain behaviors of the connected springs, it became clear that stress release and redistribution over time in the meso level causes crack propagation and failure in the macro level.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 上 田 多 門
副 査 教 授 藤 井 義 明
副 査 教 授 後 藤 康 明
副 査 准教授 佐 藤 靖 彦

学 位 論 文 題 名

Mesoscopic Analysis of Mortar Failure subjected to Time-dependent Loads

(剛体バネモデルによる時間依存荷重を受ける
モルタルの準微視的破壊解析)

コンクリートは、持続荷重や繰返し荷重を受けると、強度や剛性が低下することが知られている。コンクリート構造物は、その長い耐用期間中の種々の要因により、コンクリートの特性が劣化する。この要因としては、塩害、中性化、凍害に代表される環境作用とともに、持続荷重や繰返し荷重がある。特に、持続荷重や繰返し荷重は多くの構造物において存在し、環境作用と複合的に作用し、劣化を起こすことも明らかになっている。したがって、持続荷重や繰返し荷重によるコンクリートの損傷機構を明らかにすることは、コンクリート構造物の劣化予測に大変重要である。

本論文は、持続荷重や繰返し荷重といった荷重の強度だけでなく、その時間的变化に特徴がある荷重によるコンクリートの損傷機構を明らかにするために、まず、準微視的(メソ)レベルのモルタルの力学モデルを新たに構築し、世界で始めて、持続荷重および繰返し荷重下の強度や剛性の低下を、逐次追跡予測可能なメソレベルでの数値解析法を提示したものである。また、この解析法は、コンクリートへの拡張、その他の劣化要因である種々の環境作用との複合劣化の影響も考慮することが可能で、その汎用性が高く、発展性が高い。以下に、論文の章構成に従って、述べる。

1 章では、既往の研究を概観し、本研究の特徴と目的を述べている。繰返し荷重(疲労荷重)を受けるコンクリートに関する既往の知見としては、S-N 曲線に代表される疲労強度という終局点のみの情報しかなく、強度や剛性が徐々に低下していくという情報が得られる本研究の有用性を示している。また、準微視的レベルのモデル化が、従来のコンクリートを均質材料として扱うマクロレベルのモデル化と比較し、環境作用や複合劣化の影響を考慮する上で優れている点を示している。

2 章では、本研究の数値解析法である剛体バネモデル(Rigid Body Spring Model)を説明するとともに、要素分割手法と非線形解析における収束計算について説明をしている。

3 章では、数値解析法で適用する材料の構成則の力学的特徴を、鉛直バネとせん断バネとに分けて詳述している。鉛直バネにおいては、引張強度のみを与え、圧縮では破壊しないという特徴を持っている。両者とも、弾性変形、粘弾性変形、塑性変形、粘塑性変形の4つの成分からなっており、これ

らを組み合わせることにより、持続荷重下のリラクセーション、繰返し荷重下の同じひずみに対する応力の減少、といった実験的事実が再現できることを示している。

4章では、前章で示した構成則中の材料定数を、どのように定めるかを詳述している。準微視的レベルでの4つの成分に関する各種材料定数が、マクロレベルでの静的荷重下の強度や剛性といった力学特性、持続荷重下のクリープ変形特性、非常に載荷速度が速い場合の強度や剛性、非常に載荷速度が遅い場合の強度や剛性、から求められる過程を示している。

5章では、数値解析法における技法である、荷重制御下でどのように強度を求めるのか、その方法を詳述している。繰返し荷重の場合、荷重条件が与えられるので、荷重制御で数値解析を行うが、この場合、ピーク荷重としての強度が求められない。そこで、変位制御と荷重制御の条件を組み合わせで解析することにより、強度(疲労強度)を求める手法を提示している。

6章では、2章から5章にわたって説明された本研究で提案する数値解析法を適用して、7つの異なる荷重条件下のモルタルの、強度や剛性の変化をマクロなレベルでシミュレーションするとともに、準微視的なレベルで損傷機構を明らかにしている。最大値が漸増するひずみを繰返し与えることにより得られる応力-ひずみ関係は、ひずみを単調に増加させて得られる応力-ひずみ関係を包絡線とし、残留ひずみが漸増し、除荷・再載荷時剛性が漸減する実験的事実を再現している。次に、高応力(圧縮強度の90%)の持続載荷により、クリープ変形とその後のクリープ破壊が生じることを再現している。さらに、最大応力が高応力で一定(圧縮強度の90%もしくは85%)の繰返し荷重により、疲労破壊が生じること、ひずみが荷重の繰返しとともに漸増することを再現している。最後に、最大応力が途中で変化する(圧縮強度の85%から90%に変化、もしくは、90%から85%に変化)する繰返し荷重により、最大応力が途中で大きくなる方は、マイナー則で推定される疲労寿命より長く、逆に途中で小さくなる方は、疲労寿命が短くなることを明らかにしている。このことは既往の実験的事実と一致しており、その理由としては、繰返し荷重による蓄積された損傷が、最大応力が小さい方が初期に小さく、終盤に大きくなることで説明できるとしている。持続荷重および繰返し荷重による剛性の低下と強度の低下は、準微視的レベルで引張強度が小さい箇所ですまずひび割れが生じ、そのひび割れ周辺で応力の解放と再配分が起こり、別の箇所で新たなひび割れを発生させる、というプロセスの繰返しにより、生じると説明している。

8章は、各章の内容を要約するとともに、将来の課題として、コンクリートへの拡張、載荷速度の影響をより精度良く再現すること、高サイクル疲労の場合の計算時間短縮法の開発、さらに一般的な載荷条件での適用性の確認、を挙げている。

これを要するに、著者は、持続荷重および繰返し荷重下のモルタルの力学的特性の変化を再現できるメソレベルでの数値解析法を世界で始めて提示するとともに、その損傷機構を明らかにしている。これは、構造物の劣化予測技術に関する新たな知見を得たものであり、維持管理工学、コンクリート工学に貢献するところ大なるものがある。よって、著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。