

学 位 論 文 題 名

Modeling of Stress-Strain Relationships for Concrete Damaged by Freezing and Thawing Cycles

(凍結融解作用により損傷を受けたコンクリートの応力
－ひずみ関係のモデル化)

学位論文内容の要旨

Abstract

This study investigates the dependence of mechanical behavior of concrete, such as strength, stiffness, and deformation capacity on the damage caused by freezing and thawing cycles (FTC). FTC is a typical environmental action that directly causes deterioration in the mechanical properties of concrete. The purpose of this study is to develop the stress-strain models for FTC-damaged concrete in tension and compression. The models are intended for both simple calculation of sectional member strength and finite element analysis of plain and RC concrete structures that have been damaged by FTC. For this purpose, some series of experimental works have been carried out. Air-entrained and non air-entrained concrete specimens in shapes of cylinders and prisms were tested according to ASTM C666-92, or in a climate chamber where temperature and moisture conditions can be controlled. In the chamber the specimen temperatures were recorded together with the air temperature. After a certain number of FTC, the specimens were mechanically loaded and concrete strains were carefully measured.

The damage of concrete under FTC was associated with the hydraulic pressure in the pore space system and the internal shrinkage due to water redistribution during sub-zero temperature. Strains induced during FTC tests in the small cylinder, small prism, and big prism specimens were measured. Considering the measured strains during FTC and water transport in porous media such as concrete, the damage mechanism of concrete due to FTC was proposed. FTC causes the degree of saturation of pore structures in concrete to grow up. Concrete under FTC gets damage after the saturation of pore structures is reached. Once the concrete gets damage at certain cycle of FTC, the relative dynamic elastic modulus rapidly decreases for the following cycles of freezing and thawing. The number of FTC to have the saturation condition of pore structures is different for different test method and different type of concrete. If the saturation of pore structures is not reached due to the fact of no possibility to contact with water or maximum temperature in frost cycles less than 0 °C, the damage of concrete will not happen.

From the experimental results, it can be seen that air-entrainment concrete has the different damage under the effect of FTC compared to non air-entrained concrete. The damage in non air-entrained concrete is more severe than that of air-entrained concrete. Air-entrained concrete does not show the reduction of strength and stiffness in tension even after being exposed to 305 cycles of freezing and thawing. However, strength and stiffness in compression reduces as increasing the number of FTC. In non air-entrained concrete, strength and stiffness decays in both tension and compression. Even though strength and stiffness of air-entrained concrete in compression decrease as increasing the number of FTC, the reduction is less than of the case of non air-entrained concrete. Air-entrained concrete also has less plastic tensile strain compared to non air-entrained concrete at the same number of FTC.

Concrete tested in water showed the different damage from concrete tested in air at the same number of FTC. The concrete tested in water gets damages with smaller number of FTC compared to the concrete tested in air, because the concrete tested in water enables to have saturation condition of pore structure at

the smaller number of FTC and results in internal crack under the effect of expansion of water volume during solidification. The concrete tested in air with possibility to contact with water such as tested in this study can also experience the increasing saturation of pore structures with number of FTC and gets full saturation condition in a larger number of FTC. Once the full saturation condition is reached, the damage progress of concrete tested in air is the same with that tested in water.

The reduction of strength and stiffness in compression of concrete under FTC is different from that in tension. The degradation of compressive strength and stiffness increases as plastic tensile strain induced by FTC increases. On the other hand at low plastic tensile strains no reduction in tensile strength and stiffness. Reduction of strength and stiffness in tension increases with the degradation of relative dynamic elastic modulus.

The stress-strain model for concrete damaged by freezing and thawing prior to the application of static compression loading was proposed based on the concept of plasticity and fracture of concrete constituent element. The FTC fracture parameter was introduced to explain the degradation of the initial stiffness of concrete resulting from freezing and thawing damage. Based on the experimental data, the FTC fracture parameter was empirically formulated as a function of plastic tensile strain caused by freezing and thawing with an assumption that the plastic strain was caused by the combined effects of FTC and mechanical loading damages. The stress-strain relationships obtained by the proposed model were compared with the experimental data.

The stress-strain model for FTC-damaged concrete under static compression load was extended for combined effects of FTC and cyclic loading. In order to find the stress-strain curve, the cyclic loading was applied on the concrete with different degree of FTC damage. The plastic strain induced by cyclic loading was added to plastic strain under the effect of static loading, considering the effect of FTC. In the model under cyclic loading, the reloading and unloading stiffness at one loading cycle were not constant. In order to express this phenomenon, the reloading and unloading stiffness factors were introduced. The factors were empirically formulated as a function of maximum stress level, number of loading cycles, mechanical equivalent strain and remaining tensile strain caused by FTC. The stress-strain relationships calculated by the proposed model were compared with the experimental data.

In order to study stress-strain relationship in tension including softening part of FTC-damaged concrete, three point bending tests were performed at different degrees of damage. A tensile stress-strain model before peak stress as well as a tensile stress-crack width model were developed. The model development was based on the assumption that the damaged concrete loses its stiffness because of the fracturing of some constituent elements in the concrete during FTC. The tension softening behavior of the concrete is also affected by FTC. The crack width corresponding to the complete tensile stress release increases as increasing damage caused by FTC.

Using the models developed in this study, several concrete beams that have been affected by FTC were analyzed by finite element method. A non-linear finite element program (HUCOM) was used. The maximum loads and load-deflection curves of analytical results were compared with the experimental data. A good agreement between the analytical and experimental results for FTC-damaged concrete confirms the applicability of the models.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 上 田 多 門

副 査 教 授 佐 伯 昇

副 査 教 授 千 歩 修

副 査 教 授 角 田 與史雄

学 位 論 文 題 名

Modeling of Stress-Strain Relationships for Concrete Damaged by Freezing and Thawing Cycles

(凍結融解作用により損傷を受けたコンクリートの応力
－ひずみ関係のモデル化)

本論文は、凍結融解作用により物理的な損傷を受けたコンクリートの力学的特性に関し、特に、静的および疲労荷重下の応力－ひずみ関係に注目し、それを実験的に明らかにし、推定するための数値モデルを提示したものである。全体で5章からなっており、1章は既往の凍結融解作用による損傷に関する研究の整理と本論文の目的を示し、2章では凍結融解作用による力学特性の劣化と損傷機構を実験結果に基づいて明らかにし、3章では損傷を受けたコンクリートの圧縮応力－ひずみ関係を、4章では引張応力－ひずみ関係を明らかにし、5章はまとめである。以下に、本論文の成果である2章から4章の審査の概要を示す。

2章では、まず本論文で用いられた全ての実験供試体の実験条件と測定項目の詳細が示されている。温度・湿潤環境を制御できる環境制御室内での小型および大型無筋コンクリート供試体の凍結融解試験において、表面および内部のひずみの測定結果に基づき、損傷は最高温度が0℃以上で水分が周囲にある場合、かつ、最低温度が-10℃以下のときに大きな損傷が起こることを示している。また、損傷機構として、コンクリートに吸収された周囲の水分が空隙を飽和させ、その水の凍結時および凍結後の温度上昇時の膨張によりコンクリートの損傷が引き起こされたと推測している。

AE剤を入れた場合もそうでない場合も、凍結融解作用による圧縮載荷時の強度や剛性の劣化と引張載荷時のそれとはその性状が異なることを明らかにしている。圧縮性状の劣化は、凍結融解作用時に生じている引張残留ひずみの大きさが大きくなるとともに起こり、引張性状の劣化は、相対動弾性係数が小さくなるとともに生じる。引張残留ひずみが生じててもその値が小さい間は相対動弾性係数の減少が起こらない結果が示されている。つまり、その場合、圧縮強度や剛性の劣化は生じるが、引張強度や剛性の劣化は生じないものと考えられる。引張残留ひずみは、微視的な機構の一部が圧縮に抵抗することを不可能にし、その結果として圧縮強度や剛性の低下が起こるが、必ずしも微視的にひび割れを生じさせ引張強度や剛性を低下させるものではないと推察し

ている。

なお、既往の研究成果として凍結融解作用時に生じる引張残留ひずみの増加と相対動弾性係数の減少とが線形的な関係があるというものがあり、本論文での実験的事実と異なるが、これは既往の研究成果が ASTM 標準試験方法を用いており、本論文での実験方法と異なることなどによると考察しているが、今後さらに検討を要する。

3 章では、2 章で示した実験結果のうち、凍結融解作用を受けたコンクリートの圧縮載荷時の応力-ひずみ関係の数値モデルを示している。圧縮強度や剛性は、凍結融解作用時に生じる引張残留ひずみと密接な関係があることから、既往の圧縮応力-ひずみ関係用数値モデルを、引張残留ひずみの影響を考慮して拡張した。拡張したモデルは、AE 剤の有無にかかわらず、種々の凍結融解繰返し回数を受けたコンクリートの一軸圧縮載荷時の載荷軸方向および直角方向の応力-ひずみ関係を精度よく推定可能である。従って、初期剛性の低下、強度の低下のみならず、圧縮応力の増加に伴う剛性の回復という凍結融解作用を受けたコンクリートに見られる独特の性状をも表現することが可能である。この数値モデルの特徴は、凍結融解作用時に生じる損傷の影響として、引張残留ひずみのみを考慮すれば、圧縮応力-ひずみ関係を推測できることにある。

以上の静的載荷時の応力-ひずみ関係に加え、圧縮疲労荷重を受けた場合の応力-ひずみ関係を与える数値モデルも提示している。疲労荷重の繰返し回数とともに、除荷時および再載荷時の応力-ひずみ関係は徐々に変化していくが、これを表現することが可能である。なお、疲労強度が繰返し回数とともに減少していく関係は、凍結融解作用を受けていないコンクリートの場合と静的強度に対する低減率という観点で同じであることも示している。

4 章では、凍結融解作用を受けたコンクリートの引張荷重下の応力-ひずみ関係を表現するための数値モデルを提示している。この数値モデルは、引張強度に達するまでは線形弾性で、達した後は非線形の軟化曲線である。2 章で示されたように、引張強度と剛性は凍結融解作用による相対動弾性係数の低下と強い相関があるので、弾性係数と軟化曲線の終点（応力が完全に解放される点）を相対動弾性係数の関数で表している。軟化曲線は応力とひび割れ幅の関係で表され、応力解放点のひび割れ幅は、相対動弾性係数の低下とともに大きくなる。

提案した数値モデルを離散ひび割れ要素に適用して非線形数値解析を行い、ノッチのある無筋コンクリートはりの曲げ試験結果と比較しているが、最大荷重だけでなく、荷重-変形関係が精度よく推定できることが示されている。

以上をまとめると、本論文は、従来損傷機構や強度・剛性の低下などの段階にとどまっていた凍結融解作用を受けたコンクリートの力学特性に関する研究を、損傷機構と関係づけながら、圧縮および引張荷重下の応力-ひずみ関係の数値モデルの提示まで進めたものである。圧縮に関してはさらに疲労荷重下の応力-ひずみ関係まで拡張し、引張に関しては数値モデルを導入した有限要素解析に適用しその妥当性を示している。従って、凍害を受けるコンクリート構造物の挙動の推定に大変有益な知見を与えるもので、コンクリート構造工学への発展に寄与するところは大い。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。