

グルービング系凍結抑制舗装の氷板破碎過程と 散逸エネルギー理論の適用に関する検討

Study on a fracture process of ice crust formed on the grooving-type anti-freezing pavement
and the application of a dissipated energy theory

北海学園大学大学院 ○学生員 猪股賢大 (Kenta Inomata)
北海学園大学大学院 学生員 田中俊輔 (Shunsuke Tanaka)
北海学園大学工学部 正員 武市 靖 (Kiyoshi Takeichi)
世紀東急工業株式会社技術本部 正員 増山幸衛 (Yukiei Masuyama)

1. はじめに

物理系凍結抑制舗装は、舗装面に生成された氷板及び雪氷を交通荷重により破碎し、路面露出を助長するものである。凍結抑制舗装は数多く施工され、その効果は確認されているものの凍結抑制メカニズムは解明されていない。

そこで本研究では、たわみ特性を有するグルービング系凍結抑制舗装面に生成された氷板に対し、応力制御のもと圧縮荷重のみで動的載荷試験を行い、凍結抑制材部分の応力・ひずみの挙動から氷板破碎メカニズム及び散逸エネルギー理論による氷板の疲労破壊を検討した。

2. 供試体

本研究で使用したグルービング系凍結抑制舗装は、グルービング部分にゴムチップをウレタン樹脂で結合した凍結抑制材を充填したものである。写真-1 に試験舗装表面を表-1 に試験舗装の概要をそれぞれ示した。

3. 試験方法

応力・ひずみの計測方法：氷板が生成された状態の舗装における荷重の伝播状況や各測定点での応力・ひずみの変化を解析するため、マイクロ圧力計（直径 6.5mm、質量 0.6g、容量 3MPa）を舗装表面・凍結抑制材上部に埋設し、ひずみゲージ（長さ 36.1mm、幅 5.0mm）を、舗装表面と凍結抑制材の延長方向に設置した。マイクロ圧力計とひずみゲージ設置の様子を図-1 と図-2 にそれぞれ示した。

試験条件：本試験は -30°C ～ $+60^{\circ}\text{C}$ まで温度制御可能な恒温室を有する材料試験装置を使用し、応力制御のもと載荷速度 0.5Hz とし、載荷回数 10000 回を上限として動的載荷試験を行った。動的載荷試験の試験条件を表-2 に、試験状況を写真-2 に示した。

氷板の作製：グルービング系凍結抑制舗装面上に作製した氷板の状況を図-3 に示した。舗装面に水を散布し氷板を作製すると、凍結抑制材面からの連続空隙に水が浸入し氷結する。氷板作製後の凍結抑制材部分を確認すると、凍結抑制材上部に生成された氷板は、舗装表面に生成された氷板より若干盛り上がる傾向がみられた。

表-1 試験舗装概要

母体舗装	密粒度舗装
サイズ (mm)	300×300×50
溝幅・深さ・間隔	9mm・10mm・60mm
凍結抑制材	ゴムチップ結合材

表-2 試験条件

試験温度	-5°C
接地圧	0.196MPa (乗用車荷重)
載荷板	直径18cm (底面が硬度65のゴム板である鋼製板)
氷板厚	密粒度に対して1mmとなる水量を散布

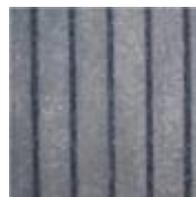


写真-1 舗装表面



写真-2 試験状況

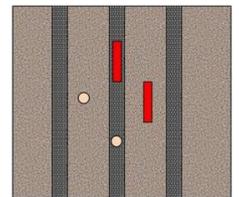


図-1 平面図

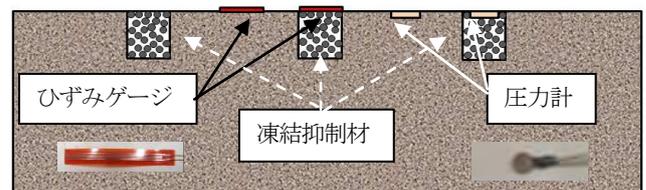


図-2 断面図

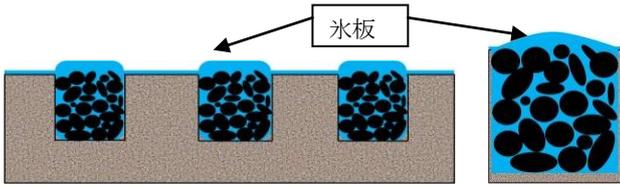


図-3 氷板作成後の状況 (右：凍結抑制材部分拡大図)

4. 試験結果

4.1 応力の推移

図-4に載荷回数に対する応力の推移を示した。

載荷回数が増加すると凍結抑制材上部の応力が減少している。これは、凍結抑制材として充填されている凍結抑制材内部の空隙に生成された氷および上部の氷板が破碎したためである。

氷板破碎の過程を phase-1 から phase-4 で示し、各載荷回数における各測定点での応力から、載荷回数の増加に伴う氷板破碎過程を考察する。

phase-1：図-3の氷板生成状況より、載荷初期は図-5に示すように凍結抑制材上部で荷重を受け持ち、大きな応力が発生する。

phase-2：その後、載荷回数の増加に伴い氷結部分の破碎が進行すると、凍結抑制材上部の応力が減少していく。

phase-3：さらに載荷回数が増加すると、舗装表面の応力が増加し、凍結抑制材上部の応力と一致する。この点は、舗装表面レベルで均一に荷重を受け持った点と考えられる。その点の荷重分担状況を図-6に示した。

phase-4：舗装表面と凍結抑制材上部の応力が一致した後、載荷回数が増加すると、凍結抑制材の応力は減少し、舗装表面で荷重を受け持つため、応力が増加していく。その点の荷重分担状況を図-7に示した。

phase-3の舗装表面と凍結抑制材上部の応力交点の位置は、凍結抑制材表面からの水が浸入し得る連続空隙の量や氷の生成状況によって多少ばらつく。また、供試体を連続して使用するに従い応力交点の載荷回数が増加する傾向がみられた。これは、凍結抑制材が劣化し、空隙内部に浸入する水量が増加したためと考えられる。

4.2 ひずみの推移

図-8に凍結抑制材上部の延長方向のひずみを計測した載荷回数に対するひずみの推移を示した。凍結抑制材上部のひずみは引張ひずみを計測し、載荷回数の増加に伴い減少傾向にあることが確認できた。

氷板の破壊強度に着目すると既往の研究において、氷の引張破壊強度は圧縮破壊強度の1/10程度¹⁾とされている。本試験において、凍結抑制材上部で引張ひずみが計測されたことから、氷板が破壊しやすい方向に変位したことがわかる。しかし、引張ひずみによる氷の破壊条件は現在のところ明確にされてはおらず、今回の引張ひずみによって氷がどの程度破壊しているかは今後の研究課題である。

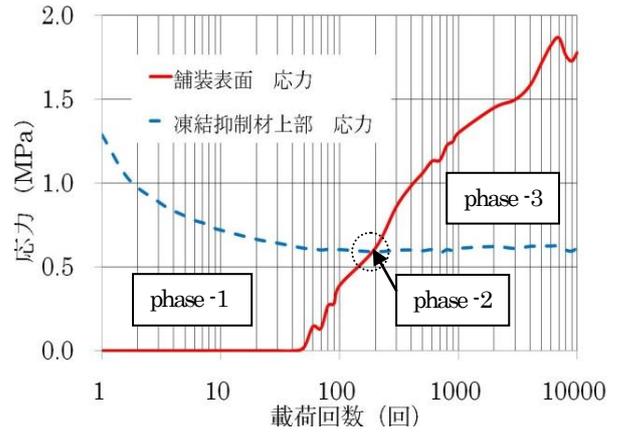


図-4 乗用車荷重載荷時の載荷回数に対する応力の推移

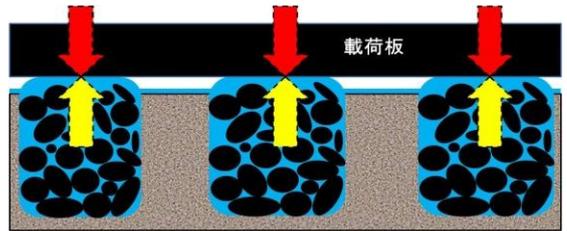


図-5 phase-1における荷重分担状況

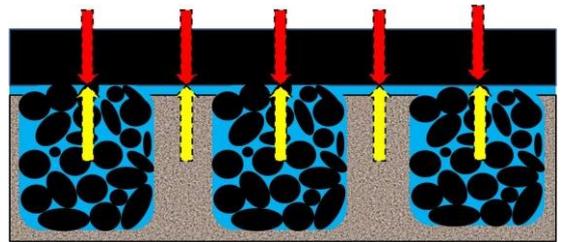


図-6 phase-3における荷重分担状況

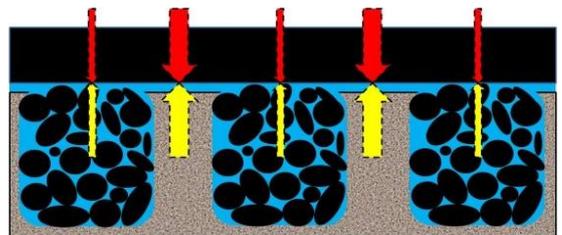


図-7 phase-4における荷重分担状況

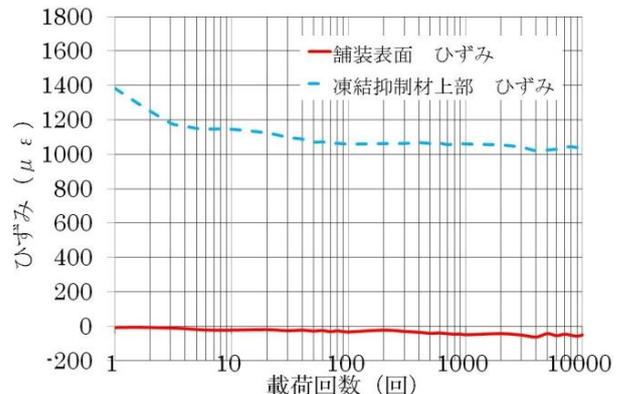


図-8 乗用車荷重載荷時の載荷回数に対するひずみの推移

4.3 散逸エネルギー理論の水板破碎への適用

散逸エネルギー理論は、アスファルト混合物に対し、曲げ疲労試験等をひずみ制御のもとで行い、疲労破壊基準を位相角や散逸エネルギーから評価するものとして研究されてきた^{2),3)}。

本研究では、グルーピング系凍結抑制舗装面に生成された氷板が動的単純圧縮荷重を受けた際の応力とひずみの挙動から氷の破碎について散逸エネルギー理論の適用が可能か検討した。

(1) 残留ひずみ

図-9 から図-11 に载荷回数 1 回目、10 回目と 1000 回目の応力とひずみの関係を示した。载荷回数の増加に伴い、除荷後のひずみの値が増加し、残留ひずみが蓄積していることが確認できた。また、今回の試験においては、载荷回数の増加によるひずみの最大値の増減は少なく、ひずみの振幅が減少していくことが確認できた。

(2) 位相角の変化についての検討

粘弾性体が動的荷重を受ける際、計測されるひずみ波形は応力波形より位相が遅れてくる。一般に、粘性を持った物体に外力が加わり、内部に周期的な応力(式 1)と、位相角 ϕ だけずれた周期的なひずみ(式 2)とが生じた場合に、外力が物体に対して一周単位体積になす仕事の量は式 3 のように与えられる²⁾。このときの応力とひずみの関係は図-12 のような楕円形のヒステリシスループで表現される。この楕円面積は散逸エネルギーを表現したものである。本研究では、楕円面積と式 3 の関係より位相角を算出した。図-13 に位相角の推移を示した。

位相角は载荷回数の増加に伴い減少傾向にある。これは、凍結抑制材表面及び内部に生成されている粘弾性体の特性を持つ氷の破壊の進行を表現していると考えられる。また、载荷回数 1 回目から 10 回目と 10 回目以降では位相角の変化形状が異なることから、载荷回数 10 回目付近で凍結抑制材の物性が粘弾性体の性質から弾性体ないし弾塑性体の性質へと変化していると推察できる。

(3) 散逸エネルギーについての検討

図-14 に各载荷回数におけるヒステリシスループを、図-15 に载荷回数毎の散逸エネルギーの推移を示した。本試験は圧縮荷重を単純荷重するものなので、縦軸の応力の値が負を示すことはない。図-14 のように、少ない载荷回数においてヒステリシスループ内の面積は大きく、散逸エネルギーが大きいことが確認できた。これらより、今回使用した供試体は比較的少ない载荷回数で凍結抑制効果が発現したと言える。また、ヒステリシスループの形状を見ると载荷回数の増加に伴い直線化していく傾向がみられたことから応力-ひずみの関係から弾性体の性質へと変化していると考えられる。その過程において、载荷回数 10 回前後でヒステリシスループがねじれる現象が確認された。これは凍結抑制材上部及び内部の氷が破壊される過程で凍結抑制材や氷の性状の変化が影響しているものと考えられる。

図-15 に示す载荷回数毎の単位散逸エネルギーの推移から、载荷回数 100 回以降は散逸エネルギー値のふらつきが少なく、値自体も低いことから、凍結抑制材表面及び内部の氷が概ね破壊したと考えられる。

(4) 散逸エネルギー理論の適用

氷板が生成されたグルーピング系凍結抑制舗装に動的荷重試験を行い、得られた試験結果に対し散逸エネルギー理論を適用することによって、氷板の破碎特性や凍結抑制の発現効果を定量的に評価できる可能性を示すことができた。また、たわみ特性を有する様々な凍結抑制舗装に対して同様の試験を行うことで、それぞれの舗装の適用箇所や環境条件による凍結抑制材の選定などができると考えられる。

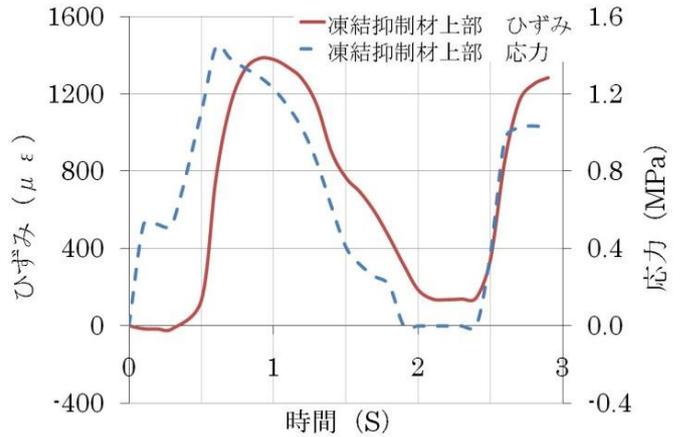


図-9 応力とひずみの関係 载荷回数 1 回目

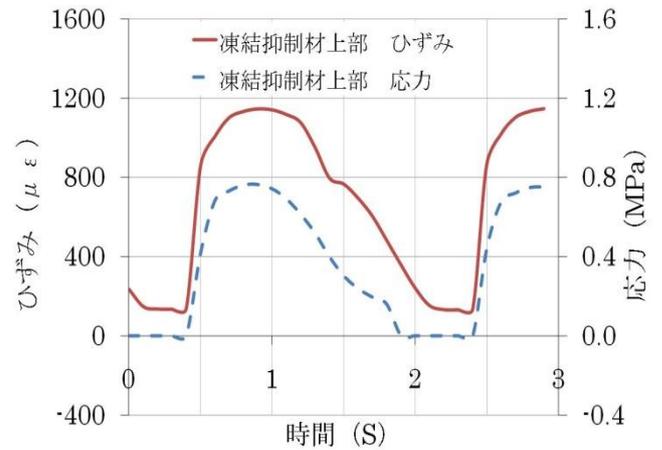


図-10 応力とひずみの関係 载荷回数 10 回目

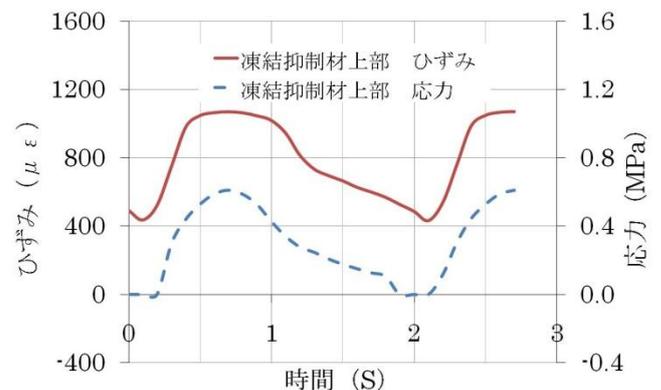


図-11 応力とひずみの関係 载荷回数 1000 回目

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t \quad \text{式 1}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad \text{式 2}$$

$$w_0 = \pi \sigma_0 \varepsilon_0 \sin \varphi \quad \text{式 3}$$

ここに、

w_0 : 一周単位体積当たりになす仕事量

σ_0 : 応力の振幅 ε_0 : ひずみの振幅

ω : 周波数 t : 時間 φ : 位相角のずれ

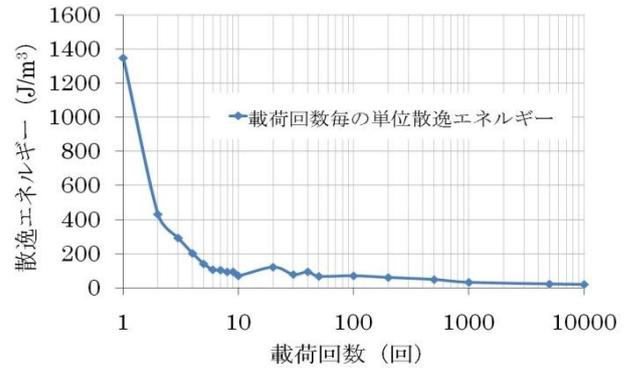


図-15 散逸エネルギーの推移

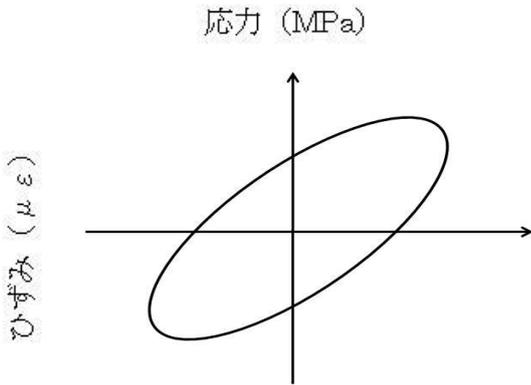


図-12 ヒステリシスループ

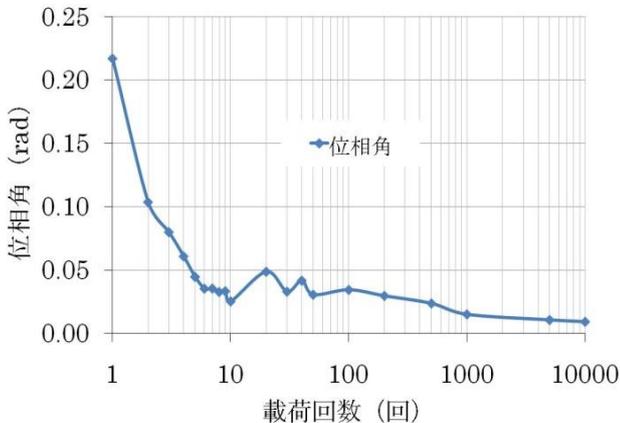


図-13 位相角の推移

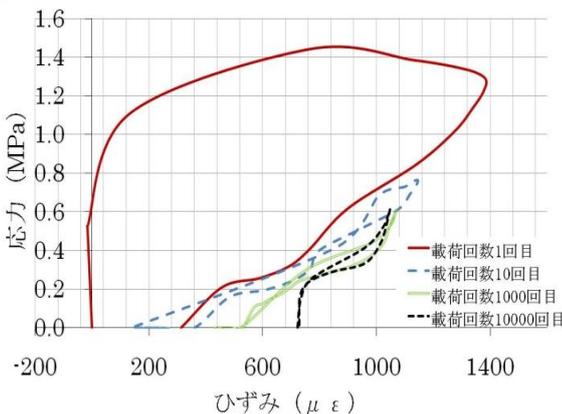


図-14 各載荷回数時のヒステリシスループ

5. まとめ

今回の研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 載荷回数増加に伴う凍結抑制材上部及び舗装表面の応力の推移から、凍結抑制の発現過程を検証できた。
- (2) ひずみの推移より、凍結抑制材上部の延長方向のひずみは引張ひずみを計測し、氷の破壊強度の低い方向に変位していることが確認できた。
- (3) 載荷回数が増加するとともに、凍結抑制材上部で残留ひずみが増加し、ひずみの振幅が減少していく。
- (4) 位相角、散逸エネルギーともに載荷回数が増加するに従い減少していくことや、ヒステリシスループの形状の変化から、粘弾性性質の氷結した凍結抑制材が弾性体ないし弾塑性体の性質へ変化していくことを確認できた。
- (5) 位相角や載荷回数毎の単位散逸エネルギーのふらつきが収まった点を氷板が概ね破壊した点と考えると、今回の供試体において、その点は載荷回数 100 回程度であることがわかった。
- (6) 散逸エネルギー理論を用いて、走行輪数の作用による凍結抑制材上部に生成された氷板の凍結抑制メカニズムや凍結抑制効果の発現過程の検討を行える可能性を示すことができた。

6. おわりに

今後、凍結抑制材の力学性状に対する散逸エネルギー理論の適用性についてさらに検討を行う必要がある。また、物理系凍結抑制舗装は交通荷重との相乗効果により効果が発現されるものなので、施工箇所や凍結抑制材の工法等の選定にも適用できるように検討を進めたい。

参考文献

- 1) 前野紀一, 福田正己: 雪氷の構造と物性, pp.118-119, 1986.
- 2) 姫野賢治, 渡辺隆, 竹井邦彦, 勝呂太: 散逸エネルギー理論を用いたアスファルト混合物の疲労破壊基準, 東京工業大学土木工学科研究報告, No.35, 1985.
- 3) 前原弘宣, 高橋修, 芥川直人: 経年劣化によるアスファルトの性状変化とアスファルト混合物の疲労特性に関する研究, 土木工学論文集, 第 12 巻, pp.73-81, 2007.