

有限要素解析によるゴムロールド舗装の氷板剥離効果に関する研究

Study on Bond-destruction effects Between Ice-crust and Gum-rolled Pavements by FEM

北海学園大学工学部 ○学生員 佐々木 卓大 (Takahiro Sasaki)
 北海学園大学工学部 麓 公貴 (Kouki Fumoto)
 北海学園大学工学部 正 員 武市 靖 (Kiyoshi Takeichi)

1. はじめに

現在、冬期路面管理手法として、ロードヒーティングや凍結防止剤の散布が実施されている。しかし、ロードヒーティングは維持費が高く、凍結防止剤の散布は道路沿いの植生や車両に対する塩害が問題となっている。

そこで、舗装の面からこれらの問題の補助的役割を果たすために、以前から凍結抑制舗装の開発が進められてきている。

今回は、凍結抑制舗装の一つであるゴムロールド舗装の氷板剥離効果を有限要素解析によって検証する。その比較対象として密粒度舗装についても同様に理論解析を行った。この解析に加え、実際に実験を行い、ゴムロールド舗装の氷板剥離効果を明らかにした。

2. 供試体説明

今回、用いたゴムロールド舗装は、既存のロールドアスファルト舗装の配合を母体として、そこに特殊ゴム骨材を転圧入した、たわみ系凍結抑制舗装である。

密粒度舗装とゴムロールド舗装の表面性状を写真-1、2に、配合を表-1に示した。

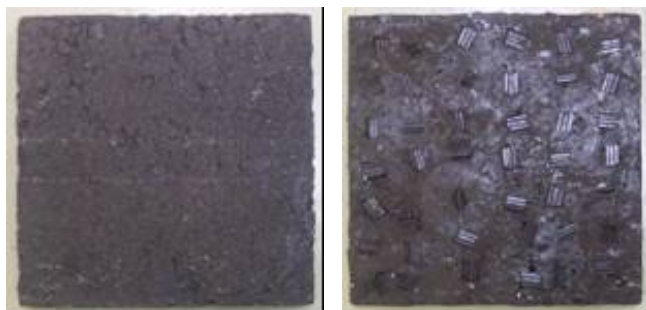


写真-1. 密粒度舗装

写真-2. ゴムロールド舗装

表-1. 密粒度舗装とゴムロールド舗装の配合

材料名	密粒度 13F 舗装	ゴムロールド舗装
5号砕石	—	18.3
6号砕石	38.8	18.3
7号砕石	6.1	—
粗砂	29.9	—
細砂	9.3	46.0
石粉	10.0	9.2
アスファルト	5.9	8.2
融氷剤	—	3
中温化剤	—	4

3. 有限要素解析

有限要素法^{1) 2)}にはh法(従来の有限要素法)とp法(新たな有限要素法)があるが、ここで使用するのは西澤による³⁾h法有限要素解析プログラムである。

3.1 設定条件

(1) 解析モデル

解析モデルは後述する実験結果と比較するため、本学実験室内に施工されたものをモデルとしている。図-1に示すように、アスファルト層の下はコンクリート層となっている。また、層構造解析プログラムのため、ゴム骨材を転圧入したモデルではなく、ゴム層を入れて解析する。

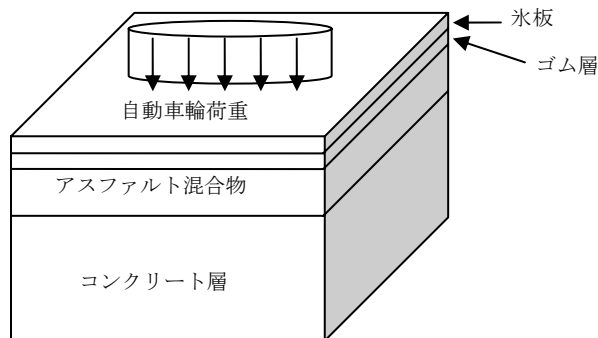


図-1. 解析モデル

(2) 各層の力学定数と厚さ

各層の材料の弾性係数、ポアソン比、深さを表2のように設定した。

表-2. 設定条件のまとめ

自動車輪荷重

↓

↓↓↓		弾性係数(MPa)	ポアソン比	厚さ(cm)
氷板	←	10000	0.33	0.1~0.3
ゴム層	←	8	0.44	0.2
アスファルト層	←	13000	0.35	5
コンクリート層	←	30000	0.2	10

(幅、奥行きとも30cmとしている)

アスファルトの弾性係数であるが、表3に示すように各温度によって変化する⁴⁾。今回の解析では冬期間の舗装を対象とするので、0℃以下の場合に限って考え、アスファルトの弾性係数は13000MPaと設定した。

表-3. 温度変化によるアスファルト弾性係数の一例

温度	0℃	10℃	20℃	30℃
弾性係数	12000MPa	8000MPa	4000MPa	2000MPa

ゴムの弾性係数は計算によって求めた。特殊ゴム骨材の硬度は70で、そのまわりを硬度50のゴムを薄くコーティングしている。この写真を写真-3、4に示す。

既往研究⁵⁾でこのゴム骨材はマイナスの気温下では硬度80程度になることが確認されている。この弾性係数は以下の式により算出した⁶⁾。

$$H_s = (G / G + 7.45) \times 100 \quad (1)$$

ここで、 H_s ：硬度、 G ：横弾性係数

上式に $H_s = 80$ を代入すると $G = 29.8$ となる。これから、縦弾性係数は次式から求まる。

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (2)$$

ここで、 E ：縦弾性係数、 ν ：ポアソン比

この式に横弾性係数とポアソン比(0.44)を代入し、 $E = 8.58 \text{ MPa}$ となった。

以上の計算結果をもとに、解析には 8 MPa と設定した。なお、氷板とコンクリートの弾性係数は一般値を使用し、軸対象なので解析範囲は4分の1のみとする。



写真-3. ゴム骨材（縦）



写真-4. ゴム骨材（横）

（3）荷重条件

荷重は乗用車および大型車の輪荷重であるが、表-4のように設定した。乗用車のタイヤの荷重半径は、本研究室での実験結果に基づき、大型車の荷重半径は竹下春見による理論式 $a = p + 12$ を使用している⁷⁾。

表-4. 載荷条件

	輪荷重	荷重半径	接地圧
乗用車	5 kN	90 mm	0.19 MPa
大型車	50 kN	170 mm	0.55 MPa

（4）氷板の破壊条件

氷板の破壊の有無は、解析によって得られる氷板のひずみによって判断することになる。

ゴムロール舗装が持つ、たわみ特性を利用した舗装面に交通荷重が作用することで発生するひずみが、氷板の破壊ひずみより大きくなると氷板の剥離が期待できると考えられる。

Malcolm MellorおよびDavid M Coleが発表した文献によると⁸⁾、氷板のひずみが0.5%に達したときが初期破壊とされている。よって、ひずみがこれ以上になった場合は氷板が剥離し、これ以下になった場合は剥離しなかったと判断する。

3.2 解析結果

解析は氷板厚を1 mm～3 mmについて行い、その結果を表-5～7にまとめた。

図-2～5は氷板厚1 mmの場合の密粒度舗装とゴムロール舗装の解析結果を図示したものである。

〈乗用車輪荷重が作用した場合〉

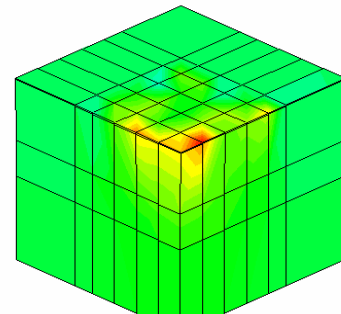


図-2. 密粒度舗装

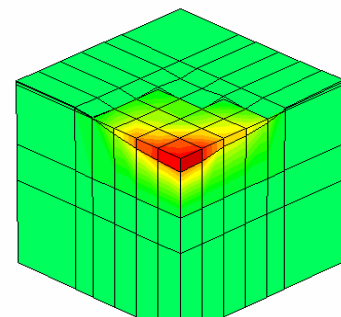


図-3. ゴムロール舗装

〈大型車輪荷重が作用した場合〉

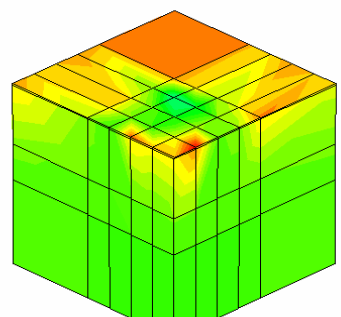


図-4. 密粒度舗装

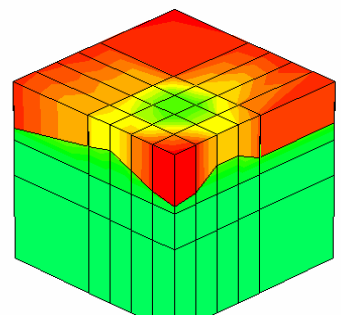


図-5. ゴムロール舗装

図-2～図5から分かるように、それぞれを比較すると乗用車より大型車、また密粒度舗装よりゴムロールド舗装の場合のとき、ひずみが大きくなる。

氷板厚を1 mmから3 mmへの変えながら解析を行なった全ての解析結果をまとめると以下になる。

氷板剥離予測の○は、氷板のひずみが0.5%以上となり破壊が予測される場合であり、×はひずみが0.5%以下で破壊されないと予測される場合である。

表-5. 氷板厚1 mmの場合の解析結果

舗装(輪荷重)	変位(cm)	ひずみ(%)	氷板剥離予測
ゴムロールド(乗用車)	0.00142	1.42	○
密粒度(乗用車)	0.00006	0.06	×
ゴムロールド(大型車)	0.00471	4.71	○
密粒度(大型車)	0.00024	0.24	×

表-6. 氷板厚2 mmの場合の解析結果

舗装(輪荷重)	変位(cm)	ひずみ(%)	氷板剥離予測
ゴムロールド(乗用車)	0.00138	0.69	○
密粒度(乗用車)	0.00006	0.03	×
ゴムロールド(大型車)	0.00452	2.26	○
密粒度(大型車)	0.00024	0.12	×

表-7. 氷板厚3 mmの場合の解析結果

舗装(輪荷重)	変位(cm)	ひずみ(%)	氷板剥離予測
ゴムロールド(乗用車)	0.00135	0.45	×
密粒度(乗用車)	0.00006	0.02	×
ゴムロールド(大型車)	0.00433	1.44	○
密粒度(大型車)	0.00024	0.08	×

3.3 考察

解析結果をまとめると表-5～表7のように、氷板厚が増すごとに、ひずみが小さくなり、破壊しにくくなることが分かる。

密粒度舗装とゴムロールド舗装を比べると、後者の氷板剥離効果が大きく現れている。特に、ゴムロールド舗装に大型車輪荷重が作用した場合では、氷板厚3 mm以上でも破壊が発生すると考えられる。そこで、この場合の氷板剥離可能な限界厚を求めるために解析を行なうと次のようになる。

表-8

氷板厚	変位	ひずみ	氷板剥離予測
7 mm	0.00372 c m	0. 5 3 %	○
8 mm	0.00360 c m	0. 4 6 %	×

表-8はゴムロールド舗装に大型車輪荷重が作用した場合の氷板剥離が可能な限界厚を表している。

氷板厚が7 mmまでは理論解析上、剥離されることに

なる。

従って、密粒度舗装では氷板厚1 mmに大型車の輪荷重が作用しても氷板の剥離は無いのに対し、ゴムロールド舗装であれば乗用車輪荷重でも2 mmまで、大型車輪荷重なら7 mmまで剥離されるほど、大きな違いがみられるのである。

今後、実験での検証や解析の精度を高めることは必要ではあるが、ここでの結果としては、ゴムロールド舗装の氷板剥離効果は十分に期待できると考えられる。

4. 実験での検証

ゴムロールド舗装の氷板剥離効果は解析だけではなく、実際に実験を行ない検証した。

解析では1回載荷であるが、ここで行なう実験は繰り返し走行試験であるため、全く同じ条件下で比較することはできない。しかし、解析で確認されたように、密粒度舗装とゴムロールド舗装とで大きな違いが見られるかどうかを確認した。

4.1 実験概要および試験装置

車両の走行回数増加による氷板路面の露出度合いを目視で確認して、ゴムロールド舗装と密粒度舗装とで比較した。

本試験では写真-5に示す室内凍結路面走行試験装置を用いた。



写真-5. 走行試験装置

4.2 目視による比較検証

実験を行なった結果では、密粒度舗装とゴムロールド舗装との間で大きな差が確認された。

密粒度舗装では写真-6に示すように、走行回数1000回で一部小さな穴があいた箇所もあったが、氷板の剥離はほとんど無かった。

しかし、ゴムロールド舗装では、写真-7に示すように走行回数が増すごとに、大きな変化が見受けられた。最初に目視確認する走行回数50回の時点で十分とは言えないまでも、氷板の剥離が確認されたのである。この実験においても両舗装間で大きな違いが見られた。

例として、-5℃での両舗装への繰り返し走行試験での目視評価を表-9に示した。

表-9. 繰り返し走行試験での目視評価表（-5℃）

走行回数	密粒度舗装	ゴムロールド舗装
50 回	変化はない。	タイヤの通過した幅で露出。少し氷面が残る。
500 回	一部ひびが入る。	完全に露出する。
1000 回	一部穴があく。	4.5 c m幅を超えて露出する。

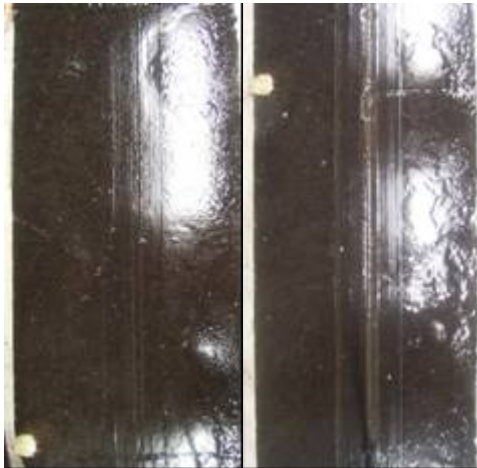


写真-6. 繰り返し走行試験（密粒度舗装）

左図：50回走行終了時

右図：1000回走行終了時

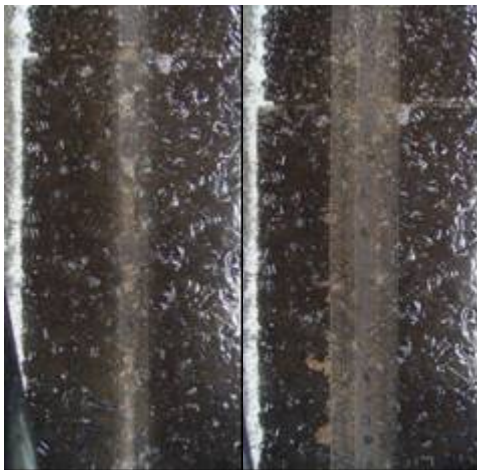


写真-7. 繰り返し走行試験（ゴムロールド舗装）

左図：50回走行終了時

右図：1000回走行終了時

5. まとめ

- 1) 層構造解析では、密粒度舗装は一切の氷板の破壊が無いのに対し、ゴムロールド舗装は乗用車輪荷重では2 mm、大型車輪荷重では7 mmまで理論上破壊されることが分かった。
- 2) 実験を行い、その結果を目視で確認すると、密粒度舗装では、ほとんど露出が無いのに対し、ゴムロー

ルド舗装では、走行回数50回の時点で、ほぼ完全に露出した。

- 3) 密粒度舗装と比較して、ゴムロールド舗装の氷板剥離の発現効果が高いことを、層構造のプログラムによる有限要素解析と室内実験結果の比較検証から明らかにした。

6. 今後の研究

h法有限要素解析は特殊ゴム骨材が撒かれた実際の舗装表面ではなく、模式的に薄いゴム層が敷かれているような状態の上で解析した。今後は、今まで行なってきたh法での解析を基にして、p法有限要素法での解析を行なっていく、解析の精度を高め、図-6のように、より実際の舗装形状に近似した解析を行なう。

h法は低次の多項式で構成されているのに対し、p法は多項式次数を上げて精度を高めることができるもので、使用するプログラムソフトは「ストレス・チェック」という。以前では行なわなかった、特殊ゴム骨材を再現し実際の舗装表面に撒かれている数量をもとに、より実物に近いモデルで現在、解析を行なっている。

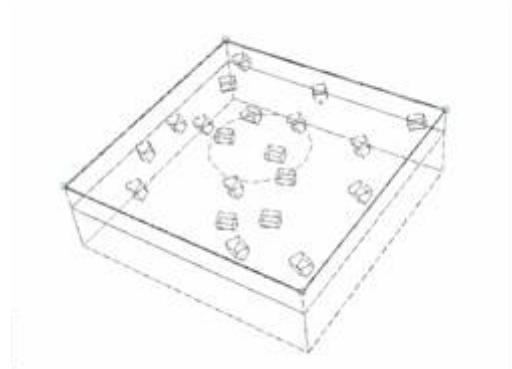


図-6 解析モデル

参考文献

- 1) 矢川元基、半谷裕彦：有限要素法の基礎 pp.7～12、1994.
- 2) 三好俊郎：有限要素法入門 pp102～111、1995.
- 3) 西澤辰男、山田英雄、横川尚佳：土木学会第57回年次学術講演会講演概要集 3 FEM によるアスファルト舗装のわだち掘れ解析、2002.
- 4) 久保裕一、安倍隆二、宮葉斗夢：多層弾性理論を適用したアスファルト舗装の構造設計法と試験施工による構造評価の検討、2004.
- 5) 松田謙治：平成17年度北海学園大学修士論文 ゴムロールド舗装の工学的性質と路面凍結抑制効果に関する研究、2005
- 6) メカニカルデザイン：Mech D&A News Vol97 1-3-3、1997
- 7) 竹下春見：竹下春見博士遺稿集 pp.258～262、1967
- 8) Malcolm Mellor、David M Cole：DEFORMATION AND FAILURE OF ICE UNDER CONSTANT STRESS OR CONSTANT STRESS-RATE、1981