

# 廃タイヤの道路材料への利用に関する研究

## Study on the utilization of waste tires as road materials

北海学園大学大学院工学研究科建設工学専攻 ○学生員 氏家伸孝 (Ujiie Nobutaka)  
 北海学園大学工学部土木工学科 学生員 高松広平 (Takamatsu kouhei)  
 北海学園大学工学部土木工学科 田近裕善 (tazika hiroyoshi)  
 北海学園大学工学部教授 正員 武市 靖 (Takeichi kiyoshi)

### 1. はじめに

廃タイヤのリサイクル意識は以前から高く、主にセメント工場などの燃料・材料用として利用されてきた。現在廃タイヤのリサイクル率はほぼ 90% 近くあり、廃棄物の中でもリサイクル率は高いほうである。しかし、近年循環型社会を目指すにあたり燃料だけではなく材料として利用しようという動きが活発となってきた。現在材料として利用されている例として歩道、スポーツ施設、公共施設や学校の運動場などの舗装用表層材料として用いられており、歩きやすさや転倒時のけがの防止など多くの利点を有する舗装材料である。一般的にこれらの結合にはウレタンバインダーなどの樹脂系バインダーが用いられているが、これら樹脂系バインダーは、費用が高価であったり、ゴムブロックの製造に特別な機械が必要であったりと普及の妨げとなってきた。

そこで本研究ではバインダーに高粘度アスファルトバインダーを用いた供試体の力学的特性や耐久性、歩きやすさについて検討した。それと同時に実際に適応された場合の変位量を有限要素法解析で算出し破壊の検討などを行った。

### 2. 使用材料と配合割合

使用した廃タイヤゴムチップ（以下ゴムチップ）はワイヤーやベルトなどの金属部分を取り除きゴム部分のみを使用した。

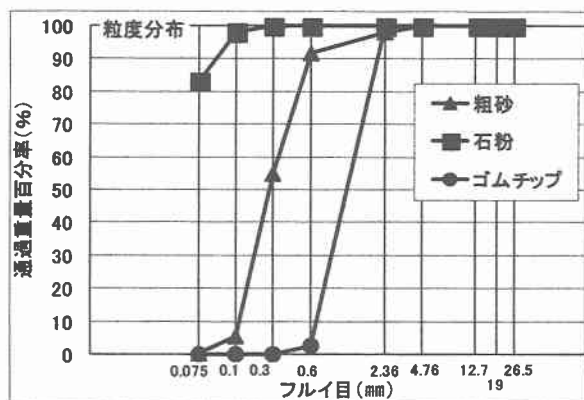


図-1 粒度分布

結合はアスファルト単体で使用せずフィラー（石粉）を 1 対 1 の割合で混合し結合力を改善させたものを使用した。また主に耐久性を改善させる目的で粗砂を混入し各種試験を行った。

本試験で使用した材料のふるいわけ試験結果を図-1 に示す、ゴムチップの最大粒径は 3mm で図から均一な材料であることがわかる。表-1 にアスファルトバインダーを用いて作成した供試体①から⑨の配合を示す。アスファルト量はゴムチップ舗装に用いられているウレタンバインダー量と同等の 20% から、22.5%、25% の 3 種類とし、主に耐久性を向上させる目的で粗砂を 5%、10% 混入させた。また比較のためにウレタンバインダーによる供試体（以下ウレタン供試体）を一般的なバインダー量である 20% で作製した。

表-1 供試体の配合

| 供試体番号   | バインダー量 | フィラー | ゴムチップ | 粗砂 |
|---------|--------|------|-------|----|
| ①       | 20     | 20   | 60    | 0  |
| ②       | 20     | 20   | 55    | 5  |
| ③       | 20     | 20   | 50    | 10 |
| ④       | 22.5   | 22.5 | 55    | 0  |
| ⑤       | 22.5   | 22.5 | 50    | 5  |
| ⑥       | 22.5   | 22.5 | 45    | 10 |
| ⑦       | 25     | 25   | 50    | 0  |
| ⑧       | 25     | 25   | 45    | 5  |
| ⑨       | 25     | 25   | 40    | 10 |
| ウレタン供試体 | 20     | 0    | 80    | 0  |

注) 配合割合は重量比 (%)

### 3. 供試体の密度と空隙率

作成した供試体①から⑨と、ウレタン供試体の密度と空隙率を比較するため計測を行った。

表-2 供試体の密度と空隙率

| 供試体番号    | 密度 (Kg/m <sup>3</sup> ) | 空隙率 (%) |
|----------|-------------------------|---------|
| ①        | 800.3                   | 32.6    |
| ②        | 879.7                   | 28.5    |
| ③        | 921.2                   | 22.5    |
| ④        | 878.1                   | 27.3    |
| ⑤        | 946.1                   | 24.4    |
| ⑥        | 1017                    | 21.8    |
| ⑦        | 980.1                   | 20.2    |
| ⑧        | 1032                    | 19.0    |
| ⑨        | 1133                    | 14.4    |
| ウレタン供試体  | 837.3                   | 17.6    |
| アスファルト舗装 | 2300程度                  | 3~5     |

ため計測を行った。密度計測はノギスで測定した体積と重量から、空隙率は実際の密度を理論最大密度で除して求めた、供

試体の密度と空隙率を表-2に示す。

供試体①から⑨の密度はバインダー量や粗砂が増加するほど増加するという関係であった。供試体①から⑨はウレタン供試体と同程度から多少大きめで、一般的なアスファルト舗装の半分程度であり、バインダーにアスファルトを用いても比較的軽量であることがわかった。空隙率はウレタン供試体と同程度から2倍近くの空隙を有していることがわかり、ある程度の排水能力があると思われる。

4. 力学的特性

1) 一軸圧縮試験

作製した供試体の力学的特性を明らかにし、また有限要素法における弾性係数と弾性限界ひずみ時における圧縮応力を求めるため一軸圧縮試験を行った。

供試体は直径100mm、高さ190mmとし、1%/minの速度で連続的に载荷した、供試体①、⑨とウレタン供試体の応力ひずみ関係を図-2に示す。

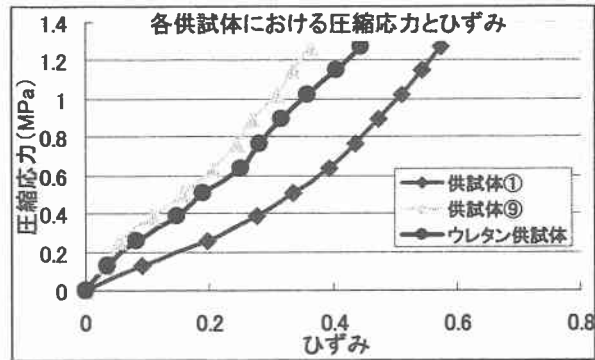


図-2 本研究供試体の典型的な応力ひずみ関係

供試体②から⑧は供試体①と⑨の範囲内にありバインダー量および粗砂混入量が増加するほど圧縮強度が高かった。圧縮応力がおおよそ0.4Mpa程度まで弾性領域であり、その後ひずみが増加するにしたがい、加速度的に応力が増加した、供試体①から⑨の圧縮強度はいずれも0.4Mpaであることを考えると、粗砂を混入させた供試体は弾性限界ひずみが減少しているものと思われる。ウレタン供試体も圧縮応力がおおよそ0.9Mpa程度まで弾性的であり、その後加速度的に応力が増加した。

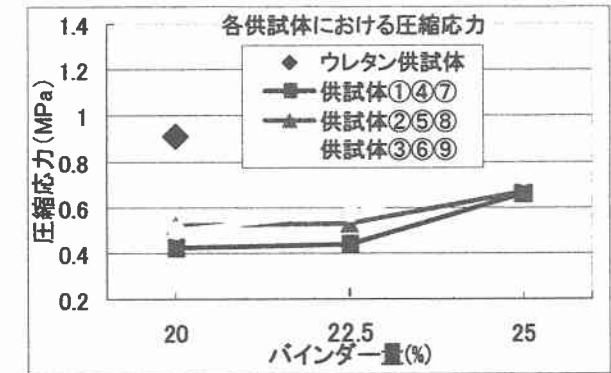


図-3 各供試体における圧縮応力

圧縮応力は弾性限界ひずみにおける値とし1軸圧縮試験の結果を図-3に示す。供試体①④⑦(粗砂配合割合0%)よりも供試体③⑥⑨(粗砂配合割合10%)の方が、全体的に圧縮応力が高い傾向にあった。粗砂を多く混入させることにより空隙が充填され、強度が増加したと思われる。圧縮応力は供試体①から⑨でおおよそ0.4~0.7Mpa、ウレタン供試体で0.9Mpaであった。

2) 水浸ホイールトラッキング試験

水の作用条件下での耐久性を測定するために水浸ホイールトラッキング試験を行った。走行回数と輪荷重を表-3のような歩道としては厳しい設定とし試験を行った。

表-3 試験設定

| 水浸ホイールトラッキング試験 |            |
|----------------|------------|
| 輪荷重            | 0.328KN    |
| 走行速度           | 42±1回      |
| 走行距離           | 2300±100mm |
| トラバース速度        | 100mm/min  |
| トラバース幅         | 250mm      |
| 往復回数           | 3000回      |

通常の方法のように剥離した体積を測定することが困難なため、供試体試験前重量と供試体試験後重量を比較し剥離した割合を密度で除して剥離した体積割合を測定した。

試験結果を図-4に示す。

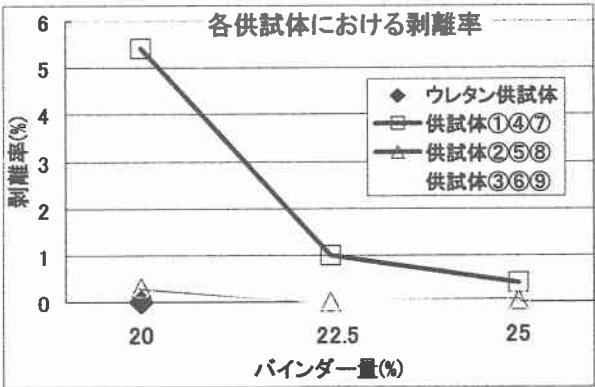


図-4 各供試体における剥離率

供試体に粗砂を混入させることにより、剥離率に向上が見られた、特に供試体①と供試体②のようにバインダー量が少ないほどその傾向が強く、粗砂を混入させることにより水の作用条件下での耐久性が向上していることがわかった。本研究の適応箇所が歩道であることを考えると、粗砂を5%混入することにより十分な耐久性が得られる。

5. 歩きやすさに関する試験

歩きやすい舗装とは感触が柔らかく、すべり抵抗性が高く、平らな物理性状を示す舗装という研究がある<sup>1)</sup>、そこで本研究で作製した供試体はアスファルト舗装と同様の施工が出来るので、平坦性は確保されているとして感触の柔らかさをゴルフボール(以下GB)スチールボール(以下SB)反発係数試験、すべり抵抗性をポータブルスキッドテスターにより測定した。

## 1) GB・SB 反発試験

GB と SB を自然落下させたときの反発高さから GB・SB 反発係数を求める試験である。測定において目視による誤差を低減するためビデオ撮影し測定を行った。

GB 反発係数は足に対する衝撃吸収性を示し、係数が小さいほど身体に対する負担が少ないと考えられている、SB 反発係数は地面反力を示し、係数が小さいと地面反力を利用できないため、砂浜を歩いているような重い感じを受け、適度に大きいと地面反力を利用できるため歩きやすいとされている<sup>2)</sup>。

GB 反発係数試験結果を図-5に示す、バインダーにアスファルトおよび粗砂を混入させても GB 反発係数が損なわれることはなく、供試体①から⑨はアスファルト舗装やウレタン供試体と比べて衝撃吸収性に優れていることがわかる。またアスファルト量や粗砂混入量による大きな違いは見られなかった。

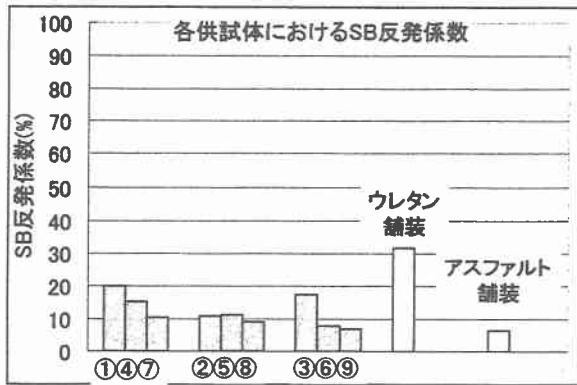


図-5 各供試体における GB 反発係数

SB 反発係数試験結果を図-6に示す、供試体①～⑨はウレタン供試体と比べ SB 反発係数が小さく、地面反力が小さかった、アスファルト量や粗砂混入量による大きな違いは見られなかった。

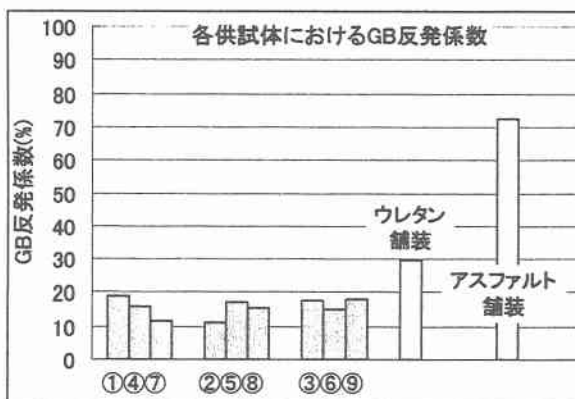


図-6 各供試体における SB 反発係数

## 2) すべり抵抗試験

すべり抵抗を測定するため、供試体①から⑨、ウレタン供試体、一般的アスファルト舗装についてすべり試験を行った、すべり試験はポータブルスキッドテスターを用いて供試体を十分湿潤状態にさせた後計測した、図-7にすべ

り抵抗試験結果を示す。

一般的にすべり抵抗値である BPN 値が 40 以上であると滑りづらいとされている。ウレタン供試体は BPN 値 30 程度と滑りやすいことがわかる、しかし供試体①から⑨はどれも BPN 値 40 を越えており滑りづらいことがわかった、アスファルト量や粗砂混入量の違いによる違いは見られなかった。

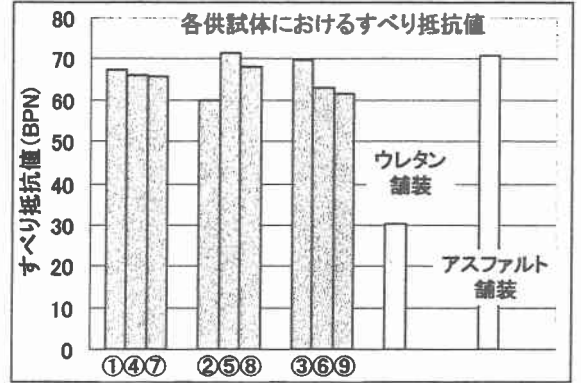


図-7 各供試体におけるすべり抵抗値

## 6. 有限要素法解析

歩道などに施工された場合の破壊検証や、人が乗ったときの変形量から舗装の柔らかさをもとめるため有限要素法解析を行った。解析には P 法有限要素法解析を用いた。P 法有限要素法とは要素分割を変えずに高次の関数を用いて変位を近似することにより精度を向上させる方法である。

### 1) 舗装構成と材料物性

舗装構成は一般的な歩道の構成を用い、表層 30 mm、路盤 270 mm、路床 1m とした。解析用にモデル化した舗装構成と材料物性を図-8に示す。

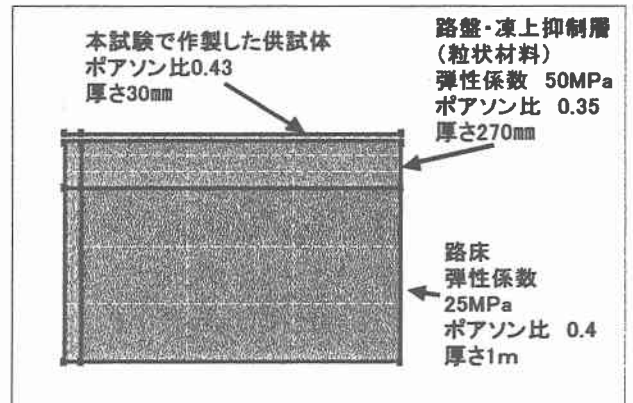


図-8 有限要素法に用いた舗装構成

仮定した弾性係数は交通荷重などがかからないことを想定しているので、舗装構造がかなり弱いときとしている。なお路盤の弾性係数に 50MPa を用いたのは、高い締固め度を期待することが出来ないであろうことによった<sup>3)</sup>。各材料におけるポアソン比は一般的な値の中間値を用い、本研究における供試体のポアソン比はアスファルトとゴムの平均した値と仮定した。

2) 荷重条件

歩道なので通常の交通荷重は無いと思われるが、除雪車による影響を考慮し、除雪車の最大輪荷重は2tfとした<sup>3)</sup>。接地半径は式(1)を用い<sup>4)</sup>接地圧は0.34MPaとした。

$$a = 12 + P \qquad \text{式-(1)}$$

a : タイヤの設置半径 (cm)

P : 輪荷重 (t)

人の接地圧と設置面積を次のように仮定した、体重は60kg、足は縦260mm横100mmの長方形と仮定し接地圧を0.023Mpaとした、接地面の形状は計算の簡略化のため円とした。

3) 解析結果

除雪車による荷重が一回載荷された場合の解析結果を図-9に示す、この図は各供試体の圧縮応力を破壊圧縮応力で除した比を示し、この比が1を越えると供試体が破壊したとみなせる。ウレタン供試体は0.4であり、供試体①から⑨は0.5~0.9とバインダーにアスファルトを用いた供試体はウレタン供試体よりも破壊しやすいが、除雪車が載荷されても破壊せず、適応範囲が歩道であることを考えると十分強度はある、供試体①④⑦(粗砂配合割合0%)よりも供試体③⑥⑨(粗砂配合割合10%)の方が、圧縮応力比が小さく、粗砂混入量が多い供試体ほど破壊しづらい傾向であった。

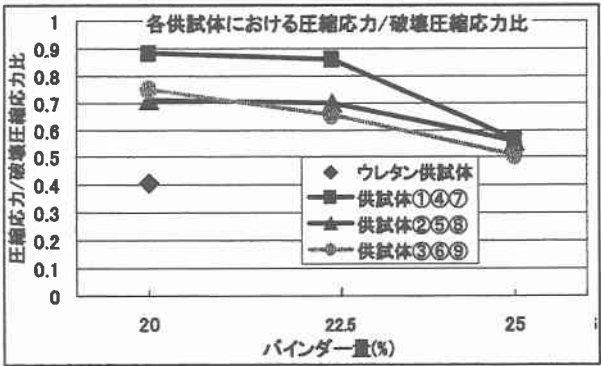


図-9 圧縮応力/破壊圧縮応力

人による荷重が一回載荷されたときの変位を図-10に示す。通常のアスファルト舗装で解析を行った結果、変

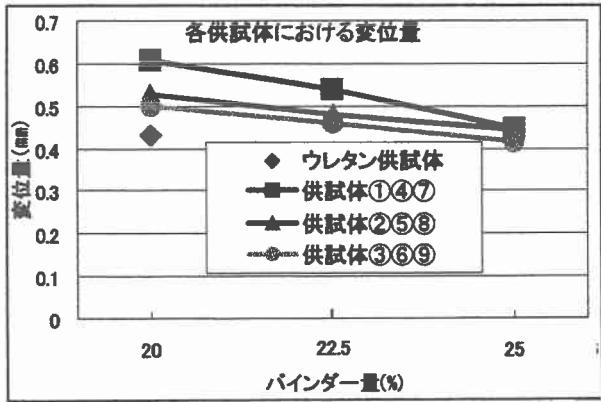


図-10 人の荷重における各供試体の変位量

位量が0.2mm程度であった。

供試体①④⑦(粗砂配合割合0%)よりも供試体③⑥⑨(粗砂配合割合10%)の方が、変位量が小さく硬い傾向であった。しかし、変位量が0.45~0.6mmなので通常のアスファルト舗装よりも柔らかい。ウレタン供試体と供試体①から⑨は変位量が同程度であった。ウレタン供試体などの樹脂系バインダーを用いた舗装が歩きやすいことを見ると、バインダーにアスファルトを用いた供試体も歩きやすい柔らかさを有していると思われる。

7. まとめ

- 密度測定の結果、供試体①から⑨の密度はウレタン供試体よりも多少大きめだが、一般的なアスファルト供試体に比べ半分程度であり軽量であった。
- 空隙率測定の結果、供試体①から⑨の空隙率はウレタン供試体に比べ同程度から2倍程度の空隙を有している。
- 一軸圧縮試験の結果、供試体①から⑨は、圧縮応力が0.4Mpa程度まで弾性変形し、その後加速度的に荷重が増加した。粗砂を混入させた供試体は弾性限界ひずみが減少する傾向であった。
- 水浸ホイールトラッキング試験の結果、粗砂混入が水の作用条件下での耐久性を向上していることがわかった。
- GB・SB試験結果より、供試体①から⑨の衝撃吸収性や地面反力はウレタン供試体と遜色なく、すべり抵抗試験が良好であるので歩きやすい舗装である。
- 有限要素法解析の結果、供試体①から⑨はウレタン供試体と比べ破壊しやすいものの、想定した荷重では破壊しなかった。また人による荷重が載荷されたときの変位量は、供試体①から⑨とウレタン供試体は同程度から多少大きく、柔らかい舗装であると言える。また一般的なアスファルト舗装と比べても十分変位し衝撃を吸収している。

9. 今後の課題

- 幅広い配合割合や使用材料で作製し検討すること
- 一軸圧縮試験による力学的性質の更なる検討と、供試体の残留ひずみの検討

参考文献

1) 池田拓哉、谷口聡、小森谷一志：歩行者系舗装の歩きやすさの評価に関する研究、舗装、pp4、1998  
2) 大道賢 斉藤弘志 坂本浩行：歩行者系舗装の歩きやすさと弾性試験に関する一考察、舗装、pp3、2000  
3) 北海道土木技術会 舗装研究委員会：軽交通舗装設計要領資料編(61年度版)、pp8、9  
4) 竹下春見、岩間滋：道路舗装の設計 p 12