

既設バラスト軌道を用いた BRT 専用道路の舗装構造に関する研究

交通工学研究室 小幡 泰史

指導教員 高橋 修

1. はじめに

我が国における地方公共交通は、少子高齢化や人口減少に伴い、その維持が深刻な問題となっている。鉄道事業者では地域公共交通を維持するため、地方自治体との協議を経て、廃線が決定した鉄道区間に対して新たに BRT へ運行転換することが行われている。鉄道線路を BRT 専用道路に作り替える際、既往の舗装構造では粒度調整砕石を新規に購入して路盤層を構築していたことから、施工費用の増加が課題として挙げられる。なお、BRT 専用道路は交通量がかなり少ないため、実交通量に応じた舗装構造を適用することで施工費用の削減が期待できる。

そこで、新たに提案した舗装構造として、路床は原地盤、路盤材には既設バラストにセメント安定処理を施した。そして、その上に直接アスファルトコンクリート（以下、アスコン）層を舗設した代替案が検討されている。これによって、既往の舗装構造で用いられた粒度調整砕石の購入と施工を省略することが可能となり、施工費用の削減につながる。しかし、提案した舗装構造の路盤層は最大骨材粒径がかなり大きい軌道用バラストであり、表面の凹凸が著しいことから、アスコン層の強度にばらつきが生じることが懸念される。

本研究では、提案されている BRT 専用道路の表・基層としてのアスコン層の力学特性を評価し、構造設計で必要とされる設計指標を定量化することを目的とした。また、得られた設計指標をもとに、舗装の構造的安全性を満足するアスコン層厚を評価した。さらに、選定した地区における既往の舗装構造との施工費用、工期の経済性による評価指標だけでなく、我が国では、Green Transformation (GX) が推進されていることから、二酸化炭素（以下、CO₂）排出量の環境による評価指標を加えた削減効果についても試算し、適用可能性について考察した。

2. 静的曲げ試験による凹凸があるアスコン層の力学特性の評価

提案した舗装構造は、セメント安定処理を施した表面凹凸の著しい既設バラストの上にアスコン層を直接舗設することから、アスコン層下面における凹凸も顕著となる。凹凸が著しい場合、アスコン層下面の締固めが不均一となり、強度にもばらつきが生じるため、損傷が進行しやすくなり、舗装構造の性能低下やライフサイクルコストの増加を招いてしまう。そこで、本章では、実際に軌道用バラストを敷き均した上にアスコン層を舗設し、下面に凹凸のあるアスコン供試体を作製した。そして、静的曲げ試験による力学特性の評価により、底面凹凸の存在が曲げ強度や曲げ変形に与える影響を評価した。

2.1 試験概要

本試験ではまず、供試体作製時の型枠にバラストを敷き均し、その上に密粒度アスファルト混合物 (13) を投入して、アスコンを舗設した。舗設後の断面の状況を写真-2.1 に、バラストを取り除いた後のアスコン供試体下面の状況を写真-2.2 にそれぞれ示す。その後、供試体を曲げ試験用の寸法にカッターで切断し、石膏で支点箇所の不陸を調整し、舗装調査・試験法便覧 B005「曲げ試験方法¹⁾」に準拠して行っ

た。試験時の厚さは、約 40 mm、約 50 mm、約 70 mm とした。また、下面に凹凸のないアスコン供試体も同じ層厚で作製し、比較した。



写真-2.1 供試体断面の状況



写真-2.2 供試体下面（バラスト側）の状況

2.2 試験結果および考察

下面に凹凸のあるアスコン供試体では凹凸のないアスコン供試体と比較した場合の結果について、破断時曲げ強度を図-2.1、破断時ひずみの結果を図-2.2 にそれぞれ示す。図-2.1 より、破断時曲げ強度については各層厚で約 5% 低下した。図-2.2 より、破断時ひずみについては、各層厚で 2 倍以上となり、変形が顕著であった。これらの要因として、凹凸により、アスコン層下面の密度が低下し、有効断面が減少するとともに、供試体の中立軸が上側にシフトしたことが要因として考えられる。

また、静的曲げ試験の結果を荷重—変位曲線を整理した場合、凹凸ありの場合、凹凸なしの場合のそれぞれにおいて厚さが変化しても、構造的には荷重と変形の関係はほぼ同じであるが、厚さが小さいほど少ない荷重で、あるいは厚さが小さいほど変形量で破断することが分かった。したがって、下面に凹凸のあるアスコン層は、下側に締固め度が低下する領域を有することが明らかとなり、舗装構造の設計ではこのことに起因する構造特性を考慮する必要がある。

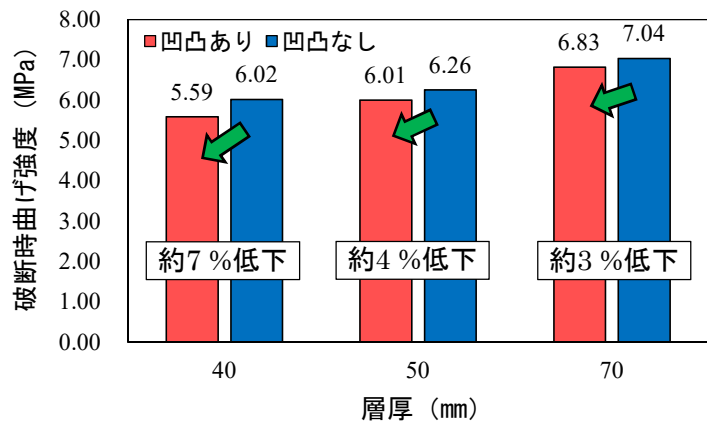


図-2.1 破断時曲げ強度の結果

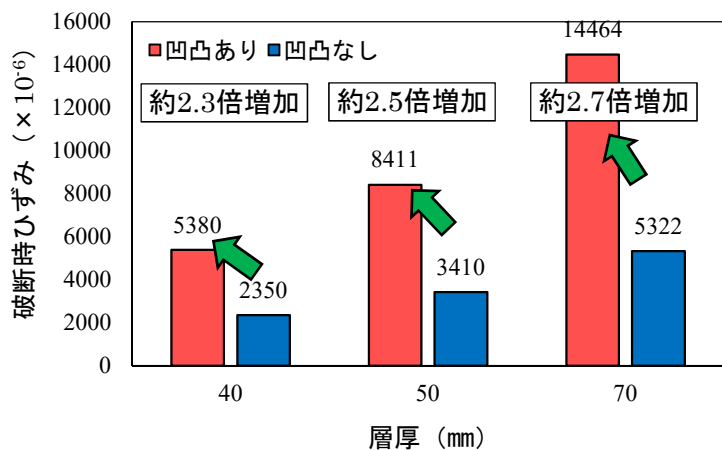


図-2.2 破断時ひずみの結果

3. 締固め度による凹凸があるアスコン厚の密度低下範囲の評価

静的曲げ試験の結果より、下面に凹凸があるアスコン層は、下側に締固め度が低下する領域を有している。このようなアスコン層で構造設計を行うと、舗装構造としては危険側に断面を選定することになる。そこで、図-3.1に示すようにアスコン層厚の深さ方向に対し、基準密度を満足する層を表層、満足しない層を基層で区分して、断面諸量を算定することが必要と考えた。本章では、前章と静的曲げ試験と同様にアスコン供試体を作製し、上縁からの長さをいくつか変化させて厚さ方向に2分割し、各層における締固め度を評価した。そして、これらの結果から下面に凹凸がアスコン層の密度低下が生じる範囲を評価し、次章における構造設計において必要情報となる基層と表層の境界位置について検討した。

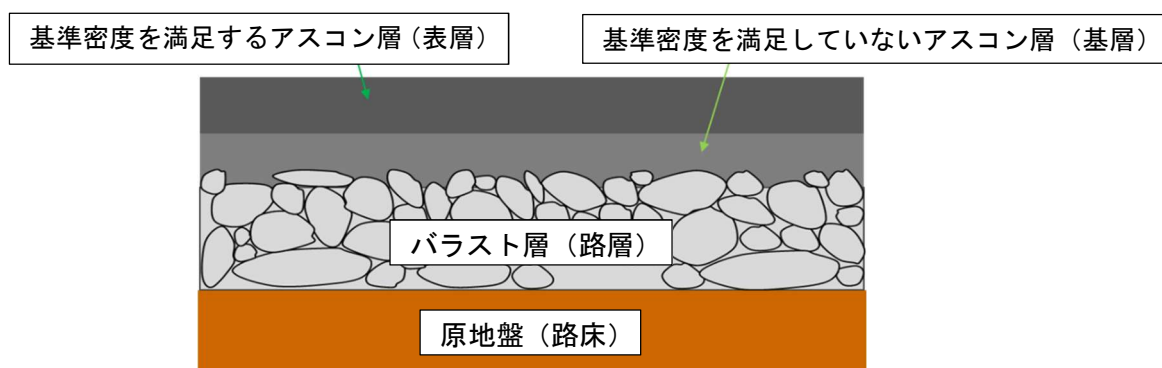


図-3.1 下面に凹凸のあるアスコン層の舗装構造の考え方

3.1 試験概要

(1) 下面に凹凸のあるアスコン供試体の作製

本試験は静的曲げ試験と同様、型枠底面のバラスト敷き均し、その上にアスコンを打設することで、下面に凹凸のあるアスコン供試体を作製した。供試体の厚さは約 120 mm、約 100 mm、約 80 mm の計 3 種類とし、比較対象として、下面に凹凸がない層厚 120 mm の供試体も作製した。なお、層厚 120 mm のアスコン層は 1 回の敷設で施工できることを想定している。

(2) 表層および基層の締固め度の評価

作製した供試体をカッターで 4 分割に切断後、各密度を測定した。その後、表-3.1 に示す基層部分と表層部分で供試体を切断し、それぞれの密度を測定した。

表-3.1 本試験における切断部分

供試体の名称	表層の層厚—基層の層厚 (mm)			
	凹凸なし 層厚 120 mm	60-60	70-50	80-40
凹凸あり 層厚 120 mm				
凹凸あり 層厚 100 mm	40-60	50-50	60-40	70-30
凹凸あり 層厚 80 mm	30-50	40-40	50-30	60-20

3.2 試験結果および考察

表層部分の結果を図-3.2, 基層部分の結果を図-3.3に示す. なお, 各図に示す赤い線が基準値の100%を示す線であり, 横軸は供試体の全厚に対する表層部分の割合をパラメータとして表している.

表層部分の締固め度(図-3.2)では, 凹凸あり層厚120mmと100mmにおいて, 60%を超える範囲で締固め度が100%を下回った. したがって, 構造設計上の安全側を考慮すると, アスコン層の上側60%を表層, 下側40%を基層とすることで, 安全側に評価できると考える.

基層部分の締固め度(図-3.3)では, 各層厚で基準値を下回った. 特に層厚が大きくなるほど締固め度の低下は顕著になることから, 層厚の拡大に伴って, 基準密度を下回る基層の領域が拡大することに留意する必要がある. このため, 構造設計上の考慮や施工上の工夫が必要となる.

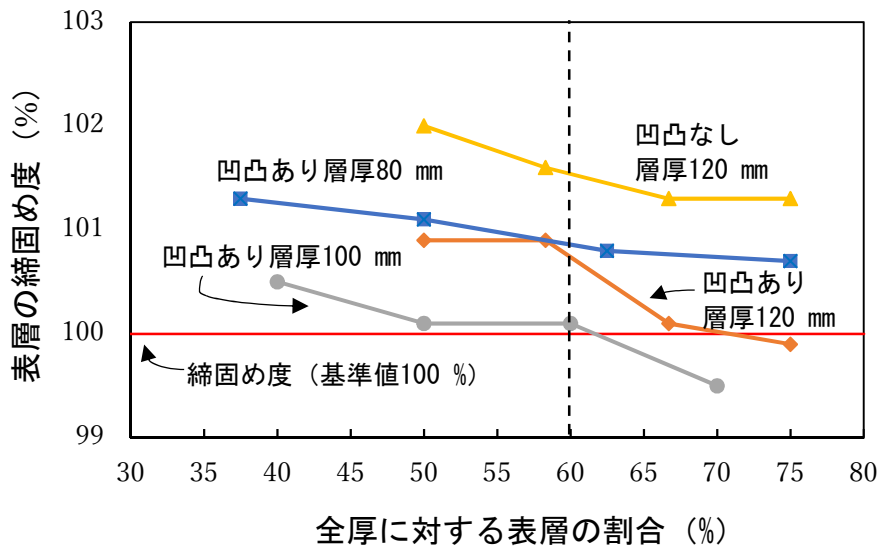


図-3.2 全厚に対する表層部分の割合と表層の締固め度の関係

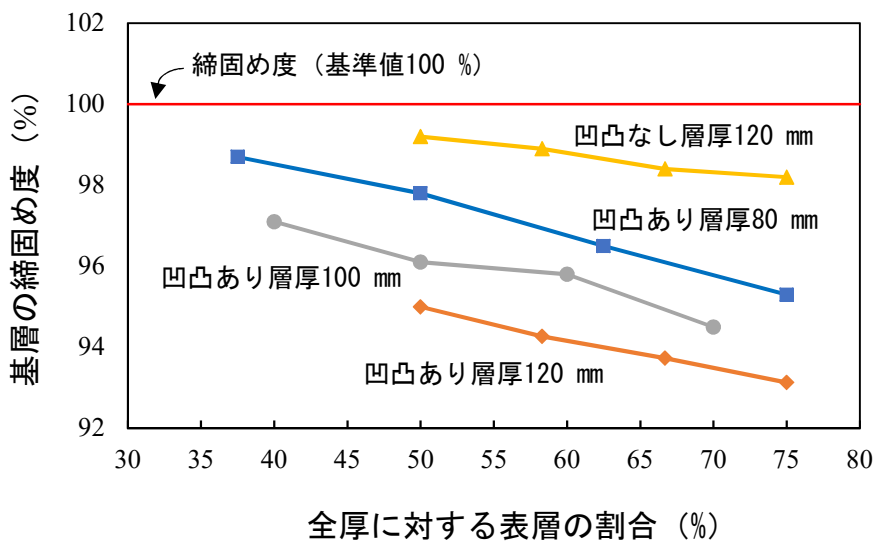


図-3.3 全厚に対する表層部分の割合と基層の締固め度の関係

4. 理論的設計による提案した舗装構造のアスコン厚の評価

前章まで実験による評価から得られた知見を踏まえ、図-3.1 に示した舗装構造の必要アスコン厚を多層弾性理論に基づく理論的設計²⁾により決定した。理論的設計法の主な流れを図-4.1 に示す。なお、多層弾性理論に基づいてひずみを算出することから、本研究では舗装構造解析プログラム「GAMES³⁾」を用いて解析を行うこととした。

4.1 理論的設計に必要な各種条件の設定と GAMES での入力条件

4.1.1 舗装の性能指標

○設計期間 : 20 年

○舗装計画交通量 : 30 台/日・方向

※東北地方で運行されている気仙沼線・大船渡線 BRT や九州地方で運行されている日田彦山線 BRT の運行本数を参考とした。

○疲労破壊輪数 : 3.10×10^4 回疲労破壊輪数

※中型路線バスで輪荷重を想定して算出した。

4.1.2 設定条件

○交通条件 : 56 kN ※中型路線バス後輪の複輪荷重で設定した。

○環境条件 : 1~3 月, 4~6 月, 7~9 月, 10~12 月の 4 条件

○基盤(路床)条件 : 弾性係数 24.4 MPa, ポアソン比 0.30 層厚 60 cm

○材料条件

(1) アスコン層

・表層

弾性係数 : 舗装設計便覧の月毎における弾性係数を環境条件で分類した 3 カ月間で平均した値
ポアソン比 : 0.35

・基層

弾性係数 : 前章の締固め度の結果および既往文献より, 表層より 50 から 70 %の範囲で低下すると考え, 計 3 種類の低下の度合い (50, 60, 70%) で設定
ポアソン比 : 0.35

・層厚

前章と同様, 全厚 120 mm, 100 mm, 80 mm に加え, 90 mm と 70 mm も含めて設定した。

(2) セメント安定処理を施したバラスト層(路盤)

弾性係数 : 1600 MPa, ポアソン比 : 0.35, 層厚 20 cm

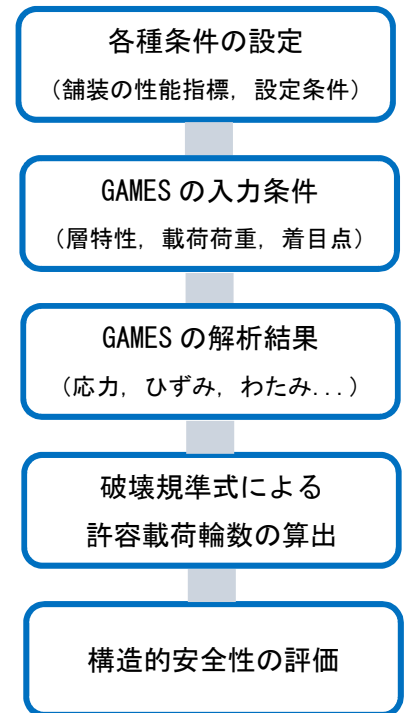


図-4.1 理論的設計の主な流れ

4.1.3 GAMES の入力条件

- ・層特性 : 4.1.2 で示した各層の弾性係数, ポアソン比, 層厚に加え, 層間すべり率を入力
- ・載荷荷重 : 交通荷重の情報 (輪荷重, 中心からの距離) を入力
- ・着目点 : 理論的設計では, アスコン層下面の疲労ひび割れの水平方向のひずみと路床上面の鉛直方向の圧縮ひずみが評価指標となる. したがって, 着目点はアスコン層下面 (基層) と路床上面のそれぞれで複輪間隔の中心直下と一輪の荷重中心直下の 2 点を入力し, 解析の結果は各層でのひずみが最大値なる方を採用した.

4.2 舗装構造の設計結果

GAMES により算出された各ひずみの結果を, AI (アメリカ・アスファルト協会) の各破壊規準式²⁾ から載荷輪数を算出した. そして, 載荷輪数を疲労度や信頼度などを考慮して許容載荷輪数を算出した.

アスコン層下面の引張ひずみから得た疲労ひび割れに基づく許容載荷輪数を表-4.1, 路床上面の圧縮ひずみから得た永久変形に基づく許容載荷輪数を表-4.2 にそれぞれ示す. なお, 単位は回である.

表-4.1 疲労ひび割れに基づく許容載荷輪数

アスコン層厚 (mm)	表層の弾性係数に対する基層の弾性係数の比率 (%)		
	50	60	70
120	8.44×10^5	1.06×10^6	1.56×10^6
100	1.46×10^6	1.84×10^6	2.70×10^6
90	2.08×10^6	2.62×10^6	3.90×10^6
80	2.94×10^6	2.81×10^6	4.18×10^6
70	4.26×10^6	3.50×10^6	8.38×10^6

表-4.2 永久変形に基づく許容載荷輪数

アスコン層厚 (mm)	表層の弾性係数に対する基層の弾性係数の比率 (%)		
	50	60	70
120	8.81×10^4	8.38×10^4	7.77×10^4
100	5.84×10^4	5.60×10^4	5.26×10^4
90	4.71×10^4	4.53×10^4	4.29×10^4
80	3.77×10^4	3.65×10^4	3.88×10^4
70	3.00×10^4	2.91×10^4	2.79×10^4

ここで, 構造的安全性を満足するためには, 表-4.1, 表-4.2 に示す許容載荷輪数が前項で示した疲労破壊輪数を上回らなければならない. しかし, 表-4.2 の赤字で示したアスコン層厚 70 mm の場合, 許容載荷輪数が疲労破壊輪数を下回る結果となった.

したがって, 構造的安全性の要求性能を満たすアスコン層厚は 80 mm と決定した.

5. 提案した舗装構造と既往の舗装構造における経済性などの比較と評価

本研究では、以上の検討で設計した BRT 舗装構造を施工する場合に、施工費用や工期の面でどの程度優位性があるのか、既往の舗装構造と比較した。また、我が国では、Green Transformation (GX) の推進も行われていることから、環境面の観点からも評価した。

5.1 舗装構造の比較要領

ここでは、新潟県内のある地域の工事単価に基づき、鉄道線路をBRT 専用道路に作り替えることを想定して試算した。比較項目は、施工費用、工期、CO₂排出量の3点とし、選定地域は、2022年8月の水害被害⁴⁾により、2026年2月時点でバスによる代行輸送が行われているJR 米坂線の運行地域である新潟県関川村とした。延長1 kmにおいてBRT専用道路を構築する場合の、施工費用、工期、CO₂ 排出量を算出し、各舗装構造で比較した。

5.2 比較結果

比較結果を表-5.1に示す。なお、提案した舗装構造におけるCO₂排出量は、上段がセメントのCO₂排出量原単位を含めた結果であり、下段が含めない結果となる。

表-5.1より、提案した舗装構造では既往の舗装構造よりも、施工費用が約50 %の削減、工期は約2週間の縮減が確認された。しかし、CO₂排出量に関して、提案した舗装構造ではセメントを使用する必要があるが、セメントは他の建設材料よりもCO₂排出原単位が大きいため、約17 %多く排出される結果となった。なお、セメントのCO₂ 排出原単位を含めずに試算した場合は、約30%のCO₂ 排出量の削減が可能となった。

表-5.1 各項目の比較結果

種類	施工費用 (万円)	工期 (日)	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)
既往	3,730	32	42.8
提案	1,935	19	50.0 29.6
削減効果	50.8 % 減	13日 減	16.8 % 増 30.8 % 減

※上段：CO₂ 排出原単位を含めた場合での結果

下段：CO₂ 排出原単位を含めない場合での結果

6. まとめ

コスト削減を目的に、BRT 専用道路に対して新しい舗装構造が提案された。しかし、既設バラストにセメント安定処理を施した路盤表面の凹凸がかなり大きいことから、その上に直接舗設されるアスコン層への影響が課題としてあった。本研究では、アスコン層に着目し、アスコン層厚を変化させた静的曲げ試験や締固め度による評価を行い、多層弾性理論に基づく理論的設計に必要な設計指標を定量化することに加え、その舗装構造の費用削減効果などから適用可能性を考察した。

以下に、本研究で得られた知見を以下に示す。

1. アスコン層下面の著しい凹凸は、下側の密度低下による強度の低下や著しい変形につながる。そこで、静的曲げ試験や締固め度の評価からアスコン層の上側 60 %を表層、下側 40 %を基層と捉えて構造設計を行うこととした。
2. BRT 専用道路は交通量が少ないため、それに相応する条件で設定した場合では、理論的設計により、アスコン層厚が 80 mm 以上必要であることから、80 mm と決定した。
3. ある地域の工事基礎単価に基き、施工費用、工期、CO₂ 排出量の 3 点に着目して試算を行った結果、施工費は約 50 %の削減、工期は約 2 週間の縮減を可能とした。しかし、二酸化炭素の排出量は約 17 %増加となった。

本研究の検討結果より、コスト削減を目的に提案した BRT 専用道路は、交通量の少ない条件下において既往の施工方法よりも、施工費用の縮減と工期の縮減に大きく寄与し、適用可能性が十分に高いことを確認した。

参考文献

- 1) 公益社会法人日本道路協会：舗装調査・試験法便覧〔第3分冊〕，pp.153-165，2019.
- 2) 公益社団法人日本道路協会：舗装設計便覧，pp.109-133，2006.
- 3) 土木学会：舗装工学ライブラリー3 多層弾性理論による構造解析入門，pp.69-94，2005.
- 4) 山本晴彦，古場杏奈，縞居和也，坂本京子，岩谷潔：2022年8月豪雨により新潟県村上市・関川村で発生した土石流・洪水災害の被害調査，自然災害科学 42 巻 2 号，pp127-157，2023.