バス専用道路の舗装維持を考慮した BRTの費用構造に関する研究

高橋 洋一¹・中村 文彦²・早野 公敏³・田中 伸治⁴・三浦 詩乃⁵・有吉 亮⁶

¹学生会員 横浜国立大学 大学院都市イノベーション学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail: takahashi-youichi-hz@ynu.jp

²正会員 横浜国立大学理事・副学長 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-1)

E-mail: f-naka@ynu.ac.jp

³正会員 横浜国立大学教授 大学院都市イノベーション研究院

(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail: hayano@ynu.ac.jp

⁴正会員 横浜国立大学准教授 大学院都市イノベーション研究院

(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail: stanaka@ynu.ac.jp

⁵正会員 横浜国立大学助教 大学院都市イノベーション研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail: shinomiura@ynu.ac.jp

⁶正会員 横浜国立大学産学連携研究員 大学院都市イノベーション研究院

(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail: ariyoshi-ryo-np@ynu.jp

近年、途上国への導入が盛んなBRTは乗車定員の大きな連節バスを運行することで鉄軌道システムと同等の輸送力を安価な費用で実現可能とする。しかし、重量の大きな連節バスの運行によってバス専用道路が激しく損傷し、舗装維持費用が急増する恐れがある。本研究は、より大きな乗車定員を持つバス車両を前提に設計することで舗装維持費用が安価となる輸送量を明らかにした。また、交通需要と乗車定員がより多く想定される場合、通行負荷が激しい停車部へのコンクリート配置が修繕費用の削減に有効であることを明らかにした。そして、供用中の輸送量増加および大きな乗車定員を持つ車両への変更が想定される場合、乗車定員と舗装配置の組み合わせを考慮した舗装設計により輸送量増加と定員変更による修繕費用の増加が抑制されることを明らかにした。

Key Words : BRT, bus exclusive way, road pavement, life cycle cost

1. はじめに

公共交通が都市における交通及び環境問題解決に向けて整備されていく中で、鉄軌道システムと同等の輸送力を安価なインフラ整備および運行費用で実現できる交通システム¹⁾として Bus Rapid Transit (以下、BRT)の導入が世界各地で進んでいる。矢部ら²⁾は、連節バスの運行で軌道系交通機関よりも安価な費用で実現可能な輸送量を示しており、財源に乏しく交通需要の急増への対応が迫られる途上国へのさらなる導入が期待される。

しかし、連節バスを運行すると大型バスより重量が大きいためにバス専用道路の舗装が激しく損傷し舗装維持費用が急増する恐れがある。さらに、舗装維持費

用の急増が運行費用の削減分を相殺し、より大きな乗車定員の車両で運行した時の BRT 自体の費用が、少ない定員の車両で運行した時の費用を上回る恐れがある。

クリチバ市(ブラジル)では、バス専用道路の損傷が激しい状態であり BRT の運行管理者の懸念事項となっている(ヒアリングより)。ITDP³⁾が発行する BRT のガイドライン(以下、BRT のガイドライン)では、ライフサイクルコストを考慮した舗装材料や工法の選定について指針が示されている。また、バスの通行負荷に関する研究として、APTA⁴⁾が米国の都市へのヒアリングから舗装の損傷を軽減するバスの車体構造や運行方法に言及している。しかし、以上の研究では、舗装劣化の主因である交通荷重を左右するバス車両の運行条件と

舗装維持費用の関係が定量的に明らかにされていない。

また、交通需要の急増が著しい途上国では、運行費用削減に向けて舗装の供用中に運行条件(連節バスの運行等)を変更する可能性が高く、設計時以上の交通負荷がかかる恐れがある。そこで、供用中の交通需要と運行条件の連動も考慮した舗装維持計画の策定が求められる。

BRT は、鉄軌道システムに比べて運行とインフラ整備両主体の負担を軽減しながら高品質な輸送サービスを提供できる交通システムとして大きな可能性を秘めている。そこで、この利点をさらに活かすために、交通需要及び運行条件と舗装維持費用の関係も考慮してBRTの費用をライフサイクルで評価する必要がある。

本研究では、BRT の導入が盛んな途上国への適用に向けて、運行費用とバス専用道路の舗装維持費用とのトレードオフ関係を明らかにし、それが総費用(本研究では、運行費用と舗装維持費用の総計と定義)に与える影響を明らかにする。具体的には、まず、供用後に想定される輸送量と運行条件(乗車定員、乗車率)を設計条件として設計した舗装を供用開始後にある運行条件で運行することを想定する。次に、設計した舗装の修繕頻度を理論的な舗装劣化予測式を用いて算定し、積算基準を用いて修繕費用を算定する。以上の算定を、輸送量と運行条件が舗装供用開始後に設計条件に沿って実現した場合と設計条件に比べて変動した場合に分けて行い、運行費用と舗装維持費用の変動関係を分析する。また、耐久性が高い舗装材料の配置による舗装維持費用の減少率を見る。

2. バス専用道路の舗装状況調査

バス専用道路の損傷要因としてバス車両の通行負荷と舗装材料の耐久性の關係に着目し、文献および現地調査からバス専用道路の整備・損傷状況を調査した。

(1) 調査概要

「バス車両の通行負荷」に関して、バス車両のカタログ値を用いて乗車定員毎の通行負荷を算定した。次に、クリチバ市(ブラジル)に赴いてバス専用道路の損傷状況を視察し、交通荷重を起因とする損傷の種類を把握した。「舗装材料の耐久性」に関して、世界で導入されているBRTのバス専用道路における「アスファルト」と「コンクリート」の採用割合をBRT情報サイト⁹⁾から集計した。次に、導入都市のバス専用道路の舗装維持の課題をBRTのガイドラインから把握した。

(2) バス車両の通行負荷

舗装の施工費用は通行負荷に対する舗装の耐久性に比例し、その性能は舗装の厚さに比例する。

表-1 算定に用いたバス車両の輪荷重

車両	車両諸元							
	定員 (人)	車両 重量(t)	定員 重量(t)	総重量 (t)	輪荷重(t)			
					前輪1	前輪2	後輪1	後輪2
大型バス	80	9.93	3.12	13.05	2.62	-	-	3.91
2連節バス	130	28.00	5.07	33.47	4.30	5.85	-	6.60
	160	30.00	6.24	36.24	4.79	7.04	-	6.29
3連節バス	250	40.50	9.75	50.25	4.97	7.22	6.47	6.47

表-2 乗車定員毎の通行負荷

定員 (人)	(輪荷重/ 標準輪荷重) ⁴	運行 本数	累積49kN 換算輪数
80	0.70	125	31,823
130	7.29	77	204,611
160	10.17	63	232,037
250	16.00	40	233,632

国土交通省の定める「舗装の構造に関する技術基準(以下、設計基準)」では、舗装の厚さは「49kNの荷重(以下、標準輪荷重)がかかるタイヤが通過した回数に比例、地盤の強度に反比例」して計算される⁹⁾。

次に、通行荷重が舗装に与える負荷(以下、通行負荷)は、「通過する輪荷重と標準輪荷重の比の4乗に比例する(4乗則)」⁹⁾に従い、「標準輪荷重を持つ車両の通行回数」と解釈でき、世界各国の舗装設計に適用されている。そこで、1日1万人をバスで輸送する際にかかる通行負荷を乗車定員毎に算定した。算定に用いた車両の輪荷重を表-1、算定結果を表-2に示す。

まず、車両のみの重量(車両重量)と体重60kgの乗客が定員乗車した時の乗客のみの総重量(定員重量)を1輪ごとに合計し、表-1の「輪荷重」とした。次に、各車両1回通行時の負荷を4乗則に則って合計した。乗車定員80人のバス(2軸)の通行負荷の算定結果を式(1)に示す。

$$\left(\frac{2.62}{5}\right)^4 + \left(\frac{3.91}{5}\right)^4 = 0.45 \quad (1)$$

舗装のある地点を前輪1と前輪2が通行した時の負荷の合計が1台分として右式に算出され、標準輪荷重の車両が0.45回通行した時と同等の負荷と解釈できる。

この値を、表-2の「(輪荷重/標準輪荷重)⁴」に示す。

表-2の「運行本数」は全便が定員乗車した状態の1日の運行本数を示している。「(輪荷重/標準輪荷重)⁴」に「運行本数」を乗じた値が1日の通行負荷である「累積49kN換算輪数」となり、定員250人で輸送するときの通行負荷は定員80人で輸送する時の7倍以上である。

しかし、実際は全便が定員乗車ではないため実際の乗車率を考慮した通行負荷を算定した。乗車率はBRTのガイドラインから一般的な範囲であるピーク時80～

表-3 実際の乗車率を考慮した通行負荷

乗車 定員	累積49kN換算輪数			
	乗車率			
	最低値	5%増加	10%増加	15%増加
80人	31,514	31,107	31,099	31,084
130人	238,299	225,500	221,723	215,497
160人	252,364	247,932	242,315	238,454
250人	241,561	238,717	238,200	232,904

図-1 ひび割れ損傷

図-2 停車部でのわだち掘れ

95%，オフピーク時65～80%を用いた．最低値（ピーク時80%，オフピーク時65%）を始めとして5%ずつ増加させて運行した時の算定結果を表-3に示す．

表-3より，定員160人の通行負荷が最も多くなっており，運行本数が増加し，通行負荷が増加しているため乗車率の変動によって定員毎の通行負荷の大小関係が異なる．そこで，本研究では実際の乗車率における舗装維持費用を算定する．

次に，2015年10月3日から9日にかけてクリチバ市（ブラジル）に赴き乗車観測によりバス専用道路の損傷状況を把握した．その結果，走行部では3連節バスのタイヤ接地部に沿って広範囲にひび割れが広がっていること，停車部では車両停車時のタイヤ接地部が著しく沈降（わだち掘れ）していることを確認した．（図-1,2参照）「わだち掘れ」は，アスファルト舗装に多く見られ，アス

図-3 BRT導入地域の割合

図-4 導入路線におけるバス専用道路の舗装配置の割合

ファルト舗装の温度が高い状態で重量荷重が低速度で通行すると沈降量（わだち掘れ量）が顕著であることが舗装工学の知見から明らかにされている^{7）}．

(3) 舗装材料の耐久性

BRTの情報サイト^{9）}から，2015年時点の世界におけるBRT路線の導入地域を集計したところ，図-3より，大半を中南米やアジア等の途上国が占めていることが明らかになった．次に，バス専用道路の舗装配置割合を同様に集計したところ，図-4より，走行部と停車部双方にアスファルト舗装が配置されている路線が全体の46%（図中，全面As）と最多を占めていることが明らかになった．これは，アスファルト舗装は施工が短期間で費用が安価であるため，途上国で急増する交通需要への対応に向けて早期の運行開始を図るために採用されたものと考察される．

その一方で，既存研究では耐久性の高さからコンクリート舗装がアスファルト舗装に比べて長期的に安価であることが明らかにされている^{7）}．また，修繕頻度の減少による工事期間中の交通封鎖の影響も小さいことからコンクリートの採用が推奨されている^{7）}．しかし，

財源に乏しい途上国では、コンクリート舗装は初期費用が高価で全面コンクリート舗装の施工は厳しいと考えられる。そこで、BRTのガイドライン³⁾では停車部へのコンクリート配置が推奨されている。

3. 運行費用および舗装維持費用算定過程

BRTの年間運行費用とバス専用道路の舗装維持費用の算定過程を示す。ヒアリングの結果、BRT導入都市からバス専用道路の舗装維持費用に関するデータが得られなかった。以上のデータ取得限界より、日本の設計⁶⁾・積算基準を用いて、仮想の路線の舗装を設計し、供用期間中の舗装維持費用を算定する。同様に、日本の運行単価を用いて運行費用を算定する。本研究では、データ制約上、車両諸元などについては日本のデータを用いたが、今後、途上国でも新たな車両が導入されることを想定すると本研究の設定は妥当なものと考えられる。

(1) BRTの運行費用

BRTの運行時間帯を6時～24時(ピーク2時間)とした。

次に、国土交通省が公表するバス事業者標準原価⁸⁾(以下、標準原価)より、以下の項目に示すバスの運行経費を乗車定員毎に算定した。運行経費に関する設定を説明した後、本研究で設定した運行条件および専用道路の条件を表にまとめたものを表4、5に示す。

a) 人件費

式(2)を用いて算定した。運転士の時間あたり概算人件費を日本での実績値⁹⁾から1500(円/時)とした。人件費については、BRTのガイドラインより、「欧州・北米では総費用の35～75%を占めるのに対して途上国では20%以下」としており、総費用の変動要因として大きいことに留意する必要がある。

$$L = P \times T_d \times F \quad (2)$$

ここで、 L ：人件費(円/年)

P ：運転士の時間あたり概算人件費(円/時)

$T_d = T_r + T_l$ ：運行あたりの乗務時間(分/本)

T_r ：所要時間＝路線長(km)/表定速度(km/h)

T_l ：折り返し休憩時間(5分)

F ：年間の往復運行本数(本/年)

運行本数を決定する1便の乗車率をピーク時とオフピーク時それぞれ一律とした。

b) 燃料油脂費

軽油価格を日本の実績値¹⁰⁾から120(円/l)とし、その値に乗車定員毎の燃費(定員80人：2.5km/l、130/160人：1.6km/l、250人：1.2km/l)で年間の往復運行距離を除いた値を乗じて乗車定員毎の年間燃料費とした。軽油価格についても各国によって差異があり、運行距離や車両の燃費により燃料油脂費が変動するため注意が必要である。

c) 車両償却・修繕費

車両償却費は、1台あたりの車両購入費用(BRTのガイドラインより、定員80人：2千万円、130、160人：4千万円、250人：6千万円)をBRTのガイドラインより一般的なバス車両の耐用年数である8年で除した値とした。車両の保有台数を稼働台数と予備台数(稼働台数の10%)の総計とした。稼働台数をピーク時輸送(ピーク率10%)への対応を考慮して式(3)を用いて算定した。

$$N_o = \frac{V_p}{C \times O_p} \times T_d \quad (3)$$

ここで、 N_o ：稼働台数(台)

V_p ：ピーク時輸送量(人/ピーク時)

C ：乗車定員(人/編成)

O_p ：ピーク時の乗車率(%)

車両修繕費は、矢部ら³⁾が用いた1kmあたりの修繕費(大型バス：21円/km、2・3連節バス：42円/km)に年間往復運行距離を乗じた値とした。

d) 利子および諸経費

利子は、国土交通省の標準原価における人件費に対する割合が1/57であることから、人件費の1/57とした。

諸経費は、標準原価において人件費に対する割合が22/57であることから、人件費の22/57とした。

表4 運行単価の設定値

諸元	車両仕様		運行単価					
	乗車 定員	燃費	車両購入費	車両 修繕費	利子	諸経費	軽油 燃料費	時間当たり 運転士人件費
設定値	80人	2.5km/l	2000万(円/台)	21(円/km)	運転士 人件費 の1/57	運転士 人件費 の22/57	120(円/l)	1,500 (円/時)
	130人	1.6km/l	4000万(円/台)	42(円/km)				
	160人							
	250人		6000万(円/台)					
設定 根拠	世界各国の一般値			クリチバ市 の実績値	国交省の公表値		日本の実績値	
参考文 献番号	3)	5)	3)	2)	8)		10)	9)

表-5 運行条件および専用道路の設定値

諸元	運行条件						バス専用道路の仕様		
	車両 予備台数	表定速度	車両 耐用年数	乗車率		想定輸送量 (人/日)	1車線 の幅員	路線長	供用期間
				ピーク時	オフピーク時				
設定値	稼働台数の10%	20(km/h)	8年	65～80%	80～95%	10,000～500,000	3.5m	10km	アスファルト舗装:10年 コンクリート舗装:20年
設定根拠 参考文献 番号	世界各国の一般値(表定速度は最低値, 路線長は平均値)								日本の舗装設計基準
	3)					5)	3)	5)	6)

図-5 乗車定員毎の年間往復運行費用

図-6 乗車定員・乗車率増加による運行費用削減率

e) 運行費用算定結果

以上の過程より、乗車率の範囲の最低値(ピーク時乗車率を80%, オフピーク時を65%)で運行した場合の年間往復運行費用を図-5に示す。

図-5より、より大きな乗車定員への車両変更によって人件費が減少し、最大で50%減少している。(定員80人から250人への変更時)次に、乗車定員80人の車両運行時の乗車率をピーク・オフピーク時共に最低値(80%・65%)とした時の運行費用を100とした場合、定員および乗車率を変更した時の運行費用減少率を図-6に示す。図-6に示すように、乗車率および乗車定員を高めるように運行することで最大60%の費用削減が見られる。

表-6 バス専用道路の仕様

専用道路		乗車定員(人)			
		80	130	160	250
総延長距離(m)		10,000			
停車部	バス停長(m)	12	19	19	27
	バス停数	20			
	全長距離(m)	240	380	380	540
走行部	駅間距離(m)	514	506	506	498
	全長距離(m)	9,760	9,620	9,620	9,460

(2) バス専用道路の舗装維持費用

本研究で設定するバス専用道路の車線数を往復計2車線、バス停全長をバス車両の全長と同じ値とした。バス専用道路の仕様を表-6に示す。

本研究では「舗装維持費用」を舗装が寿命を迎える「新設費用および維持修繕費用の総計」とした。舗装維持費用を「平成25年度版・積上積算方式による土木工事積算標準単価¹¹⁾(以下、標準単価)」に示される都道府県毎の標準単価の中央値を用いた。

a) 新設費用

新設費用は舗装の厚さに比例する。そこで、設計基準から信頼性が一番高い式を用いて舗装厚を算定した。

設計基準より、舗装の寿命をアスファルト舗装の場合10年、コンクリート舗装の場合20年とした。

b) 維持修繕費用

本研究では、車両の交通荷重が舗装維持費用に与える影響を明らかにするため、バス車両の通行速度と舗装の温度と材料条件(アスファルト混合物の粘度、締固め度等)を一定(設計基準にて定める材料規格値および日本の一般値)として修繕頻度を算定した。

維持内容を「路面清掃」とし、清掃頻度を国道の実績値である年間6回とした。

修繕費用の算定対象とする損傷を前節の現地調査から「ひび割れ」と「わだち掘れ」とし、ひび割れを「切削オーバーレイ工法」、わだち掘れを「オーバーレイ工法」で修繕するとした。

本研究では算定対象とするひび割れを、交通荷重を起因とする「底面ひび割れ」とし、修繕基準を国土交通省が推奨する¹²⁾「ひび割れ率(ひび割れ面積/道路面積)」が

20%」とした。

修繕頻度を決定する舗装のひび割れ損傷速度を、アスファルト舗装の場合、日本道路協会が日本の実績値を考慮して修正した破壊基準式¹³⁾を用いて算定した。これは、アスファルト混合物層の厚さを考慮しているため、想定する通行負荷に比例して厚くなる舗装では、底面から表面にひび割れが表れるまでの時間が長くなる。

次に、「わだち掘れ」進行速度を促進する累積載荷時間を、SHELL石油が提案する式¹⁴⁾を用いて算定した。得られた値を竹下¹⁵⁾が提案する、累積載荷時間と東京管内の道路舗装の実測わだち掘れ量の関係式に代入した。

そして、バス車両の通行負荷が国土交通省の推奨する¹⁶⁾「わだち掘れ量が30mm」に相当する累積載荷時間に達する毎に修繕するとした。

本研究では走行部での走行速度20kmでの通過時間を停車部ではBRTのガイドラインから乗車定員毎の停車時間算定式を用いて算定し、わだち掘れ量算定式に組み込んだ。

バス停での停車時間を乗降時間(ガイドラインよりピーク時の一般的な範囲20~40秒、オフピーク時18~30秒)とバス停への進入出時間そしてドア開閉時間の総計とした。乗降時間は乗降ドアの数に反比例するため大型バスは範囲の最大値、2連節バスは中央値、3連節バスは最低値を取った。また、ガイドラインより進入出には車両の長さ1mにつき1/6秒かかり、ドアの開閉を含めるとさらに10秒加算されることから、これらの値の総計を乗車定員毎の停車時間とした。

わだち掘れの進行速度は今回用いたSHELLの式¹⁴⁾よりアスファルト混合物層の厚さに比例することが明らかになっている。

以上より、底面ひび割れとわだち掘れの進行関係は逆の関係にあると言える。

コンクリート舗装の場合、アスファルト舗装のひび割れ進行速度の1/2とした。また、コンクリートのわだち掘れの主因はタイヤとの接触による摩耗であることから交通荷重によるわだち掘れは生じないものとした。

c) 舗装の施工費用

以上の過程で算定した舗装の施工費用を表-7に示す。

表-7 舗装の施工費用

舗装材料	新設工 (円/m ²)	修繕工(円/m ²)	
		ひび割れ	わだち掘れ
As	6,102	2,282	714
Con	10,273	184	—

4. BRTの運行条件と舗装維持費用の関係

本節では、3節で算定した運行費用と舗装維持費用の交通需要と運行条件による変動関係を示す。

(1) 分析の枠組み

想定輸送量と運行条件に沿って舗装が設計され運行開始した後、輸送量と運行条件が変動する可能性が考えられる。前節より、舗装は路面的機能と構造的機能を有し、想定輸送量と運行条件を考慮してそれぞれの寿命が設定されるため、設計時以上の交通負荷がかかると増加分だけ寿命が縮小し、年間の新設・修繕費用が増大する恐れがある。そこで、全面アスファルトで設計したバス専用道路を異なる輸送量(10,000~500,000人/日)と運行条件で供用期間(寿命10年)だけ運行した場合の年間の舗装維持費用変動を分析する。次に、停車部にコンクリートを配置した時の供用中(寿命20年)の費用減少率を分析する。

条件の変動パターンとして、まず輸送量が供用中に設計時の輸送量で増減しない「一定」と毎年一定の割合で増加する「増加」に分ける。以上の2パターンの中で、運行条件として乗車定員が、「一定(供用期間中、設計車両と同様の乗車定員を持つ車両で全便運行)」と「増加(供用期間中、設計車両より大きな乗車定員を持つ車両で全便運行)」する2パターンと、乗車率が「一定(供用期間中、舗装設計時に想定した乗車率を維持するダイヤで運行)」と「増加(供用期間中、設計時よりも高い乗車率を前提としたダイヤで運行)」の2パターンを組み合わせる8種類の想定パターンを設定した。図-7に想定パターン([1]~[8])、図-8に設定値(太字:供用後の運行条件、細字:舗装設計時の運行条件、太字斜字:舗装設計時・供用後の運行条件)を示す。

図-7 想定パターン

図-8 想定パターン毎の設定値の組み合わせ

図-9 想定乗車定員毎の舗装維持費用

(2) 想定パターン[1]の算定結果

a) 乗車定員の影響

全面アスファルト舗装とした時の年間の舗装維持費用を想定輸送量毎に算定した結果を図-9に示す。

図-9より、想定定員毎に費用変動が異なり、1日40万人(片方向)まで輸送する場合、大きな乗車定員を想定して設計した場合の舗装維持費用が安価になっている。

そこで、大きな乗車定員への変更による舗装維持費用の変動要因を明らかにする。なお、図-9より、定員130人以上では費用変動に大きな変化が見られなかったため、例として定員を80人から130人へ変更した時の構成費用変動率を寄与度で表した結果を図-10に示す。

図-10より、定員130人の車両運行を前提として舗装を設計した場合、より大きな輸送量を想定するにつれて新設費用が10%増加している。その一方でひび割れ修繕費

図-10 定員130人への変更による構成費用の増加率

図-11 想定乗車率毎の舗装維持費用増加率

が減少しておりわだち掘れ修繕費の増加を相殺し、総費用減少に大きな影響を与えている。しかし、より大きな輸送量を想定するにつれてひび割れ修繕費の減少率が縮小、わだち掘れ修繕費が増加し、総費用増加に大きな影響を与えている。これは、より大きな定員の車両運行を前提に舗装が設計されるため、初期費用は高価となるが耐久性が強化され、修繕費が安価に抑えられると考えられる。

b) 乗車率の影響

乗車定員を変えずに乗車率が最低値から5%ずつ高くなるように運行することを想定して設計したときの舗装維持費用をa)と比較した結果を図-11に示す。

図-11より、乗車率を5%増加させると、定員に関わらず費用の削減が見られた。しかし、乗車率をさらに5%増加させると、ほとんどのケースにおいて舗装維持費用が1%以内の増加を示した。特に、より大きな乗車定員を想定するにつれて、舗装維持費用が増加している輸送量が見られた。これは、乗車率増加による通行負荷の増加が運行本数の削減分を上回っているためと考えられる。

c) 総費用の算定結果

乗車率最低値の乗車定員毎の1人あたりのBRTの総費用と運行費用を図-12に示す。

図-12 乗車定員毎の1人あたり総費用と運行費用

図-14 供用中の乗車定員増加後の舗装維持費用増加率

図-13 供用中の乗車率増加後の舗装維持費用増加率

図-12より、大きな乗車定員を設計条件とした場合、より大きな乗車定員の車両運行を加味しても乗車定員の大きな車両を運行した方が安価な総費用になることが明らかになった。先述の運行・舗装維持の構成費用変動(図-5, 10)から、BRTの総費用変動は、舗装維持費用よりも運行費用、特にバス運転士の人件費に拠るところが大きいと言える。

(3) 想定パターン[2]の算定結果

乗車率最低値での運行を前提に舗装設計し、供用中に乗車率が5%ずつ増加させるように運行した時の舗装維持費用を乗車率最低値との比較結果を図-13に示す。

図-13より、定員に関わらず舗装維持費用の削減が見られた。設計時よりも乗車率を上げて運行することで一回の通行負荷を増やす分、通行回数が削減されたため累積49kN換算輪数(表-3)が減少し、修繕頻度が減少していると考えられる。しかし、定員160人では乗車率増加による費用減少率が定員130人よりも縮小している。これは、高い乗車率での運行で削減された運行回数分だけ減

少した負荷を、更なる乗車定員の大きな車両運行で急増した1回あたりの通行負荷が相殺したためと考えられる。

以上より、設計時の最低値での乗車率を前提とした舗装には、より大きな乗車定員の乗車率を高めるように運行することで舗装維持費用の削減に効果があるといえる。

(4) 想定パターン[3]の算定結果

輸送量が供用中一定で、乗車率を固定したまま乗車定員80人から130人以上の車両による運行を行った時の年間舗装維持費用増加率を図-14に示す。

図-14より、定員80人から130人以上の車両変更によって舗装維持費用が5倍以上増加している。特に、定員160人への車両変更によって著しく費用が増加している。これは、定員250人で運行した時の累積49kN換算輪数を上回り損傷進行速度が増加していると考察される。

(5) 想定パターン[4]の算定結果

供用中に乗車定員80人から130人以上の車両へ変更、乗車率を5%ずつ増加させて運行した時の舗装維持費用増加率を図-15に示す。

図-15より、供用中に乗車定員80人からより大きな乗車定員のバス車両へ変更すると5倍以上の費用増加が見られた。また、より大きな輸送量を想定するにつれて供用中の乗車率増加による費用が減少している。しかし、5倍以上の費用増加となっているため、大きな乗車定員を前提とした舗装設計による耐久性強化が見込まれる。

(6) 停車部へのコンクリート配置による費用削減度

輸送量が供用中一定の場合、停車部にコンクリート舗装を配置した時の舗装維持費用を全面Asを100とした場合の減少率を図-16、構成費用の減少率を図-17に示す。

図-16より、総費用は1%前後の減少に留まっているが、

図-15 供用中の乗車率・定員増加後の舗装維持費用増加率

図-16 停車部コンクリート配置時の舗装維持費用減少率

構成費用で見ると図-17より、より大きな乗車定員の運行を想定するほど新設費は増加している。

また、修繕費はより多くの輸送量と大きな乗車定員を持つ車両の運行を想定して設計するほど、全面アスファルト舗装に比べて減少率が拡大している。これは、コンクリート配置による耐久性向上が影響していると考えられる。

(7) 想定パターン[5]の算定結果

輸送量が想定1%増加した時に年間舗装維持費用の増加量を図-18に示す。なお、想定パターン[5]～[8]の算定結果に示す図-18～図-22の横軸名称である「輸送量」は「運行開始年における輸送量」を示している。

図-18より、より大きな乗車定員の車両運行を想定し

図-17 停車部へのコンクリート配置による構成費用減少率

図-18 供用中の輸送量増加時の舗装維持費用増加量

て舗装を設計する方が輸送量増加による舗装維持費用増加を抑制している。

また、定員80人よりも大きな車両の運行を前提とした舗装設計による舗装維持費用の抑制割合は、より大きな輸送量を想定するにつれて強まっており、10,000人/日と500,000人/日における定員130人以上での両増加量を比較すると75%まで減少率が拡大している。次に、乗車率毎の舗装維持費用増加率を図-19に示す。

図-19より、より大きな乗車定員でさらに乗車率を高める運行を前提に舗装設計したほうが舗装維持費用の減少率が高くなる傾向にある。しかし、より大きな輸送量を想定するにつれて、費用削減率が縮小している傾向が見られた。これは、輸送量の増加量が増加するにつれて運行本数が増加するため、累積49kN換算輪数が増加して舗装維持費用の削減率を縮小していると考えられる。

(8) 想定パターン[6]の算定結果

供用中に輸送量が想定1%増加し、さらに乗車率が

図-19 輸送量増加時の乗車率毎の舗装維持費用増加率

図-20 輸送量・乗車率増加時の舗装維持費用増加率

増加した時、年間舗装維持費用増加率を乗車定員毎に算定した。その結果を図-20に示す。

図-20より、定員80人で乗車率+10%まで増加させて運行すると増加している傾向が見られた。これは、輸送量増加による運行本数の増加が、乗車率増加による舗装維持費用削減を相殺しているものと考えられる。

(9) 想定パターン[7]の算定結果

供用中に、輸送量が想定1%増加し、さらにより大きな乗車定員の車両による運行を開始した時の年間舗装維持費用増加量が、設計車両とする乗車定員の違いによってどの程度異なるかを図-21に示す。

図-21より、より大きな乗車定員を持つ車両の運行を前提として設計することで、供用中の定員増加による舗装維持費用の増加を10%以内に抑制(図中、点線)している。特に定員160人の車両運行を前提とした設計が最も費用を抑制している。

さらに、より多くの輸送量を想定することで抑制率が増加している。これは、図-12より、定員160人での運行による累積49kN換算輪数が他の定員よりも多いため、

図-21 輸送量・定員増加時の舗装維持費用増加率

図-22 乗車定員・乗車率増加後の舗装維持費用増加率

耐久性が強化されたものと考えられる。

(10) 想定パターン[8]の算定結果

輸送量が想定1%増加した場合に定員80人からより大きな乗車定員の車両に変更し、さらに乗車率を5%ずつ増加させた時の舗装維持費用増加率を図-22に示す。

図-22より、定員80人・乗車率最低値での運行を前提とした設計に比べて6倍以上増加している。輸送量一定時における想定パターン[4]の結果に示した5倍以上の増加に比べてより舗装維持費用が増加している。これは、輸送量増加による運行本数増加の影響を受けていると考えられる。また、想定パターン[4]の考察と同様に、乗車率・想定輸送量の増加によって費用削減が見られる。

(11) 輸送量増加時の総費用

BRTの総費用が輸送量増加に伴ってどのように変動するかを分析した結果を示す。最低乗車率で定員80人の車両で運行した時の総費用を基準として、供用中に乗車率が最低の状態定員130人の車両で全便運行した時および定員130人の運行で乗車率を5%ずつ増加させた時の1人あたりの年間総費用を比較した。その結果を図-23に示す。

図-23 供用中の定員増加後の年間総費用増加率

す。図-23の縦軸の値である100%を上回っていれば定員80人で運行した場合の総費用よりも増加していることを指す。

図-23より、定員130人の運行変更によって総費用が増加する輸送量が現れている。また、乗車率を増加させるように運行することで、増加率が減少している。以上より、舗装設計時の車両定員より大きな定員の車両を運行することで修繕費用が急増し、運行費用の削減を相殺し、総費用が増加している。

5. 考察

以上の分析より、舗装の構造的な性能すなわち寿命は、重量の4乗に比例する「累積49kN換算輪数」に拠る所が大きい。この値が急増する状況は、設計時より大きな乗車定員を持つ車両に変更して運行した時であり、運行費用削減分を相殺するだけの総費用増加要因となる。

乗車率に関しては、同じ定員で運行する前提で設計時より大きな乗車率で運行した時、車両あたりの輸送人数が増えるため、大きな乗車定員ほど運行回数が減少し累計49kN換算輪数が減少する。しかし、連節バスは大型バスに比べて空車時の輪荷重が2倍以上であるため、連節バスの乗車率を高めるほど、増加する輪荷重の4乗に比例して急増し、1回あたりの通行負荷が通行回数削減分の負荷を相殺する。したがって、乗車定員毎の空車時の輪荷重と乗車率の関係を考慮する必要がある。

供用中に輸送量が増加した場合、設計条件と運行条件が同一とすると、図-20に示したように運行本数が増えるため設計条件の最低値より10%高い乗車率で運行しても舗装維持費用が増加し、結果として運行費用削減分を相殺する恐れがあることに留意する必要がある。

交通需要が急増している途上国に対しては、BRT導入地域の大半を途上国が占めている事を考慮するとBRT利用者の急増に伴って収益が増え、既存の大型バスから連節バスへの運行を開始する可能性が高い。この場合、大

型バスの運行を考慮して設計した舗装を連節バスで運行したと仮定すると、想定パターン[3]の算定結果に示すように、年間の舗装維持費用が6倍以上に急増するため、既存舗装の供用中に、より大きな乗車定員を持つバス車両の運行を想定した舗装に打ち換える方が長期的に安価になると考えられる。

しかし、打ち換え時には施工区間におけるバス輸送を中断する必要がある、輸送量が多い区間ほど迂回区間の舗装への負荷急増や交通量増加による周辺交通への影響が懸念される。そこで、施工区間の細分化や迅速な施工方法および施工が容易な舗装材料の使用によって施工時の影響を軽減することが有用と考えられる。

6. 結論・今後の課題

以下に結果をまとめ、結論とした。

(1) 輸送量・運行条件が供用中一定の場合

- ・より大きな乗車定員・最低乗車率の運行を前提に設計することで安価な舗装維持が期待できる。
- ・停車部へのコンクリート配置によって、全面アスファルト舗装よりも修繕費用の減少率が拡大する。

(2) 輸送量・運行条件が供用中増加した場合

- ・舗装設計時の車両定員よりも大きな定員の車両を運行することで修繕費用が急増し、総費用が増加する。
- 今後の課題として、以下を挙げる。
- ・途上国の施工状況に合わせた多様な施工方法による舗装維持費用の分析
- ・供用開始後の輸送量増加および運行条件の変動予測が不確定な場合に備えた、舗装の迅速な修繕方法実施による舗装維持費用の変動分析

謝辞：本研究(の一部)は、文部科学省・科学技術振興機構による支援プログラム「センター・オブ・イノベーション(COI)プログラム」によって行われたものです。

参考文献

- 1) GAO: *Mass Transit: Bus Rapid Transit Shows Promise*, US General Accounting Office, Washington, D.C., 2001.
- 2) 矢部努, 中村文彦, 大蔵泉: 専用走行空間を活用したバス輸送に関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 21, No. 3, pp. 667-676, 2004.
- 3) ITDP Planning Guide, 2007.
- 4) APTA: *An analysis on the bus vehicle weight*
- 5) Global BRT DATA: <http://brtdata.org/>
- 6) 国土交通省: <別添>舗装の構造に関する技術基準, 2001.
- 7) セメント協会: <http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jk1.html>

- 8) 国土交通省：バス事業者の経営状態，経費構成等
- 9) 年収ラボ：http://nensyu-labo.com/
- 10) e 燃費：http://e-nenpi.com/gs/price_graph/4/3/0
- 11) 建設物価調査会：平成 25 年度版－積上積算方式による－土木工事積算標準単価
- 12) 国土交通省：道路維持修繕工
- 13) (一社)日本道路協会：舗装設計便覧，2006.
- 14) Lijzenga, J.: On the prediction of pavement rutting in the shell pavement design method, *Proc. 2nd European Symposium, Performance and Durability of Bituminous Materials*, pp. 175-194, 1997.
- 15) 竹下春見：新編 道路工学，金原出版，p. 2, 1963.

(2016. 2. 26 受付)

A STUDY ON THE COST STRUCTURE OF BRT CONSIDERING THE PAVEMENT MAINTENANCE OF BUS EXCLUSIVE WAY

Yoichi TAKAHASHI, Fumihiko NAKAMURA, Kimitoshi HAYANO,
Shinji TANAKA, Shino MIURA and Ryo ARIYOSHI

BRT which are introduced in the developing countries mainly enable to transport the passenger volume as much as rail-based transport system cheaply by operating the articulated bus which have more riding capacity. However, the heavy weight of articulated bus cause damage to the road pavement of bus exclusive way, and will lead to increase the pavement maintenance cost. This study showed the transportation volume that the pavement design which is anticipated the operation by bus having bigger riding capacity enabled to decline the pavement maintenance cost. Second, if it is anticipated more transportation demand and bigger riding capacity of bus vehicle, it is showed that the cost reducing rate by paving concrete to the stopping part is more bigger than asphalt pavement on the all part. Finally, if it is estimated to increase more transportation demand and change to the bus having bigger riding capacity in operating period, it is showed that pavement design considering the riding capacity and the kind of pavement material enabled to reduce the increase of pavement maintenance cost.