

異なる諸外国の舗装設計基準において理論的 設計法を用いた場合の LCC 比較

研究第三部 主任研究員 渡部 健太郎

研究第三部 上席調査役 保田 敬一

1. はじめに

我が国が支援している海外の道路建設工事では施工延長は長いものの、橋梁、擁壁、カルバート等の構造物は比較的少ない。そのため、舗装工が全体工事費に占める割合が高く、アスファルト舗装の場合は特に材料単価が高い表層/基層(以下、AC 層)の厚さの設定が重要である。一方、途上国における舗装設計は自国の基準が無い場合は世界的に使用実績が多い米国基準を採用することが多い。しかし、米国基準以外、例えば熱帯地域あるいは乾燥地域等で採用されている設計基準を適用した場合、コスト面で有利な舗装構成となる可能性がある。このような考え方を相手国側に説明するためには、設計条件に応じた舗装構成の設定方法を明らかにした上で、各基準における舗装構造の耐久性やコストを比較検討し、把握する必要がある。

本論では、上記を踏まえ、日本を含む各種舗装設計基準を適用した場合における舗装構造の耐久性につ

いて理論的設計法を用いて評価し、ライフサイクルコスト(以下、LCC と略す)を比較した。理論的設計法を用いることで AC 層厚や路盤厚を変えた場合、どの箇所が設計上クリティカルになるかを容易に検討できる。

2. 比較検討方針

(1) 設計基準

比較検討で適用する基準は AASHTO Guide 1993(米国)、Overseas Road Note31(英国)、公路沥青路面设计规范(中国)とし、舗装設計便覧(日本国)¹⁾を参考とする。各設計基準の概要については表-1 に整理した。

(2) 設計条件

過去の JICA 業務よりアフリカ、中央アジア、南アジア、東南アジアの地域別に基本設計レベルで適用した設計条件(自然条件、設計期間、交通条件、路床の設計 CBR)を整理し、それらの採用値から現実的な値を用い

表-1 設計基準の概要

基準名称	AASHTO Guide 1993	Overseas Road Note31	公路沥青路面设计规范 (JTG G50-2017)	舗装設計便覧
作成国	米国	英国	中国	日本
設計法	経験的設計法	経験的設計法	力学的設計法 (ただし、等級が低く交通量が少ない路線は経験的な手法を許容している。)	経験的設計法/力学的経験的設計法
特徴	PSI (現在供用性指数) を指標として舗装の設計を行う。	熱帯諸国の実績にもとづき、英国の舗装技術を組み入れている。	設計指標には多層弾性理論を用いてひずみ値や応力を算定し評価している。	設計は舗装各層の厚さ設計と表層混合物の設計からなる。
荷重条件	80kN等価単軸荷重	80kN等価単軸荷重	100kN等価単軸荷重	49kN換算輪数
設計期間	20年 ※1	15年まで	15年まで ※道路等級により異なる	国道は20年等であるが、道路管理者が設定する。
信頼性	50~99.9%	記述なし	70~95%	50%、75%、90%
排水条件	安定処理をしない場合の路盤の層係数を修正するため、排水係数miを考慮している。	路床を地下水位より高くすること、表層のみならず路盤についても、横断勾配によって水を早く排出すること、透水性の路盤材の適用(路盤排水)について言及されている。	路床が湿潤な状態の場合、粒状材料を下層路盤または路床の置換え材としての使用を推奨している。また、多雨地域でセメント安定処理路盤を採用する際は、適切な排水対策を施すことを留意点としている。	総論(舗装設計施工指針)において重要性に触れるが具体的な記述はない。また、路盤内排水に関する記述はない。

※1 道路の区分および属する地域により設定

ることとした。各種基準の適用範囲を踏まえて、本論ではアフリカにおいて3か国程度を想定した設計条件を設定する。表-2に設計条件を示す。

表-2に示す設計条件にもとづき各基準における舗装構成を設定する。各層で使用する材料および条件については地域差が大きい過去JICA業務を参考に適用する。ただし、JICA業務での適用事例がない場合は各基準の平均的な値を適用する。なお、カタログから舗装構成を適用する場合は設計条件に応じた舗装構成を選択し、比較対象とする。

(3) 検討フロー

本論での検討フローを図-1に示す。

3. 理論的設計法による耐久性検証

(1) 解析方法

経験的設計法である T_A 法を用いるとAC層の厚さを薄くしても路盤厚を増せば同じ T_A 値とすることはできるが、理論的設計法を使って疲労破壊の概念を入れると寿命は異なる結果となる。逆に、同じ T_A 値でAC層を厚くして路盤を薄くすると路床の疲労破壊がクリティカルになるなどの検討が簡単にできる。設定した舗装構成に対する耐久性の評価については、舗装の疲労破壊を理論的手法によって評価する。舗装設計便覧¹⁾では解析手法として多層弾性理論モデルを採用している。多層弾性理論とは、アスファルト舗装を構成する各層の材料を弾性体と仮定し、舗装体の任意の点に生じる応力、ひずみ、および変位を弾性理論から計算し、解析する方法をいう¹⁾。具体的には、舗装の各層を弾性体と仮定し、一般的に円形等分布荷重を載荷した3次元問題として、応力、ひずみ、変位等を計算し、舗装を構成する材料が力学的に舗装にどのような影響を与えているかを評価するための理論であり、Burmisterの理論が有名である¹⁾。多層弾性理論モデルによる理論的設計法の具体的手順を図-2に示す。

舗装構造については図-3に示すようなモデル(多層弾性理論の舗装モデル)を作成し、任意点としてアスファルト混合物下層の引張りひずみおよび路床上面の圧

表-2 設計条件

地域名	アフリカ
舗装種別	アスファルト舗装
自然条件	降雨量多, 雨季有り
設計期間	15年
交通条件(W18)	9.0×10^6 ESAL
路床の設計 CBR	6%
信頼性	90%

※W₁₈: 供用期間内の18kip(=8.2t)換算の軸荷重通過数

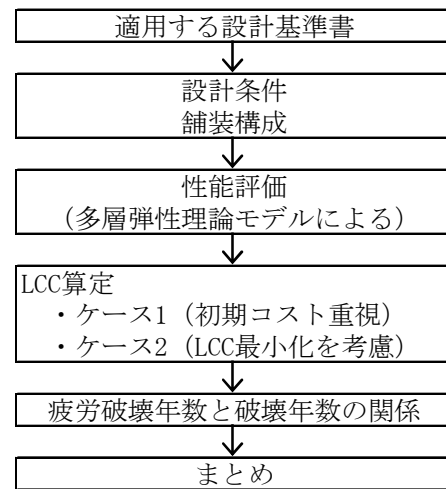


図-1 検討フロー

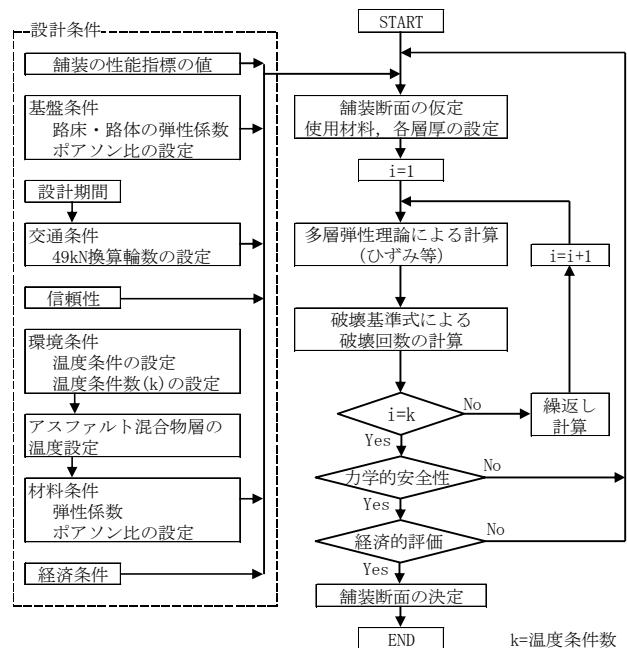


図-2 多層弾性理論モデルによる理論的設計法の具体的手順¹⁾

縮ひずみを算定する。

ひずみ ϵ は多層弾性理論の計算プログラム「GAMES (General Analysis of Multi-layered Elastic Systems)」を用いて算出した。GAMES は土木学会の舗装工学委員会の WEB 頁からダウンロードできる²⁾。 ϵ_t はアスファルト混合物層下面の引張りひずみ、 ϵ_z は路床上面の圧縮ひずみを示し、許容 49kN 輪数 N_{fa} 、 N_{fs} は、舗装設計便覧¹⁾P123~125 の暫定破壊規準式より算出した。また、舗装設計便覧¹⁾より、舗装の構造的な破壊が生じた時点破壊年数と設定した。暫定破壊基準式で用いる条件およびパラメータは、舗装設計便覧¹⁾P287 より引用し、表-3 に示す。

(2) 破壊年数の算定

破壊年数は式(1)にて算定した。

$$D = \frac{N_f}{\gamma} \cdot \frac{P}{N} \quad (1)$$

ここに、 D :破壊年数(年)、 N_f :許容 49kN 輪数(回) [N_{fa} 、 N_{fs} の小さい方を採用]、 γ :信頼度(90%)に応じた係数(=4.00)、 P :設計期間(15年)、 N :疲労破壊輪数(回)= 4.00×10^6 である。

すなわち、破壊年数は設計条件である疲労破壊輪数/設計期間を基本とし、許容 49kN 輪数が疲労破壊輪数よりも小さい場合、破壊年数は設計期間よりも短くなるとした。なお、疲労破壊輪数は設計条件の交通荷重 9.0×10^6 ESAL を 2.25 で除することで換算できる。

4. LCC 比較

(1) 検討条件

経済性の評価については、概算工事費から 40 年間における LCC を算定した。ここでは、最も簡易な舗装の LCC 算定例として、道路管理者費用の一部のみに着目した。新設建設費は材料単価のみで算定した。今回、使用した材料単価はアフリカ地区ではケニアのプロジェクト単価を参考とした(表-4 参照)。また、建設後の管理費用は新設建設費および補修費のみとし、補修費は算定した破壊年数に対する全層打換え費用のみ

計上した。これは、途上国では日本のように切削オーバーレイ等の補修技術が一般化されていないこと、国毎でひび割れ等の損傷に対する補修時期や工法も一定ではないことから、舗装の構造的な破壊に対しては全層打換えを行うものと想定した。

(2) 初期コストを重視したケース

同じ設計条件下において異なる設計基準を適用して設定した舗装構造について、疲労破壊に対する耐久性と LCC を含む経済性の比較を実施した。比較に際しては、初期コストを重視した場合と LCC を考慮して舗装

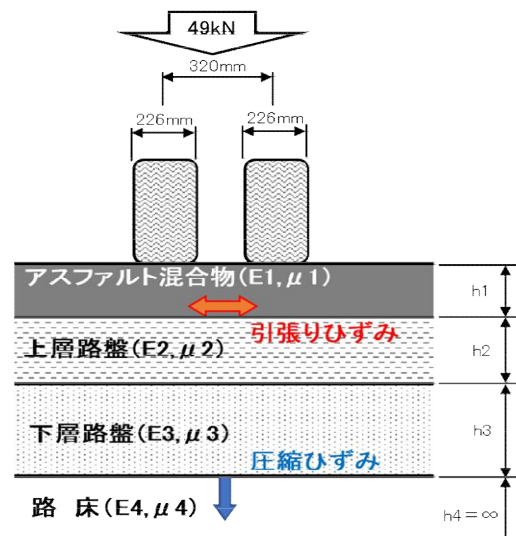


図-3 多層弾性理論の舗装モデル

表-3 暫定破壊基準式で用いる条件

・材料条件	年平均舗装温度20℃	
・地盤条件	CBR=6%	
項目	弾性係数(Mpa)	ポアソン比
As混合物	5,000	0.35
粒度調整碎石	300	0.35
クラッシュラン	200	0.35
路床	60	0.4

表-4 工事費算定に用いた材料単価

項目	材料	材料単価※ アフリカ
表層	密粒度アスコン(20)	10,744円(t)
基層	粗粒度アスコン(20)	10,207円(t)
上層路盤	粒度調整碎石(M-30)	2,847円(m ³)
下層路盤	クラッシュラン(C-40)	1,160円(m ³)

※材料単価はアフリカ地区1ksh=1.0744JPYで算出

構成を見直した場合の2ケースで実施した(図-4参照)。なお、ケースの見直しは設計条件よりカタログから舗装構成を選定するORN31は除くものとする。

初期コストを重視するケースでは各基準におけるAC層の厚さは最小値を適用し、同様に上層路盤の厚さは最小値を念頭にトータルで経済的になるように設定した。

初期コストを重視した4つの設計基準の比較検討結果を表-5に示す。さらに、LCCで評価してみることで、破壊年数および新設/補修費用から算定した。各基準における初期コストおよび破壊年数の値は初期コストが高いものが破壊年数でも大きい傾向にあり、LCCも同様の傾向であった。

(3) LCCを考慮したケース

次に、LCCを考慮して各基準の舗装構成の見直しを行った。ここでは破壊年数に影響するAC層の厚さを増加させる一方で、路盤の厚さは、例えばAASHTOであればSN値を満足する範囲で薄くし、破壊年数が最大となるように設定した。各基準の検討結果からAASHTOと中国の結果を表-6に示す。破壊年数は舗装構成を

見直した結果、当初の2~3倍程度に改善した。ORN31は5年であり、設計期間15年の1/3である。新設工事費は舗装構成の見直し後、各案当初よりも1割程度上昇した。LCCはORN31を除く各案で改善したが、AASHTOは当初の4割程度となった。

比較の結果、初期コストを重視するケースでは各基準ともにAC層の早期の疲労破壊が顕著であり、その結果LCCも高くなる。一方、LCCを考慮したケースではAASHTOと中国基準が特に破壊年数およびLCCに改善が見られる結果となった。

図-5に初期コストを重視したケースにおける年数-累積施工費のグラフを示す。各基準における初期コストおよび破壊年数の値は類似しており、40年間における

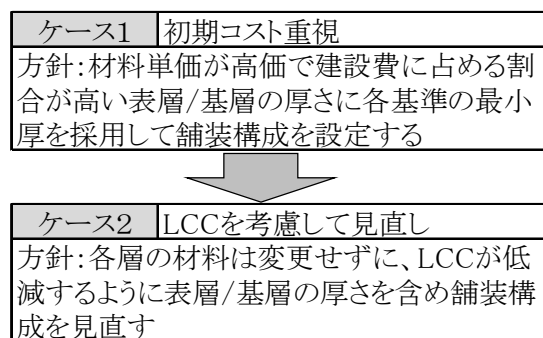


図-4 LCC 検討ケース

表-5 初期コストを重視したケース

基準名	AASHTO	Overseas Road Note31	公路沥青路面设计规范	舗装設計便覧	
設計法	経験的設計法	経験的設計法[カタログ]	力学的設計法	経験的設計法[TA法]	
舗装断面図	 必要SN値=4.59<4.60(設計SN値)			 目標TA値=25.5<25.6(設計TA値)	
理論的 設計法に よる 評価	ひずみ値 [単位:μ]	$\epsilon_t=2.01 \times 10^{-4}$ $\epsilon_z=3.03 \times 10^{-4}$	$\epsilon_t=2.03 \times 10^{-4}$ $\epsilon_z=4.30 \times 10^{-4}$	$\epsilon_t=2.01 \times 10^{-4}$ $\epsilon_z=2.54 \times 10^{-4}$	$\epsilon_t=2.03 \times 10^{-4}$ $\epsilon_z=3.37 \times 10^{-4}$
	許容49kN輪数 [単位:回]	$N_{fa}=5.48 \times 10^6$ $N_{fs}=23.2 \times 10^6$	$N_{fa}=5.25 \times 10^6$ $N_{fs}=6.43 \times 10^6$	$N_{fa}=5.48 \times 10^6$ $N_{fs}=44.3 \times 10^6$	$N_{fa}=5.25 \times 10^6$ $N_{fs}=15.7 \times 10^6$
	破壊年数	5年	5年	5年	5年
工事費 概算	新設建設費	3,876円/m ² (1.02)	3,725円/m ² (0.98)	3,974円/m ² (1.05)	3,802円/m ² (1.00)
	LCC [期間40年]	31,008円/m ² (1.02)	29,800円/m ² (0.98)	31,792円/m ² (1.05)	30,416円/m ² (1.00)

ライフサイクルコストに差は生じない結果となっている。また、図-6 に LCC を考慮したケースでの年数-累積施工費のグラフを示す。ORN31 を除く LCC は当初の約 1/2 に低減され、各基準で大きな差は生じない結果となった。なお、補修費(全層打換え)は破壊年数毎に計上した。

(4) 舗装のコスト削減に係る仕様および考え方

各基準において、As 混合物の最小厚さは ESAL に代表される交通荷重あるいは計画交通量に応じて設定されている。設計者は与えられた設計条件をもとに、AASHTO の場合は SN、日本の場合は T_A 値を満足する舗装構成を設定するが、考え方として初期コストを重視する場合、As 混合物層を最小厚に設定し、次に上層路盤を最小値以上とする等、材料単価の高い材料を極力薄く設定する傾向がある。今回、各基準による比較により、初期コストを重視する場合の破壊年数は与条件である交通荷重の値に関わらず、多くのケースで設計期間を満足しない結果となった。

理論的設計法を用いて評価した破壊年数は As 混合物層下面および路床上面のたわみ値より算定し、両者を比べて年数の小さい値とした。初期コストを重視する場合においては、As 混合物層下面のたわみ値が大きくなり、破壊年数に影響する結果が得られた。このことから、As 混合物層の厚さと破壊年数は関連しており、設計段階での層厚の設定が供用後の疲労破壊に起因

し、将来的な維持管理費に影響を与える可能性が高いと言える。

各基準による比較の結果、As 混合物層の厚さと破壊年数の関係や舗装構成の見直し後におけるライフサイ

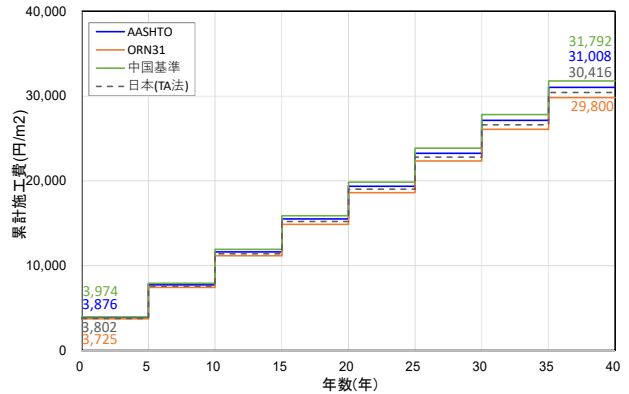


図-5 初期コストを重視したケースでの累積施工費

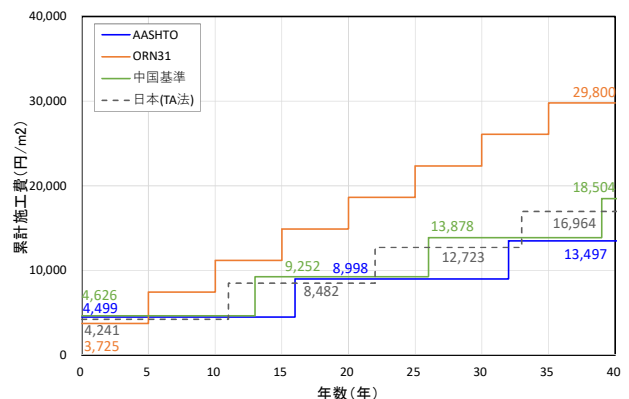


図-6 LCC を考慮したケースでの累積施工費

表-6 LCC を考慮して見直したケース(AASHTO、中国基準)

基準名	AASHTO		公路沥青路面设计规范	
	初期コスト重視	LCC考慮	初期コスト重視	LCC考慮
設計条件	初期コスト重視	LCC考慮	初期コスト重視	LCC考慮
舗装断面図	表層/基層: As コンクリート 10cm 上層路盤: 粒調碎石 16cm 下層路盤: クラシヤラン 45cm	表層/基層: As コンクリート 13cm 上層路盤: 粒調碎石 16cm 下層路盤: クラシヤラン 35cm	表層/基層: As コンクリート 10cm 上層路盤: 粒調碎石 15cm 下層路盤: クラシヤラン 55cm	表層/基層: As コンクリート 12cm 上層路盤: 粒調碎石 27cm 下層路盤: クラシヤラン 35cm
破壊年数	5年	16年	5年	13年
新設建設費	3,876円/m ² (1.00)	4,499円/m ² (1.16)	3,974円/m ² (1.00)	4,626円/m ² (1.16)
LCC [期間40年]	31,008円/m ² (1.00)	13,497円/m ² (0.44)	31,792円/m ² (1.00)	18,504円/m ² (0.58)

クルコストの縮減は類似した傾向であることが確認できたことから、設計段階において将来の維持管理を念頭において舗装設計の考え方はコスト縮減に寄与するものと考えられる。

5. T_A 法における疲労破壊輪数と破壊年数の関係

舗装計画交通量と表層+基層の最小厚さを示した内容に疲労破壊輪数を加えて表-7として整理した。この表から疲労破壊輪数毎に必要な T_A 値を求め、AC層の最小厚さを適用した舗装構成に対して破壊年数を算定し、グラフ化した(図-7参照)。AC層厚に規定の最小値を適用した場合、全体としてAC層下面の疲労破壊が舗装の寿命を決定し、かつ期待する設計年数を満たさない傾向にある結果となった。ただし、例えば、切削オーバーレイ等との補修方法を考慮した場合の評価では、結論は異なるものと考えられる。

表-7 舗装計画交通量と疲労破壊輪数

交通量区分(旧区分)	舗装計画交通量 (台/日・方向)	疲労破壊輪数 ※1 ($\times 10^6$)	表層+基層の最小厚さ (cm)※2
N7(D)	$T \geq 3,000$	$N \geq 35$	20(15)
N6(C)	$3,000 > T \geq 1,000$	$35 > N \geq 7.0$	15(10)
N5(B)	$1,000 > T \geq 250$	$7.0 > N \geq 1.0$	10(5)
N4(A)	$250 > T \geq 100$	$1.0 > N \geq 0.15$	5
N3	$100 > T \geq 40$	$0.15 > N \geq 0.03$	5
N2	$40 > T \geq 15$	$0.03 > N \geq 0.007$	4(3)

※1: 日本道路協会「舗装設計便覧」説明PDF # 50から読み取りによる。
<http://www.road.or.jp/event/pdf/hosou03.pdf>
 ※2: ()内は上層路盤に瀝青安定処理工法及びセメント・瀝青安定処理工法を用いる場合の最小厚さ。

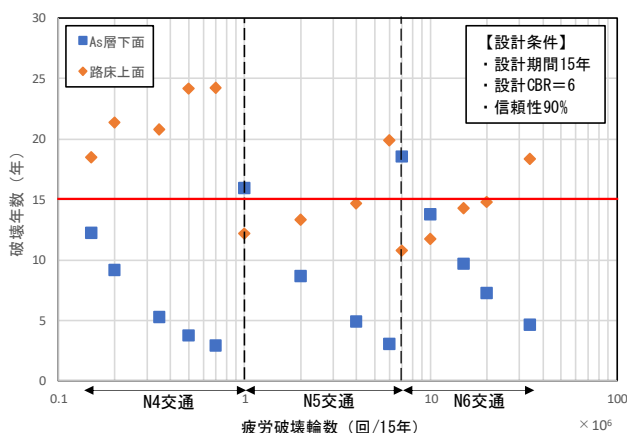


図-7 T_A 法による最低Ac層厚を用い場合の疲労破壊輪数と破壊年数の関係

6. おわりに

本論では米国、英国、中国、日本の舗装設計基準を海外で適用した場合舗装耐久性について理論的設計法を用いてLCCを比較した。得られた結果を以下に要約する。

- AASHTO および中国基準は初期コストを重視した場合、As 混合物層の早期疲労破壊が顕著となり、LCCも高い。同じ SN 値となるよう留意しつつ舗装構成を見直した結果、破壊年数は約 2.5~5 倍、LCC は 3~4 割程度となる。

- 基本設計段階では予算の関係上、初期コストを重視する傾向にあるが、理論的設計法を用いて比較を行うことにより、ライフサイクルコストの改善が期待できる。

前述の比較検討結果より、AC 層の最小値を採用した場合、各基準における破壊年数は T_A 法と類似した傾向であることから、設計段階において理論的設計法により舗装構造を評価することで、将来的な維持管理費を含めコスト縮減に寄与するものと考えられる。

今後の課題として理論的設計法のパラメータの信頼性向上、あるいは、材料や温度条件等は地域で異なるため適用するパラメータの分析が必要であるとともに、米国や南アフリカ等の既に理論的設計法を導入している国の設計法との比較も参考になると考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会: 舗装設計便覧, 2006.
- 2) 土木学会舗装工学委員会 WEB 頁
<http://www.jsce.or.jp/committee/pavement/downloads/>

上記は、平成 30 年度に実施した「道路橋示方書の途上国への普及に関する検討業務」(発注機関: 独立行政法人国際協力機構)の結果に基づいてとりまとめたものである。