

## 熱帯地域開発途上国におけるアスファルト舗装の轍掘れ発生要因に関する基礎的検証

横浜国立大学大学院 正会員 ○森山 素

横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院 正会員 早野公敏

### 1. はじめに

東南アジアやアフリカにおいては、基幹道路の轍掘れが大きな問題となっているケースが少なくない。特に、平均外気温が高く、過積載車両の通行が多い熱帯地域の開発途上国諸国では、アスファルト舗装の流動化による変形・塑性変形が散見される<sup>1)</sup>。特に、工業団地から港湾施設への接続道路や、内陸部における石油等資源エネルギーの流通路、都市部基幹道路の交差点等において、その発生が顕著である。本稿では、熱帯地域の途上国における轍掘れ発生は、以下3点の複合要因によるものとの仮説を立て、基礎的検証を試みた。

- (1) マーシャル安定度試験で求められた最適アスファルト量は、熱帯地域ではやや過剰であり、最適量よりも少ないアスファルト量において轍掘れへの耐性がある。
- (2) 過積載車両による影響を受ける。
- (3) 渋滞や地形条件、交差点等位置等に起因した過積載車両の低速走行により影響を受ける。

検証方法としては、仮説(1)については、アスファルト量3ケースを基準に3試験条件下でホイールトラッキング試験を実施した。具体的には、タンザニア国で実際に施工された道路に適用されたアスファルト合材の粒度に極力近い合材を再生、マーシャル安定度試験を基に最適アスファルト量(OAC)を決定した。続いて、OACとして得られた53%に近い50%を基準に0.5%および1.0%をマイナスしたアスファルト量の計3ケースについて、ホイールトラッキング試験を実施し、塑性変形の抵抗性を確認した。

表-1 仮説(1)を検証するための試験条件

試験番号	試験温度	輪荷重	載荷速度
(1)	60°C	686N	42回/分

表-1の試験条件は、通常のホイールトラッキング試験である。試験温度は、熱帯地域での実際の路面温度測定結果に基づき、試験方法で定められている規定内最高温度である60°Cで実施した。仮説(2)については、表2試験条件により検証した。上記(1)と同じ粒度のアスファルト合材を用いて、ホイールトラッキング試験の輪荷重・接地圧を大きくする。試験温度、載荷速度については(1)と同じ条件とする。なお、本ケースの輪荷重は、試験機の限界値である。

表-2 仮説(2)を検証するための試験条件

試験番号	試験温度	輪荷重	載荷速度
(2)	60°C	980N	42回/分

仮説(3)については、下記試験条件により検証した。上記(1)と同じ粒度のアスファルト合材を用いて、ホイールトラッキング試験の輪荷重を大きくし、更に載荷速度を通常の約57%の24回/分とすることで対応した。試験温度については(1)と同じ条件とする。なお、載荷速度については、通常状態の50%である21回/分に設定することを試みたが、24回より少なくすることはできなかった。

表-3 仮説(3)を検証するための試験条件

試験番号	試験温度	輪荷重	載荷速度
(3)	60°C	980N	24回/分

走行試験輪の荷重、接地圧および関連仕様は、以下のとおりである。

表-4 走行試験輪の関連仕様

載荷重量	接地圧	試験温度	走行方式
686N	0.63Mpa	60°C	クランク
980N	0.90Mpa	60°C	クランク

### 2. アスファルトコンクリート粒度とマーシャル安定度試験

タンザニアの道路で実施されたコア抜きおよびベトナムの道路に適用されたアスファルト表層混合物の配合設計データにより、アスファルト表層混合物の粒度を確認した。コア抜き対象としたタンザニアの道路は轍掘れ発生が顕著ではないが、ベトナムの道路は轍掘れ発生が顕著であった。後者について、轍掘れの程度は場所によってばらつきがみられるが、最大深は100mm程度である。サンプリングコアの粒度試験結果およびベトナムの配合設計実績より、いずれもほぼ同じ粒度であることがわかった。粒度分布を図1に示す。タンザニアの仕様は、ゴム樹脂系の改質アスファルトと各々異なっているが、ベトナムの仕様はストレートアスファルトであり、配合時の針入度とともに6080であった。それらと同様の粒度分布・針入度のアスファルト合材を日本にて再現生産した。なお、上記道路に適用されたアスファルト合材の最大骨材粒径は19mmで、層厚は各々65cm(タンザニア)および60cm(ベトナム)であった。コア抜きによるコアサンプリングによる性状試験結果を表-5に示す。

キーワード 轍掘れ、過積載車両、低速走行、最適アスファルト量、熱帯地域開発途上国

連絡先 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5 横浜国立大学大学院 E-mail: bendung@pekarado@yahoo.co.jp

表-5 タンザニアおよびベトナムの道路アスファルト混合物粒度

項目	タンザニア コア抜	ベトナム 配合材
層厚(cm)	65	60
最大密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.63	2.49
かさ密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.49	2.44
空隙率(%)	5.10	2.36
骨材空隙率(%)	15.9 <sup>(*)</sup>	13.0
安定度(kN)	10.6	14.3
フロー値(1/10mm)	52	48
針入度	15	N/A
軟化点	63.5	N/A
アスファルト量(%)	4.5	5.3
ふるい通過率	19mm	100
	13.2mm	99.5
	9.5mm	N/A
	4.75mm	51.3
	2.36mm	34.5
	0.6mm	22.9
	0.3mm	17.7
	0.15mm	11.7
0.075mm	5.7	

\* (I) : 骨材空隙率の値は、アスファルトビチューメンの密度を日本で再生した配合材に使用したものと同様の値 1.033g/cm<sup>3</sup>を用いて、下式により求めたもの。アスファルト量 (a)、かさ密度 (b) として：

$$\frac{a \times b}{1.033} + 5.10 \text{ (空隙率)} = \text{骨材空隙率}$$

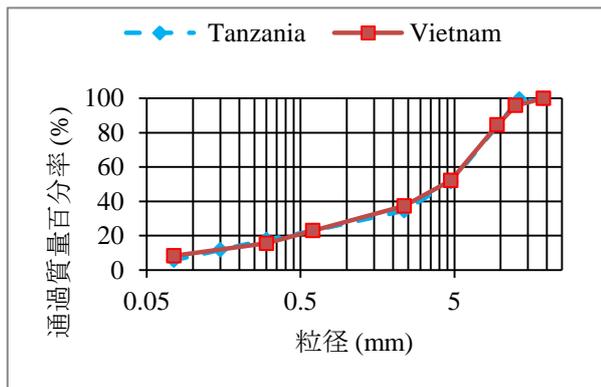


図 1. アスファルト表層混合物粒度

### 3. マーシャル安定度試験

タンザニアおよびベトナムの道路舗装に使用されているアスファルト表層混合物の粒度は、日本における密粒度ギャップアスファルトに近い。再現した粒度のアスファルト混合物を基に、OACを確認するためのマーシャル安定度試験（以下、マーシャル法と記載）を実施した。アスファルト量を 4.0% から 0.5% きざみで 6.0% まで変化した結果、OAC は 5.3% となった。ベトナムでの配合実績として、アスファルト量は 5.3% であり、マーシャル法で得られた粗粒度アスコンの OAC と一致している。一方、

タンザニアでのコア抜き結果より得られたアスファルト量は 4.5% であり、ベトナムのそれと比較して 0.8% 小さくなっている。

次に、アスファルト配合中の空隙率についてみると、マーシャル法で得られた OAC 5.3% における空隙率は 4.3% であるのに対して、タンザニアおよびベトナム道路の空隙率は各々 5.1%、2.4% であった。タンザニアでは、マーシャル法での打撃回数を 75 回とし、まず最低空隙率が 6% となる配合を決定、このときのアスファルト量を中心に ±0.5% のアスファルト量による 3 点で改めて試験を行っている。この試験では、マーシャル法と同様に供試体を作成するが、打撃回数は 200 回から 500 回程度とし、打撃後の最小空隙率が 3% 以上あればよいとされている<sup>2</sup>。他方、ベトナムでは、マーシャル法による 75 回の打撃回数を標準としており、打撃後の最小空隙率が 3% から 6% あればよいとされている<sup>3</sup>。日本では、設計アスファルト量の決定に際し、いわゆる共通範囲法を用いているが、米国では別の基準でアスファルト量を決定している。例えば、AI（米国アスファルト協会）や NAPA（全米アスファルト舗装協会）では、マーシャル法で考慮される密度、空隙率、飽和度、安定度、フロー値以外に、骨材空隙率 (VMA) を考慮して設計アスファルト量を決定している。

AI では、交通量に応じて設計基準値としての空隙率を定めているが、その空隙率に対して最低骨材空隙率を定めている<sup>4</sup>。骨材空隙率は、アスファルトコンクリート配合材の中に存在するアスファルトビチューメンと空気と考えられるが、舗装敷設直後の骨材空隙率は、終局状態まで締め固められた状態ではなく、依然として空気量の多い骨材空隙率である。交通解放されてもアスファルトビチューメンの容積は変化せず、徐々に転圧されることにより空気量が減少し、最終安定状態の骨材空隙率に落ち着くとされている<sup>5</sup>。骨材空隙率は、骨材の粒度分布によりおのずと決定され、振動等により十分締め固めた時点で骨材の空隙に相当する体積といえる。

マーシャル法では、マーシャルランマを用いるが、マーシャルランマによる 50 回もしくは 75 回の打撃回数では終局締め固め状態には成り得ず、密度が過少評価され、空隙率が過大に算出されるため、この時点では、最終骨材空隙率にはなっていないと考えられる。タンザニアの道路舗装において、轆掘れ発生が顕著でなかったのは、設計アスファルト量を決定した後、打撃回数を 200 回以上にすることで疑似終局状態を作り出し、打撃後の最終空隙率を定める配合を決定していることによると考えられる。これは、いわゆる Refusal Density 法と呼ばれる設計法である<sup>6</sup>。

一方、ベトナムの配合設計では、通常のマーシャル法による75回打撃時の空隙率が2.36%、骨材間隙率が13.0%となっているが、これは終局状態までには至っておらず、施工後の交通転圧により空隙率および骨材間隙率が徐々に低下していった結果、轍掘れ発生を顕著にさせた一因であると推測される。隙率が徐々に低下していった結果、轍掘れ発生を顕著にさせた一因であると推測される。低下していった結果、轍掘れ発生を顕著にさせた一因であると推測される。

4. ホイールトラッキング試験結果

ここでは、再現粒度のアスファルト合材について、マーシャル法で求められたOAC再現したアスファルト合材のアスファルト量を、45%を中心に±0.5%ずつ変化させた供試体について、ホイールトラッキング試験を荷重および載荷速度を変えて実施し、動的安定度の変化を検証した。その結果を表-6および図2に示す。表-6より、例えば本邦における都市内道路の動的安定度基準値である1,500回/mm<sup>7</sup>以上の条件を満たすのは、標準型(A)のアスファルト量40%および45%、重車両型(B)のアスファルト量40%および重車両低速型(C)のアスファルト量40%の計4ケースであった。

表-6 ホイールトラッキング試験結果 (1)

No.	載荷重量と走行速度	単位AS量 (%)	上載荷重 (N)	走行速度 (回/分)	動的安定度 (回/mm)
①	(A): 標準	40	0.69	42	4500
②		45			2250
③		50			1000
④	(B): 重車両標準速	40	0.98	42	2100
⑤		45			1189
⑥		50			887
⑦	(C): 重車両低速	40	0.98	24	1853
⑧		45			913
⑨		50			750

標準型(A)の場合は、アスファルト量が0.5%増えると、動的安定度はアスファルト量40%比で50%、約20%まで各々低下する。重車両走行型(B)および重車両+低速走行型(C)の場合は、同40%比で約55%、約40%まで各々低下する。標準型の場合、アスファルト量の増加に伴い動的安定度が大きく低下するが、重車両走行型および、重車両低速走行型の場合、特にアスファルト量が4.5~5.0%に変化する際は低下率が標準型の約半分になる。各アスファルト量における載荷重量と走行速度別の変化率を表-7にまとめた。

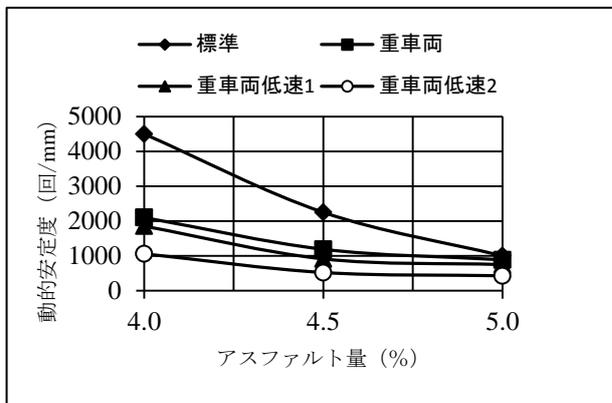


図2. アスファルト量と動的安定度の関係

表-7 動的安定度の変化率

単位アスファルト量 (%)	載荷重量と走行速度	動的安定度変化率 (%)
40	A型→B型	53
	A型→C型	58
45	A型→B型	47
	A型→C型	60
50	A型→B型	11
	A型→C型	25

(注)A型: 標準、B型: 重車両走行、C型: 重車両低速走行

アスファルト量が5.0%の場合、載荷重量増加や速度低下による動的安定度への影響が少ない反面、アスファルト量が5.0%より少ない場合は、影響が大きい。上浦は、舗装体の流動変形を確認するために、アスファルト量を変えてホイールトラッキング試験を行っている<sup>8</sup>。その結果、アスファルト量が40~50%の範囲では、動的安定度は1,500回/mm程度を示し、アスファルト量の多少による動的安定度の差は殆ど生じないとし、動的安定度については、アスファルト量よりも骨材の噛み合わせが主な影響因子であるとしているが、本検証試験においては、アスファルト量40~45%の範囲ではアスファルト量の多少に加え、上載荷重の大小によっても、動的安定度が大きく変化する結果が得られた。

前出の表-6に記した動的安定度は、以下の式で求まる<sup>9</sup>。

$$DS = 42 \times \frac{t2 - t1}{d2 - d1} \times C1 \times C2$$

低速走行 (C型) の場合、式中の値42をそのまま適用せずに、低速走行回数である24を適用すると、結果は表-8のとおりとなる。ここで、C1およびC2は補正係数で、ともに1.0である。24を適用して算出した動的安定度は、図2中の「重車両低速2」で示した。以上より、アスファルト量が5.0%の場合、輪荷重や走行速度の変化は、動的安定度に顕著な影響は与えない。他方、アスファルト量が4.5%および4.0%の場合、標準型(A)の走行から、重車両型(B)の走行形態となった場合、動的安定度が約50%低下することが確認できた。また、重車両型(B)から重車両低速型(C)への走行形態の変化においては、動的安定度は5~10%程度の低下となり、低下率としては小さいことが

わかった。ただし、重車両低速型(C)のケースで、動的安定度式の数値を変更して絶対値で捉えた場合は、重車両型(B)・重車両低速型(C)の走行タイプの変化による影響は12~30%程度の低下率であることがわかった。表9に、アスファルト量毎の変形率および圧密変形量を示す。

表-8 ホイールトラッキング試験結果(2)

No.	载荷と走行速度	単位AS量 (%)	上乗荷重 (N)	走行速度 (回/分)	動的安定度 (回/mm)
⑩	D:	40	098	24	1,059
⑪	重車両	45			522
⑫	低速	5.0			429

表-9 単位アスファルト量毎の変形率および圧密変形量

No.	载荷と走行速度	単位AS量 (%)	変形率 $\beta$ (mm/分)	圧密変形量 (mm)
①	A: 標準	40	0.01	1.60
②		45	0.02	1.27
③		5.0	0.04	1.92
④	B: 重車両標準 準速	40	0.02	1.49
⑤		45	0.03	1.98
⑥		5.0	0.05	1.75
⑦	C: 重車両低 速	40	0.02	1.76
⑧		45	0.05	1.98
⑨		5.0	0.06	2.18

上表より、変形の傾向としては、単位アスファルト量が多いほど载荷条件や走行速度によらず、変形率が大きい。また、重車両標準準速走行より、重車両低速走行になるに従い、変形率は大きくなる。一方、圧密変形量については、明確な傾向は把握できなかった。次に供試体各々の骨材間隙率および飽和度を算出、動的安定度と比較した。結果を表-10に示す。

表-10 ホイールトラッキング試験結果(3)

No.	単位AS量 (%)	骨材間隙率 (%)	飽和度 (%)	動的安定度 (回/mm)
①	40	180	50.2*	4,500
②	45	174	59.3*	2,250
③	5.0	168	69.2	1,000
④	40	179	50.8*	2,100
⑤	45	173	59.9*	1,189
⑥	5.0	169	68.6	887
⑦	40	181	50.0*	1,853
⑧	45	173	59.7*	913
⑨	5.0	168	68.5	750

骨材間隙率は、骨材粒度によっておのずと決定されるはずであるが、コンパクター等の振動を伴う機械により十分に締め固められる必要がある。骨材間隙率が高くても、舗装敷設完了後の交通転圧によって、将来的に徐々に空隙率が減少していくことが轍掘れ発生の遠因となっていくものと考えられる。特に、上表中\*印で示したよう

に、骨材空隙率が高いケースやアスファルト量が小さいケースでは、飽和度がAIの規定値に達していない状況が多くみられる。空隙率に着目しても、AIで規定された上限値を超過するケースがあることがわかった。今回実施した試験では、マーシャルランマによる締固めを50回で実施しているが、次なる課題として、refusal densityの考え方を基に、200回以上のランマ締固めにより、舗装敷設後の交通転圧による空隙率減少を予め考慮した状態を疑似的に作り出し、骨材間隙率と動的安定度の変化に着目していく必要があると考えられる。

## 5. 課題

マーシャル法で求められた最適アスファルト量よりも少ない値においては、動的安定度が増すことで轍掘れへの耐性は高まるが、同時に透水性も大きくなると考えられ、路盤・路床への影響を検討する必要がある。加えて、舗装表面温度を種々変化させた場合の試験・検討についても実施する必要がある。

## 6. まとめ

本基礎的検証試験で得られた知見を以下に示す。

- ① アスファルト量5.0%の場合、輪荷重や走行速度の変化は、動的安定度の変化に顕著な影響を与えないが、絶対値としては1,000回/mm以下であった。
- ② マーシャル法で求められた最適アスファルト量よりも少ない値において、動的安定度が増し、轍掘れへの耐性が高くなると考えられた。
- ③ 輪荷重を通常試験の1.42倍として作り出した過積載状態においては、アスファルト量が最適アスファルト量に近い場合、顕著な影響は認められないが、最適アスファルト量より少ない値では、動的安定度の低下が顕著であり、過積載車両通行の影響を受けやすいと考えられた。
- ④ 過積載車両の低速走行により、動的安定度は低下する。この場合、アスファルト量が4.5%よりも4.0%において、低下率が顕著であることがわかった。

<sup>1</sup> Yang H. Huang: Pavement Analysis and Design, pp.374, 2004

<sup>2</sup> 国際協力機構: 海外道路事業の注意点と提言(ドラフトファイナルレポート)、2012

<sup>3</sup> TCVN Vietnam National Standard No.8819, Table 3 Required Technical Criteria for Compact Asphalt Concrete, 2011

<sup>4</sup> 土木学会: 舗装工学の基礎、舗装工学ライブラリー、pp.131, 2012

<sup>5</sup> 郡司保雄: アスファルト舗装講座(アスファルト混合物の配合設計法)、pp.5

<sup>6</sup> Dr.S.K.Rao, J.K.Das, and Pinaki Roychowdhury: Asphalt Mix Design Refusal Density Approach for Heavily Trafficked Roads, Indian Road Congress Paper No.530, 2007

<sup>7</sup> 日本道路協会 舗装設計便覧、pp.50~pp.52, 2006

<sup>8</sup> 上浦正樹: 多層弾性理論と供用性を考慮した鉄道貨物ヤード舗装の設計および修繕維持に関する研究、長岡技術科学大学学位請求論文、pp.42, 1996

<sup>9</sup> 日本道路協会 舗装調査・試験法便覧、[3]-46, 2007