

9.5 舗装構造の理論設計の高度化に関する研究

研究予算：運営交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）

研究担当者：久保和幸、井上直

【要旨】

本研究は限られた予算で効率的な道路基盤整備を行うための舗装構造の設計方法の確立を目的としている。今年度も昨年度に引続き、交通条件および材料条件について検討を行った。交通条件では車両走行位置は車線幅や路肩幅といった道路構造と相関があることが分かった。また、車両走行位置分布は昭和 62 年以降大きな変化がないことが分かった。材料条件では国内外の文献調査の結果、拘束応力と含水比が路盤および路床の弾性係数に影響を与えることが分かった。また、拘束応力はアスファルト層が厚い場合は交通荷重の変化による影響をあまり受けないことが分かった。これら文献調査の結果を踏まえて、簡易な粒状材料の弾性係数試験法を提案した。

キーワード：理論設計法、車両走行位置分布、拘束応力、粒状材料の弾性係数試験

1. はじめに

平成 13 年に国土交通省都市・地域整備局長と道路局長より「舗装の構造に関する技術基準」¹⁾が通達され、設計法や使用材料、施工法を問わない性能規定化に向けた方針が示された。それを受けて舗装の自由な設計が行えるように現段階での理論的設計法を整理した「舗装設計便覧」²⁾が平成 18 年 2 月に発刊された。しかし、この理論設計法は従来の経験的な設計法（ T_A 法）と同等の設計ができるということに過ぎない。

そこで、本研究では限られた予算で効率的な道路基盤整備を行うための舗装構造の設計法の確立を目指して、アスファルト舗装、コンクリート舗装に関して既存の理論設計法をもとに不足している情報の整理、使用材料や実道での実態調査および実規模舗装による実験的検証を行い、より精度の高い信頼性に基づいた理論設計法を提案することを目的とする。

平成 19 年度は平成 18 年度に引続き、交通条件と材料条件について検討を実施した。交通条件ではコンクリート舗装の設計に用いられる主要な条件である車輪走行位置分布について検討を行った。材料条件では粒状路盤および路床の材料定数の設定方法について検討を行った。

2. 車両走行位置分布の検討

平成 18 年度は交通荷重の推移について検討を行ったが、平成 19 年度は現在のコンクリート舗装の構造設計において主要な交通条件である車輪の走行位置と走行頻度の関係について検討した。アメリカではアスファルト舗装の設計にも導入されており、日本でも舗装

断面の合理化に寄与することが考えられる。走行位置分布を考慮した場合の影響については今後検討する。

車輪の走行位置と走行頻度の関係は舗装の設計を行うたびに調査することが望ましいが、実際は困難である。そのため、舗装設計便覧に例示されている値を用いられている。しかし、舗装設計便覧で用いられている値の根拠となるデータは昭和 34 年から 37 年の実測結果であるため、現在の交通状況に合致しているか確認する必要がある。

そこで、車両の走行位置分布に関する調査結果をもとに車両走行位置と道路構造の関係を調べるとともに、走行位置分布の推移について検討を行った。

2.1 車両走行位置分布調査

車両走行位置と道路構造の関係を調べるため昭和 62 年に北陸地方整備局管内で実施された調査をもとに検討を行った。

2.1.1 車両走行位置分布調査の概要

今回分析に使用したのは昭和 62 年度に北陸地方整備局管内の直轄国道で交通流自動観測装置のセンサーマットを用いて調査された結果である。分析は調査が実施された 10 箇所のうち車線幅、路肩幅の異なる 6 箇所を選定して行った。分析に用いた調査場所を表-1 に示す。

表-1 分析に用いた調査箇所

No	調査場所	車線数	路線
1	国道8号 富山県射水市白石	2	下り
2	国道8号 石川県金沢市森戸	2	上り
3	国道8号 石川県白山市倉光	2	下り
4	国道8号 石川県小松市今江	2	下り
5	国道8号 石川県加賀市加茂	1	上り、下り
6	国道8号 石川県加賀市中代	1	上り、下り

2.1.2 車両走行位置と道路構造

石川県白山市倉光における車輪通過位置と外側車線から10cmごとの車輪通過頻度を図-1に示す。

図-1を見ると全車両走行位置分布および大型車走行位置分布とも概ね正規分布を示している。同一位置における車両通過頻度は大型車のほうが全車両に比べて2割程度大きくなっている。

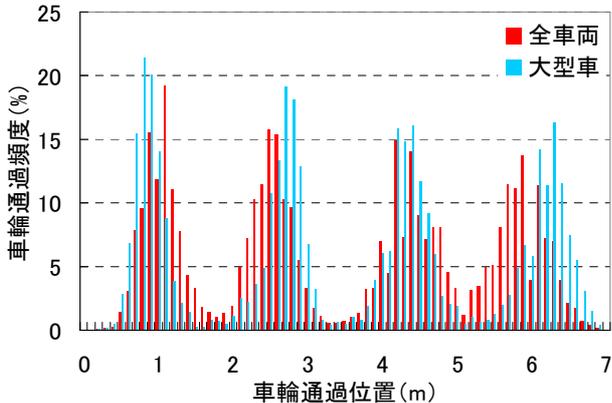


図-1 車両走行位置分布調査結果（白山倉光）

舗装の構造設計においては、大型車交通量が疲労破壊輪数に大きな影響を与えるため、大型車の走行位置について詳細な分析を行った。調査箇所の車線ごとの幅員、車輪間距離（外輪と内輪間の距離）、走行中心位置（外輪と内輪の中心位置）および車輪ごとの通過位置の標準偏差を表-2に示す。なお、表-2の走行中心位置は道路のセンターラインからの距離である。

表-2 大型車の車両走行位置分布調査結果一覧

No	方向	車線番号	幅員 (m)		車輪間距離 (m)	走行中心位置 (m)	車輪通過位置の標準偏差	
			車線	路肩				
1	下り	1	3.70	0.35	4.05	1.87	1.81	0.23
		2	3.30	0.50	3.80	1.87	1.85	0.27
2	上り	1	3.50	2.00	5.50	1.76	1.73	0.30
		2	3.50	0.60	4.10	1.83	1.85	0.25
3	下り	1	3.25	0.45	3.70	1.80	1.47	0.23
		2	3.55	0.60	4.15	1.84	2.03	0.30
4	下り	1	2.80	0.50	3.30	1.76	1.22	0.26
		2	2.80	0.00	2.80	1.89	1.49	0.23
5	上り	1	3.50	0.60	4.10	1.93	1.61	0.20
		下り	1	3.80	1.00	4.80	1.91	2.00
6	上り	1	3.60	1.50	5.10	1.93	1.90	0.28
		下り	1	3.65	1.25	4.90	1.91	1.98

車輪間距離については、路線を通行する車両の構造に起因するものであることから概ね1.8~1.9mの間となっている。走行中心位置および車輪通過位置の標準偏差については、道路幅員の影響を受けている可能性が考えられるため、回帰分析によってその影響を検討した。

車線幅・路肩幅と走行中心位置の関係を図-2に、車線幅・路肩幅と車輪通過位置の標準偏差の関係を図-3に示す。

図-2、図-3を見ると走行中心位置は車線幅と相関が

あり、車輪通過位置の標準偏差は路肩幅と相関があることが分かった。

但し、車両の走行中心位置や走行位置分布については、車線幅や路肩幅などの道路構造以外にも沿道の状況や交通状況、路面状況、気象状況などに影響される³⁾と考えられており、今回の結果からはこれら影響因子の影響については判断できない。しかし、今回の調査結果から車線幅・路肩幅等の道路構造と車両の走行位置分布の間に相関があることが分かった。

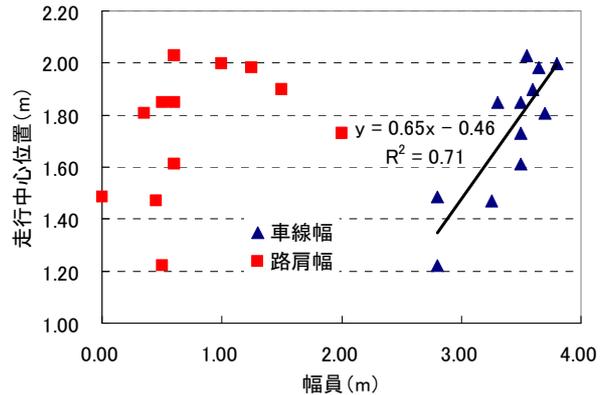


図-2 走行中心位置と車線幅・路肩幅の関係

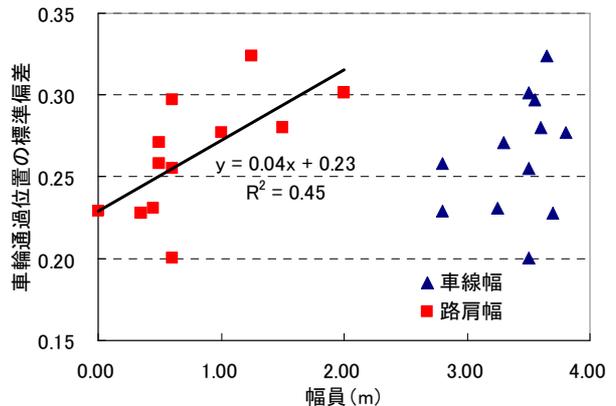


図-3 車輪通過位置の標準偏差と車線幅・路肩幅の関係

2.2 車両走行位置分布の推移

走行位置分布の推移を検討するために既往文献および調査の結果を整理した。検討に用いた調査結果の年代と場所を表-3に示す。

表-3 調査年代と調査箇所

年代	調査箇所
昭和34年	国道1号 滋賀県甲賀市
昭和48年	国道4号 宮城県仙台バイパス ⁴⁾
昭和62年	国道8号 北陸
平成19年	国道4号 栃木県那須塩原市

各年代の大型車の車輪走行位置（センターラインから30cmごと）と通過頻度の関係を図-4に示す。

設計便覧で示されている「車輪の走行位置と走行頻度の関係」のデータとなっている昭和34年の結果を見

ると、車輪通過位置はセンターライン付近に集中している。このような結果になった理由は、昭和34年当時は車線の分離が進んでいなかったためにセンターライン付近に集中したと考えられる。その後、昭和48年ごろには車線の分離化が進み、車輪の軌道はIWPとOWPの2つで山を示すようになった。昭和62年以降になるとセンターライン付近を通過する車輪はほとんど存在しなくなっている。また、昭和62年と平成19年のデータを比較した場合、両者に明確な差が見られないことから、昭和62年以降は走行位置分布に大きな変化が生じていないと考えられる。

このようなことから、平成に入ってから車輪走行位置分布を測定した地点以外については車輪走行位置分布を測定することが望ましいと考えられる。

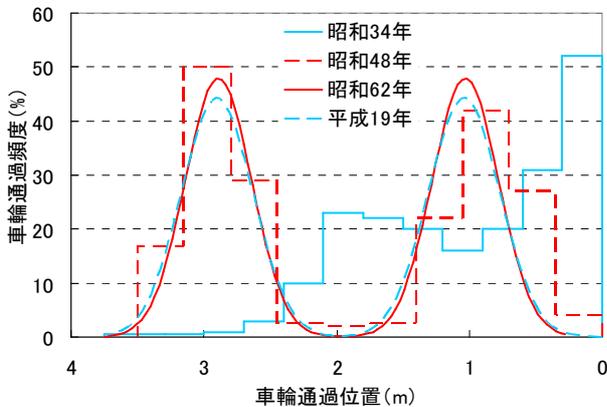


図-4 車輪の通過位置と走行頻度の関係

3. 路盤、路床の材料定数の設定法の検討

材料条件の検討として、平成18年度はアスファルト混合物の材料定数設定法について検討を行った。平成19年度は粒状路盤材および路床の材料定数設定法について検討を行った。

粒状材料は鋼鉄などと異なり完全な弾性挙動を示す材料ではない。舗装の設計を行う際には周囲を拘束され、弾性的な挙動を示すという仮定に基づいて計算している。したがって、粒状路盤や路床の弾性係数を室内で計測することは困難である。

そこで、国内外における舗装構造の理論的設計法に関する既往の研究成果を収集し、以下の項目について整理した。

- ・粒状路盤材、路床の材料定数の試験方法
- ・路盤、路床の材料定数に影響を与える要因

3.1 粒状路盤材・路床の材料定数の試験方法

路盤材料および路床の材料定数の測定方法は「材料としての変形係数を求める方法」と「層としての変形

を求める方法」がある。また、それぞれに動的に荷重する方法と静的に荷重する方法がある。表-4に国内のそれぞれの代表的な試験方法および海外での主な試験方法を示す。

表-4 粒状材料の材料定数測定方法

国内	材料の係数	静的	CTV試験
		動的	レジリエントモデュラス試験
	層の係数	静的	平板荷重試験
		動的	FWDによるたわみ測定
海外			動的平板荷重試験

3.1.1 レジリエントモデュラス試験

理論設計で用いる弾性係数を室内で求めるための最も一般的な室内試験であるレジリエントモデュラス試験について説明する⁵⁾。

レジリエントモデュラス試験は図-5にある試験装置を使って、荷重時間と休止時間を合成したサイクルで繰り返し荷重を行って弾性係数の一つであるレジリエントモデュラスを求める試験である。

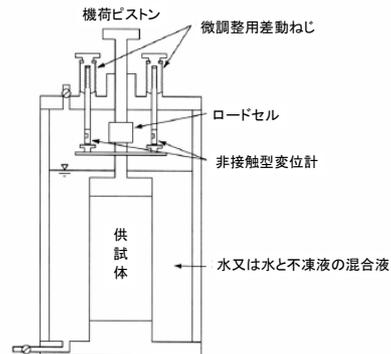


図-5 レジリエントモデュラス試験装置

軸応力と拘束圧の差である偏差応力を変えてレジリエントモデュラスを求め、供試体に垂直にかかる応力の和である主応力和(θ)とレジリエントモデュラス(Mr)の関係式(式-1)のK1およびK2を算出する。そして、実際に掛かると想定される主応力和を入力してレジリエントモデュラスを算出する。

$$Mr = K1 \cdot \theta^{K2} \dots (式-1)$$

しかし、レジリエントモデュラス試験は人力による供試体作成のため締固めエネルギーの統一が難しく、供試体ごとの締固め度(密度)に若干のバラツキが生じたり、繰り返し回数が多いため試験に時間がかかるなどの欠点がある。また、試験装置が高価であるため現場で標準的に利用するのは難しい。

3.2 路盤・路床の材料定数に影響を与える要因

粒状路盤および路床の材料定数は多くの要因の影響を受けると考えられる。そこで、文献調査等から材料定数に影響を与える要因を調べた。その結果、時間、

拘束応力、含水比の影響が大きいことが分かった。

3.2.1 時間の影響

AASHTOデザインガイド⁷⁾によると、載荷速度の影響は車両の走行速度だけでなく、その材料が舗装構造のどこに位置しているかによっても異なるとされている。一般的には舗装の深い位置であれば材料に生じる応力は遅くなり、載荷時間も浅い位置に比べて遅れる。しかし、データが十分でないことからアスファルト混合物の場合を除いては設計で考慮されていない。

平成18年度に土木研究所の舗装走行実験場で行った荷重車による載荷時間の調査結果からも図-6にあるように路床の下面になるほど荷重への反応が鈍くなり、荷重の影響時間が長くなることを確認している。

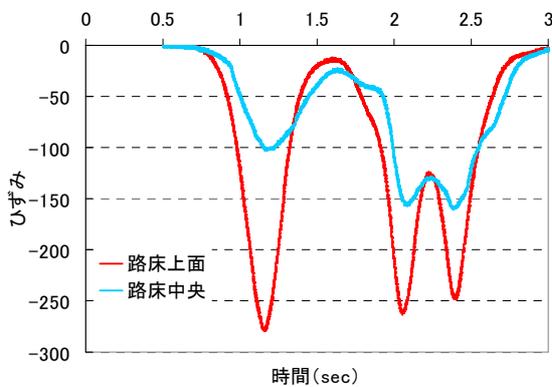


図-6 路床上面と中央のひずみと時間の関係

3.2.2 拘束応力の影響

材料定数を設定する際に影響を与える要因として最も大きな要因が拘束応力である。カナダのオンタリオ州において23地区から5種類の材料を選定してレジリエントモデュラス試験が実施された⁸⁾。試験結果を図-7に示す。

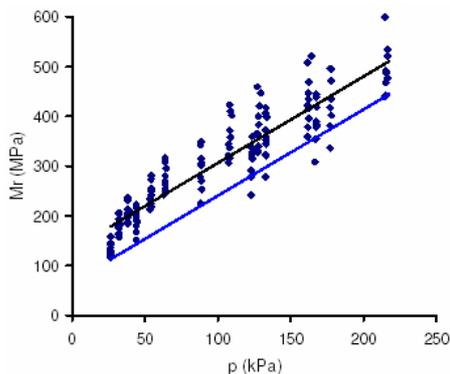


図-7 レジリエントモデュラス試験の結果 (全データ)

個別の粒状材料の結果を見ても図-7と同様の傾向を示しており、拘束応力とレジリエントモデュラスは直線関係にあることが分かった。

日本の粒状路盤の拘束応力を静的構造解析ソフト

(GAMES)により算出した。計算に用いた材料定数を表-5に、断面を表-6に示す。また、計算の着目点は図-8のとおりである。

表-5 計算に用いた材料定数

材料名	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
表基層 (20°C)	5,000	0.35
As安定処理 (20°C)	3,500	0.35
粒調碎石	300	0.35
クラッシュラン	200	0.35
路床	10CBR	0.40

表-6 計算断面

交通量区分	設計 CBR	アスファルト層		粒度調整碎石 (M)	クラッシュラン (C)
		表基層	安定処理		
N ₃	3	5	-	15	20
	4	5	-	15	15
	6	5	-	10	15
	8	5	-	10	10
N ₄	3	5	-	15	35
	4	5	-	20	25
	6	5	-	10	30
	8	5	-	15	15
N ₅	12	5	-	10	20
	3	10	-	25	30
	4	10	-	15	35
	6	10	-	10	30
N ₆	8	10	-	15	15
	12	10	-	10	15
	3	10	8	25	40
	4	10	8	20	35
N ₇	6	10	8	20	20
	8	10	9	15	15
	12	10	9	10	10
	20	10	8	-	15
	3	15	10	35	40
	4	15	11	25	35
6	15	10	15	35	
8	15	10	10	30	
12	15	8	-	35	
20	15	8	-	20	

単位: cm

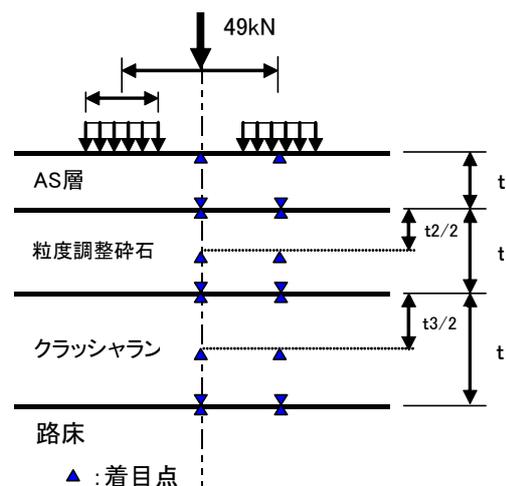


図-8 計算の着目点

交通量区分N₃断面とN₇断面の結果を図-9、図-10に示す。なお、算出した拘束応力は各層の上面、中央、下面での各計算結果に土圧を加えたものである。また、

アスファルト層の単位体積質量を 2.3kN/m^3 、粒度調整砕石層の単位体積質量を 1.9kN/m^3 として計算している。

計算結果を見て分かるように交通量区分 N_3 断面では深さによって拘束応力が大きく変化しているが、交通量区分 N_7 の断面では深さによる変化はほとんどなく概ね 100kPa 以下になっている。交通量区分の小さい断面ほど拘束応力の変化が大きくなり、 N_6 断面は N_7 断面と同じように 100kPa 以下となっていた。

このような現象が生じた理由としては N_6 断面や N_7 断面ではアスファルト層が十分に厚いため、交通荷重の分散効果や衝撃の緩和によって、変化の大きい交通荷重の影響が N_3 断面や N_4 断面に比べて小さくなったからだと考えられる。

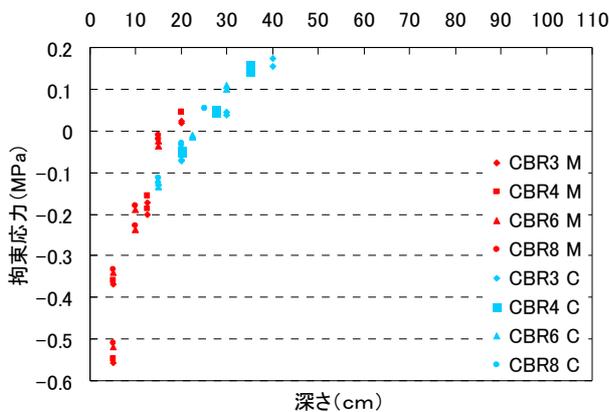


図-9 N_3 断面における主応力和

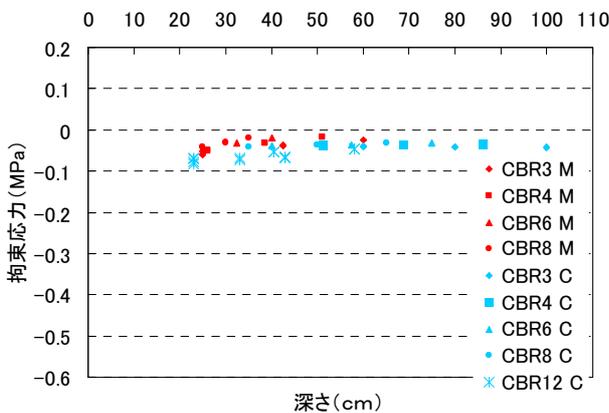


図-10 N_7 断面における主応力和

以上のようなことから直轄国道などのアスファルト層が厚い構造となる道路では拘束応力の変化を考慮なくても良いことが分かった。しかし、アスファルト層が薄い箇所については交通荷重の変化による影響を受けるため、拘束応力の設定が重要になる。

3.2.3 含水比の影響

カナダのオンタリオ州でのレジリエントモデュラス試験の一種類の材料の結果を図-11 に示す。各供試体は最適含水比の $\pm 2\%$ 程度で作成されている。

図-11 にあるように最適含水比より含水比が大きいほどレジリエントモデュラスは小さくなっている。この結果は他の材料でも同様の傾向を示している。このことから含水比を適切に評価する必要があることが分かった。

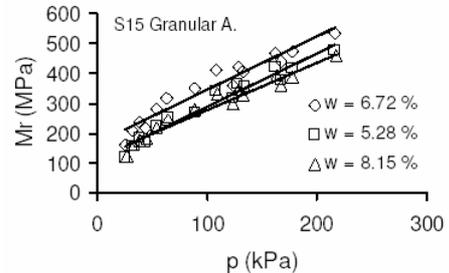


図-11 レジリエントモデュラス試験の結果

4. 簡易な材料定数試験方法の提案

文献調査の結果をもとにして、粒状路盤材および路床の材料定数試験方法を検討した。

4.1 試験方法の検討

現在、粒状路盤材および路床の材料定数を設定するための室内試験としてレジリエントモデュラス試験が行われているが、試験結果のばらつきが大きく、試験装置が高価なことから現場で標準的に行うのは難しい。そこで、CBR 試験供試体を使用した簡易な試験法を検討した。今回検討した試験法は静的な試験であるが、アスファルト層が厚い場合は交通荷重による拘束応力の変化が少ないことが分かったため、実際の交通状況を反映できていると考える。

4.1.1 試験方法

試験器具は CBR 試験で使用する器具と同じものを使用する。モールドは 150mm モールドで、有孔底版とし、穴の直径は 2mm 以下とする。測定装置を図-12 に示す。

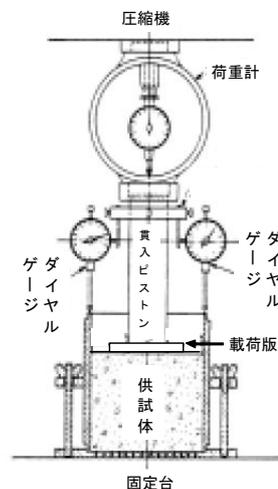


図-12 貫入量測定装置

供試体は CBR 試験の供試体作成方法に準じて作成する。

以下に試験手順を示す。

- ① 供試体の表面の浮石やろ紙を取り除いて載荷版を中央に載せる。
- ② 貫入ピストンが正確に載荷版の中央にくるように供試体をセットし、貫入ピストンと載荷版と密着させる。この場合の荷重は 0.05kN 以下とし、これを試験のゼロ荷重とする。
- ③ 載荷装置の荷重計の読みを記録するか、ゼロに合わせる。
- ④ ピストンに 1mm/min の速さで荷重をかけ、荷重が所定の荷重の時に載荷を止め、貫入量の読みを記録する。荷重計の読みが所定値になる前に貫入量が 5mm に達した時はその時の荷重と貫入量を記録する。
- ⑤ 荷重を除き、ダイヤルゲージの読みが安定したら貫入量を記録しておく。
- ⑥ 再び、ピストンに 1mm/min の速さで荷重をかけ、④、⑤を繰り返す。
- ⑦ 試験後の供試体をモールドから押出し、含水比を求める。

4.1.2 試験結果の整理

弾性係数の計算は以下の手順で行う。

- ① 貫入試験の結果から求めた荷重を載荷版の断面積で除して荷重強さを計算する。
- ② 貫入量の平均値を計算し、供試体高さからひずみを求める。
- ③ 各繰り返し載荷、除荷のサイクルにおける荷重強さ、ひずみから (式-2) により弾性係数を計算する。
- ④ 1 サイクル目を除いた変形係数の平均値を計算する。

$$E_r = p / \varepsilon \quad \cdots \text{(式-2)}$$

ここに、 E_r : 弾性係数 (MPa)

p : 荷重強さ (MPa)

ε : ひずみ

$$E_r = a \cdot p \cdot \pi (1 - v^2) / (2 \cdot d) \quad \cdots \text{(式-2.1)}$$

ここに、 E_r : 弾性係数 (MPa)

a : 載荷版の半径

p : 荷重強さ (MPa)

v : ポアソン比

d : 載荷版直下の復元変位 (mm)

4.2 簡易試験法の実施

粒状路盤材の粒度調整砕石、切込砕石、再生切込砕石、路床土で簡易試験を実施し、弾性係数を算出した。試験結果を表-7 に示す。路盤材料は JIS 道路用砕石の基準を満足する材料を、路床土は土木研究所構内の舗

装走行実験場で使用されていたものを採取し、使用した。

表-7を見ると各材料とも大きなばらつきはないことから試験の精度に問題はないと考えられる。

表-7 簡易試験の結果

材料名	No	乾燥密度 (g/cm ³)	締固め度 (%)	含水比 (%)	弾性係数 (MPa)
粒度調整砕石 (M30)	1	2.242	100.9	3.8	468.4
	2	2.221	100.0	3.7	467.7
	3	2.222	100.0	3.8	492.4
	平均	2.228	100.3	3.8	476.2
切込砕石 (C40)	1	2.208	99.5	3.6	510.9
	2	2.190	98.6	3.4	531.5
	3	2.193	98.8	3.5	496.6
	平均	2.197	99.0	3.5	513.0
再生切込砕石 (RC40)	1	1.955	98.5	9.3	593.7
	2	1.929	97.3	9.5	585.0
	3	1.929	97.2	10.0	619.4
	平均	1.938	97.7	9.6	599.4
路床	1	0.994	93.0	37.9	73.5
	2	0.969	90.6	40.3	94.8
	3	0.972	90.9	40.1	82.5
	平均	0.978	91.5	39.4	83.6

路盤では 3 種類すべての材料の簡易試験結果が舗装設計便覧に示されている弾性係数の範囲 (100~600MPa) に入っている。但し、舗装設計便覧で示されている粒度調整砕石および切込砕石の代表値 (粒度調整砕石 300MPa、切込砕石 200MPa) を大きく上回っている。また、通常は粒度調整砕石の方が切込砕石より弾性係数が大きくなると考えられているが今回の試験結果では逆になっている。このような試験結果になった要因が簡易試験条件によるものなのか、材料特性によるものなのかは今回の結果だけでは検証できない。

路床の結果を見ると現在の設計で推定値として用いられている 10CBR (91MPa) に近似しており、良好な試験結果であると言える。

以上のようなことから検証が必要な課題はあるものの簡易試験は材料定数試験として使用できるものであるということが出来る。

今後は様々な試験条件で簡易試験を実施し、詳細に試験条件などを整えていく必要がある。

5. まとめ

本検討で得られた成果をまとめると以下のとおりである。

車両走行調査結果

○ 車両走行中心位置は車線幅と相関があり、車輪通過位置の標準偏差は路肩幅と相関がある。

○ 車両走行位置分布は舗装設計便覧に示された調査の年代である昭和 34 年以降大きく変化していること

から実際に計測することが望ましい。

文献調査の結果

- 粒状路盤、路床の弾性係数は載荷時間、拘束応力、水分によって変化する。
 - アスファルト層が厚い場合には交通応力の影響が小さくなり、深さに関係なく拘束応力が一定になる。
- 文献調査の結果を踏まえて、粒状材料の材料定数を設定するための簡易試験を提案した。

今後は車両走行位置分布がアスファルト舗装断面に与える影響を明らかにするとともに、粒状路盤材および路床の試験データを収集し、試験精度を検証する必要がある。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説、2001.9
- 2) (社) 日本道路協会：舗装設計便覧、2006.2
- 3) 牛尾俊介、井町弘光：「車輪の横方向軌跡分布がわだち掘れに及ぼす影響について」、第14回日本道路会議一般論文集、pp181-182、1981.10
- 4) 福田正、遠藤成夫、堀川達司：「車輪走行位置の調査結果とその影響」、第12回日本道路会議一般論文集、pp161-162、1977.9
- 5) (社) 日本道路協会：「路盤材・路床土のレジリエントモデュラス試験方法」、舗装調査・試験法便覧、第4分冊、pp[4]55-[4]66、2007.6
- 6) (社) 土木学会：「多層弾性理論による舗装構造解析入門」、p64、2005.4
- 7) American Association of State Highway and Transportation Officials：“AASHTO Design Guide”，2002
- 8) D. F. E. Stolle, P. Guo, Y. Liu：“RESILIENT MODULUS PROPERTIES OF TYPICAL GRANULAR BASE MATERIALS OF ONTARIO”，Sea to Sky Geotechnique 2006, 2006.10

A STUDY ON IMPROVEMENT OF THEORETICAL STRUCTURE DESIGN METHOD FOR PAVEMENT

Abstract : This study aims at establishment of the design method in order to construct road pavements efficiently under the budget limitation. The traffic load and material properties, which are input conditions for theoretical structure design of pavement, were examined. The structure of roads, such as lane width and road-shoulder width, affects a position of vehicles. A position distribution of vehicles is almost changeless in 1987 and afterwards. As a result of investigating domestic and foreign reference, it turns out that confining pressure and water content the elastic modulus of a subbase course and subgrade. When an surface course and asphalt binder course depth is thick, it turns out that the influence of the traffic load given to confining pressure is small. The simple examining method of the material constant of granular material was proposed from the result of reference investigation. A simple and easy elastic modulus test of granular material was proposed from the result of reference investigation.

Key words : theoretical structure design, position distribution of vehicles, confining pressure, elastic modulus test of granular material