

9. 1 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、寺田剛、堀内智司

【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。今年度は平成 20 年度に引き続いてコンクリート（以下、Co とする）舗装の構造設計で使用する表の検証等を実施した。

Co 版上下面の温度差と発生頻度の表の検証では、様々な気候を代表する全国 9 都市で 6 版厚の Co 版供試体を設置し計測を開始した。路盤の設計曲線の検証では、路盤材がクラッシュランの場合、現在の設計曲線の信頼度が 85% となることを確認した。また、舗装構造細目の見直しでは、アスファルト中間層を有することで疲労度やひずみが小さく段差の進行を抑制すること、鉄網を有することでひび割れ発生後のひび割れ幅を抑制する可能性があり、理論的設計方法でこれらの効果を考慮する必要があることがわかった。また、支持力係数の計算値と実際に構築した路盤の実測値とを比較し、計算に使用する弾性係数を求めるレジリエントモジュラス試験やその代替試験（H19 に提案）の有効性を確認した。そして、路盤強度のばらつきを考慮した設計に向けて支持力係数を調査した。

キーワード：理論的設計方法、コンクリート舗装、温度差の発生頻度、路盤厚の設計曲線、アスファルト中間層

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方法を整理した「舗装設計便覧」²⁾が平成18年2月に発刊された。しかし、この理論的設計方法は経験にもとづく設計方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、アスファルト舗装とコンクリート（以下、Co とする）舗装に関して既存の理論的設計方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的設計方法を提案することを目的とする。

平成21年度は、Co舗装の構造設計で使用する温度差の発生頻度や路盤厚の設計曲線の表の検証、舗装構造細目であるアスファルト中間層と鉄網の有効性の検討、弾性係数の算出方法の検証、構築路盤の強度の精度の確認を実施した。なお、本年度の研究は、(独)土木研究所、東京農業大学、石川工業高等専門学校、(社)セメント協会の共同研究の一環として行われたものである。

2. Co版上下面の温度差とその発生頻度の例の検証

設計条件で環境条件の一つである、Co版上下面の温度差とその発生頻度について、実測値が求められない場合に使用する舗装設計便覧に掲載の例を検証する。

平成20年度に土木研究所構内のCo舗装（版厚25cm）で検証した結果、便覧例よりも温度差が大きな発生頻度が高くなる傾向がみられることが確認された。また、便覧例では、温度差による地域分類が不明確であり適用がしにくい。そこで、日本全国の様々な気候を代表する地域にCo舗装の供試体を設置し、2010年2月から1年間、温度測定をして発生頻度を算出する予定である。

対象地域として、竹内³⁾らの気温と全天日射量による分類の代表する6都市（北海道苫小牧市、宮城県多賀城市、石川県河北郡、福岡県久留米市、鹿児島県鹿児島市、沖縄県豊見城市）と、気温の日振幅が14℃を超える日数の異なる3都市（茨城県つくば市、愛知県名古屋市、広島県広島市）を対象とする。（図-1）

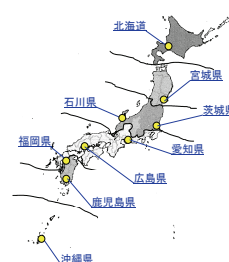


図-1 対象地域

9.1 舗装構造の理論設計の高度化に関する研究

Co版供試体の寸法は図-2のように底面を30cm四方、高さ(版厚)を6種類(15cm、20cm、23cm、25cm、28cm、30cm)とする。土部または砂利部の上に、厚さ20cm以上の路盤材(RC40)を敷き、その上にCo版供試体を設置し、側面は路盤材をかぶせてある。(図-3)温度測定位置は上部、中央、下部の3点とし、上部と下部は表面から5mmの位置の温度は表面温度と同程度であると考えられるので、上部の温度から下部の温度を引いたものを温度差として算出した。

ここでは、北海道苫小牧市と茨城県つくば市の2地域について述べる。2010年2月～2010年3月のほぼ同時期の1ヶ月間の温度差の発生頻度について算出した結果を、それぞれ表-1、表-2に示す。値を0より大きい場合と0.4以上の場合の2段階に色分けしている。北海道は茨城県と比べて、温度差が大きくなる頻度が小さい傾向があることがわかった。よって、地域差があるため、今後全国でのデータを蓄積する必要がある。

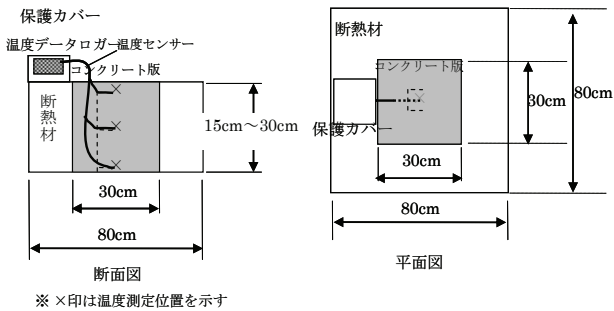


図-2 Co版供試体の寸法



図-3 Co版供試体の設置例(愛知県)

表-1 温度差の発生頻度(北海道、2010.2.20～2010.3.19)

温度差(°C)	版厚(cm)					
	15	20	23	25	28	30
19(18～19.9)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17(16～17.9)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15(14～15.9)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13(12～13.9)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11(10～11.9)	0.000	0.006	0.006	0.012	0.013	0.012
9(8～9.9)	0.021	0.028	0.022	0.039	0.060	0.031
7(6～7.9)	0.102	0.093	0.123	0.087	0.082	0.108
5(4～5.9)	0.090	0.108	0.098	0.108	0.117	0.099
3(2～3.9)	0.153	0.170	0.157	0.175	0.158	0.195
1(0～1.9)	0.635	0.594	0.594	0.578	0.570	0.554
-1(0.1～2.0)	0.491	0.415	0.412	0.409	0.385	0.361
-3(2.1～4.0)	0.349	0.355	0.366	0.350	0.354	0.341
-5(4.1～6.0)	0.160	0.186	0.170	0.191	0.194	0.203
-7(6.1～8.0)	0.000	0.043	0.052	0.050	0.067	0.086
-9(8.1～10.0)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009

表-2 温度差の発生頻度(茨城県、2010.2.8～2010.3.7)

温度差(°C)	版厚(cm)					
	15	20	23	25	28	30
19(18～19.9)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17(16～17.9)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.004
15(14～15.9)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.031
13(12～13.9)	0.000	0.000	0.009	0.009	0.076	0.063
11(10～11.9)	0.004	0.022	0.039	0.030	0.046	0.059
9(8～9.9)	0.091	0.094	0.108	0.078	0.053	0.063
7(6～7.9)	0.091	0.089	0.065	0.109	0.091	0.082
5(4～5.9)	0.107	0.152	0.134	0.117	0.091	0.118
3(2～3.9)	0.163	0.143	0.151	0.170	0.163	0.145
1(0～1.9)	0.544	0.500	0.496	0.487	0.437	0.435
-1(0.1～2.0)	0.800	0.609	0.518	0.446	0.474	0.396
-3(2.1～4.0)	0.200	0.339	0.407	0.441	0.433	0.484
-5(4.1～6.0)	0.000	0.051	0.075	0.102	0.093	0.103
-7(6.1～8.0)	0.000	0.000	0.000	0.011	0.000	0.017
-9(8.1～10.0)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

3. 路盤厚の設計曲線の検証

路盤厚を決定する際に使用する路盤厚の設計曲線の中でクラッシュランの設計曲線の信頼性について検討した。

土木研究所舗装走行実験場中ループ内でのCo舗装施工時に路床・路盤表面で小型FWD試験を実施した。小型FWD試験は、図-4で示す路盤厚26cmの1～5工区と路盤厚30cmの7～11工区の各工区において、路床・路盤上面の隅角部4箇所、中央部1箇所の計5箇所で行われ、関根ら⁴⁾の換算式からK₃₀を算出した。路盤支持力効果(路盤のK₃₀/路床のK₃₀)と路盤厚について、既存の開削調査結果とともに路盤厚設計曲線上にプロットした結果を図-5に示す。図の凡例でCはクラッシュランの設計曲線を示す。

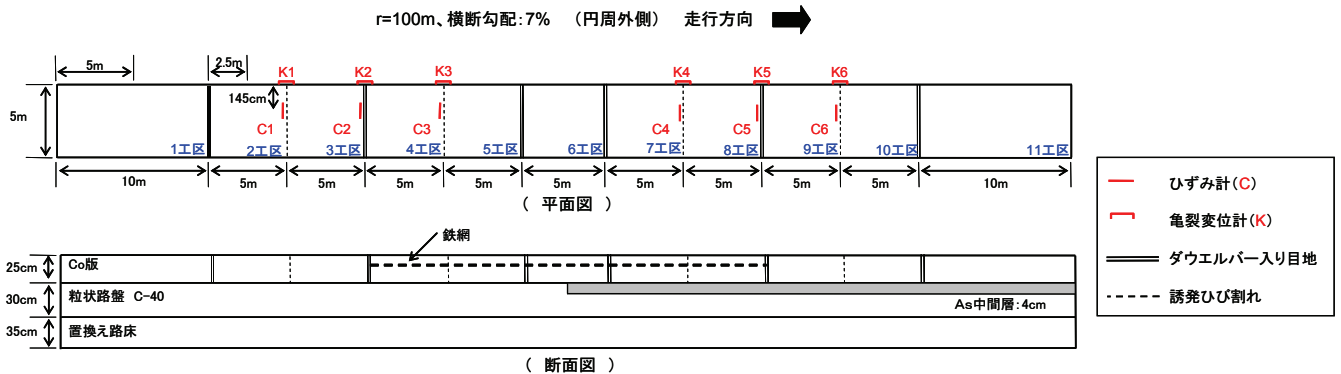


図-4 土木研究所舗装走行実験場中ループ内のCo舗装工区

図-5に囲み線(破線)で示したように、測定データは路盤厚毎にグルーピングできる。ここで、路盤厚20cmのグループはデータ数が少なく、データの正規性の確認が困難なことからこのグループは除外した。

各グループにおいてデータの正規性を確認した上で、データが特性値を下回る確率Pが5%、10%、15%となるように、各確率に応じた路盤支持力効果をそれぞれ算出した。この路盤支持力効果の値をプロットし、確率ごとに回帰直線を引いたものを図-6に示す。Cの設計曲線は、P=15%とP=10%の回帰直線の間に位置していることがわかる。つまり、設計曲線に従ってCの路盤厚を決定した場合、K値が規定値を下回る確率は10%~15%程度ということになり、Cの設計曲線は少なくとも85%の信頼性を有していると言える。

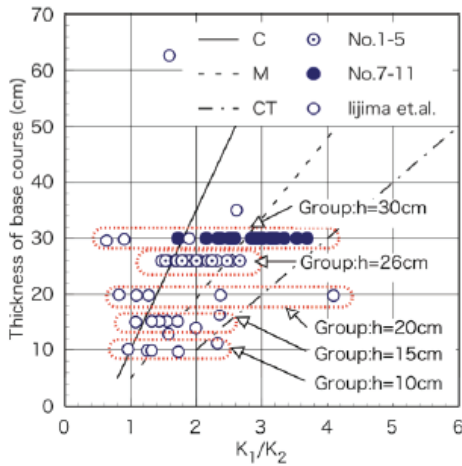


図-5 路盤厚設計曲線と実測データの関係

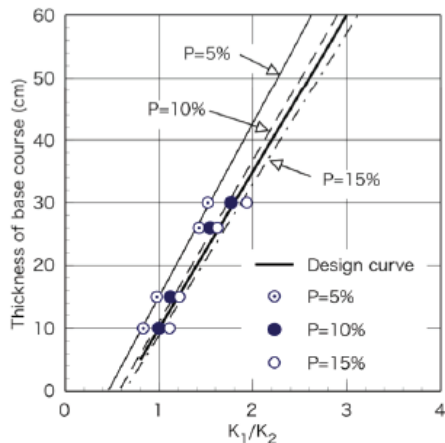


図-6 クラッシュランの設計曲線と特性値との関係

4. 舗装構造細目の検討

土木研究所舗装走行実験場中ループ内に試験施工したCo舗装(図-4)において促進載荷試験を平成19年度から連続して実施しており、平成21年度までの成

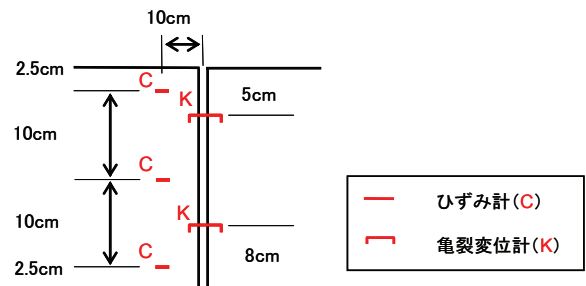
9.1 舗装構造の理論設計の高度化に関する研究成果からアスファルト中間層と鉄網の理論設計方法での取り扱いについて検討した。

4.1 アスファルト中間層

Co版の温度差とその発生頻度、疲労度、ひずみ、段差量、たわみの観点からアスファルト中間層の有効性について検討を行った。

(1) Co版の温度差とその発生頻度

土木研究所舗装走行実験場中ループ内のCo舗装(図-4)において、車輪通過部の横目地部(C2、C5)および誘発ひび割れ部(C3、C4)で、図-7に示すようにCo版の表面より2.5cm、12.5cm、22.5cmの位置の温度とひずみを1時間に1回測定する。これらのデータからCo版表面および底面の温度を推定する。



(横目地部・誘発ひび割れ部の断面図)

図-7 ひずみ計・亀裂変位計の位置

平成20年度の結果に平成21年度のデータも追加し、温度差の発生頻度を算出した結果を表-3に示す。横目地部は誘発ひび割れ部に比べて温度差が大きい頻度が低くなる傾向がみられた。これは、横目地部に目地材が注入されており、気象状況等の影響が少ないためだと考えられる。中間層の有無で比較すると、横目地部および誘発ひび割れ部ともに、中間層を有する方が有しない場合より温度差が大きい頻度が低くなる傾向がみられた。これは、中間層は粒状路盤材と比べ、断熱・保温効果があるためと考えられる。

表-3 Co版上下面の温度差とその発生頻度

温度差(°C)	頻度			
	誘発ひび割れ部		目地部	
	中間層:無C3	中間層:有C4	中間層:無C2	中間層:有C5
19(18~19.9)	0.007	0.005	0.003	0.000
17(16~17.9)	0.022	0.019	0.017	0.011
15(14~15.9)	0.046	0.042	0.041	0.030
13(12~13.9)	0.067	0.063	0.061	0.056
11(10~11.9)	0.099	0.099	0.088	0.083
9(8~9.9)	0.124	0.119	0.119	0.121
7(6~7.9)	0.127	0.132	0.135	0.133
5(4~5.9)	0.139	0.143	0.143	0.147
3(2~3.9)	0.156	0.162	0.164	0.165
1(0~1.9)	0.214	0.217	0.229	0.255
-1(0.1~2.0)	0.232	0.206	0.259	0.289
-3(2.1~4.0)	0.395	0.383	0.407	0.435
-5(4.1~6.0)	0.286	0.308	0.268	0.242
-7(6.1~8.0)	0.083	0.099	0.064	0.033
-9(8.1~10.0)	0.003	0.004	0.002	0.000

9.1 舗装構造の理論設計の高度化に関する研究
れる。

(2) 疲労度

誘発ひび割れ部および横目地部における表面および底面の推定温度を使用し、表-4 の条件で疲労度が最大となる縦自由縁部の疲労度 (FD) を算出した結果を表-5 に示す。中間層の有無で比較すると、中間層を有する方が有しない場合より、疲労度が小さくなる傾向がみられた。これより、中間層を設けることで耐久性が向上する可能性があることが示された。

表-4 疲労度の計算条件

項目		条件
設定された舗装の目標	舗装の設計期間 (年)	20
	信頼度 (%)	考慮しない
走行頻度	路肩の有無	十分な路肩有り
	片側の車線数(車線)	2車線
コンクリート舗装の種類		普通コンクリート
応力算出位置		縦自由縁部, 横目地部
Co版の条件	版厚 (cm)	25
	曲げ強度 (MPa)	4.4
	弾性係数 (MPa)	30,000
	ポアソン比	0.2
	温度膨張係数 (1/°C)	1.0.E-05
	横収縮目地間隔 (m)	10m
交通条件	輪荷重群と通過輪数	舗装設計便覧参照
	温度差が正または負のときの大型車の比率	郊外部
	タイヤ接地半径	舗装設計便覧参照
路盤支持力係数 K_{75} (MPa/m)		100
疲労度算定		舗装設計便覧参照
コンクリートの疲労破壊確率 (%)		50, 20

表-5 疲労度の計算結果

計算条件			疲労度			
応力算出位置	疲労度算定式*	破壊確率 (%)	誘発ひび割れ部		目地部	
			'08年+'09年	'08年+'09年	'08年+'09年	'08年+'09年
			C3:中間層無	C4:中間層有	C2:中間層無	C5:中間層有
縦自由縁部	式(a)	—	92.69	71.00	50.51	16.05
	式(b)	50	0.95	0.79	0.66	0.39
		20	5.91	5.00	4.24	2.61

* 舗装設計便覧 式 (6.3.7), 式 (6.3.8)

(3) ひずみ

1ヶ月毎に任意の1日を選び、Co版内部の温度とひずみの関係性を調べた。測定箇所の上、中、下の温度を横軸に、ひずみを縦軸にプロットした結果の一例について図-8 に示す。プロットした点はほぼ直線状のっており、近似曲線の相関係数は高いことがわかる。中間層の有無で比較するため、各測定箇所の上、中、下の傾き (ひずみ/舗装体温度) の平均をとって時系列で整理した結果を図-9 に示す。中間層の有無で差が見られ、中間層を有する方が有しない場合より、傾きは小さく、温度変化に対するひずみ変化が小さいことがわかった。これは、Co版とアスファルト中間層が一体化しひずみが小さくなった可能性があると考えら

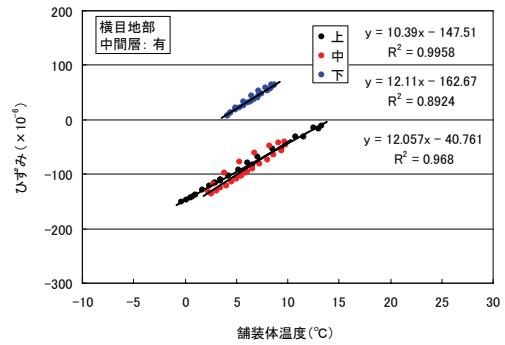


図-8 温度とひずみの関係 (2009/1/1, C5)

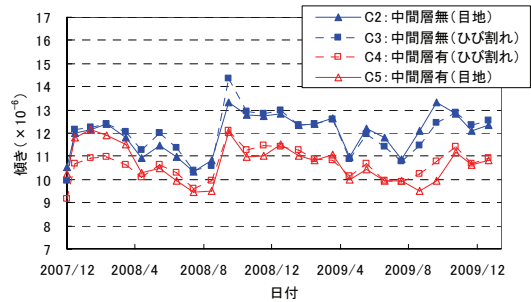


図-9 傾きの経時変化

(3) 段差量について

Co舗装においてひび割れが発生した場合、降雨時にひび割れ部に水が浸透し、車両の通過に伴いCo版下層の路盤が洗掘され空洞化を起し、Co版に段差が発生する。土木研究所舗装走行実験所中ループ内のCo舗装において、この段差の発生を促進させるため、Co版の誘発ひび割れ部 (2工区と3工区の間、9工区と10工区の間) に荷重車走行時に降雨を模擬した散水試験を実施した。降雨を模擬した散水を実施するため、図-10のように誘発ひび割れに沿って横断方向に3箇所穴を空け、Co版以下の路盤に水を浸透させた。散水量については、荷重車10万輪 (49kN換算輪数) 走行期間中に年間降雨量1,500mm相当量の散水を実施した。

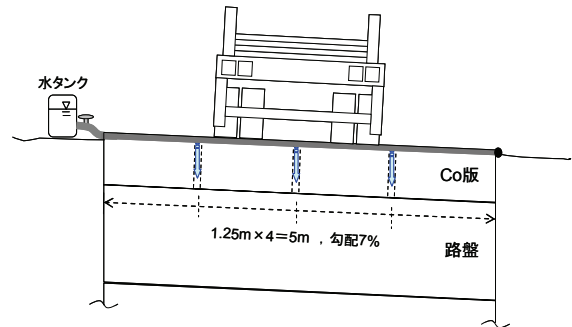


図-10 散水方法

9.1 舗装構造の理論設計の高度化に関する研究
 対する有効性が確認された。

荷重車走行時に散水を行った2箇所について、荷重車の通過輪数10万輪ごとに段差量の測定を行った。結果を表-6に示す。中間層無工区のひび割れ部について、わずかではあるが中間層有工区と比較して段差量の進行が測定された。この結果より、ひび割れ部において中間層を有することで段差量の進行を抑制できることが確認された。

表-6 段差量の測定結果

通過輪数(万輪) (散水開始以降)	段差量(mm) [※]				段差 増加量 (mm)
	0	20	30	40	
測定日	'09/7/14	'09/10/22	'09/12/24	'10/2/25	
①ひび割れ部 (中間層無, 鉄網無)	0.2	0.9	1.3	1.3	1.1
②ひび割れ部 (中間層有, 鉄網無)	0.1	0.1	0.2	0.4	0.3

※段差の測定は、舗装調査試験法便覧S031(スケールによる方法)により実施した。段差量は、横断方向に50cmピッチで9点測定し、平均値を示した。

(4) たわみ量

49kN換算輪数で10万輪ごとにFWD測定を実施した。FWDにより測定された誘発ひび割れ部のたわみ量(D₀)を図-11に示す。中間層の有無で比較すると、中間層を有することでひび割れ部のCo版のたわみ量を低減できている結果が得られており、中間層が路盤の支持力に影響を与えていることが確認できた。

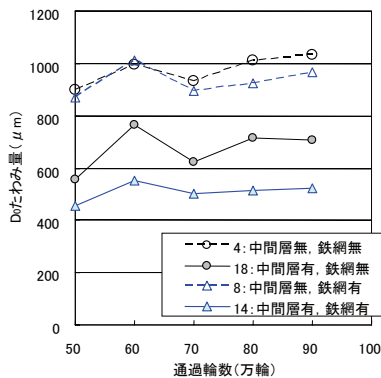


図-11 FWD試験の結果(ひび割れ部、D₀たわみ量)

4.2 鉄網

Co版の誘発ひび割れ部の亀裂変位、荷重伝達の観点から鉄網の有効性について検討を行った。

(1) 亀裂変位

誘発ひび割れ箇所において、鉄網がひび割れ幅を抑制しているかどうかを確認するため、亀裂変位量の経時変化を測定した。結果を図-12に示す。図-3において、中間層有工区および中間層無工区についてそれぞれ鉄網の有無を比較してみると、鉄網を有する方が亀裂変位量は小さくなる(K1>K3、K6>K4)。以上より、誘発ひび割れ箇所において、鉄網を有することでひび割れ幅が抑制されており、鉄網のひび割れ幅抑制効果に

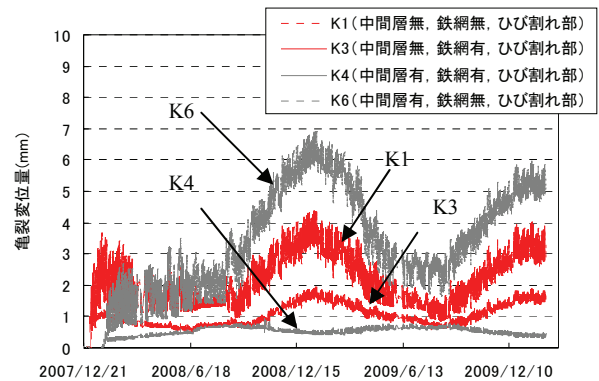


図-12 亀裂変位量の経時変化

(2) FWDについて

49kN換算輪数で10万輪ごとにFWD測定を実施した。FWDにより測定された誘発ひび割れ部の荷重伝達率を図-13に示す。鉄網の有無にかかわらず30%以下と低くなっており、鉄網については、ひび割れ後は荷重伝達の効果を期待できないことが確認できた。

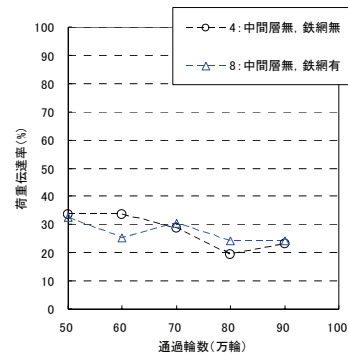


図-13 荷重伝達率(ひび割れ部)

5. 弾性試験算出試験の検証

弾性係数を算出する方法として、レジリエントモジュラス試験があるが、現場試験はできず作業も困難であるため、代替となる簡易な試験が求められているため、平成19年度に簡易試験を提案した。その簡易試験の有効性を確認するため、図-14に示す路盤を構築し、路盤の支持力係数について、実測値と、レジリエントモジュラス試験や簡易試験により得られた弾性係数をGAMESに入力して得られた理論値とを比較した。

支持力係数について、舗装設計便覧に掲載されている値の中央値を使用して算出した結果も追加して結果を表-7に示す。中央値は実測値よりも大きめに見積もる恐れがあることがわかった。また、レジリエントモジュラス試験と簡易試験はおおよそ同程度の値を示している。また、セメント安定処理の工区で、実測値と理論値とが一致していないことがわかった。

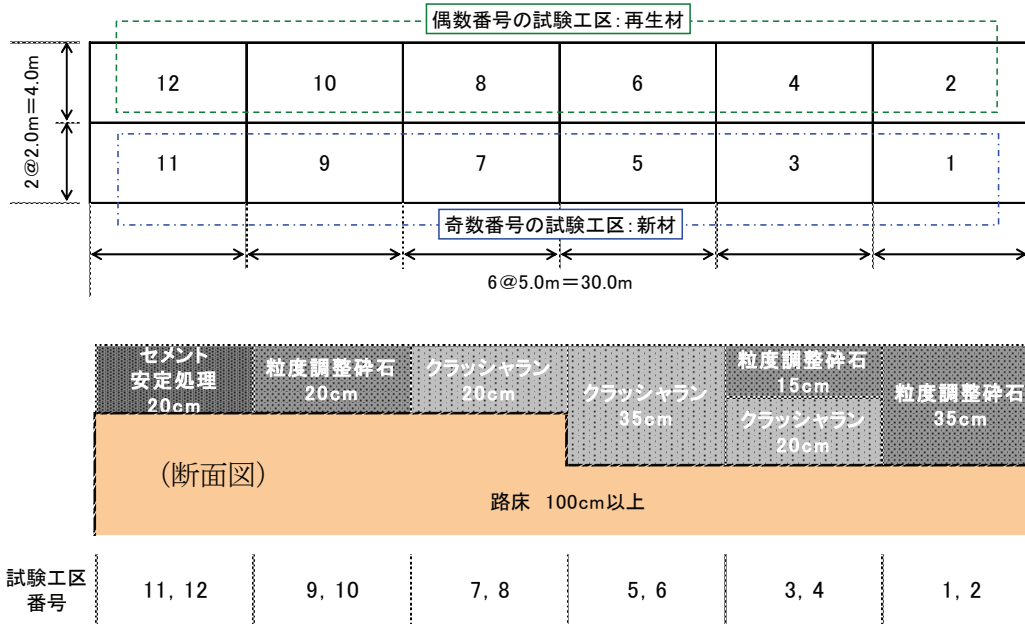


図-14 試験ヤード

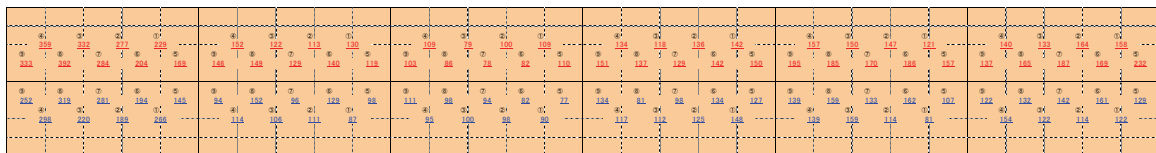


図-15 平板載荷試験の測定点

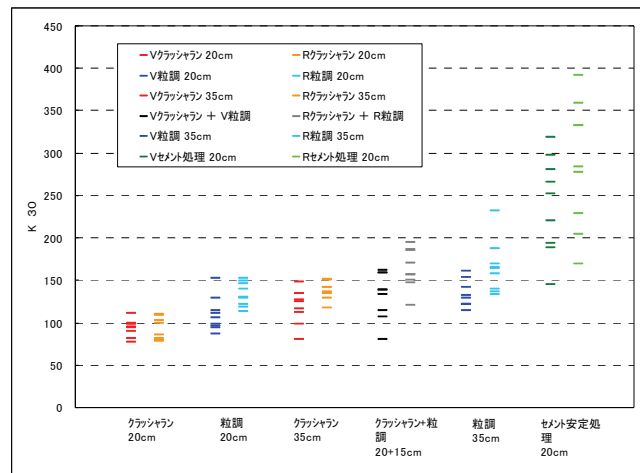


図-16 平板載荷試験結果

表-7 支持力係数 K_{30} について実測値と各理論値との比較

工区	実測値	代表値	簡易試験	レジモジ
1	133	215	91	106.4
2	165	215	91	108.7
3	133	200.3	87.4	103.9
4	163	200.3	92	95
5	120	191.2	84.9	108.7
6	138	191.2	92.8	109.1
7	94	144	58.1	70.3
8	95	144	62.1	70.6
9	110	155.2	61.2	69.2
10	133	155.2	61.2	70.3
11	240	198.2	63.4	90.1
12	287	198.2	64.2	83.8

6. 路盤強度のばらつきの検討

路盤の支持力係数のばらつきを考慮した設計方法の確立のため、5. で構築した路盤において、図-15のように各工区9箇所ずつ平板載荷試験を実施した。図-16に示した結果から、セメント安定処理で大きく値がばらつくことがわかる。施工精度や試験精度が影響していると考えられる。

7. 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。

温度差の発生頻度の検証

○Co 版上下面の温度差は地域により異なっており、今後全国でデータの蓄積が必要である。

路盤厚の設計方法の検証

○クラッシュランの路盤厚の設計曲線の信頼性は85%であることを確認した。

構造細目の有効性の検証

○アスファルト中間層と鉄網の有効性を確認した。設計の際に中間層の効果を定量的に扱うため、今後さらに詳細な調査が必要である。

弾性係数算出試験の検証

○レジリエントモジュラス試験とその代替試験の簡易試験において、おおよそ同等の結果が得られた。精度を高めるため、さらに荷重条件等を検討する必要がある。

路盤強度のばらつきの検証

○セメント安定処理の路盤の支持力係数はばらつくことがわかった。このようなばらつきを考慮した設計方法を確立するため、今後、施工精度や試験精度が支持力係数へ与える影響を考慮する必要がある。

今後は引き続き、Co 舗装に荷重を載荷し、供用性やCo 版の設計、構造細目等を見直す予定である。

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) 竹内他、気象観測データを用いたコンクリート舗装版上下面温度差の試算、土木学会第60回年次学術講演会、第V部門、V-104、2005.9
- 4) 関根他、重錘落下による鉄道盛土の締固め管理方法、土と基礎、48-4、pp.13-16、2009

A STUDY ON IMPROVEMENT OF THEORETICAL STRUCTURE DESIGN METHOD FOR PAVEMENT

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2006-2010

Research Team : Road Technology Research Group

(Pavement)

Author : KUBO Kazuyuki

TERADA Masaru

HORIUCHI Satoshi

Abstract : This study aims at establishment of the design method in order to construct road pavements efficiently under the budget limitation. The coefficient used for the design of concrete pavement was verified this year.

In order to verify the frequency of difference between the temperature of top concrete slab and that of bottom concrete slab, small size concrete pavement was placed in nine different kinds of climate. It was showed that the design curve of crusher-run base course has 85% reliability. The effectiveness of the asphalt intermediate course and steel meshes was confirmed in several points. And the effectiveness of the Resilient modulus test and the alternative test, which was proposed in 2009, was also confirmed. The distribution of K-value was measured.

Key words : Theoretical structure design, Concrete pavement, Frequency of generating of a difference of temperature, Design curve of crusher-run base course