

ポーラスコンクリートを適用した 駐車場舗装の構造と配合設計手法

松本 大二郎¹・本松 資朗²・小関 裕二³・鈴木 徹⁴・山田 優⁵

¹ 正会員 日本道路公団 試験研究所 舗装研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

² 正会員 日本道路公団 試験研究所 舗装研究室主任 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

³ 正会員 博(工) 大林道路株式会社 技術研究所 開発研究室長 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸 4-640)

⁴ 正会員 工修 大林道路株式会社 技術研究所 開発研究室主任研究員 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸 4-640)

⁵ 正会員 工博 大阪市立大学大学院 工学研究科 教授 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

高速道路のサービスエリア等休憩施設の駐車場には、アスファルト舗装を基本とし、表層に高機能舗装用混合物の適用を試みている。しかし、静荷重による塑性変形や油漏れによるカットバックおよびタイヤによる据え切りなどの損傷が発生する場合がある。これらの損傷に、表層をセメント系舗装にすることで対応可能であると考えられる。そこで、本研究では、駐車場の表層にポーラスコンクリートを適用した場合の舗装構造を検討した。さらに、ポーラスコンクリートの配合設計において、施工実態に基づく振動エネルギーを考慮した合理的な締固め方法を適用した。これらの結果より、駐車場に適したポーラスコンクリートの強度およびその配合を見出し、従来の車道用ポーラスコンクリートよりコストを低減できることを示した。

Key Words: porous concrete, structural analysis, parking area, compaction method, mix design

1. はじめに

高速道路のサービスエリア等休憩施設の駐車場の舗装構造は、設計要領¹⁾で、「アスファルト舗装を基本とし、TA=15~20cmの間で定める」と規定し、表層に高機能(排水性アスファルト)舗装用混合物の適用を試みている。しかし、静荷重による塑性変形や油漏れによるカットバックおよびタイヤによる据え切りなどの損傷が発生する場合がある。これらの損傷に、表層をセメント系舗装にすることで対応可能であると考えられる。

セメント系排水性舗装混合物であるポーラスコンクリートは高速道路の料金所の舗装として試験的に適用されているが²⁾、配合設計手法が統一されておらず、施工者ごとに異なる方法で実施されているのが現状である。特に配合設計時の供試体の作製方法は、経験に基づくもので、理論的な検証はされていない。

そこで、本研究ではアスファルト舗装の駐車場(駐車ます)の表層にポーラスコンクリートを適用した場合の舗装構造を3次元有限要素法により検討した。さらに、配合設計において、施工実態に基づく振動エネルギーを考慮した合理的な締固め方法を適用した。

これらの結果より、駐車場に適したポーラスコンクリートの強度およびその配合を見出し、現在、車道に適用されているものより材料コストを低減できるかどうかを検討した。

2. 舗装構造の検討

駐車ますの平面構造は図-1に示すとおりとし、検討対象とする既設舗装構造には、表-1に示すアスファルト舗装の断面を用いた。

舗装表面をポーラスコンクリートにする場合にはフルデプス型と薄層付着型がある³⁾。また、薄層付着型については、排水性舗装構造としてアスファルト舗装にオーバーレイする方法(ホワイトトッピング)とコンクリート舗装にオーバーレイする方法(コンクリートオーバーレイ)がある。本研究では、この薄層付着型の2方法につ

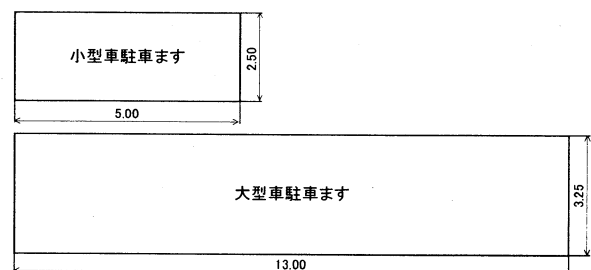


図-1 駐車ますの構造 (単位: m)

表-1 標準とした既設舗装の断面

位置	材料	厚さ	等価換算係数	TA
表層及び基層	表層及び基層用混合物	10cm	1.00	10.0
上層路盤	加熱アスファルト安定処理タイプⅡ	10cm	0.68	6.8
下層路盤	粒状材料	10cm	0.25	2.5
路床	設計CBR=10			
合計				19.3

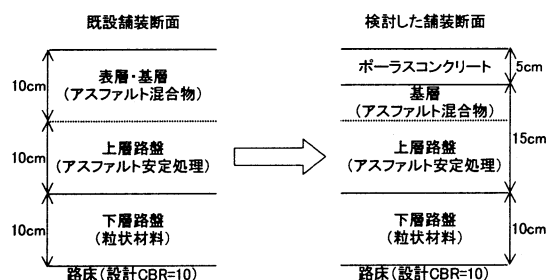


図-2 ホワイトトッピング構造

表-2 解析条件 (ホワイトトッピング)

項目	入力値
コンクリート版	
弾性係数(GPa)	25.5
ポアソン比	0.2
版厚(cm)	5.7, 5.10
温度膨張係数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	8.5
目地	
ばね係数(GN/m^3)	k_x, k_y, k_z
	1.0×10^2
Co-As境界面	
ばね係数(GN/m^3)	k_x, k_y, k_z
	1.0×10^2
アスコン層(アスファルト安定処理含む)	
弾性係数(MPa)	490
ポアソン比	0.35
厚さ(cm)	15
路盤層	
弾性係数(MPa)	245
ポアソン比	0.35
厚さ(cm)	10
路床	
弾性係数(MPa)	98
ポアソン比	0.35
厚さ(cm)	270

表-3 温度差の時間割合 (ホワイトトッピング)

温度差($^{\circ}\text{C}$)	時間割合
7	0.014
5	0.105
3	0.254
1	0.627
-1	0.604
-3	0.386
-5	0.010

いて構造を検討した。ホワイトトッピングについては、ポーラスコンクリートの下層はアスファルト舗装になるが、オーバーレイによる舗装内部の温度低減効果や大型車両を想定した長時間静止荷重実験などの結果³⁾から、小型車の静止荷重によるアスファルト舗装の塑性変形は無視できると考えた。なお、舗装構造の解析には、3次元有限要素プログラム⁴⁾を用いた。

(1) ホワイトトッピング

検討した舗装断面は図-2に示すとおり、既設アスファルト舗装の上部5cmをポーラスコンクリートに置き換えるものである。なお、表層・基層のアスファルト混合物層と上層路盤のアスファルト安定処理は一体となつて一層のアスファルト混合物層として働くと考えた。

ただし、この舗装構造の場合、コンクリート下面に発生する大型車による荷重応力と温度応力を合成すると、通常の舗装用コンクリートの設計曲げ強度4.5MPaより大きくなる。したがって、ホワイトトッピングに関しては、小型駐車車を対象として、大型車の走行が無いものとして解析した。

a) 解析条件

解析条件は文献^{5), 6)}を参考に表-2に示す値とした。荷

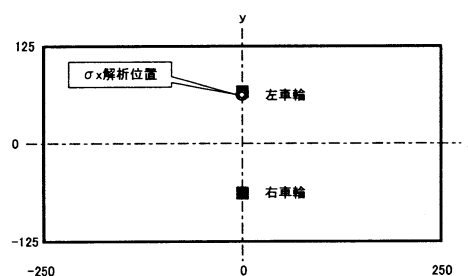


図-3 解析および荷重位置 (ホワイトトッピング)

表-4 合成応力の計算 (ホワイトトッピング)

温度差	温度応力	R	合成応力
7	1.74	0.014	2.29
5	1.25	0.105	2.453
3	0.75	0.254	18.396
1	0.25	0.627	44.501
-1	-0.25	0.604	109.850
-3	-0.76	0.386	105.821
-5	-1.25	0.010	67.627
			1.752

重条件は、代表的な乗用車タイヤの接地圧⁷⁾と合わせるため、15cm×15cmの接地面積に4.9kNの荷重が作用するものとした。温度条件は文献⁸⁾より表-3に示す温度差と時間割合を用いた。交通量は常に駐車場所に駐車車両が入りしていると仮定し、文献⁹⁾の時刻別の1台当たりの平均駐車時間から推定した。その結果、平均すると駐車時間は約30分となり、24時間では48台の交通量となった。したがって、1台あたり2軸(2輪)として設計期間を10年とし、 $N=48 \text{ 台/日} \times 2 \text{ 輪/台} \times 365 \text{ 日} \times 10 \text{ 年}=350,400$ 輪を設計交通量とした。また、温度差が正または負の時に走行する比率は、50:50とした。

b) 解析結果

解析モデルは駐車場所1台分とし、目地を設けない構造とした。荷重応力を解析した結果、どの位置に車輪を載荷しても0.6MPa以上の応力は発生しなかった。それに対し、厚さ5cmのホワイトトッピングで最大の温度差7°Cで解析したとき、温度応力が1.74MPaとなり、進行方向(x軸)で最も大きくなった。そこで、最も大きな温度応力が発生する図-3に示す車輪荷重位置で解析を行った。また、走行位置分布は考慮せず、すべての車両は、解析位置を走行するものとし、荷重応力解析結果の最大値(0.55MPa)が作用するものとした。

荷重・温度応力及び合成応力を表-4に示す。合成応力が負(圧縮側)は疲労抵抗の計算には用いない。合成応力の大きさと度数を整理し、ポーラスコンクリートの設計曲げ強度を2.8MPaとして疲労抵抗値を設計要領¹⁾のコンクリートの疲労曲線から算出した結果は表-5に示すとおり、疲労抵抗値の合計が1未満となり設計条件(期間10年)を満足する。なお、交通量を2倍にした場合、ポーラスコンクリートの設計曲げ強度は2.9MPaで設計条

表-5 疲労抵抗の計算 (ホワイトトッピング)

合成応力	度数	応力度	許容繰返し度数	疲労抵抗値
2.8 (2.71 ~ 2.90)	0	1.00	1	0.00
2.6 (2.51 ~ 2.70)	0	0.93	42	0.00
2.4 (2.31 ~ 2.50)	0	0.86	717	0.00
2.2 (2.11 ~ 2.30)	2,453	0.79	5,179	0.47
2.0 (1.91 ~ 2.10)	0	0.71	20,874	0.00
1.8 (1.71 ~ 1.90)	18,396	0.64	84,128	0.22
1.6 (1.51 ~ 1.70)	0	0.57	339,052	0.00
1.4 (1.31 ~ 1.50)	0	0.50	1,366,448	0.00
1.2 (1.11 ~ 1.30)	44,501	0.43	5,507,064	0.01
1.0 (0.91 ~ 1.10)	0	0.36	22,194,582	0.00
0.8 (0.71 ~ 0.90)	109,850	0.29	89,448,662	0.00
0.6 (0.51 ~ 0.70)	0	0.21	380,496,229	0.00
0.4 (0.31 ~ 0.50)	0	0.14	1,452,872,833	0.00
0.2 (0.11 ~ 0.30)	105,821	0.07	5,855,371,835	0.00
0.0 (~ 0.10)	69,379	-	-	-
計	350,400	-	-	0.70

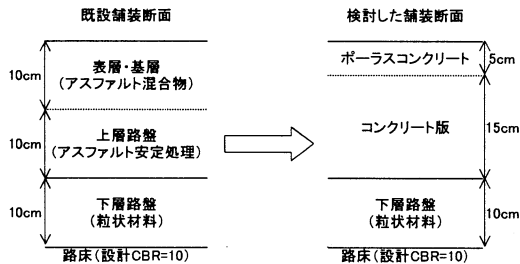


図-4 コンクリートオーバーレイ

表-6 解析条件 (コンクリートオーバーレイ)

項目	入力値
ポーラスコンクリート	
弾性係数(GPa)	25.5
ポアソン比	0.2
線膨張係数(10 ⁻⁶ /°C)	8.5
厚さ(cm)	5
コンクリート版	
弾性係数(GPa)	29.4
ポアソン比	0.2
線膨張係数(10 ⁻⁶ /°C)	10
厚さ(cm)	15
コンクリートと路盤の境界面	
ばね係数(GN/m ³)	$\frac{k_t}{k_b} = 1.0 \times 10^{-2}$
	$\frac{k_b}{k_t} = 1.0 \times 10^4$
路盤(粒状材料)	
弾性係数(MPa)	245
ポアソン比	0.35
厚さ(cm)	10
路床(設計CBR=10)	
弾性係数(MPa)	98
ポアソン比	0.35
厚さ(cm)	270

件を満足する。

(2) コンクリートオーバーレイ

大型車駐車ますの場合、ホワイトトッピングでは、コンクリート下面に発生する大型車による荷重応力と温度応力を合成すると、通常の舗装用コンクリートの設計曲げ強度 4.5MPa より大きくなる。そこで、コンクリート舗装にポーラスコンクリートをオーバーレイする方法で構造を検討した。

検討した舗装断面は図-4 に示すとおり、既設アスファルト舗装をすべてコンクリートに置き換え、その上部 5cm をポーラスコンクリートにするものである。

ただし、下層コンクリート版と上層のポーラスコンクリートは完全に付着しているものとして解析を行った。これは床版上面増厚工法の付着強度が 1MPa 程度であれば層間の剥離は生じないこと¹⁰⁾、下層コンクリートと上層のポーラスコンクリートの付着強度は 1MPa を確保できるからである¹¹⁾。

層間が完全に付着している場合、上層と下層のコンクリートは弾性係数に大きな差がないので、境界面の応力

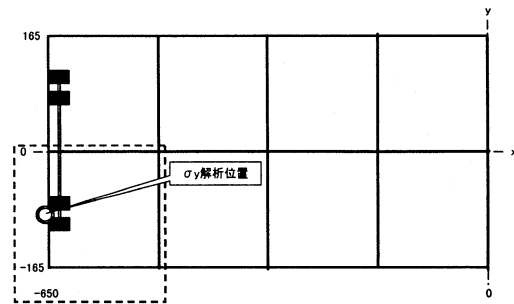


図-5 解析および荷重位置 (下層コンクリート版)

表-7 合成応力の計算 (下層コンクリート版)

輪荷重	2.98	2.66	2.35	2.04	1.72	1.41	1.10	0.78	0.47	0.16
度数N	304	1,215	3,644	9,110	22,169	54,662	121,472	182,208	133,619	78,957
温度差	15	13	11	9	7	5	3	1	-1	-3
温度応力 R	4.33	4.01	3.70	3.39	3.07	2.76	2.45	2.13	1.82	1.51
合成応力	1.35	0.002	0	2	5	14	33	59	82	100
合成応力	1.18	0.015	0.16	0.33	0.53	0.76	1.02	1.28	1.54	1.79
合成応力	1.00	0.040	0.38	0.66	1.04	1.51	2.07	2.72	3.46	4.29
合成応力	0.82	0.070	0.60	1.03	1.51	2.07	2.72	3.46	4.29	5.12
合成応力	0.65	0.100	0.83	1.31	1.91	2.56	3.27	4.03	4.84	5.69
合成応力	0.47	0.120	1.00	1.53	2.16	2.84	3.57	4.34	5.15	5.99
合成応力	0.29	0.200	1.27	1.82	2.47	3.16	3.89	4.66	5.47	6.31
合成応力	0.12	0.450	1.30	1.82	2.47	3.16	3.89	4.66	5.47	6.31
合成応力	-0.06	0.500	1.27	1.82	2.47	3.16	3.89	4.66	5.47	6.31
合成応力	-0.23	0.340	1.27	1.82	2.47	3.16	3.89	4.66	5.47	6.31
合成応力	-0.41	0.150	1.27	1.82	2.47	3.16	3.89	4.66	5.47	6.31

はほとんど変わらない。したがって、全層厚 20cm の表面に荷重が作用しても表面から 5cm 下の位置では引張応力は発生しない。また、表面に引張応力が発生した場合、表面から 5cm 下は表面より大きな引張応力は発生しない。

そこで、本研究ではポーラスコンクリートの上面に発生する引張応力に着目した。

a) 解析条件

解析条件は表-6 に示すとおりである。下層コンクリートは舗装用コンクリートとして一般的な数値を用い、路盤との境界面は非接着状態¹²⁾とした。荷重条件は大型車の後輪が荷重するものとし、一輪当たり 20cm×30cm の複輪荷重で行った。交通量は常に駐車ますに駐車車両が出入りしていると仮定し、文献⁹⁾の時刻別の 1 台当りの平均駐車時間から推定した。その結果、平均すると昼間の駐車時間は約 30 分、夜間の駐車時間は約 90 分となり、昼間は 24 台、夜間は 8 台の交通量となる。したがって、1 台当たり 2.6 軸 (2.6 輪) として設計期間を 20 年とし、32 台/日×2.6 輪/台×365 日×20 年=607,360 輪を設計交通量とした。また、温度差が正または負のときに走行する大型車の比率は、75:25 とした。

b) 解析結果

解析ではポーラスコンクリート上面の引張応力だけでなく、下層コンクリート版下面に発生する引張応力についても検討を行った。その結果、下層コンクリート版に使用するコンクリートを設計曲げ強度 4.5MPa とすると、目地間隔が 6.5m および 3.25m の場合、設計条件を満足しない結果になった。したがって、目地間隔を 1.65m として解析を行った。また、荷重は設計要領¹³⁾に従い、4.9~

表-8 疲労抵抗の計算（下層コンクリート版）

合成応力(MPa)	度数	応力度	許容繰返し度数	疲労抵抗値
4.4 (4.31 ~ 4.50)	0	0.98	3	0.000
4.2 (4.11 ~ 4.30)	3	0.93	33	0.092
4.0 (3.91 ~ 4.10)	11	0.89	277	0.040
3.8 (3.71 ~ 3.90)	30	0.84	1,048	0.029
3.6 (3.51 ~ 3.70)	105	0.80	3,957	0.027
3.4 (3.31 ~ 3.50)	305	0.76	9,330	0.033
3.2 (3.11 ~ 3.30)	448	0.71	22,208	0.020
3.0 (2.91 ~ 3.10)	902	0.67	52,864	0.017
2.8 (2.71 ~ 2.90)	2,238	0.62	125,838	0.018
2.6 (2.51 ~ 2.70)	3,992	0.58	299,543	0.013
2.4 (2.31 ~ 2.50)	6,185	0.53	713,029	0.009
2.2 (2.11 ~ 2.30)	10,392	0.49	1,697,287	0.006
2.0 (1.91 ~ 2.10)	20,772	0.44	4,040,201	0.005
計	45,383			0.307

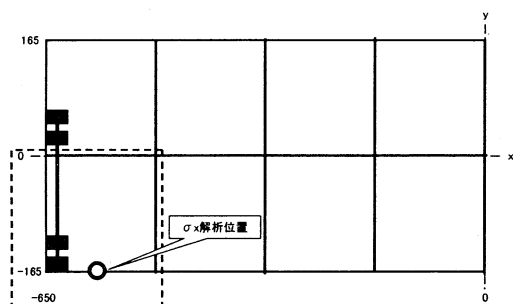


図-6 解析および荷重位置（上層ポーラスコンクリート）

93.1kN (9.8kN きざみ) の荷重群と相対度数分布を用いた。
（下層コンクリート版の検討）

最大の荷重応力が発生するところで解析した結果、図-5に示す荷重位置で横断方向（y 軸）に発生する応力が最大となったため、その位置を解析位置とした。また、走行位置分布は考慮せず、すべての車両は解析位置を走行するものとした。

荷重・温度応力及び合成応力を表-7に示す。なお、温度差の割合はセメントコンクリート舗装要綱¹³⁾の版厚15cmにおける数値（温度差が大きいところ）を用いた。合成応力の大きさと度数を整理し、コンクリートの設計曲げ強度を4.5MPaとして疲労抵抗値を設計要領¹⁾のコンクリートの疲労曲線から算出した結果は表-8に示すとおり、疲労抵抗値の合計が1未満となり設計条件（期間20年）を満足する。

（ポーラスコンクリートの検討）

同様に、最大の荷重応力が発生するところで解析した結果、図-6に示す荷重位置で進行方向（x 軸）に発生する応力が最大となったため、その位置を解析位置とした。また、下層コンクリート版と同様に走行位置分布は考慮していない。

荷重・温度応力及び合成応力を表-9に示す。なお、温度差の割合はセメントコンクリート舗装要綱¹³⁾の版厚20cmにおける数値（温度差が大きいところ）から温度勾配が同じになるようにした。合成応力の大きさと度数を整理し、ポーラスコンクリートの設計曲げ強度を1.2MPaとして疲労抵抗値を設計要領¹⁾のコンクリートの疲労曲線から算出した結果は表-10に示すとおり、疲労抵抗値の合計が1未満となり設計条件（期間20年）を満足する。

表-9 合成応力の計算（上層ポーラスコンクリート）

合成応力(MPa)	度数	応力度	許容繰返し度数	疲労抵抗値
1.2 (1.1 ~ 1.30)	0	1.00	1	0.00
1.0 (0.91 ~ 1.10)	109	0.83	1,461	0.07
0.8 (0.71 ~ 0.90)	1,474	0.67	52,864	0.03
0.6 (0.51 ~ 0.70)	13,737	0.50	1,366,448	0.01
0.4 (0.31 ~ 0.50)	97,352	0.33	35,320,155	0.00
0.2 (0.11 ~ 0.30)	205,547	0.17	912,960,478	0.00
0.0 (~ 0.10)	289,141	-	-	-
計	607,360			0.12

表-10 疲労抵抗の計算（上層ポーラスコンクリート）

合成応力	度数	応力度	許容繰返し度数	疲労抵抗値
1.2 (1.1 ~ 1.30)	0	1.00	1	0.00
1.0 (0.91 ~ 1.10)	109	0.83	1,461	0.07
0.8 (0.71 ~ 0.90)	1,474	0.67	52,864	0.03
0.6 (0.51 ~ 0.70)	13,737	0.50	1,366,448	0.01
0.4 (0.31 ~ 0.50)	97,352	0.33	35,320,155	0.00
0.2 (0.11 ~ 0.30)	205,547	0.17	912,960,478	0.00
0.0 (~ 0.10)	289,141	-	-	-
計	607,360			0.12

3. 配合設計手法の検討

舗装用ポーラスコンクリートの締固め性を評価する方法としてマーシャル法¹⁴⁾、VC試験¹⁵⁾、タンパ締固め法、沈下法による空隙率¹⁶⁾等が報告されているが、これらに用いられている機器の締固め機構・特性はそれぞれ異なる。未硬化状態のポーラスコンクリートは、与えられた振動の状況により締固め程度が異なってくるため、配合設計時の締固め性等の性状評価や品質確認試験用供試体等を作製する際に使用する機器の振動のエネルギーは、実施工時の振動エネルギーを考慮することが望ましい。

舗装用ポーラスコンクリートの施工は、通常、アスファルトフィニッシャで敷き均し・締固めを行い、その後プレート等の小型軽量振動機器や小型ローラーにて整形が行われている。このため、現場での締固めは、アスファルトフィニッシャの振動・締固め機構に依存しているといえる。そこで本研究ではアスファルトフィニッシャおよび各種振動締固め機器の振動特性（加速度、振幅）を測定し、施工時の振動エネルギーを考慮したポーラスコンクリートの性状評価方法を検討した。さらに、本検討手法を用いて前章に示した駐車場の舗装構造に適したポーラスコンクリートの配合を検討した。

(1) 室内締固め評価方法

図-7は、アスファルトフィニッシャおよび各振動締固め機器（VC試験機、振動タンパ、型枠振動機、プレート）の加速度および振幅の関係を示したものである。なお、片振幅は次の式（1）から算出した。

$$r = \alpha / (2\pi f)^2 \quad (1)$$

ここに、r: 片振幅(m) α: 加速度(m/s²) f: 振動数(周波数)(Hz)

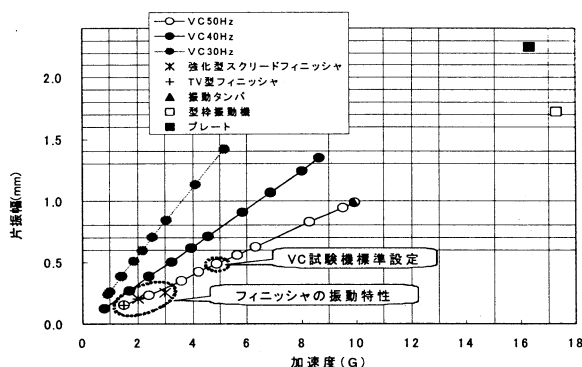


図-7 加速度と片振幅の関係

図-7 に示すように、機種や設定値の違いにより振動レベルは異なっている。この測定結果からVC試験機は、各周波数とも加速度と片振幅が線形関係であり、周波数50Hzの関係線上にフィニッシャの振動レベルが位置することがわかった。これにより、本検討ではVC試験機の振動レベルをフィニッシャの振動レベルに合わせた方法で、ポーラスコンクリートの締固め性状を評価することにした。ただし、VC試験機の加速度と振幅は、周波数とウェイトバランスの組み合わせで決まり、組み合わせ以外に任意設定できないため、フィニッシャの振動レベルに最も近い設定（周波数 50Hz、加速度 2.3G、振幅 0.23mm）とした。なお、使用したVC試験機の仕様は、振動数 50Hz、電圧 200V、全振幅 1.0mm、出力 0.2kw であり、加速度はインバータを用いて周波数を、振幅は偏心モーターのウェイトバランスを変更することによって調整できるようにしている。したがって、図-7 で示しているVC試験機の加速度と片振幅の関係は周波数とウェイトバランスを変更した組み合わせの加速度の実測値を測定し、式(1)から片振幅を求めた結果をプロットしている。

締固め性試験は、φ24×20cm 容器に、試料の厚さが5cmで目標空隙率 17%となるように計量した試料を入れ、試料表面にプラスチック円盤と 20kg の重錘を載荷した後、振動を加える方法で行い、振動時間 30 秒と 60 秒のときに締固められた試料の容積と質量から単位容積質量 (A) を求め、目標空隙率から計算される単位容積質量 (B) との割合を締固め率 $(A/B \times 100 \%)$ として算出することにした。なお、振動時間は施工時にフィニッシャのスクリード部が締固めている時間（およそ 30～60 秒）を考慮して設定したものである。

文献¹⁷⁾によれば、コンクリートが単位容積当たりを受ける振動エネルギーを締固め仕事量と定義しており、締固め仕事量は、振動条件、締固め時間およびコンクリートの単位体積質量から次の式(2)によって求められるとしている。

$$E = \{ m \cdot \alpha^2 \cdot t \} / \{ (2\pi)^2 \cdot f \} \quad (2)$$

ここに、E：締固め時間 t における仕事量 (J/m³)、t：締固め時間 (s)、m：試料の単位容積質量 (kg/m³)、α：加速度 (m/s²)、f：振動数 (s⁻¹ or Hz)

表-11 振動台式コンシステンシー試験方法

区分	名 称	番 号	振動数 f Hz	片振幅 r mm	重錘質量 kg	試料容器 mm	試験結果	加速度 α G	1秒当りの 仕事量 J/m ³	備 考
振動台式コンシステンシー試験	JSCE-E901		25	0.4	1	φ240×200	沈下度(s)	1.0	0.237	舗装用コンクリート
本研究VC試験機	RCD技術指針		50	0.23	20	φ240×200	締固め率(%)	2.3	0.51	ポーラスコンクリート
VC試験機	BS1881Part104		50	0.35	2.75	φ240×200	Vctime(s)	3.5	1.45	硬練り超硬練りコンクリート
振動台式コンシステンシー試験機	Corps of Eng.		50	0.35	12.5	φ241×197	Vctime(s)	3.5	1.45	RCCダム用コンクリート
VC試験機	RCD技術指針		50	0.5	20	φ240×200	締固め率(%) VC値(s)	5.0	2.96	RCC用コンクリート RCC用コンクリート
振動台式コンシステンシー試験機	ASTM C1170		60	0.43	NS(計測) 22.7	φ241×197	修正VC値 Vctime(s) VC密度	6.2	3.78	硬練りコンクリート RCCダム用コンクリート
供試体成形方法	ブロック協会指針		(30s) 75	0.5	0	φ100×200	空隙率(%)	11.3	9.99 (全 300)	即時脱型用コンクリート

上記のVC試験機の設定条件は、加速度 22.54m/s² (2.3 G)、周波数 50Hz、締固め時間 30 秒または 60 秒であり、この条件でポーラスコンクリートの単位容積質量を 2kg/m³とした場合、各締固め時間における仕事量は 15.5 J/m³、31 J/m³、1 秒当たりの仕事量では 0.51J/m³となる。

なお、各種コンクリートの振動台式コンシステンシー試験方法による 1 秒当たりの仕事量については、文献¹⁷⁾で報告されており、その内容に、上記に示したVC試験機による締固め性試験の締固め仕事量を挿入したものを表-11 に示す。本検討における実施工を考慮したポーラスコンクリートの締固め仕事量は、舗装用コンクリートと硬練りコンクリートの間に位置しており、各種コンクリートの施工状況とコンシステンシー評価における締固め仕事量の関係を勘案すると、ポーラスコンクリートの締固め性評価としての妥当性がうかがえた。

(2) 供試体作製方法の検討

次に、前項で検討を行ったフィニッシャの振動特性に合わせたVC試験機による締固め性試験の締固め仕事量に着目して、品質確認試験用供試体（曲げ試験用、透水試験用等）作製方法を検討した。

締固め機器については、現場でも容易に使用できることを想定し、可搬性に優れ、電源が比較的容易に対応可能な 100V 電源のもので、既存の評価方法^{18), 19)}としても実績のある型枠振動機を選定し、本検討では、振動数 50Hz、電圧 100V、出力 220w、電流 4A の仕様のもを使用した。

VC試験機と型枠振動機では振動特性が異なることから、型枠振動機の締固め仕事量を求める必要があるため、図-7 に示した振動特性の測定結果を使用し、式(2)により、型枠振動機の 1 秒当たりの仕事量を算出した。この結果、型枠振動機の締固め仕事量は約 29J/m³となり、VC試験機による締固め性試験の仕事量の約 57 倍となることがわかった。そこで、両者の締固め仕事量を合わせるため、振動締固め時間を調整することとした。

VC試験機による締固め性試験での締固め率が 100% になるときの振動締固め時間を 60 秒と仮定すると、型枠振動機で締固める時の時間は両者の締固め仕事量の比率から 60/57=1.1 秒となる。VC試験機では振動台が振動し、重錘を載荷した円盤の内径 φ24cm に均等に振動が加わるとすれば、面積約 452cm²に 0.51J/m³の仕事量が与え

表-12 検討配合

配合No.	W/C (%)	m/g	S/C	Km	Kp	単位量(kg/m ³)					合計 (kg/m ³)
						W	C	S	G	Ad	
1	47	0.42	2.20	0.67	1.42	70	150	323	1548	0.38	2091
2	53	0.42	2.00	0.67	1.67	80	150	297	1548	0.38	2075
3	57	0.42	1.90	0.67	1.81	85	150	285	1548	0.38	2068
4	60	0.42	1.80	0.67	1.97	90	150	272	1548	0.38	2060
5	67	0.42	1.60	0.67	2.33	100	150	247	1548	0.38	2045
6	60	0.40	1.70	0.63	2.13	90	150	251	1570	0.38	2061
7	60	0.45	2.00	0.71	1.77	90	150	303	1516	0.38	2059
8	60	0.48	2.20	0.76	1.61	90	150	332	1485	0.38	2057
9	53	0.45	2.20	0.71	1.52	80	150	328	1516	0.38	2074
10	57	0.45	2.10	0.71	1.64	85	150	315	1516	0.38	2066
11	63	0.45	1.90	0.71	1.92	95	150	290	1516	0.38	2051
12	26	0.45	0.50	0.71	3.54	80	312	155	1516	30 *1)	2093

W:水道水、C:早強ポルトランドセメント、S:陸砂、G:6号砕石、Ad:AE減水剤 *1):無機系特殊混和材
W/C:水セメント比、m/g:モルタル粗骨材容積比、S/C:砂セメント比、Km:モルタル粗骨材空隙比、Kp:ベース-細骨材空隙比

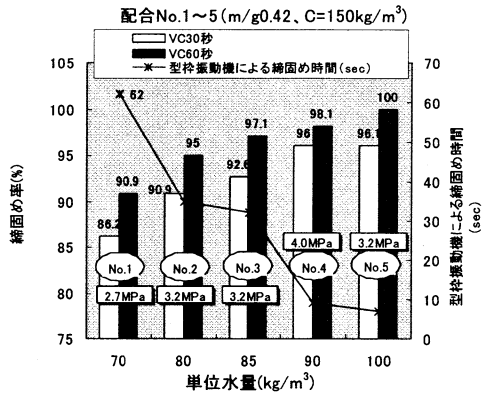


図-8 単位水量と締固め率および供試体締固め時間の関係

られることになる。一方、使用した型枠振動機の接地面積は77cm² (11cm×7cm) であるので、曲げ試験用供試体の作製を例にすると、振動を与える上部面積 400cm² (10cm×40cm) に対して型枠振動機の接地回数は約 5.2回 (400 cm²/77 cm²) となり、上部面積全体で振動締固めを約6秒 (1.1秒/回×5.2回) 行えば、施工時の締固め仕事量で供試体を作製することが可能となる。また、マーシャル供試体を作製する場合は、試料上面に合板等を置くことで、φ10cm 全体に振動をかけることができるため、上記と同等な仕事量を与えるには、振動締固め時間を約1～2秒とすればよい。

(3) 検討配合

本検討におけるポーラスコンクリートの目標強度 (曲げ強度) は、前章に示した舗装構造の解析結果から、設計曲げ強度が2.9MPa であるので、割り増し係数 (1.2) を考慮し、3～3.5MPa の範囲に設定した。

配合については、経済性と汎用性を考慮して、通常の生コンプラントが有している材料・設備で製造可能なものを対象として検討した。これにより、使用材料は粗骨材、細骨材、セメント、水および生コンプラントで常時使用されている標準型AE減水剤とし、一般の車道用ポーラスコンクリート²⁰⁾で使用されている特殊混和材、高性能AE減水剤は、使用しないこととした。

検討した配合を表-12に示す。なお、比較として特殊混和材を使用した一般の車道用ポーラスコンクリートの配合についても同表に併記した。

(4) 配合設計における性状等の評価方法

図-8に、配合No.1～5についての単位水量と(1)に示

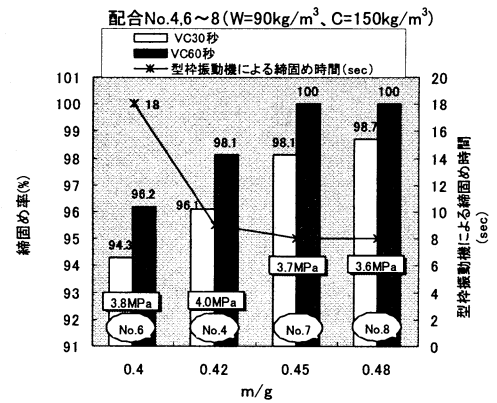


図-9 m/g と締固め率および供試体締固め時間の関係

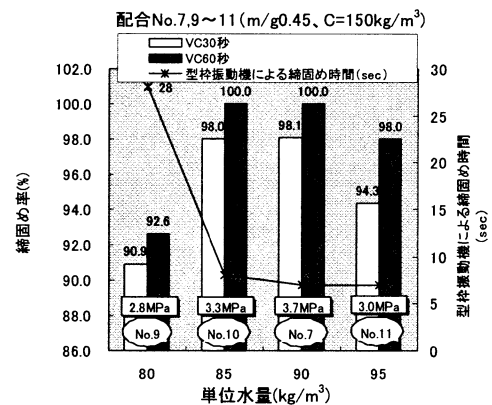


図-10 単位水量と締固め率および供試体作製時間の関係

した締固め性試験による締固め率および曲げ強度試験用供試体試料が(2)に示した型枠振動機により所定の容積に締固まるまでに要した時間を示す。また、図中に型枠振動機で締固めた供試体の曲げ強度 (7日標準水中養生) も併記した。

図-8から、締固め率が小さいものは、振動締固め時間が長くなっている。一方、締固め率が100%に近い配合は、振動締固め時間は短く、締固め性試験と同等の締固め仕事量から算出した6秒近くで供試体作製が可能となっている。しかし、単位水量と曲げ強度の関係をみると、単位水量90kg/m³のとき、曲げ強度が最大となっている。そこで、単位水量を一定にして m/g (モルタル粗骨材容積比) による影響を調べた。

図-9に、配合No.6～8 (No.4併記) について、図-8と同様に m/g と締固め率および振動締固め時間の関係を示す。

図-9から、m/gの増加により、締固め率は増加し、供試体作製の振動締固め時間はさらに6秒近くになる。一般的に、m/gが増加すれば締固め易くと言われており、本検討でも同様な結果となった。このことから、本検討における締固め方法の妥当性がうかがえる。しかし、単位水量が90kg/m³のとき、m/g0.40～0.48の範囲では目標強度よりすべて大きい。そこで、図-9から締固め率がVC60秒で100%となる最少のm/g (0.45) を一定として単位水量を変化させた。

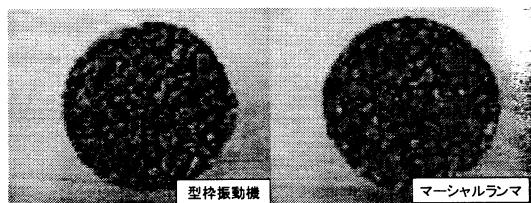


写真-1 供試体表面形状

図-10 に、配合 No.9~11 (No.7 併記) について、先と同様に単位水量と締固め率および振動締固め時間の関係を示す。図-10 は、図-8 と同様の傾向となり、単位水量 90kg/m^3 で曲げ強度が最大となった。この結果、目標強度となる配合は No.10 となる。すなわち、駐車場舗装に適用できるポーラスコンクリートは、単位セメント量が 150kg/m^3 と一般の車道用ポーラスコンクリートの配合に比べて少なく、特殊混和剤も必要ないものとなる。

以上のような施工時の振動特性にあわせた締固め性試験と供試体作製により、締固め性および強度評価を行うことで、目標とする配合を得るための配合設計が可能になる。

また、一例として、同一配合における圧裂試験用供試体 ($\phi 10 \times 6.35\text{cm}$) の型枠振動機 (振動時間 1~2 秒) とマーシャルランマ (片面 25 回突き) で作製した供試体表面形状を写真-1 に示すが、両者の表面形状は異なっており、型枠振動機で作製したものが施工現場と同様な形状 (表面のきめの確保) となっている。

次に、定水位透水試験についても、合板を介して型枠振動機により振動時間 1~2 秒で作製した。このように作製した供試体で定水位透水試験を行った結果、いずれも透水係数 $1 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ 以上であり、一般の排水性舗装と同様の透水性能であることが確認された。

(5) 現場における簡易的な性状評価手法

ドライ状態で施工した場合の締固め不足やウェットまたは過剰締固め時における材料分離 (ダレの発生) など、ポーラスコンクリートの性状の良否を現場で判定する手法を検討した。

前述の検討結果で得られた知見から、所定厚さになったときに目標空隙率となるように計量した試料を任意の容積の容器に投入し、配合設計時の締固め性試験と同じ締固め仕事量となる振動時間で、使用する締固め機械 (本検討では型枠振動機) により試料表面から振動を与えることで、以下に示すような性状の良否を判定できると考えられる。

- ① 容積と試料重量から締固め率を算出し、目標締固め率より小さい場合は、何らかの原因でポーラスコンクリートが乾燥または硬化しており、施工時の締固め不足、接着力低下が懸念される。
 - ② 容器に多くのモルタル分が付着した場合、ウェットであり、施工時のダレや材料分離が懸念される。
- そこで、本検討では一般的に入手可能な容器を使用し

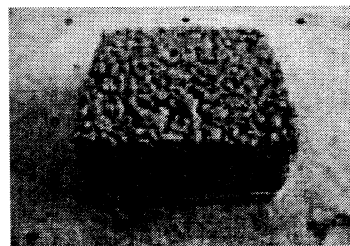


写真-2 脱容器後の試料状況

て試験を試みた。プラスチック容器 ($12 \times 12 \times 12\text{cm}$) に試料を投入 (試料上面に合板を設置) し、その上から型枠振動機で 1~2 秒の振動を与えた直後に試料を容器から取り出した状況の一例を写真-2 に示す。良好なものは写真-2 のように形状を保持したが、ドライの場合は崩れ、ウェットの場合はダレがみられた。このため、上記の判定内容に加え、容器から試料を取り出した時の試料の形状からも性状の良否を判定できると考えられる。

図-10 に示した配合では、容器に付着するモルタル分は、単位水量が少ない配合である No.9 の付着量がほぼゼロ (締固め率 97%) となり、適切な配合と思われる No.10 が付着量 $0.3 \sim 0.8\text{g}$ (付着率 $0.02 \sim 0.06\%$ 、締固め率 100.5%)、強度の低下する境界点付近の配合 No.11 が付着量 $4 \sim 9\text{g}$ (付着率 $0.3 \sim 0.6\%$ 、締固め率 99%) となった。容器の寸法、試料重量等の詳細な検討は今後の課題であるが、以上に示した方法により、ポーラスコンクリートの性状の良否が現場において簡易に判定できると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた主な知見をまとめると次のとおりである。ただし、これらについては、構造解析および室内試験結果から得られた知見であるため、試験施工等による検証が今後の課題として挙げられる。

(1) 舗装構造について

- (a) ポーラスコンクリートを駐車場舗装に適用する場合、小型車駐車マスにはホワイトトッピング構造、大型車駐車マスにはコンクリートオーバーレイ構造が適用できる。
- (b) 上層 5cm に適用するポーラスコンクリートの必要曲げ強度は、小型車駐車マスでは、大型車の走行が無い場合において 2.9MPa 、大型車駐車マスでは、下層コンクリート版との付着強度が 1MPa 以上確保されている場合において 1.2MPa である。

(2) 配合設計手法について

- (a) 実施工を考慮してアスファルトフィニッシャの振動特性に合わせたポーラスコンクリートの締固め性評価方法および供試体の作製方法を示すことができた。

- (b) 駐車場に適用できるポーラスコンクリートの配合を示すことができた。また、従来配合されていた高価な特殊混和材を使用する必要がないことがわかった
- (c) 現場等において、簡易にポーラスコンクリートの良否を判定する手法を示すことができた。

謝辞：本研究で示したアスファルトフィニッシュの振動レベルのデータの一部は、鹿島道路株式会社から提供していただいた。関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領 第一集 舗装編，2004.1.
- 2) セメント協会：車道用ポーラスコンクリート現場試験舗装結果（福井県）—中間報告（供用 3 年）—，R-15，舗装技術専門委員会報告，pp.45，2003.11.
- 3) 野田悦郎，中原大磯，梶尾聡：ポーラスコンクリートを用いたホワイトトッピングの構造的性能の一検討，舗装，pp.7-12，2005.5.
- 4) 西澤辰男：3次元FEMに基づいたコンクリート舗装構造解析パッケージの開発，舗装工学論文集，第5巻，pp.112-121，2000.12.
- 5) 東本崇，小関裕二，濱田 秀則，西澤辰男：ホワイトトッピングの空港舗装への適用について，舗装工学論文集，第8巻，pp.153-162，2003.
- 6) 野田悦郎，中原大磯，梶尾聡，市川勝俊：ポーラスコンクリートの車道舗装への適用に関する検討，舗装，pp.10-15，2001.4.
- 7) 渡辺徹郎：タイヤのおはなし，日本規格協会，pp.88，1994.
- 8) 東本崇，小関裕二，濱田 秀則，西澤辰男：ホワイトトッピングの温度特性とそり応力，第25回日本道路会議論文集，CD-ROM，09006，2003.
- 9) 井上義之：高速道路の休憩施設，道路，pp.29-33，1980.10.
- 10) 梅原秀哲，石神孝之，檜貝勇：増厚した鉄筋コンクリート床版の力学的挙動に関する研究，土木学会論文集 No.451/V-17，pp.89-98，1992.8.
- 11) 中原大磯，榊田宗一郎，梶尾聡，船越伸二：早期交通開放型ポーラスコンクリート舗装の実用化検討，舗装，pp.9-14，2002.9.
- 12) 西澤辰男，村田芳樹，中川達裕：薄層ホワイトトッピング工法におけるコンクリート版のそり応力，土木学会舗装工学論文集，第6巻，pp.176-185，2001.12.
- 13) 日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱，pp.224，1984.2.
- 14) 関口修，浅野嘉津真：ポーラスコンクリートの歩道および車道への適用，舗装，Vol.36，No.4，pp.16-21，2001.5.
- 15) 鈴木徹，八尋正典，小関裕二，加賀谷誠：車道用ポーラスコンクリートのコンシステンシー試験および基礎物性に関する考察，セメント・コンクリート論文集，No.55，pp.345-352，2001.
- 16) 渡辺治郎，田中敏嗣，下山善秀，野田悦郎：透水性排水性舗装用コンクリートのコンシステンシーに関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.52，pp.798-803，1998.
- 17) 日本コンクリート工学協会：超硬練りコンクリート研究委員会報告書，1998.
- 18) 片平博，河野広隆：ポーラスコンクリートのフレッシュ性状判定法の検討，土木技術資料，41-9，pp.56-61，1999.
- 19) 田中博一，栗田守朗：ポーラスコンクリートのフレッシュ時の品質管理方法，土木学会第56回年次学術講演会，V-228，pp.456-457，2001.
- 20) 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム，委員会報告書・論文集，2002.

APPLICATION OF POROUS CONCRETE FOR PAVEMENTS IN PARKING AREA AND ITS MIX DESIGN METHOD

Daijiro MATSUMOTO, Shiro MOTOMATSU, Hiroji KOSEKI,
Toru SUZUKI and Masaru YAMADA

Porous asphalt pavement is generally used for parking lots in Service Area of the Japanese expressways. However it sometimes suffers from cutback of asphalt and stripping of aggregates. One of the solution to these distress problems is the use of porous concrete mix for the surface course. In this study pavement structure using porous concrete in parking lot is first examined, and then its mix design using a rational compaction method based on actual construction procedures is probed. Finally it was found that target strength and mix of porous concrete appropriate for parking lot gives cost reduction rather than conventional mix procedure for roadways.