

数量化理論による道路維持補修計画について

HIGHWAY MAINTENANCE PLAN BY QUANTIFICATION METHOD TYPE 2

福 山 俊 郎*
By Toshiro Fukuyama

1. はじめに

近年、自動車交通の大幅な増加に対応するため、道路網の整備がいそがれてきた。その結果、既設道路の路面舗装は、ほぼ完了の段階に至ったようである。したがって、今後は、その舗装破損の状況を適確に予測して、合理的な道路維持補修の管理計画を作成することが、道路行政上の重要な課題となってきた。

この研究は、この要望を満たすため、道路をつくる立場における、従来の物理的、技術的研究に加えて、道路を維持する立場にたって、統計解析的な見地から、道路舗装破損状況の数量的評価を試みて、既設道路の管理計画の作成方針を求めようとするものである。

計画作成のフローチャートを 図-1 に示す。

2. データの収集と整理

この研究における資料は、広島県土木建築部所管の広島、三次および福山の 3 つの土木建築事務所管内の道路について収集したものである。調査の手順として、まず道路台帳、道路改良設計書などから、昭和 36 年以降に施工、補修が行われた舗装道路の道路特性を、保管書類から求めるとともに、各道路区間ごとの舗装破損状況を現地調査した。

データの数は、健全データ数 323、および破損データ数 189、計 512 個である。その調査様式を 表-1 に示す。

解析の準備段階として、まず、調査項目（交通量、土質、舗装破損状況など）についての単純集計、およびクロス集計を行い、それを図化して、視察により原データの整理検討を行った。単純集計、クロス集計、および、以下に出てくる統計数学的な述語、定義については、文

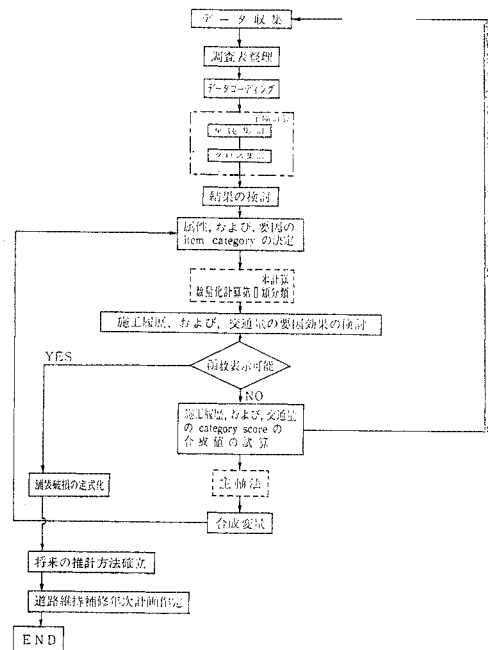


図-1 道路維持補修年次計画策定のための
フローチャート

献 1) ないし 9) を参照されたい。

まず、単純集計によって、各要因の各 category 別のデータ収集頻度を視察する。最初の段階では、category の分類が適切でないのが普通であるから、度数が極端に少ない category は、隣接 category に併合させて、各要因の category 化の再編成を行う。この結果を 表-2 に示す。

さらに、要因間のからみぐあいを知るために、クロス集計を行う。これによって、各要因の相関がわかるので、説明要因の取捨選択の検討、各要因の category 化再編成の検討ができる。得られたクロス集計の一部を表-3 に示す。

図-2 の各要因と舗装破損率との関係図から判断し

* 正会員 工博(株)福山コンサルタント代表取締役社長

表-1 調査

町村名	路線名			路 床		地 盤				交 通 量		
	道路種別	道路名	区分No.	土 質	C.B.R.	地 盤	地 形	湿 気	積 雪	小型車	大型車	計
	1. 国 道 2. 主 要 地方道 3. 県 道			1. れき砂土の混合 2. れき砂土の混合 3. シルト質のれき 4. 粘土質のれき 5. 砂 6. シルト質の砂 7. 砂混合シルト土 8. 粘土質の砂 9. 粘土質の砂 10. シルト質の砂 11. シルト質の砂 12. 砂粘有機質土 13. 砂粘有機質土	1. なし 2. 5%以下 3. 15~5 4. 40~15 5. 40%以上	1. 川沿 2. 川沿でない 3. 海沿	1. 平地強 2. 平地軟 3. 切り取り側 4. 片側 5. 溪谷	1. 多い 2. 中 3. 少い	1. 多い 2. 少い			
特記事項	イ		ロ		ハ		ニ		ホ			
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
	部分的沈下	なし	地下埋設工事後始末不良	なし	急曲線箇所の変状	なし	橋台前後に変状著しい	同著しく左	新旧路床のずれあり	なし		

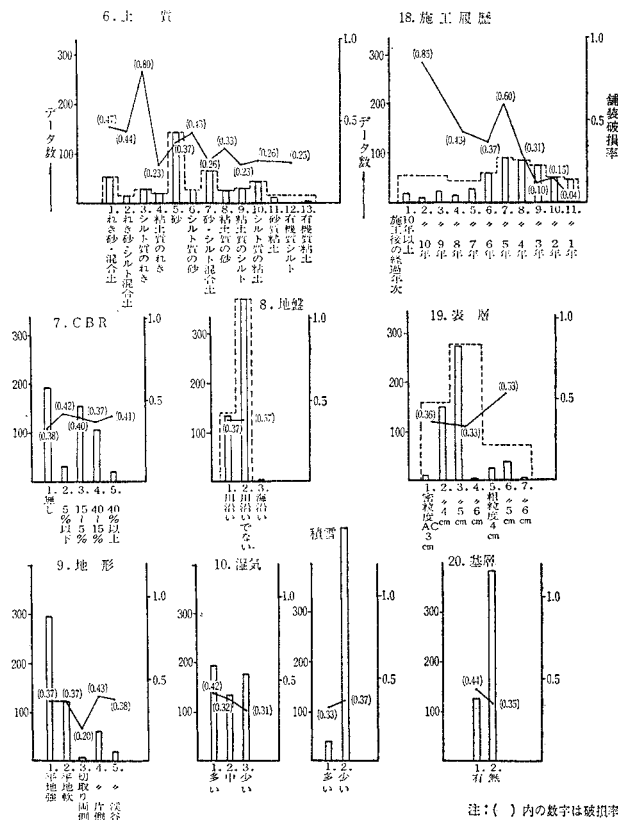


図-2 (a) 単純集計および破損率

票 様 式

施工履歴	舗 装				補 修 経 歴		舗装状況
	表 層	基 層	上層路盤	下層路盤	種 類	長 さ	
1. 施工後経過 年次10年以上	1. 密粒度AC 3cm	1. 5cm	1. 碎石水締 マカダム6cm	1. 砂利まじり砂 10cm	1. パッチング		1. 縦裂 A-1
2. " 10年	2. " 4cm	2. なし	2. " 10cm	2. " 15cm	2. オーバレイ		2. " A-2
3. " 9年	3. " 5cm		3. " 15cm	3. " 20cm	3. なし		3. " A-3
4. " 8年	4. " 6cm		4. 二層仕上 10cm	4. 切込碎石 5cm			4. 亀甲状 B-1
5. " 7年	5. 粗粒度 4cm		5. 粒度調整 6cm	5. " 6cm			5. " B-2
6. " 6年	6. " 5cm		6. " 7cm	6. " 10cm			6. " B-3
7. " 5年	7. " 6cm		7. " 10cm	7. " 15cm			7. 変状なし
8. " 4年			8. 不 明	8. " 20cm			
9. " 3年			9. 粒度調整 5cm	9. " 30cm			
10. " 2年				10. " 45cm			
11. " 1年				11. " 50cm			

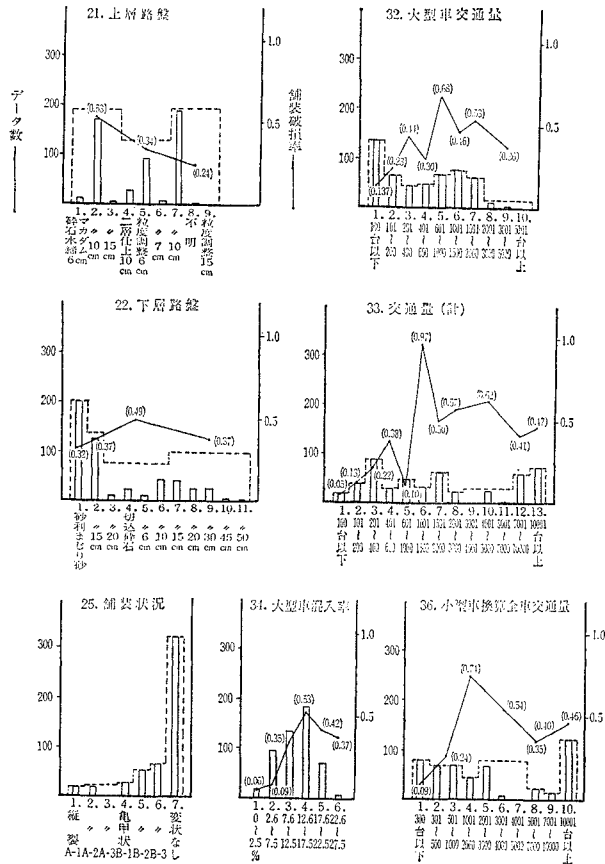


図-2 (b) 単純集計および破損率

表-2 (a) Category 一覧表および単純集計表

要因	舗装破損状況							土 質													C.B.R.					地 盤					
	縦裂	亀裂	甲	変状	変状	変状	変状	れき・砂混合土	れき・砂・シルト混合土	シルト質のれき	粘土質のれき	シルト質の砂	シルト質の砂	粘土質の砂	粘土質のシルト	粘土質のシルト	有機質粘土	有機質粘土	なし	5%以下	15%~5%	40%~15%	40%以上	川沿	川沿	海沿					
Category	A	A	A	B	B	B	なし	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	1	2	3	4	5	3	2	1			
原データ Category	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	1	2	3	4	5	3	2	1			
修正 Category	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11						1	2	3	4	5	1	2	

要因	地 形					湿 気		積 雪		施 工 履 整											表 層 (cm)						基 層								
	平地	平地	切取	溪谷	両片	多	少	多	少	施工後の経過年次											密粒粗度						あな								
Category	1	2	3	4	5	1	2	1	2	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	A	A	A	C	粒	粒	度	度	1	2						
原データ Category	1	2	3	4	5	1	2	1	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	1	2						
修正 Category	1	2	3	4	5	1	2	1	2	1	2	3	4	5	6	7	8											1	2	3				1	2

要因	上 層 路 盤 (cm)									下 層 路 盤 (cm)											乗用車換算全車交通量 (クラス別)																				
	碎石水締マカダム	二粒層	二粒層	不粒層	不粒層	砂利	切込	切込	切込	切込	切込	切込	切込	切込	切込	切込	切込	切込	切込	切込	300台以下	301~500台	501~1000台	1001~2000台	2001~3000台	3001~4000台	4001~5000台	5001~7000台	7001~10000台	10001台以上											
Category	6	10	15	10	6	7	10	15	10	15	20	5	6	10	15	20	30	45	50	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
原データ Category	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
修正 Category	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

表-2 (b) Category 一覧表

要因	小 型 車 交 通 量									大 型 車 交 通 量										全 車 交																		
	300以下	301~500	501~1000	1001~2000	2001~3000	3001~4000	4001~5000	5001~7000	7001~10000	10001以上	100以下	101~200	201~400	401~600	601~1000	1001~2000	2001~3000	3001~5000	5001~10000	10001以上	100以下	101~200	201~400	401~600	601~1000	1001~2000	2001~3000	3001~5000	5001~10000	10001以上								
Category	3	3	5	1	2	5	7	1	2	1	1	2	4	6	1	1	2	3	5	1	1	2	4	6	1	1	2	3	5	1	1	2	4	6	1	1	2	3
原データ Category	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	
修正 Category										1	2	3	4	5	6	7	8													1	2	3	4	5	6	7	8	

表-2 (c) 要因ごとの単純集計一覧表

Category	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
土質	64	16	30	22	147	46	68	27	31	46	12		3
C・B・R	193	33	156	108	22								
地盤形状	135	371	6										
地盤湿度	295	123	10	63	21								
積雪	196	138	178										
施工履歴	40	472											
表層	19	11	24	16	29	60	92	86	75	52	48		
基層	10	151	275	4	27	40	5						
上層路盤	128	384											
下層路盤	12	173	5	28	95	6	191	1	1				
舗装状況	203	126	11	22	10	42	40	27	27	3	1		
小型車交通量	20	20	1	28	53	67	323						
大型車交通量	21	62	84	72	60	87	84	37	5				
交通量(計)	136	66	43	47	68	76	62	12	2				
大型車混入率	21	40	91	29	49	32	64	23		27	2	61	73
小型車換算大型車交通量	18	96	136	182	72	8							
小型車換算全車交通量	129	82	35	79	79	60	37	9	2				
区間延長	81	71	71	46	71	9	26	15	122				
	30	154	154	69	33	18	34	11	9				

て、舗装破損状況に影響を与えていると思われる要因として、①土質、②C・B・R、③川沿いか、否か、④地形、⑤湿度、⑥積雪、⑦施工履歴、⑧表層、⑨基層、⑩上層路盤、⑪下層路盤、⑫交通量(小型車換算台数、および

表-3 (a) 舗装状況×土質クロス集計表

	6. 土 質													計
	1. れき	2. れき砂	3. 粘土質のれき	4. シルト質のれき	5. シルト質の砂	6. シルト質の混合土	7. 粘土質の砂	8. 粘土質の混合土	9. シルト質の砂	10. 粘土質の混合土	11. シルト質の砂	12. 有機質シルト	13. 有機質粘土	
25 舗装状況	7	1	7	1	1	2	1							20
1. 縦裂破損弱	2				5	5	2	1	1	3	1			20
2. 中強					1									1
3. 強	2	3	6	7	4	1	1	4						28
4. 亀甲状破損弱	13	10	2	9	3	7	4	2	2	1				53
5. 中強	6	7	10	3	26	4	4	3	1	2	1			67
6. 強	34	9	6	17	93	26	50	18	24	34	9			323
7. 変状なし	64	16	30	22	147	46	68	27	31	46	12			512
計														

および単純集計表

通 量	大型車混入率 (%)						大型車を小型車に換算						区 間 延 長									
3 4 5 7 10	0 2 7 12 17 22	3 5 0 0 0 0	1 2 3 4 5 7 10	0 0 0 0 0 0	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	
0 0 0 0 0 0	6 6 6 6 6 6	0 1 1 1 1 1 1	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	
1 1 1 1 1 1	7 12 17 22 27	1 1 1 1 1 1 1	1 2 3 4 5 7 10	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	
?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4 5 7 10	5 5 5 5 5 5	1 2 3 4 5 7 10	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1	
0 0 0 0 0		0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	
9 10 11 12 13	1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	
		1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8	

大型車交通量)をとることにした。

3. 数量化理論による解析

(1) 施工履歴および交通量の要因効果の検討

収集データの分析結果から取捨選択した上記の 12 個の要因を説明要因とし、外的基準は破損、非破損の 2 分類として解析を行った。その数量化計算、文献 1) の結果を 表-4 に示す。

表-4 において、category score の差が大きいほど、

表-3 (b) 舗装状況×地形クロス集計表

		9. 地 形					計
		1. 平地強	2. 平地軟	3. 切面取り側	4. 切片取り側	5. 溪谷	
25 舗装状況	1. 縦裂破損弱	12	1		3	4	20
	2. 中強	14	4		2		20
	3. 強	1					1
	4. 亀甲状破損弱	13	11		3	1	28
	5. 中強	30	8		13	2	53
	6. 強	39	21	2	4	1	67
	7. 変状なし	186	78	8	38	13	323
計	295	123	10	63	21	512	

表-3 (c) 舗装状況×施工履歴クロス集計表

		18. 施 工 履 歴											計
		1. 施工年	2. 次工年	3. 10年経過後	4. 10年経過後	5. 10年経過後	6. 10年経過後	7. 10年経過後	8. 10年経過後	9. 10年経過後	10. 10年経過後	11. 10年経過後	
25 舗装状況	1. 縦裂破損弱	1	2			1	6	7	2	1			20
	2. 中強				2	1	3	5	6	1	2		20
	3. 強						1						1
	4. 亀甲状破損弱	1			1	2	2	9	6	2	4	1	28
	5. 中強	6	2	8	1	2	7	21	3	2	1		53
	6. 強	9	7	10	4	7	9	13	5	2		1	67
	7. 変状なし	2		6	8	17	38	37	59	66	44	46	323
計	19	11	24	16	29	60	92	86	75	52	48	512	

表一3 (d) 舗装状況×交通量計クロス集計表

		33. 交通量 (計)															
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.			
		100台以下	1001	2001	4001	6001	10001	15001	20001	30001	40001	50001	70001	100001	計		
		2000	4000	6000	10000	15000	20000	30000	40000	50000	70000	100000	100000以上				
25 舗装 状況	1. 縦裂破損弱	1		5	1	2		4	4				1	2	20		
	2. 中強		1	2	4			6	1					6	20		
	3. 亀甲状破損弱			1											1		
	4. 亀甲状破損弱			5	3			5					5	9	2	29	
	5. 中強			3	6	1	1	15	9	6			2	3	6	52	
	6. 強			1	1	2	2	16	8	2			2	1	5	26	66
	7. 変状なし	20	35	71	18	44	1	32	10				18	36	39	324	
	計	21	40	91	29	49	32	64	23				27	2	61	73	512

表一3 (e) 舗装状況×小型車換算全車交通量クロス集計表

		36. 小型車換算全車交通量											
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.		
		300台以下	3001	5001	10001	15001	20001	30001	40001	50001	70001	100001	計
		5000	10000	15000	20000	30000	40000	50000	70000	100000	100000以上		
25 舗装 状況	1. 縦裂破損弱	1	5	3			8			1	1	1	20
	2. 中強	1	2	4			6	1			2	4	20
	3. 亀甲状破損弱	1											1
	4. 亀甲状破損弱		5	3			7			3	3	8	29
	5. 中強	3	6	2	14	10	6			2		9	52
	6. 強	1	1	3	17	10				3		31	66
	7. 変状なし	74	52	56	12	33	2			20	9	66	324
	計	81	71	71	43	74	9			29	15	119	512

表一3 (f) 小型車換算全車交通量×施工履歴クロス集計表

		18. 施工履歴											
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	
		施工後10年経過以上	10年	8年	7年	6年	5年	4年	3年	2年	1年	計	
36 小型車換算全車交通量	1. 300台以下				2	2	3	8	14	25	12	15	81
	2. 301~500	3		1	1		1	8	15	18	15	9	71
	3. 501~1000		3	1	2	3	9	10	7	13	8	15	71
	4. 1001~2000	3	1	1	1	2	11	17	7	2		1	46
	5. 2001~3000	1			2	16	28	16	3	3	2	7	71
	6. 3001~4000			8	1								9
	7. 4001~5000												
	8. 5001~7000	1		2		4	1	3	6	2	7		26
	9. 7001~10000							3	7	2	1	2	15
	10. 10001台以上	11	7	11	9	16	16	11	19	11	5	6	122
	計	19	11	24	16	29	60	92	86	75	52	48	512

表一4 要因別 Category score 表 (原データのまま、破損、非破損の2種類)

番号	Item	Category	Category score
1	土質	れき砂・混合土	-0.6235
		れき砂・シルト混合土	-0.6174
		シルト質のれき	0.9220
		粘土質のれき	-0.5152
		砂	-0.7268
		シルト質の砂	-1.9042
		砂・シルト混合土	-0.9828
		粘土質の砂	-0.8073
		粘土質のシルト	-0.9181
		シルト質粘土	-0.6202
		砂質粘土	0.0164
2	CBR	なし	0.4700
		あり 5%以下	-0.2431
		15%~5%	0.4822
		40%~15%	-0.1292
		40%以上	0.0164
3	地盤	川沿いでない	-0.1282
		川沿い	0.0164
4	地形	平地	0.1663
		強軟	0.5981
		切取り両側	-0.6478
		削り片	0.3239
		倒谷	0.0164
5	湿度	多い	0.6082
		中	0.0665
		少ない	0.0164
6	積雪	多	0.4490
		少	0.0164
7	施工履歴	9~10年以上	3.6864
		7~8年	0.9047
		6年	0.2992
		5年	1.2351
		4年	0.4594
		3年	0.5226
		2年	-0.1170
		1年	0.0164
8	表層	密粒度 AC 3~4 cm	0.4863
		5~6 cm	-0.3548
		粗粒度 4~6 cm	0.0164
9	基層	あり	0.6866
		なし	0.0164
10	上層路盤	砕石水締マカダム 6~15 cm	0.6901
		二層仕上 10 cm 粒度調整 6~7	0.4989
		不明、粒度調整 10~15 cm	0.0164
11	下層路盤	砂利まじり砂 10 cm	1.3855
		15~20 cm	1.4089
		切入砕石 5~100 cm	1.1065
		15~50 cm	0.0164
12	小型車換算全車交通量	300台以下	-2.1521
		301~500台	-2.2637
		501~1000台	-2.1758
		1001~2000台	1.6845
		2001~5000台	-0.8976
		5001~7000台	-0.7174
		7001~10000台	-1.7954
		10001台以上	0.0164

すなわち、range が大きいほど、要因効果は大きいことを示すものであって、range の大きさの順序は交通量、施工履歴、地形、土質、および上層路盤となっている。逆に、要因効果の小さいものとして、川沿いか、否か、基層の有無、表層、積雪、および C・B・R があることがわかる。

sample score と舗装の破損の評価に関しては、文献 6), 8) および 9) に述べられている数量化理論第Ⅱ類分類、文献 1) によってわかるように、ここでは、sample score が高いほど、破損が大きいことから、category score も高いほど舗装の破損率が大きい。それで、施工履歴の category score は、履歴が大きくなるほど、また交通量の category score は、交通量が多くなるほど、一様増加することが期待される。

図-3(a), (b) は、施工履歴、および交通量と破損率の関係を示すものであるが、どちらも一様変化とは見なされない。すなわち、施工履歴では、6年および7~8年の score が低すぎ、交通量では 1000~2000 台/日の

score が高すぎる。したがって、category score の変化についての説明がつきにくい。

図-2(a) において、18. 施工履歴のところを見ると、施工履歴 6年、および 7~8 年のところで、資料の数が少なく、かつ破損率が多い。36. 小型車換算全車交通量では、1000~2000 台のところ、資料数が少なく破損率が多い。これらのことが、category score の不連続性と関連していると考えられるが、それを個別の要因ごとに補正する手段が見あたらない。そこで、その2つの要因を合成して検討すれば、納得のいく説明が可能になりはしないかと考えた。ここで文献 2) で述べられている主軸法を利用することを試みることにした。

(2) 合成変量による要因効果の検討

以下、まず、理論の概要を述べ、後に、その応用例を述べることにする。

a) 理論の概要

資料の分類に当り、その性質として、客観的に測定できるものを“要因”とよび、分析結果ののちに、共通的なものとして抽出されるものを“因子”とよぶことにする。

2つ以上の要因の1次結合として作られる新しい因子を“合成因子”とよび、その1次結合式の係数(各構成要因の要因効果を示す指標)を“重みベクトル”とよぶ。

そして、この重みベクトルは、それぞれの要因と合成因子の単相関係数の2乗和が最大になるように定められる。さらに、標準化された(normalized)“合成因子”、およびそれを作る“重みベクトル”をそれぞれ“標準合成因子”、“標準重みベクトル”とよぶことにする。

1つの合成因子と、これを構成しているn個の要因との相関関係を“合成因子の構造”とよび、相関係数をもって表わす。また、n個の相関係数を要素とするベクトルを“構造ベクトル”とよぶ。

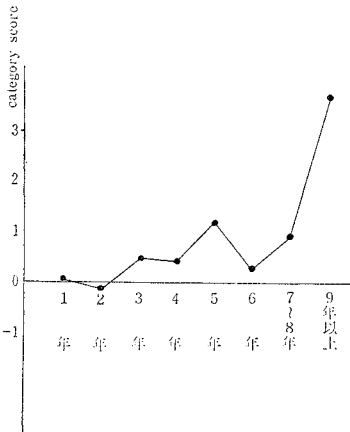
すなわち、この方法は、いくつかの要因群が共通にもっていると思われる因子を作り出そうとする相関分析の1方法である。この研究では、その要因群として、施工履歴と交通量とをとりあげ、それらの合成因子を利用して要因個別には理解できなかった調査結果がまちがっていないことを確かめたことになる。

一般に、相関係数は正負の値をとるから、合成因子 f と各要因 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ との単相関係数 r_i の2乗和、

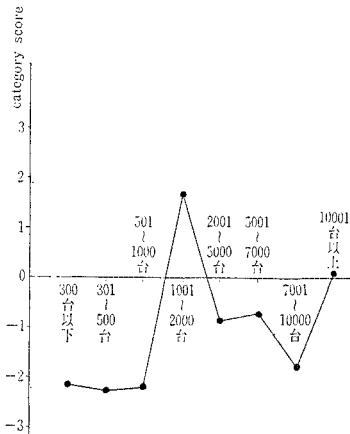
$$\rho^2 = r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_n^2 \dots \dots \dots (1)$$

を最大にするように、各要因の重み $\omega_i (i=1, 2, \dots, n; n$ は item 番号とする) を求めると、

$$f = \sum_{i=1}^n \omega_i x_i \dots \dots \dots (2)$$



(a) 施工履歴



(b) 小型車換算全車交通量

図-3 要因の category score 分布図

となって、合成因子をつくることができる。

まず、次の行列を用意する。

$$K = \begin{bmatrix} x_{11}x_{12}\cdots x_{1n} \\ x_{21}x_{22}\cdots x_{2n} \\ \vdots \\ x_{N1}x_{N2}\cdots x_{Nn} \end{bmatrix} : \text{データ行列} \quad \dots (3)$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11}Z_{12}\cdots Z_{1n} \\ Z_{21}Z_{22}\cdots Z_{2n} \\ \vdots \\ Z_{N1}Z_{N2}\cdots Z_{Nn} \end{bmatrix} : \text{標準化されたデータ行列} \quad \dots (4)$$

ここに、 n ：要因数、 N ：データ数であって、その標準化の手順は式 5) のように表わされる。

$$Z_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / \sigma_j \quad \dots (5)$$

ここに、 $\bar{x}_j = \sum_{i=1}^N x_{ij} / N$, $\sigma_j^2 = \sum_{i=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 / N$, また、 $j=1, 2, \dots, n$.

このとき、 i, j 要因間の相関係数 r_{ij} を要素とする相関行列は、

$$R = \begin{bmatrix} r_{11}r_{12}\cdots r_{1n} \\ r_{21}r_{22}\cdots r_{2n} \\ \vdots \\ r_{n1}r_{n2}\cdots r_{nn} \end{bmatrix} \quad \dots (6)$$

$$r_{ij} = \sum_{v=1}^N Z_{vi}Z_{vj} / N = r_{ji} \quad (i, j=1, 2, \dots, n)$$

より、

$$R = (1/N) Z^T Z \quad \dots (7)$$

で表わされる。いま、次の定義をする：

重みベクトルの転置行列、

$$W^T = [W_1, W_2, \dots, W_n] \quad \dots (8)$$

標準重みベクトルの転置行列、

$$\omega^T = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n] \quad \dots (9)$$

合成因子ベクトル、

$$f^T = [f_1, f_2, \dots, f_n] = (KW)^T \quad \dots (10)$$

標準合成因子ベクトル、

$$g^T = [g_1, g_2, \dots, g_n] = (Z\omega)^T \quad \dots (11)$$

標準化合成因子 g_i と、標準化された Z_{ij} を用いると、合成因子と各要因との相関係数 $r_j (j=1, 2, \dots, n)$ を並べたベクトルは、次のようにして求められる。

$$\begin{aligned} r_j &= (1/N) \sum_{i=1}^N Z_{ij} g_i \\ &= (1/N) \sum_{i=1}^N Z_{ij} \sum_{k=1}^n Z_{ik} \omega_k \quad \dots (12) \end{aligned}$$

したがって、単相関係数行列

$$a^T = [r_1, r_2, \dots, r_n] \quad \dots (13)$$

は、次のように表わされる。

$$a = (1/N) Z^T Z \omega = R \omega \quad \dots (14)$$

したがって、われわれの目的とする相関係数 r_i の 2 乗和

$$\rho^2 = r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_n^2 = a^T a \quad \dots (15)$$

は、次のようになる。

$$\rho^2 = \omega^T R \omega \quad \dots (16)$$

一方、標準化合成因子の分散 σ^2 は、

$$\sigma^2 = \omega^T R \omega \quad \dots (17)$$

と誘導することができる。

いま、 $\sigma^2=1$ なる条件のもとで ρ^2 を最大にするには ρ^2 と σ^2 がうえのように書けることから、次の条件式が得られる。

$$R(R\omega - \lambda\omega) = 0 \quad \dots (18)$$

ここに λ は Lagrange の未定数である。

したがって、 R の行列式 $|R| \neq 0$ を仮定すれば、上記の問題は、

$$R\omega = \lambda\omega \quad \dots (19)$$

なる固有値問題を解けばよいこととなる。一方、単相関係数の 2 乗和 ρ^2 は、

$$\rho^2 = \omega^T R \omega = \omega^T R (\lambda\omega) = \lambda \omega^T R \omega = \lambda \quad \dots (20)$$

となる。したがって、 ρ^2 を最大ならしめようとするわれわれの意図は、結局

$$\sigma^2 = \omega^T R \omega = 1 \quad \dots (21)$$

なる条件のもとで、

$$R\omega = \lambda\omega \quad \dots (22)$$

なる最大固有値問題を解くことに帰着する。これは式 (19) で得られたものである。

なお、条件式 (19) のもとでの求解 ω は、標準化されたデータ行列 Z に乗じることより、標準化された合成因子を生成するのであるが、一般には、標準化される前のデータ行列 K に、直接かけることのできる重みベクトル W を求める必要がある。それは、次のようにすればたやすく求められる。

$$Z = (K - IM^T) V^{-1/2} \quad \dots (23)$$

ここに、 $I^T = [1, \dots, 1]$, $M^T = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n]$,

$$\bar{x}_j = (1/N) \sum_{i=1}^N x_{ij}$$

$$V^{-1/2} = \begin{bmatrix} 1/\sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/\sigma_2 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & & \vdots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1/\sigma_n \end{bmatrix} \quad \sigma_j^2 : j \text{ 要因の分散}$$

とおけば、

$$\begin{aligned} g &= Z\omega = K(V^{-1/2}\omega) - (IM^T V^{-1/2}\omega) \\ &= K(V^{-1/2}\omega) - \sum_{j=1}^n (\bar{x}_j \omega_j / \sigma_j) I \\ &= K(V^{-1/2}\omega) - CI \quad (C \equiv \text{定数}) \quad \dots (24) \end{aligned}$$

となる。

右辺の第 2 項は、合成因子の平行移動の作用であるから、結局、われわれの知りたい最終的な重みベクトル W は、

$$W^T = [x_1, x_2, \dots, x_n] = (V^{-1/2}\omega)^T$$

表-5 (a) 主軸法による合成変量：式 (26) によるもの

施工履歴 大型車 交通量	1. 施工後の 経過年次 10年以上	2. " 10 年	3. " 9 年	4. " 8 年	5. " 7 年	6. " 6 年	7. " 5 年	8. " 4 年	9. " 3 年	10. " 2 年	11. " 1 年
1. 100 台以下	-0.0092	0.2497	0.5086	0.7675	1.0264	1.2853	1.5442	1.8031	2.0620	2.3209	2.5798
2. 101~ 200	-0.2774	-0.0184	0.2405	0.4994	0.7583	④ 1.0172	1.2761	1.5350	⑤ 1.7939	② 2.0528	① 2.3117
3. 201~ 400	-0.5454	-0.2865	-0.0276	⑥ 0.2313	⑤ 0.4902	0.7491	1.0080	1.2669	1.5258	1.7847	2.0436
4. 401~ 600	-0.8135	-0.5546	-0.2957	⑦ -0.0368	0.2221	0.4810	0.7399	0.9988	1.2577	1.5166	1.7755
5. 601~1000	-1.0816	-0.8227	-0.5638	-0.3049	-0.0460	0.2129	0.4718	0.7307	0.9896	1.2485	1.5074
6. 1001~1500	-1.3497	⑧ -1.0988	-0.8319	0.5730	-0.3141	-0.0552	0.2037	0.4626	0.7215	0.9804	1.2393
7. 1501~2000	-1.6178	-1.3589	-1.1000	-0.8411	-0.5822	-0.3233	-0.0644	0.1945	0.4534	0.7123	0.9712
8. 2001~3000	-1.8859	-1.6270	-1.3681	1.1092	-0.8503	-0.5914	-0.3325	-0.0736	0.1853	0.4442	0.7031
9. 3001~5000	-2.1540	-1.8951	-1.6362	-1.3773	-1.1184	-0.8595	-0.6006	-0.3417	-1.0828	0.1761	0.4350
10. 5001 台以上	-2.4222	-2.1633	-1.9044	-1.6455	-1.3866	-1.1277	-0.8688	-0.6099	-0.3510	-0.0921	0.1668

表-5 (b) 主軸法による合成変量：式 (27) によるもの

施工履歴 小型車換算 全車交通量	1. 施工後の 経過年次 10年以上	2. " 10 年	3. " 9 年	4. " 8 年	5. " 7 年	6. " 6 年	7. " 5 年	8. " 4 年	9. " 3 年	10. " 2 年	11. " 1 年
1. 300 台以下	0.0761	0.3359	0.5956	0.8553	1.1150	1.3747	1.6344	1.8941	2.1538	2.4135	2.6732
2. 301~ 500	-0.1073	0.1524	0.4121	0.6718	0.8315	1.1912	1.4509	1.1106	② 1.9703	① 2.2300	2.4897
3. 501~ 1000	-0.2908	-0.0311	0.2286	0.4883	0.7480	1.0077	1.2674	③ 1.5271	1.7868	2.0465	2.3062
4. 1001~ 2000	-0.4743	-0.2146	0.0451	0.3048	0.5645	⑤ 0.8242	④ 1.0839	1.3436	1.6033	1.8630	2.1227
5. 2001~ 3000	-0.6578	-0.3981	-0.1384	0.1213	⑥ 0.3810	0.6407	0.9004	1.1601	1.4198	1.6795	1.9392
6. 3001~ 4000	-0.8413	-0.5816	-0.3211	⑦ -0.0622	0.1975	0.4572	0.7169	0.9766	1.2363	1.4960	1.7557
7. 4001~ 5000	-1.0248	⑧ -0.7651	-0.5054	-0.2477	0.0140	0.2737	0.5334	0.7931	1.0528	1.3125	1.5722
8. 5001~ 7000	-1.2033	-0.9486	-0.6889	-0.4292	-0.1895	0.0902	0.3499	0.6096	0.8693	1.1290	1.3887
9. 7001~10000	-1.3918	-1.1321	-0.8724	-0.6126	-0.3530	-0.0933	0.1664	0.4261	0.6858	0.9455	1.2052
10. 10001 台以上	-1.5755	-1.3158	-1.0661	-0.7964	-0.5367	-0.2770	-0.0173	0.2424	0.5021	0.7618	1.0215

(注)カテゴリー化した時の境界線

$$=[\omega_1/\sigma_1, \omega_2/\sigma_2, \dots, \omega_n/\sigma_n] \dots\dots\dots(25)$$

で求められる。

b) 適用例

道路舗装の資料に主軸法を適用したところ、その計算結果は、次のようになった。

大型車交通量をとったとき、

$$f_i = 0.25893 x_1 - 0.26811 x_2 \dots\dots\dots(26)$$

小型車換算交通量をとったとき、

$$f_i = 0.25973 x_3 - 0.18351 x_4 \dots\dots\dots(27)$$

ここに、

f_i : 合成変量, x_1 および x_2 : 施工履歴,

x_3 : 大型車交通量, x_4 : 小型車換算全車交通量。

式 (26) および式 (27) を用いて、それぞれの 2 要因の各 category について計算した合成変量を表-5 に示す。表-5(a) の値は、-2.4222~2.5798、表-5(b) の値は、-1.5755~2.6732 の範囲にある。これを、数値の大きさの順に、9 あるいは 8 個に分類すると、表中太線で階段型に囲んだようになる。

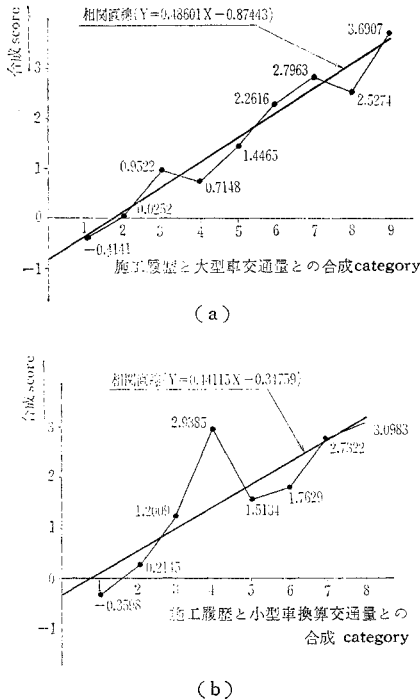


図-4 施工履歴と大型車交通量または小型車換算交通量との合成 score

次に、この新しい分類で再度、式 (26)、および (27) を用いて計算した結果を 図-4 に示す。ここでも 表-5 と同様、大型車交通量と施工履歴の合成変量に関するものを (a) とし、小型車換算全車交通量と施工履歴に関するものを (b) とする。これにより、交通量と施工履歴とを、それぞれ、独立した要因と考えたときには説明のつかなかったデータの凹凸が、主軸法による合成変量の作成によって、都合よく説明されたことになる。図-4 に記入されている回帰式は、得られた category ごとの合成変量を、最小2乗法によって計算したものである。

4. 舗装破損の将来推計の方法と補修管理計画の作成

(1) 将来推計の方法

表-6 は、大型車交通量と施工履歴との合成変量によって、破損、非破損についての解析を行った結果の category score 表であり、それによって、判別を試みたのが 図-5 である。小型車換算全車交通量による合成変量のときの判別を 図-6 に示す。

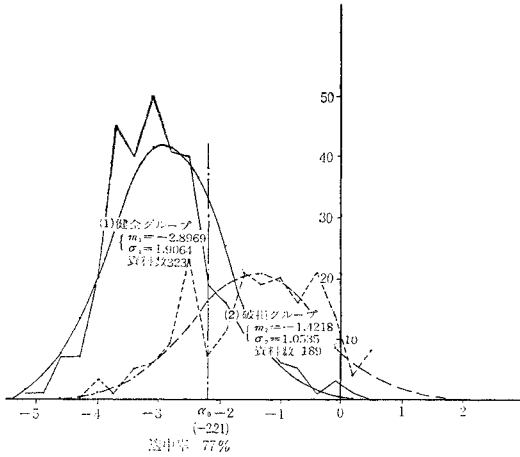
ここで、原データのままの計算による 表-4 における category score を用いた判別結果を 図-7 に示す。図-5 および 図-6 と比較してみると、適中率は合成

表-6 要因別 Category score 表 (大型車交通量と施工履歴を合成したとき、破損、非破損の2分類のとき)

番号	Item	Category	Category score
1	土質	砂混合土	-0.0474
		れき・砂・シルト混合土	0.3099
		シルト質れき	1.6103
		粘土質のれき	0.2415
		砂	-0.5250
		シルト質の砂	-1.8109
		砂・シルト・混合土	-0.7407
		粘土質の砂	-0.3324
		粘土質のシルト	-0.5654
		シルト質粘土	-0.5870
		砂質粘土	-0.4124
2	C B R	なし	-0.3973
		あり 50%以下	-1.0585
		15%~5%	-0.0810
		40%~15%	-0.9856
		40%以上	-0.4124
3	地盤	川沿でない	-0.3514
		川沿	-0.4124
4	地形	平地	-0.7296
		軟	-0.0838
		切取と両側	-1.2105
		片側	-0.3881
		溪谷	-0.4124
5	湿気	多い	-0.1222
		中	-0.2912
		少	-0.4124
6	積雪	多少	-0.7888
		い	-0.4124
7	表層	密粒度 AC 3~4 cm	-0.3064
		5~6 cm	-1.4882
		粗粒度 4~6 cm	-0.4124
8	基層	あり	0.0438
		なし	-0.4124
9	上層路盤	砕石水縮マカダム 6~15 cm	0.2693
		二層仕上 10cm 粒度調整 6~7	0.3471
		不明、粒度調整 10~15 cm	-0.4124
10	下層路盤	砂利まじり砂 10 cm	0.6386
		15~20 cm	0.6693
		切入砕石 5~10 cm	0.5666
		15~50 cm	-0.4124
11	大型車交通量と施工履歴	別記	0.4124
			0.2705
			1.0163
			2.6022
			1.6543
			1.5327
			2.3750
			3.3025

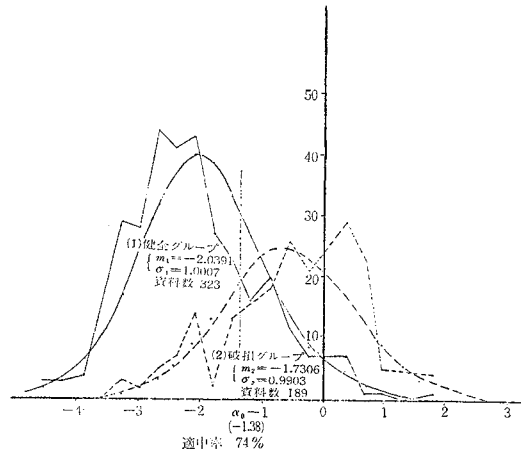
変量を用いないときの 図-7 のほうが、わずかながら高くなっている。すなわち、合成変量を用いることは、要因の説明のためには有効であるが、判別効果については、わずかながらではあるが不利となった。

しかし、将来予測にあたっては、合成変量によるほう



(大型車交通量と施工履歴の合成 score のとき)

図-5 Sample score 頻度分布



(小型車換算全車台数と施行履歴の合成 score のとき)

図-6 Sample score 頻度分布

表-7 整備計画に対する基礎数値表

路線名	町村名	区分	区間長	要因											舗装年度	舗装状況	47年	48年	49年	50年	51年	52年
				土質	CBR	地盤	地形	湿度	積雪	表層	基層	上層路盤	下層路盤	大型交通量								
一般国道一八四号線(その一)	三次市	1	491	1	1	2	1	1	2	2	1	1	4	7~9	40	B	-0.6099 ×	-0.6099 ×	-0.6099 ×	-0.6099 ×	-0.6099 ×	-0.6099 ×
		2	288	1	2	2	1	1	2	2	1	1	4	〃	40	B	-0.2759 ×	-0.2759 ×	-0.2759 ×	-0.2759 ×	-0.2759 ×	-0.2759 ×
		3	491	3	2	2	1	1	2	2	1	1	4	〃	41	B	0.3519 ×	0.3519 ×	0.3519 ×	0.3519 ×	0.3519 ×	0.3519 ×
		4	259	1	2	1	1	1	2	2	1	1	4	〃	41	B	-1.6773 ▲	-0.5140 ×	-0.5140 ×	-0.5140 ×	-0.5140 ×	-0.5140 ×
		5	491	1	3	1	1	1	2	2	1	1	4	6~9	42	B	-1.7186 ×	-1.5553 ×	-0.5553 ×	-0.5553 ×	-0.5553 ×	-0.5553 ×
		6	540	1	2	1	1	1	2	2	1	1	4	〃	42	B	-1.6773 ▲	-1.6773 ▲	-0.5140 ×	-0.5140 ×	-0.5140 ×	-0.5140 ×
		7	213	1	4	2	1	1	2	2	1	3	4	〃	42	A	-2.0887 ▲	-2.0887 ▲	-2.0887 ▲	-2.0887 ▲	-1.1943 ▲	-1.1943 ▲
		8	602	1	4	2	1	1	2	2	1	3	4	5~9	44	A	-2.0887 ▲	-2.0887 ▲	-2.0887 ▲	-2.0887 ▲	-1.1943 ▲	-1.1943 ▲
		9	500	1	4	2	1	1	2	2	1	3	4	4~8	45	A	-2.6234 △	-2.0887 △	-2.0887 ▲	-2.3576 △	-2.3576 △	-1.1943 △
		10	500	1	4	1	1	1	2	2	1	3	4	〃	45	A	-2.8615 △	-2.3268 △	-2.3268 △	-2.5957 △	-2.5957 △	-1.4324 △
		11	500	1	3	1	1	1	2	2	1	1	4	〃	45	A	-1.9844 ▲	-1.4497 ▲	-1.4497 ▲	-1.7186 ▲	-1.7186 ▲	-0.5553 ×
三良坂町	12	387	3	1	1	1	1	2	1	2	3	2	7~9	41	B	-0.1227 ×	-0.1227 ×	-0.3916 ×	-0.3916 ×	0.7717 ×	0.7717 ×	
	13	2000	3	1	2	1	1	2	1	2	3	2	〃	41	C	0.1151 ×	0.1151 ×	-0.1535 ×	-0.1535 ×	1.0098 ×	1.0098 ×	
	14	323	3	1	1	1	1	2	1	2	3	2	〃	41	C	-0.1227 ×	-0.1227 ×	-0.3916 ×	-0.3916 ×	0.7717 ×	0.7717 ×	
	15	64	3	1	1	1	1	2	1	2	3	2	5~9	44	C	-1.4725 ▲	-1.4725 ▲	-0.6574 ×	-0.1227 ×	-0.1227 ×	0.7717 ×	
	16	62	3	1	1	1	1	2	1	2	3	2	4~8	45	C	-2.2042 ▲	-1.4725 ▲	-1.4725 ▲	-0.6574 ×	-0.1227 ×	-0.3916 ×	

がわかり易いので、ここは合成変量によることにした。合成変量の要因としては、図-4で(a)と(b)を比較すると(a)のほうが形がよく、また、図-5と図-6に

おける適中率を見ても、図-5のほうが大きいので、ここでは、大型車交通量と施工履歴をとりあげて、長期管理計画を樹立することとした。

最後に、この研究は、広島県から株式会社福山コンサルタントに対して発注された委託業務の報告書の内容をなすものであることを付記して、これを発表することを許された広島県の担当者の方々へ深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 林 知己夫・村山孝喜：市場調査の計画と実際，日刊工業新聞社（1964）
- 2) 芝 祐順：行動科学における相関分析法，東京大学出版会（1964）
- 3) 丸安降和：写真判読による地すべり崩壊の統計的研究，土木学会論文報告集，No. 116，pp. 37～55（1965）
- 4) 福山俊郎：特集・土木界の動向をさぐる／総合と分化の観点から，土木学会誌，Vol. 53，pp. 26～29（1968）
- 5) 丸安降和・清水 仁・鶴田厚二：都市における自然災害一とくに、かけ崩れの危険度予知についての研究一，土木学会論文報告集，No. 159，pp. 77～89（1968）
- 6) 松尾寿一・島 常信・福山俊郎：道路橋施工実績調査資料の解析，土木学会論文報告集，No. 176，pp. 1～11（1970）
- 7) 赤松惟夫・川井 優・福山俊郎：パーソントリップの交通機関利用率に関する解析，土木学会論文報告集，No. 193 pp. 81～88（1971）
- 8) 久保村圭助・武井昌博：数量化法による切取りのり面の安全度解析，土木学会論文報告集，No. 194，pp. 141～159（1971）
- 9) 持永竜一郎・福山俊郎：シラスのり面崩壊に関する要因分析，土木学会論文報告集，No. 197，pp. 101～110.
(1973.6.21・受付)