

83-39-232

瀝青混凝土填充料 拌合技術之研究



交通部運輸研究所

中華民國八十三年九月

交通部運輸研究所 合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱 中文：瀝青混凝土填充料拌合技術之研究 外文：A Study on the Mixing Method of Fillers in Asphalt Concrete			
國際標準書號（或叢刊號）	政府出版品統一編號 009104830380	運輸研究所出版品編號 83-39-232	
本所主辦單位：運工組 主 管：侯和雄 計畫主持人：侯和雄 研究人員：黃萬益	合作研究單位：國立臺灣工業技術學院營建系 計畫主持人：沈得縣、劉明仁 研究人員：張邦域、張文溢、張道光 地 址：台北市基隆路四段43號 聯絡電話：(02)7376573	研究期間 自82年08月 至83年06月	
關鍵詞：填充料、瀝青混凝土、拌合技術、乾拌法、濕拌法			
摘 要：本研究係以石粉、水泥、飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵等材料，分別作為瀝青混凝土之填充料，採用國內路面工程目前常用施工規範中粗級配（III d）、密級配（IV b）及瀝青砂級配（VII a）等三種粒料級配進行一系列瀝青混凝土拌合試驗研究，比較填充料乾拌法（填縫理論filler theory）及濕拌法（膠漿理論mastic theory）之效果，而尋求最有效之拌合技術。研究結果顯示：(1) 傳統填充料包括石粉及水泥，資料回收細料包括飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵等填充料，其於填充料乾拌法與濕拌法瀝青混凝土上之應用效果，仍以石粉及水泥之效果較優；資源回收細料則以粉塵效果最佳，爐石粉次之，而飛灰居末。(2) 在相同填充料時，瀝青混凝土填充料濕拌法之成效較填充料乾拌法為佳。			
出版日期	頁數	工本費	本 出 版 品 取 得 方 式
83年 9 月	156	160	凡屬機密或限閱性出版品均不對外公開。一般性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按工本費價購。
管制等級： <input type="checkbox"/> 機密 (<input type="checkbox"/> 解密日期為 年 月 日， <input type="checkbox"/> 承辦單位視情況辦理解密) <input type="checkbox"/> 限閱 (<input type="checkbox"/> 解限日期為 年 月 日， <input type="checkbox"/> 主辦單位視情況辦理解限) <input checked="" type="checkbox"/> 一般			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

瀝青混凝土填充料拌合技術之研究

摘 要

本研究係以石粉、水泥、飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵等材料，分別作為瀝青混凝土之填充料，採用國內路面工程目前常用施工規範中粗級配(III d)、密級配(IV b)及瀝青砂級配(VII a)等三種粒料級配進行一系列瀝青混凝土拌合試驗研究，比較填充料乾拌法(填縫理論Filler Theory)及濕拌法(膠漿理論Mastic Theory)之效果，而尋求最有效之拌合技術。

瀝青混凝土試體之製作及試驗係以馬歇爾配合設計法使用III d、IV b及VII a三種級配分別以石粉、水泥、飛灰、爐石粉及粉塵等五種作為填充料，採用填充料乾拌及濕拌兩種拌合方式製作馬歇爾試體分別求取最佳瀝青含量，再進行基本力學性質試驗及車轍試驗，以分析各種填充料及拌合技術之優劣，並與馬歇爾設計規範比較，以評估其在鋪面工程上應用之可行性及拌合效果。

研究結果顯示：(1)傳統填充料石粉及水泥，資源回收細料飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵等填充料，其於填充料乾拌法與濕拌法瀝青混凝土上之應用，仍以石粉、水泥之效果較優；資源回收細料則以粉塵效果最佳，爐石粉次之，而飛灰居末。(2)瀝青混凝土填充料濕拌法較填充料乾拌法為佳。

關鍵字：填充料、瀝青混凝土、拌合技術。

A Study on the Mixing Method of Fillers in Asphalt Concrete

ABSTRACT

In this study, stone dust, portland cement, fly ash, slag powder and baghouse fine are used as the fillers of asphalt concrete to undertake a series of asphalt concrete mix tests, to compare the effectiveness of various mixing technology and find the best mixing technology. Three types of grading, coarse grade (III d), dense grade (IV b) and sand sheet asphalt grade (VII a), which are often found in technical specifications for domestic construction projects, are used in a series of mixing tests for asphalt concrete. By comparing the test results with the Filler and Mastic Theory, a most effective mix technology for asphalt concrete is obtained.

The test samples of the asphalt concrete are produced by following Marshall mixing design method. Three types of grading (III d, IV b, VII a), five kinds of filler (stone dust, portland cement, fly ash, slag powder, baghouse fine), and two kinds of mixing method (dry, wet) have been taken for processing of Marshall specimens to find the optimal asphalt content. Then undertake basic mechanical tests and rutting tests. The different fillers and mixing technology are compared. They are also compared with Marshall design Code to assess the possibility of their application to pavement engineering and mixing efficiency.

The results show that (1) the conventional fillers such as stone dust and cement have the best mechanical performance, when using either dry or wet mix, and the performance sequence for the recycled fillers are, first baghouse fines, second slag powder and third fly ash. (2) The samples made by the wet mix technology have better performance results than those made by the dry mix technology.

Keywords : fillers , asphalt concrete , mixing technology.

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
誌謝	III
目錄	IV
圖目錄	VIII
表目錄	X III
第一章 緒論	1
1-1 研究動機	1
1-2 研究目的	2
1-3 研究範圍	2
1-4 研究步驟與方法	3
1-5 研究流程	5
第二章 文獻回顧	7
2-1 瀝青材料之組成及物性	7
2-1-1 瀝青材料之組成	7
2-1-2 瀝青材料之物理性質	9
2-2 填充料之種類及其性質	10
2-3 瀝青混凝土之工程性質	15
2-4 瀝青混凝土品質控制之因素	16
2-5 填充料對瀝青混凝土品質之影響	18
2-5-1 飛灰在瀝青混凝土上應用之成效	18
2-5-2 爐石粉在瀝青混凝土上應用之成效 ..	19
2-5-3 拌合廠回收粉塵在瀝青混凝土上應用 之成效	20

2-6	填充料在瀝青混凝土中扮演之角色	20
第三章	試驗材料及試驗計畫	23
3-1	試驗材料準備	23
3-2	材料試驗計畫	25
3-2-1	瀝青材料物性試驗	25
3-2-2	粒料物性試驗	27
3-2-3	填充料物性試驗	28
3-3	瀝青混凝土配合設計試驗計畫	28
3-3-1	馬歇爾法配合設計特性	29
3-3-2	馬歇爾法試驗設備	29
3-3-3	馬歇爾法配合設計步驟	31
3-4	瀝青混凝土基本力學試驗計畫	33
3-4-1	抗壓試驗	34
3-4-2	抗拉(劈裂)試驗	35
3-4-3	抗剪試驗	38
3-4-4	抗彎試驗	40
3-4-5	試驗應注意事項	42
3-5	瀝青混凝土車轍試驗計畫	42
第四章	試驗結果分析與討論	47
4-1	試驗材料基本性質分析	47
4-1-1	瀝青材料	47
4-1-2	粒料	48
4-1-3	填充料	49
4-2	瀝青混凝土馬歇爾試驗結果分析	49
4-2-1	穩定值	50

4-2-2	流度值	55
4-2-3	單位重	60
4-2-4	孔隙率	64
4-2-5	粒料間孔隙	65
4-3	瀝青混凝土馬歇爾設計結果分析	73
4-3-1	最佳瀝青含量及馬歇爾設計值	73
4-3-2	粗級配(Ⅲd)瀝青混凝土	78
4-3-3	密級配(Ⅳb)瀝青混凝土	79
4-3-4	瀝青砂級配(VⅡa)瀝青混凝土	81
4-4	瀝青混凝土基本力學試驗結果分析	83
4-4-1	抗壓強度	84
4-4-2	抗拉強度	85
4-4-3	抗彎強度	85
4-4-4	抗剪強度	86
4-5	瀝青混凝土車轍試驗結果分析	88
4-5-1	動穩定值	99
4-5-2	變形率	101
4-5-3	輪跡外觀	108
4-6	填充料拌合技術及拌合效果評估	111
4-6-1	填充料可行性分析	111
4-6-2	填充料應用效果比較	113
4-6-3	填充料拌合技術可行性分析	117
4-6-4	填充料拌合技術比較及評估	120
4-7	改質瀝青之可行性分析	128
4-7-1	改質瀝青膠漿物性試驗結果及分析 ...	129

4-7-2 改質瀝青膠漿馬歇爾配合設計試驗結果及分析	131
第五章 結論與建議	134
5-1 結論	134
5-2 建議	136
參考文獻	138
附錄(一) 期中簡報	144
附錄(二) 期末簡報	151

圖目錄

圖 1-1	研究流程圖	6
圖 2-1	瀝青組成示意圖	8
圖 3-1	馬歇爾試驗儀	30
圖 3-2	自動夯壓機	30
圖 3-3	馬歇爾配合設計試驗流程	32
圖 3-4	抗壓試驗操作情形	36
圖 3-5	抗壓試體與馬歇爾試體比較	36
圖 3-6	抗壓試體模及試體	37
圖 3-7	抗拉試體施行劈裂試驗情形	37
圖 3-8	抗剪試驗操作情形	39
圖 3-9	抗剪試驗裝置及試體	39
圖 3-10	抗彎試驗操作情形	41
圖 3-11	抗彎試體模、承壓頭座及試體	41
圖 3-12	車轍試體滾壓機	46
圖 3-13	車轍試驗輪跡試驗儀	46
圖 4-1	填充料乾拌瀝青混凝土穩定值之比較	53
	(a) 粗級配(Ⅲd)	52
	(b) 密級配(Ⅳb)	52
	(c) 瀝青砂級配(Ⅶa)	53
圖 4-2	填充料濕拌瀝青混凝土穩定值之比較	54
	(a) 粗級配(Ⅲd)	53
	(b) 密級配(Ⅳb)	54
	(c) 瀝青砂級配(Ⅶa)	54
圖 4-3	填充料乾拌瀝青混凝土流度值之比較	58

(a) 粗級配(Ⅲd)	57
(b) 密級配(Ⅳb)	57
(c) 瀝青砂級配(Ⅶa)	58
圖 4-4 填充料濕拌瀝青混凝土流度值之比較	59
(a) 粗級配(Ⅲd)	58
(b) 密級配(Ⅳb)	59
(c) 瀝青砂級配(Ⅶa)	59
圖 4-5 填充料乾拌瀝青混凝土單位重之比較	62
(a) 粗級配(Ⅲd)	61
(b) 密級配(Ⅳb)	61
(c) 瀝青砂級配(Ⅶa)	62
圖 4-6 填充料濕拌瀝青混凝土單位重之比較	63
(a) 粗級配(Ⅲd)	62
(b) 密級配(Ⅳb)	63
(c) 瀝青砂級配(Ⅶa)	63
圖 4-7 填充料乾拌瀝青混凝土空隙率之比較	68
(a) 粗級配(Ⅲd)	67
(b) 密級配(Ⅳb)	67
(c) 瀝青砂級配(Ⅶa)	68
圖 4-8 填充料濕拌瀝青混凝土空隙率之比較	69
(a) 粗級配(Ⅲd)	68
(b) 密級配(Ⅳb)	69
(c) 瀝青砂級配(Ⅶa)	69
圖 4-9 填充料乾拌瀝青混凝土V.M.A.之比較	71
(a) 粗級配(Ⅲd)	70

(b) 密級配(IVb)	70
(c) 瀝青砂級配(VIIa)	71
圖 4-10 填充料濕拌瀝青混凝土V.M.A.之比較	72
(a) 粗級配(III d)	71
(b) 密級配(IVb)	72
(c) 瀝青砂級配(VIIa)	72
圖 4-11 密級配(IVb)瀝青混凝土石粉填充料乾拌法之 馬歇爾試驗值迴歸曲線	75
(a) 穩定值	74
(b) 流度值	74
(c) 單位重	74
(d) 空隙率	75
(e) V.M.A.	75
圖 4-12(a)抗彎試體呈45° 裂紋破壞情形	87
圖 4-12(b)抗彎試體呈90° 裂紋破壞情形	87
圖 4-13(a)密級配乾拌瀝青混凝土25°C輪壓 7 kg/cm ² 車轍試驗變形圖	93
圖 4-13(b)密級配濕拌瀝青混凝土25°C輪壓 7 kg/cm ² 車轍試驗變形圖	93
圖 4-14(a)密級配乾拌瀝青混凝土25°C輪壓13.2kg/cm ² 車轍試驗變形圖	94
圖 4-14(b)密級配濕拌瀝青混凝土25°C輪壓13.2kg/cm ² 車轍試驗變形圖	94
圖 4-15(a)密級配乾拌瀝青混凝土25°C輪壓19.4kg/cm ² 車轍試驗變形圖	95

圖 4-15(b)密級配濕拌瀝青混凝土25°C輪壓19.4kg/cm ² 車轍試驗變形圖	95
圖 4-16(a)密級配乾拌瀝青混凝土60°C輪壓 7 kg/cm ² 車轍試驗變形圖	96
圖 4-16(b)密級配濕拌瀝青混凝土60°C輪壓 7 kg/cm ² 車轍試驗變形圖	96
圖 4-17(a)密級配乾拌瀝青混凝土60°C輪壓13.2kg/cm ² 車轍試驗變形圖	97
圖 4-17(b)密級配濕拌瀝青混凝土60°C輪壓13.2kg/cm ² 車轍試驗變形圖	97
圖 4-18(a)密級配乾拌瀝青混凝土60°C輪壓19.4kg/cm ² 車轍試驗變形圖	98
圖 4-18(b)密級配濕拌瀝青混凝土60°C輪壓19.4kg/cm ² 車轍試驗變形圖	98
圖 4-19 25°C時乾拌法車轍試驗動穩定值DS趨勢圖 ...	104
圖 4-20 25°C時濕拌法車轍試驗動穩定值DS趨勢圖 ...	104
圖 4-21 60°C時乾拌法車轍試驗動穩定值DS趨勢圖 ...	105
圖 4-22 60°C時濕拌法車轍試驗動穩定值DS趨勢圖 ...	105
圖 4-23 25°C時乾拌法車轍試驗變形率RD趨勢圖	106
圖 4-24 25°C時濕拌法車轍試驗變形率RD趨勢圖	106
圖 4-25 60°C時乾拌法車轍試驗變形率RD趨勢圖	107
圖 4-26 60°C時濕拌法車轍試驗變形率RD趨勢圖	107
圖 4-27(a)25°C乾、濕拌瀝青混凝土車轍試驗輪跡外觀	109
圖 4-27(b)60°C乾、濕拌瀝青混凝土車轍試驗輪跡外觀	109
圖 4-28(a)壓密車轍	110

圖 4-28(b) 橫向推擠	110
圖 4-29 原衡量式瀝青混凝土拌合廠生產流程	122
圖 4-30 建議修改後之衡量式瀝青混凝土拌合廠生產 流程	122
圖 4-31 各填充料粗級配(III d)乾、濕拌瀝青混凝土穩 定值之比較	123
圖 4-32 各填充料密級配(IV b)乾、濕拌瀝青混凝土穩 定值之比較	123
圖 4-33 各填充料瀝青砂級配(VII a)乾、濕拌瀝青混 凝土穩定值之比較	123
圖 4-34 密級配乾、濕拌瀝青混凝土抗壓強度比較 ...	124
圖 4-35 密級配乾、濕拌瀝青混凝土抗拉強度比較 ...	124
圖 4-36 密級配乾、濕拌瀝青混凝土抗剪強度比較 ...	125
圖 4-37 密級配乾、濕拌瀝青混凝土抗彎強度比較 ...	125
圖 4-38 25°C 輪壓19.4kg/cm ² 車轍試驗變形量比較圖	126
圖 4-39 60°C 輪壓19.4kg/cm ² 車轍試驗變形量比較圖	126
圖 4-40(a) 乾、濕拌車轍試體試驗後輪跡之比較	127
圖 4-40(b) 乾、濕拌車轍試體試驗後輪跡之比較	127

表目錄

表 3-1	公路工程施工規範 $3/4"$ 級配料(Ⅲd粗級配)	24
表 3-2	公路工程施工規範 $1/2"$ 級配料(Ⅳb密級配)	24
表 3-3	公路工程施工規範粗片瀝青砂級配料(Ⅶa級配)	25
表 4-1	瀝青膠泥物性試驗結果	47
表 4-2	粒料物性試驗結果	48
表 4-3	各種填充料篩分析、比重及細度試驗結果	49
表 4-4	粗級配(Ⅲd)瀝青混凝土各種填充料乾拌法之馬歇爾設計值	76
表 4-5	密級配(Ⅳb)瀝青混凝土各種填充料乾拌法之馬歇爾設計值	76
表 4-6	瀝青砂級配(Ⅶa)瀝青混凝土各種填充料乾拌法之馬歇爾設計值	76
表 4-7	粗級配(Ⅲd)瀝青混凝土各種填充料濕拌法之馬歇爾設計值	77
表 4-8	密級配(Ⅳb)瀝青混凝土各種填充料濕拌法之馬歇爾設計值	77
表 4-9	瀝青砂級配(Ⅶa)瀝青混凝土各種填充料濕拌法之馬歇爾設計值	77
表 4-10	密級配乾拌瀝青混凝土在常溫基本力學試驗值	83
表 4-11	密級配濕拌瀝青混凝土在常溫基本力學試驗值	83
表 4-12	試驗溫度 25°C 乾拌法車轍試驗值	89
表 4-13	試驗溫度 25°C 濕拌法車轍試驗值	90
表 4-14	試驗溫度 60°C 乾拌法車轍試驗值	91

表 4-15	試驗溫度60℃濕拌法車轍試驗值	92
表 4-16	密級配瀝青混凝土車轍試驗動穩定值	103
表 4-17	密級配瀝青混凝土車轍試驗變形率值	103
表 4-18	填充料應用於瀝青混凝土效果之總評表	114
表 4-19	粗級配乾拌瀝青混凝土評分表	114
表 4-20	粗級配濕拌瀝青混凝土評分表	114
表 4-21	密級配乾拌瀝青混凝土評分表	114
表 4-22	密級配濕拌瀝青混凝土評分表	114
表 4-23	瀝青砂級配乾拌瀝青混凝土評分表	115
表 4-24	瀝青砂級配濕拌瀝青混凝土評分表	115
表 4-25	馬歇爾試驗值總評表	115
表 4-26	最佳瀝青含量值總評表	115
表 4-27	密級配乾拌瀝青混凝土基本力學評分表	115
表 4-28	密級配濕拌瀝青混凝土基本力學評分表	116
表 4-29	基本力學力學總評分表	116
表 4-30	密級配乾拌瀝青混凝土車轍試驗評分表	116
表 4-31	密級配濕拌瀝青混凝土車轍試驗評分表	116
表 4-32	車轍試驗總評分表	116
表 4-33	改質瀝青物性試驗結果	131
表 4-34	改質瀝青馬歇爾配合設計試驗值	133

第一章 緒論

1-1 研究動機

瀝青混凝土填充料係指用以填塞瀝青混凝土中級配粒料孔隙之材料，依我國「公路工程施工規範」[1]規定填充料應為粒徑至少有70%以上通過NO.200篩之礦物粉末或灰塵；在一般瀝青混凝土工程施工規範中常指定填充料應為石粉、水泥或經工程司認可之無塑性無機粉末。填充料用量依瀝青混凝土用途而異，大約佔瀝青混凝土中級配粒料總重之10~15%，對壓實後之瀝青路面強度、塑性、空隙率及耐久性有極密切之關係。

以往國內瀝青混凝土填充料之主要來源為石粉及水泥，但水泥由於價格太高一直少被採用。而石粉之原料為碎石，近年來由於經濟繁榮，都市大興土木且政府因基於維護自然景觀之環保考慮及加強水土保持之法律規定，故砂石之取得已呈困難，石粉供應亦日漸短缺。國內瀝青路面里程目前已達二萬公里以上，每年新鋪或維修需要極大數量之瀝青混凝土，因此為確保瀝青混凝土品質，極需開發填充料來源以相配合。

目前國內火力發電廠產生之飛灰，煉鋼廠產生之爐石粉及瀝青拌合廠回收之粉塵，存量極為豐富且尚未加以資源化利用，已造成堆積處理之困擾，若能詳加研究再生利用方案，則可能成為將來瀝青混凝土填充料之來源。鑑於

此台電公司及中鋼公司均曾委託學術機構進行試驗研究，初步結果認為飛灰及爐石粉作為填充料其效果尚可。但迄今卻仍無法推廣應用，其主要原因乃在於國內目前採用之乾拌方式會造成空氣污染形成二次公害，故瀝青拌合廠未能接受，為促使瀝青拌合廠接受並達到推廣飛灰、爐石粉及瀝青拌合廠粉塵作為瀝青混凝土填充料應用之目的，尚應在瀝青混凝土拌合技術上進行深入研究。

1-2 研究目的

本研究之主要目的包括下列各項：

1. 探討爐石粉、飛灰及拌合廠回收粉塵等作為瀝青混凝土填充料之可行性。
2. 經由馬歇爾配合設計值、基本力學試驗值及車轍試驗值等評估填充料對瀝青混凝土物理特性、力學特性及耐久性等之影響。
3. 比較各種填充料試拌方式改善瀝青混凝土品質之效果，並探討填充料拌合技術相關之理論及填充料改善瀝青混凝土品質之機理。
4. 評估填充料乾拌法，濕拌法或其他方法之優缺點，並研擬瀝青拌合廠可接受之拌合技術及注意事項。

1-3 研究範圍

瀝青混凝土因用途不同，所採用之粒料級配有許多種規範，為驗證指定之拌合方式所生產之瀝青混凝土是否可適用於各種鋪面或路面上，本研究採用我國目前公路工程施工中較常用之三種特定級配進行瀝青混凝土鋪面試驗研究。

1. 粗級配(III d)：適用於鋪面連結層及底層，填充料用量為5%，本級配類似美國ASTM D3515 中3/4" 級配。
2. 密級配(IV b)：適用於路面面層，填充料用量為12%，本級配類似美國ASTM D3515 中1/2" 級配。
3. 瀝青砂級配(VII a)：適用於街道面層及停車場鋪面，填充料用量為15%，本級配類似美國瀝青學會粗片瀝青砂級配。

以上每一種級配之瀝青混凝土均用石粉、水泥、飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵等材料作填充料以乾拌法及濕拌法拌合，以進行馬歇爾配合設計、基本力學性質試驗及車轍試驗並互相比較，以探討填充料拌合方式對瀝青混凝土物理性質、力學性質及耐久性之影響，並研究與填充料拌合技術有關之理論。

1-4 研究步驟與方法

本研究以石粉、水泥、飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵等，作為III d、IV b及VII a等瀝青混凝土鋪面材料之填

充料，瀝青混凝土填充料拌合之方式採用乾拌法及濕拌法進行。所謂乾拌法即傳統方式係將填充料與粗細粒料混合加熱後再將定量之瀝青加入拌合，經現場調查發現國內瀝青拌合廠均採用此種拌合方法。另濕拌法乃是於拌合過程中將填充料與預熱之瀝青先加熱混煉成膠漿，然後直接再與粗細粒料拌合。瀝青混凝土進行馬歇爾試驗、基本力學試驗及車轍試驗等。研究過程可分為下列五個階段進行。

第一階段：準備合乎規範要求之試驗材料並測定其物理性質，試驗材料包括各種填充料（包括石粉、水泥、飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵）、碎石級配料及瀝青材料等。

第二階段：採用填充料乾拌法，將填充料先與碎石級配料充分混合後再添加瀝青材料與之拌合成瀝青混合料，並夯製成瀝青混凝土。

第三階段：採用填充料濕拌法，將填充料先與瀝青材料充分混拌之後再倒入碎石級配料拌合成瀝青混合料，並夯製成瀝青混凝土。

第四階段：將第二階段與第三階段夯製成之瀝青混凝土（瀝青混凝土試體依試驗條件製成各種形狀）進行馬歇爾配合設計、基本力學試驗及車轍試驗，將試驗之結果互相比較以評估各種拌合技術之優劣，並與馬歇爾設計規範或其他相關文獻比較以評估填充料在鋪面工程上應用之可行性及拌合效果。

第五階段：選擇一種瀝青混凝土級配以一種填充料之數量作為變數摻入瀝青材料中加熱混煉成瀝青膠漿進行瀝

青物性試驗、馬歇爾配合設計及基本力學試驗以探討填充料之活性機能及其對瀝青混凝土物理性質及力學性質之影響。

1-5 研究流程

本研究係利用石粉、水泥、飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵等作為填充料，針對各種不同拌合方式，包括填充料乾拌法、填充料濕拌法或其他方法……等，首先探討在相同拌合方式時，各種填充料對瀝青混凝土品質之影響，其次比較在相同填充料時，拌合方式改變對瀝青混凝土品質之影響，最後綜合評估各種拌合技術之拌合效果及對拌合作業與環境之影響。研究步驟如圖 1-1研究流程圖所示。

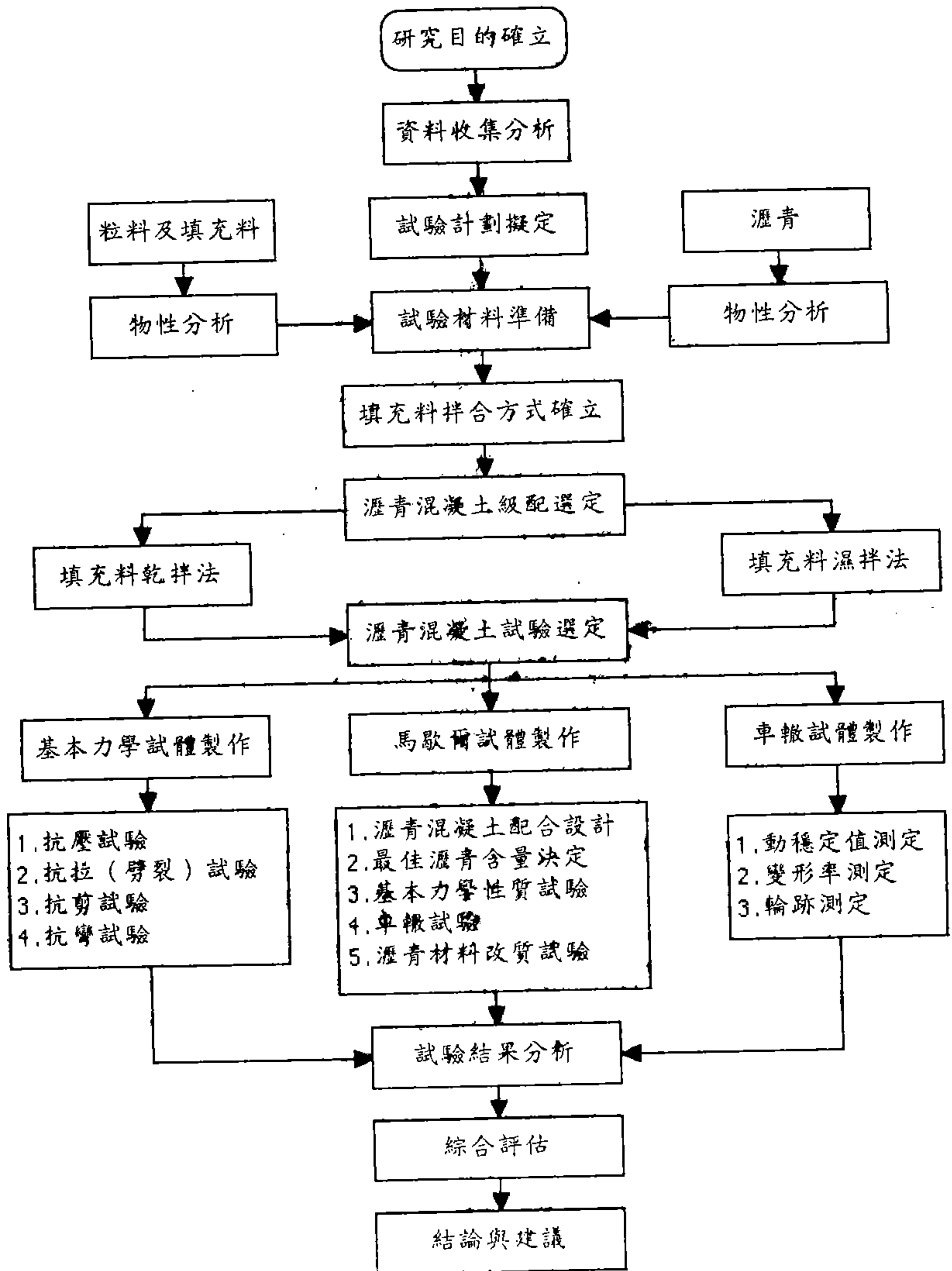


圖 1-1 研究步驟流程圖

第二章 文獻回顧

2-1 瀝青材料之組成及性質

2-1-1 瀝青材料之組成[2,3]

瀝青材料(Bituminous materials)為天然碳氫化合物、人造碳氫化合物或此等化合物之非金屬衍生物或混合物。其存在自然界之型態有氣體、液體、半固體及固體狀態，可溶於二硫化碳(CS_2)及四氯化碳(CCl_4)等有機溶劑。

瀝青材料有瀝青(Asphalt)及柏油(Tar)二大類，瀝青係天然生成或由原油蒸餾而得，柏油係用煤炭乾餾而得。由原油蒸餾而得之瀝青稱為石油瀝青(Petroleum Asphalt)，石油瀝青依蒸餾過程中為高度真空蒸餾或空氣吹製，又分成直餾瀝青及吹氣瀝青兩類。本研究係以直餾瀝青膠泥(Asphalt Cement)為材料。

瀝青是一種複雜之碳氫化合物膠狀體，其主要係以瀝青本質(Asphaltene)、瀝青脂類(Asphaltic Resin)及油質(Oily Constituent)等組成。在其成份中，以瀝青脂類為防凝劑，瀝青本質則以油質為主體，以瀝青脂類之特性使之具有附著性、延展性(Ductility)，並以油脂影響其粘度與流動。圖 2-1為瀝青組成示意圖，

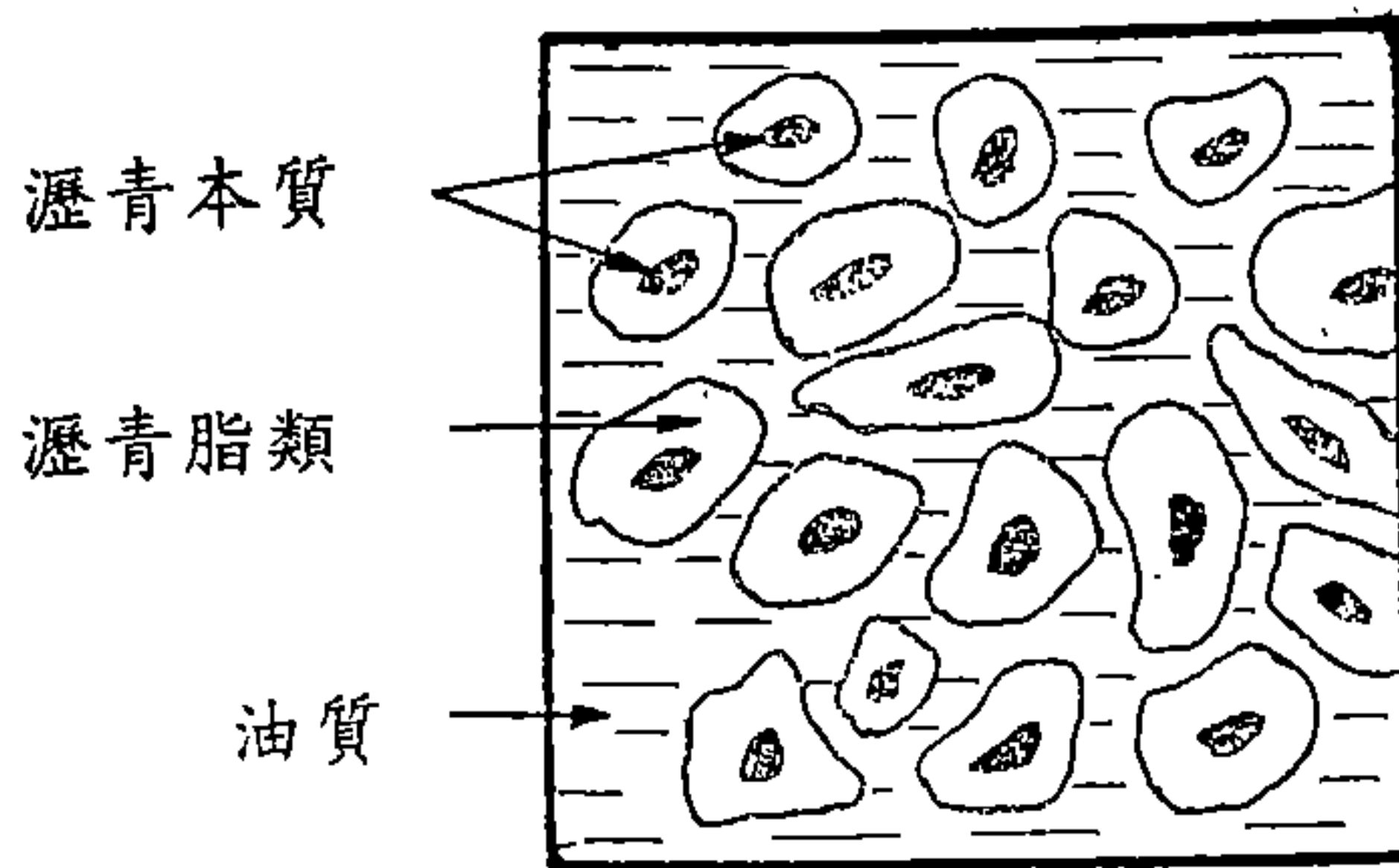


圖 2-1瀝青組成示意圖

其詳細組成如下：

1. 溶於苯之成份(Benzene Soluble)

(1)瀝青精(Asphaltene)

係由各種不同之碳氫化合物組成而成之混合物。其中除了氫、碳占大部份外，尚含氧、硫磺、氫氣等，因產地而異，瀝青精為構成瀝青材料之主要成份，會影響瀝青材料之硬度及顏色。其碳與氫之比通常大於80%。

(2)油質(Oils)

一種幾可溶於所有有機溶劑之物質其碳與氫之比小於40%，碳氫分子當受熱時即聚合成瀝青脂類，易於揮發及氧化而變脆。

(3)瀝青脂類(Asphaltic Resin)

係油質受熱聚合等作用而形成者，其碳與氫之比介於80%及60%之間。

2. 不溶於苯之成份(Benzene Insoluble)

(1)瀝青質(Carbenes)

在瀝青膠泥之製造過程中，若分餾之溫度過高時，即可生成瀝青質，其含量約為 1%。

(2) 瀝青碳質(Carboids)

在瀝青膠泥之製造過程中，若過度分餾，則易生成不溶解於二硫化碳之瀝青碳質。

2-1-2 瀝青材料之物理性質[2,4]

瀝青材料具有下列一般物理特性：

1. 比重：瀝青材料之比重受原油種類來源，精煉方法，混合物及溫度等影響而異。在常溫之比重約為 0.95 至 1.10，軟液狀瀝青之比重略低於 1，而瀝青膠泥則略大於 1。
2. 防水性：瀝青材料對水份之吸收量視瀝青之種類而異，普通約為其重之 1.5%—12%，其透水量甚小，通常在 10^9 — 10^8 (g · cm/cm² · hr · mm · Hg) 範圍。
3. 感溫性：瀝青材料之粘度隨溫度變化而異，感溫性大者在低溫時材質易成脆裂，溫度高時則易成軟質。瀝青材料可以針入度指數(PI)表示。感溫性之大小，PI < -2 表示高感溫性之瀝青材料，PI > 2 表示低感溫性之瀝青材料，-2 < PI < 2 為正常感溫性之瀝青材料。瀝青膠泥是屬於正常感溫性瀝青材料。
4. 粘著性：瀝青材料適用於路面材料係因其具有特強之粘性，能將粒料緊粘在一起。瀝青材料之粘度隨溫度之不同而有很大之變化，如果粘度太大則無法在短時間內將粒料

徹底包裹。路面施工時瀝青混凝土之拌合及滾壓皆須有一定之粘度，通常以塞氏粘度 85 ± 10 秒或 170 ± 20 cst時之溫度作為拌合溫度，塞氏粘度 140 ± 15 秒 280 ± 30 cst時之溫度作為夯實或滾壓之溫度。

- 5.熱膨脹係數：瀝青材料於常溫至 200°C 之間，瀝青材料之體積膨脹係數約在 $6\times 10^{-4}\sim 6.3\times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 。
- 6.軟化點：瀝青材料隨溫度的增加，由固體狀態逐漸軟化成液態過程中之軟化分界溫度，是為瀝青材料之軟化點。通常針入度愈小，軟化點愈高。直餾瀝青之軟化點約為 $35^{\circ}\text{C}\sim 75^{\circ}\text{C}$ 。
- 7.針入度：一定負荷重量(100公克)之標準針，於一定時間(5秒)內，在規定溫度(25°C)下，垂直貫入瀝青內之深度值為針入度。針入度在85~150之間者，稱為中硬度瀝青，而在150以上者，則為軟瀝青。
- 8.延展性：半固體或固體瀝青材料伸張之能力稱為延展性、半固體或固體瀝青材料延展性之高低，隨溫度變化而異，與粘性、可撓性及耐磨性等有關。通常，直餾瀝青之延展性大而吹製瀝青則甚小。

2-2 填充料之種類及性質

填充料係用於填塞瀝青混合料中級配粒料空隙之材料，其作用在調整混合料之緊密度使含有適度空隙、提高瀝青軟化點、增加穩定值及增加包裹性。填充料係指至少須有70%以上通過0.075CNS 386篩(美國200號篩)之礦物粉

末或灰塵，其在瀝青混合料中所佔比例雖然甚少，但因其顆粒極小，表面積甚大，對壓實後瀝青混合料之強度、塑性、空隙率、抵抗水之侵害及抵抗風化作用等都有甚大之影響[2]。本研究探討之填充料包括傳統之填充料，如石粉及水泥，與資源再生或環保考量之填充料，如飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵等五種材料，以下分別敘述其性質：

1. 石粉[5, 6, 7]

石粉係利用天然石材打碎研磨而成，其主要成份以氧化鈣為主，約佔40%~50%左右，尚有少許之 SiO_2 、 Al_2O_3 及 MgO 等成份。其比重介於2.65~2.80之間，燒失量介於40%~50%之間，不具塑性。

由於石粉之來源為天然石材，因此其某些特性會隨著石材原料之不同，而改變其工程性質。若使用親水性石材所生產之石粉，如砂質石粉則因填充料吸附水而缺乏對瀝青材料之親和力容易造成剝脫現象。然而若使用親油性石材生產之石粉，如花崗岩石粉，則因該填充料具親油性，石粉對瀝青材料具有相當良好之親和力，較不易造成剝脫現象。因此若使用親水性之粗粒料則應配以親油性之石粉，方能減輕瀝青混凝土因水作用而產生剝脫現象。

2. 水泥[5, 6, 7, 8]

本研究所使用之水泥係卜特蘭第一型水泥，卜特蘭水泥依照中國國家標準之定義，係由水硬性矽酸鈣類及鋁酸鈣類組成之熟料經研磨而成之粉末，除添加少許水及未

經處理之石膏或不超過 1.0%之其他無害物質外，在煨燒後不另加其他任何添加料。

卜特蘭水泥之主要成份為 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 。此四種成份取自含有 CaO 之石灰質骨材及含有氧化矽、氧化鋁及氧化鐵之粘土質原料。卜特蘭水泥中含有前述四種氧化量達95%以上，而各氧化物之間所形成之化合物 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 及 C_4AF 對水泥性能之瞭解極為重要。

卜特蘭水泥之比重一般介於3.0~3.2之間，其熱膨脹係數約為 $8 \times 10^{-5}/^\circ\text{F}$ 。

3. 飛灰[9~13]

飛灰是燃煤發電時所產生之廢棄物，由於燃煤鍋爐均採用粉煤燃燒方式，煤炭先經研磨成細粉，霧狀噴入鍋爐，在 1200°C 以上高溫燃燒，在鍋爐底部收集之爐渣經壓碎後以海水沖出通常稱為底灰；隨燃燒氣進行到達煙道之微細灰粒，以機械除塵或靜電集塵方式收集者稱為飛灰。

飛灰是燃煤所產生之灰分，被廢氣帶動而飛舞在空氣中會造成空氣污染，若被吸入人體內對人體健康影響甚大[9]。依據臺電公司購煤品質要求灰分不得超過19%，若以19%估計將來興達電廠八部機組完成全量運轉，每日用煤量為35000公噸，產生灰分量為6650公噸，其中約五分之四為飛灰，五分之一為底灰，因此每日飛灰產量達5320公噸[10]，若全部當廢料處理所需費用不貲，而且拋棄場所更是重大困難問題；若不處理非但無

堆積之場地，同時勢必造成環境污染影響生態，因此飛灰極需儘量予以資源化處理。

飛灰之化學成份取決於煤礦之品種以及其他礦物之相對含量[11]。就一般燃煤飛灰而言，其主要成分以矽、鋁、鐵、鈣等氧化物及玻離質組成，物理性狀大部分成玻離圓球形，真比重 2.0-2.2，視比重 0.8-1.0，性質與火山灰相似，含CaO較低者與水作用不會硬化，但在有水存在之狀況下能與氫氧化鈣緩慢結合成大量不溶性之化合物，性質相當穩定[9,12,13]。

4. 爐石粉[14~17]

爐石為鋼鐵工業生產之主要固態副產物，若處理不當亦會造成環境保護之困擾，然而由於爐石材質上具有較高之氧化矽、氧化鋁及氧化鈣，經不同冷卻處理，其性質硬脆且具潛在之波索蘭反應功能，除可當路基材料外亦可作為柔性或剛性路面材料之組成成份。

爐石傳統稱之為爐渣，係生產鋼鐵之礦原料因含粘土雜質與石灰石助溶劑在高溫爐中反應產生之物質，再經冷卻而成者。爐石化學性質與其所含之成份有關成份[12]，若爐石含有大量SiO₂及 Al₂O₃等酸性成份，則稱之為酸性爐石，其性質較硬而密度較大，較適合於一般道路路基級配料使用；倘若爐石含有大量CaO及MgO則稱之為基性爐石，較易形成多孔隙之顆粒，具低密度性質，其比重一般介於 2.0-2.8，此類基性爐石若處理成粉末即爐石粉，則具有相當之膠結作用，一般可當作水泥部份取

代料或混凝土摻料來使用，中國鋼鐵公司所生產之爐石為此類材料[14，15]。

爐石之冷卻速率及方式對其性質有相當大之影響，一般處理方式有氣冷及水淬二類型。氣冷者係爐渣在大氣中自然冷卻所形成，含少量之玻離質，形狀不規則，具大孔隙，可如一般天然骨材而經粉碎處理成為粒料使用；水淬者係加裝噴水設施，將爐渣噴水急速冷卻，以致分解成粒化狀，又稱之為粒化高爐石，具多量小孔隙，因快速冷卻晶體不易形成，故含有大量之玻離質水淬爐石之化學活性甚佳，適合當作水泥添加料及部份取代水泥材料。爐石之冷卻處理方式對爐石使用為柔性路面及剛性路面材料方式有決定性之影響[16，17，18]。

水淬爐石含有較高之 SiO_2 、 CaO 及中量之 Al_2O_3 和 MgO ，其相關之 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 與水泥熟料甚為接近。其比重約介於 $2.8 \sim 2.9$ 之間，在中國國家標準規定其細度值需大於 $2800(\text{cm}^2/\text{g})$ [14，15]。本研究採用水淬爐石粉。

5. 粉塵[19，20，21]

近年來由於民眾之環保意識高漲，對環境品質之要求日益提高；同時因積極推動公共設施及營建工程，天然資源之消耗日鉅，為兼顧環境保護及節省資源，瀝青拌合廠之粉塵應予回收利用。粉塵回收之煙塵處理多採用旋風式與濾袋式集塵機之二段處理，由於拌合廠之乾燥機通常係使用燃料油或鍋爐油來烘乾粒料，粒料在烘乾過程中所產生之粉塵及燃料油廢氣經過濾袋布過濾時，粉塵若粘結

未完全燃燒之燃料油則變為灰色或深灰色粉塵。將粉塵回收再與瀝青拌合料拌合，對瀝青混凝土品質可能有某一程度之影響[19]。

一般瀝青拌合廠大多採用旋風式集塵機，而旋風式集塵機又可分為靜電式與濾袋式兩種，惟靜電集塵機造價昂貴，非一般業者所願意負擔；而濾袋式集塵機造價較低，處理效果良好，且所處理之粉塵可以回收作為填充料使用，因此拌合廠以裝設濾袋式集塵機為主。粉塵所含化學成份取決於級配粒料之來源，其比重介於 2.2~2.6 之間，通常不具塑性或僅具低塑性 [19, 20, 21]。本研究採用之粉塵係屬於濾袋式集塵機回收之粉塵。

2-3 瀝青混凝土之工程性質[4, 5]

瀝青混凝土係指以瀝青材料作為粘結料而與粗粒料、細粒料及填充料以一定比例均勻拌合以滿足特定物理性質與績效之混合料，應具備下列各項特性：

1. 耐久性

瀝青混合物應有足夠之瀝青含量及足夠之粒料強度以保持路面耐久性。通常耐久性係指：(1)抵抗重交通量作用。(2)抵抗水份及濕氣滲透。(3)抵抗霜凍及溫度變化之縮脹能力。(4)防止路面鬆散、破洞及表面龜裂之能力。

2. 穩定性

瀝青混凝土應具有足夠之強度以承受交通荷重、抵抗塑性變形及防止路面扭曲或變形之能力，是以穩定性與配合設計之穩定值有關。

3. 柔性

瀝青混凝土必須具有適當之柔性以適應承受荷重時所造成之撓曲以及抵抗反復作用下之壓力及拉力，瀝青混凝土之柔性與配合設計之流度值有關。

4. 適當之空隙率

瀝青混凝土應有足夠之空隙，以容許路面受交通荷重後所產生之壓縮防止路面冒油，並能抵抗水份及濕氣之侵入，防止粒料及瀝青剝落，使瀝青材料老化。

5. 工作性

瀝青混凝土必須有適當之工作性使粒料及瀝青在拌合過程中，不致發生粒料析離現象，並在壓實時較容易達到應有之壓實度。

6. 抗滑性

瀝青混凝土之瀝青含量應適當，粒料之耐磨須足夠，以減少煞車滑動發生及路面被磨光而容易發生意外。

2-4 瀝青混凝土品質控制之因素[4, 5, 22]

瀝青混凝土係將瀝青材料與粒料依一定比例拌合而使達到上節各基本性質者，除對組成材料品質應予重視外，尚應注意下列各種控制因素：

1. 單位重

壓實後瀝青混凝土之單位重增大，通常單位重大之瀝青混凝土較能耐久，瀝青混凝土之單位重是以試驗室壓實密度為準，但是工地現場壓實程度常因無法壓實徹底。故所謂壓實度係指工地密度與試驗室壓實密度之百分比，通常規範規定底層為95%以上，面層96%以上。

2. 空隙率

空隙率係指瀝青混凝土壓實後被瀝青及粒料所包圍空隙之總和，適量之空隙，可使骨材及瀝青路面受壓變形時，有足夠空間伸縮。在試驗室內用於面層之拌合料其容許空隙率約為3~5%，底層之容許值約為3~8%，詳細狀況，則依各工程而異。瀝青路面之耐久性與空隙率有關，若空隙率太高，則水份與氣體，容易穿透路面使瀝青老化。反之，若空隙率太低，則路面容易產生冒油現象。

3. 粒料間空隙率

粒料間空隙率(Voids in the Mineral Aggregate, V.M.A.)，是指壓實後之瀝青混凝土，粒料與粒料之間之空隙。一般為有效瀝青量（總瀝青量扣除骨材表面吸收量）及所需空隙率之和。乾燥粒料間之V.M.A.愈高，所需之瀝青含量愈多。由於瀝料表面之瀝青層愈厚，瀝青老化愈慢，且瀝青混凝土之耐久性愈佳，因此V.M.A.之值，在規定範圍內有其下限，並依粒料尺寸而定。

4. 穩定值

穩定值係指瀝青混凝土試體在60°C溫度下承受荷重試驗，當試體首先發生破壞時之壓力，瀝青混凝土之穩定性與穩定值有關，至於瀝青混凝土所需之穩定值，要依據

交通量而定。穩定值必須高到足以承受交通量，但也不可太高，因為穩定值過高，將使瀝青混凝土之勁度增大，對耐久性有害。

5. 流度值

流度值代表試體受荷重試驗在最大穩定值時，試體所發生之變形。通常流度以1/100吋或1/100公分為單位，通常瀝青混凝土之柔性與流度值有關，所謂柔性係指瀝青路面受路面變形影響而不致裂開之能力。由於路面受荷重後總會下沉或上昇，故瀝青路面應具有柔性才不致開裂。由於柔性之要求與穩定性之要求相抵觸，故工程師必需要在其中找出一個平衡點。

2-5 填充料對瀝青混凝土品質之影響

石粉與水泥係傳統之瀝青混凝土填充料，其在工程界已應用多年，在此不多作陳述，國內已有部分廠商使用石灰作為瀝青混凝土填充料，由於目前尚在研究發展階段，且石灰並不是資源回收料，因此本研究未列入探討對象。本節乃針對飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵作一回顧。

2-5-1 飛灰在瀝青混凝土上應用之成效

根據林炳森[23]等研究結果顯示：(1)添加飛灰填充料瀝青混凝土試體之空隙率，在壓實能量增加時其降低率較少。(2)添加飛灰之瀝青混凝土流度、空隙率與添加石

粉填充料者相差不大。(3)用比石粉用量低之飛灰作為填充料即可使瀝青混凝土達到最大單位重。

由於飛灰之顆粒較石粉為細，故在相同之瀝青含量下，用較低百分比之飛灰填充料即可達到最大單位重。欲得較穩定不易變形之瀝青混凝土時，飛灰添加量應增加，雖然如此，其流度值在添加飛灰量少於 7% 時仍能合乎設計規範之要求，流度值係瀝青混凝土柔度之指標，亦即有適當之柔性可以防止路面龜裂破壞。

因此文獻中[23]建議：(1) 用較少之飛灰作為瀝青混凝土填充料可得較佳之單位重、穩定值及空隙率，且飛灰瀝青混凝土品質優於石粉作填充料時，工作性亦不比石粉差，故國內路面工程界可考慮使用飛灰填充料，以獲取較佳之瀝青混凝土。(2) 可減輕飛灰處理之困擾，達到善用國家資源之利益。(3) 瞭解飛灰填充料對瀝青混凝土耐久性之影響與貢獻。(4) 建議進行剝脫試驗，以瞭解在不同之飛灰添加量下瀝青混凝土之耐久性。

2-5-2 爐石粉在瀝青混凝土上應用之成效

根據沈得縣[24~27]等研究結果顯示，若利用爐石粉作為瀝青混凝土填充料時，則具有如表面活性劑般，可使夯實時所需潤滑之油料較少，而獲得相當高之經濟性，同時因壓密性較佳而會有很好的穩定性，故爐石粉取代石粉作為瀝青混凝土之填充料時，不但成本低且可獲得較高之穩定值，其流度值、孔隙率及 V.M.A. 亦能符合規範之要

求，可視為一理想之運用策略。另根據抗壓、抗拉、抗剪及抗彎等基本力學試驗結果顯示，使用爐石粉作為瀝青混凝土填充料所夯製之試體，其基本力學試驗結果均優於全碎石級配、全爐石級配、爐石粗骨材碎石細骨材及碎石粗骨材爐石細骨材等策略所夯製之瀝青混凝土試體。

2-5-3 拌合廠回收粉塵在瀝青混凝土上應用成效

受限於環保法規之規定，排放至大氣之顆粒需小於 $1\mu\text{m}$ ，使得回收粉塵通常比石粉還細，其對瀝青混凝土性質之影響亦大於石粉。廖昌業君[19]認為瀝青拌合廠，回收粉塵用於瀝青混凝土對瀝青混凝土品質應有影響，且不同使用量之粉塵對瀝青混凝土之流動值有明顯差異；對穩定值及密度則未見明顯影響。因此廖昌業君[19]建議；為顧及維護品質並考慮施工誤差，回收粉塵之使用量以不超過填充料之20%為宜。另由於未完全燃燒燃料油，在乾燥機之燃燒過程已聚合為相當高分子量成份，與粉塵粘結後不再溶於瀝青，故粉塵作為瀝青混凝土填充料替代石粉，其在同一瀝青含量下有效含油量較石粉為高。

2-6 填充料在瀝青混凝土中扮演之角色

根據文獻[2, 37]填充料在瀝青混合料中之主要作用有兩種不同之理論；即填充理論 (Filler Theory) 及膠漿理論 (Mastic Theory)。填充理論認為填充料之作用，在

填充瀝青混合料中級配粒料之空隙，使其壓實後能得最高密度及高穩定性。在此理論下，填充料之每一顆粒都被瀝青材料包裹，而成單獨之填塞級配粒料中空隙及粘附於大粒料表面，達到填充空隙之作用。膠漿理論認為填充料與瀝青材料混合後成爲一種膠漿體而填充於瀝青混合料中級配粒料之空隙，並能粘結各級配粒料，使其壓實後能得最高密度及高穩定性。在此理論下，填充料之顆粒在瀝青材料中係成一種懸浮狀態，顆粒較大者爲力學懸浮，顆粒小者爲膠質懸浮，而後者在瀝青材料中懸浮之時間較長。懸浮有填充料之膠漿，針入度比未懸浮填充料之瀝青材料低，亦較具堅硬及強韌性，對溫度感應性 (Temperature Susceptibility) 較低，可見膠漿對瀝青混合物特性有很大影響 [2]。在本研究計劃中傳統填充料乾拌法乃是依填充理論進行，而填充料濕拌法即是依膠漿理論進行。

此外根據 Besson在西元1923年所發表之文章[50]顯示：填充料之作用並不是用來減少孔隙之數量，而是在減少孔隙之大小，同時填充料可以產生薄之瀝青膜包裹厚度以減少材料對溫度之影響。此概念與Ridcharson[50]自由瀝青(Free Asphalt)觀念相通，換言之，由於填充料之使用，可使得固定瀝青(Fixed Asphalt)量增加，而減少自由瀝青之比例，避免因爲自由瀝青含量愈多，則感溫性愈大。又根據西元1962年，學者Tunnickliff[51, 52]對礦物填充料之研究，據研究結果指出：大多數之礦物填充料在瀝青混合物中多扮演著"局部鍵結料"之角色，可使瀝青混合物在達到某一特定力學行爲時減少所需之瀝青含量，若

真有此項特性，則可降低瀝青混凝土之最佳瀝青含量，因此填充料亦可作為瀝青材料改質用之礦物摻料。

第三章 試驗材料及試驗計劃

3-1 試驗材料準備

本研究之試驗材料如下：

1. 瀝青材料：本研究採用中油公司生產之 85/100針入度瀝青膠泥作為粘結材料。
2. 填充料：
 - (1) 石粉：由台北市區建材行價購。
 - (2) 水泥：使用台灣水泥公司生產之卜特蘭Type I 水泥。
 - (3) 飛灰：使用台電興達火力發電廠飛灰。
 - (4) 爐石粉：使用中鋼水淬爐石研磨粉末，由中聯公司提供。
 - (5) 粉塵：採用台北市養工處景美瀝青拌合廠提供之濾袋式集塵機所回收之粉塵。
3. 粒料：碎石級配料（停留N0.8篩以上為粗骨材，停留N0.16～N0.100篩為細骨材，通過N0.100則使用填充料）採用台北附近大漢溪之碎石及砂。粒料級配則採用我國「公路工程施工規範」常用之III d級配，IV b級配及VII a級配，此等級配分別符合ASTM D3515中3/4"，1/2" 及美國瀝青學會粗片瀝青砂級配之規定，如表 3-1，表 3-2及表 3-3所示。

表3-1 公路工程施工規範3/4"級配料(III_d粗級配)

篩 (粒 徑)	尺 寸 (粒 徑)	級配料通過各篩號之百分比	
		3/4"規範*(%)	採用 (%)
1"	(25.4mm)	100	100.0
3/4"	(19.0mm)	90-100	92.5
1/2"	(12.7mm)	-	75.0
3/8"	(9.5mm)	56-80	57.5
N0.4	(4.76mm)	35-65	40.0
N0.8	(2.38mm)	23-49	27.5
N0.30	(0.59mm)	-	12.5
N0.50	(0.30mm)	5-19	7.5
N0.100	(0.15mm)	-	5.0
N0.200	(0.07mm)	2-8	2.0

*ASTM D3515 規定[1, 39]

表3-2 公路工程施工規範1/2"級配料(IV_b密級配)

篩 (粒 徑)	尺 寸 (粒 徑)	級配料通過各篩號之百分比	
		1/2"規範*(%)	採用 (%)
3/4"	(19.0mm)	100	100.0
1/2"	(12.7mm)	90-100	92.5
3/8"	(9.5mm)	-	80.0
N0.4	(4.76mm)	44-74	60.0
N0.8	(2.38mm)	28-58	42.5
N0.30	(0.59mm)	-	23.5
N0.50	(0.30mm)	5-21	18.0
N0.100	(0.15mm)	-	12.0
N0.200	(0.07mm)	2-10	7.0

*ASTM D3515規定[1, 39]

表3-3 公路工程施工規範粗片瀝青砂級配料(VIIa級配)

篩 (粒 徑)	號 (粒 徑)	尺 (粒 徑)	寸 (粒 徑)	級配料通過各篩號之百分比	
				N0.4規範*(%)	採用 (%)
3/8"	(9.50mm)			100	100.0
N0.4	(4.76mm)			80-100	92.5
N0.8	(2.38mm)			65-100	87.5
N0.16	(1.19mm)			40-80	79.5
N0.30	(0.59mm)			25-65	62.5
N0.50	(0.30mm)			7-40	35.0
N0.100	(0.15mm)			3-20	15.0
N0.200	(0.07mm)			2-10	9.0

*美國瀝青學會粗片瀝青砂級配之規定[1, 42]

3-2 材料試驗計劃

3-2-1 瀝青材料物性試驗

爲檢定本研究所採用之瀝青膠泥是否符合瀝青路面之85/100針入度瀝青膠泥規範，乃進行下述各項物性試驗：

1. 針入度試驗

依據ASTM D5及AASHTO T49規範，以一荷重100公克標準貫入針頭，在溫度25°C，時間5秒鐘下，垂直貫入試體內，其貫入之深度以1/100cm爲單位。

2. 軟化點試驗

依據ASTM D2398, AASHTO T53規範，本試驗以環球法(Ring-and-Ball Method)進行。

3. 粘度試驗

依據ASTM D88及AASHTO T72規範，採用塞勃爾特粘度試驗(Saybolt Viscosimeter)進行試驗，其目的在預測一較佳拌合溫度，以供施工拌合之使用。

4. 延展性試驗

依據ASTM D113及 AASHTO T51規範用以量度瀝青材料之粘結性及彈性，表示瀝青材料之韌性。

5. 比重試驗

依據ASTM D70及AASHTO T288 規範採用比重瓶法作比重試驗，以測定瀝青材料之特性。

6. 閃火點及燃燒點試驗

依據ASTM D92及AASHTO T48規範，採用克氏露口杯法，逐漸加熱於瀝青材料，以小火焰接觸初發生閃火現象時之最低溫度即閃火點；若繼續加熱使溫度升高至另一限度，此小火焰與之接觸會發生持續至少五秒以上燃燒時之最低溫度，即為燃燒點。

7. 薄膜加熱試驗

依據ASTM D1754及AASHTO T179規範，取 50c.c.瀝青膠泥，放入圓形平底小盤內，將溫度控制在 163.5℃，使其以轉動架轉速為 5-6rpm連續烘5小時，冷卻後測定重量之損失率及殘餘針入度比。

8. 溶解度

依據ASTM D4及AASHTO T44規範，取約 2公克之瀝青膠泥，使用四氯化碳為溶劑，利用古氏坩鍋過濾法進行，以測定瀝青膠泥之純度。

3-2-2 粒料物性試驗

為測定碎石粒料性質，進行下列各項物性試驗：

1. 粒料之比重及吸水率試驗

本研究以No.8篩區分粗、細粒料，停留於No.8篩以上者為粗粒料，通過No.8篩至停留No.100篩者為細粒料。依據ASTMC128,C127；AASHTO T84, T85規範用以量測粒料之比重，吸水率，以決定壓實後瀝青混凝土之空隙含量。

2. 粗粒料洛杉磯磨損試驗

依據ASTM C131，AASHTO T96規範用洛杉磯磨損試驗機，測定粗粒料之磨損抵抗能力。本試驗採用B級配，轉速每分鐘30～33轉，置入11個鋼珠磨球，圓筒轉數設定為500轉。

3. 硫酸鈉健性試驗

依據ASTM C88，AASHTO T104規範，測定粗、細粒料對飽和硫酸鈉之分解抵抗力，用以研判粒料之抗風化作用之能力。將骨材浸入硫酸鈉溶液中16至18小時，取出後於室溫下晾乾，然後放入105℃至110℃之恆溫烘箱內烘乾，如此重覆五個循環，在最後一次浸泡後，將粒料洗淨

並以氯化鋇溶液測試硫酸鈉是否洗淨，然放入烘箱烘乾後，秤重以計算其損耗率。

3-2-3 填充料物性試驗

本研究以通過No.100篩以下之細粒料以填充料取代，並進行下列之物性試驗：

1. 篩分析

依據ASTM D546及 AASHTO T37規範，用以篩析本研究所使用之五種填充料之粒徑分佈。

2. 比重試驗

依據ASTM C188，AASHTO T133規範用比重瓶法測定填充料之比重。

3. 細度試驗

依據ASTM C204，CNS 2724規範用氣透儀法測定填充料之細度。

3-3 瀝青混凝土配合設計試驗計劃

瀝青混凝土配合設計原理就是應用各種力學試驗所得結果，達到對瀝青混凝土最佳配比。目前尚未有任何一種試驗可將其所有特性涵蓋，只有依賴模擬方法，加上統計資料判斷，本研究採用馬歇爾法配合設計，此方法已列入ASTM D1559及 AASHTO T245 規範。

3-3-1 馬歇爾法配合設計特性

馬歇爾法係第二次世界大戰後，被廣泛應用於熱拌瀝青混凝土求最佳瀝青含量之設計方法，常被使用在試驗室設計及工地施工品質控制試驗。其特性如下：

1. 瀝青混凝土試體之夯壓，採用自由落體方法，與土壤之夯實試驗類似，能量甚易控制，可針對交通量因素，採取不同之夯實次數。
2. 瀝青混凝土中各成份控制及配合方式與拌合廠之作業程序相似。
3. 對瀝青混凝土進行單軸試驗並測定穩定值及流度值，用以表示抵抗變形之大小能力及變形量之大小。
4. 試驗中測定瀝青混凝土中之孔隙率、粒料間孔隙率(V.M.A.)，及有效瀝青含量，此乃針對瀝青混凝土之柔性及耐久性而設置。
5. 測定瀝青混凝土之鬆比重，可配合工地瀝青混凝土壓實度之要求，藉此以控制壓實目的。

3-3-2 馬歇爾法試驗設備

1. 馬歇爾試驗儀如圖 3-1所示：包括下列部份：
 - (1) 可帶動油壓千斤頂以每分鐘2"上升速度之110V馬達一具。
 - (2) 測定試體破壞時所能承受之最大荷重，此值為穩定值，可經由基座上之下數字幕顯示得到。

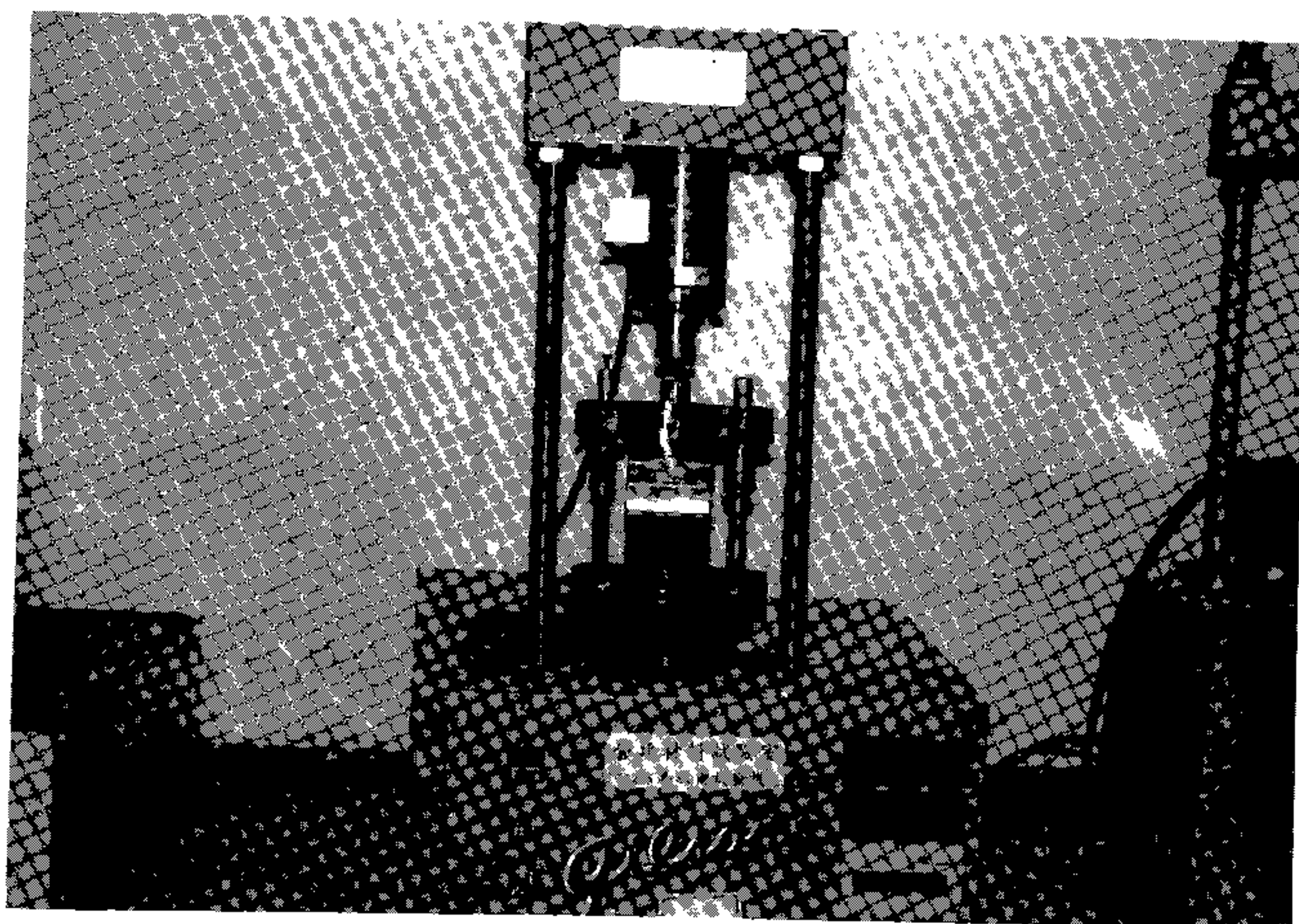


圖 3-1 馬歇爾試驗儀

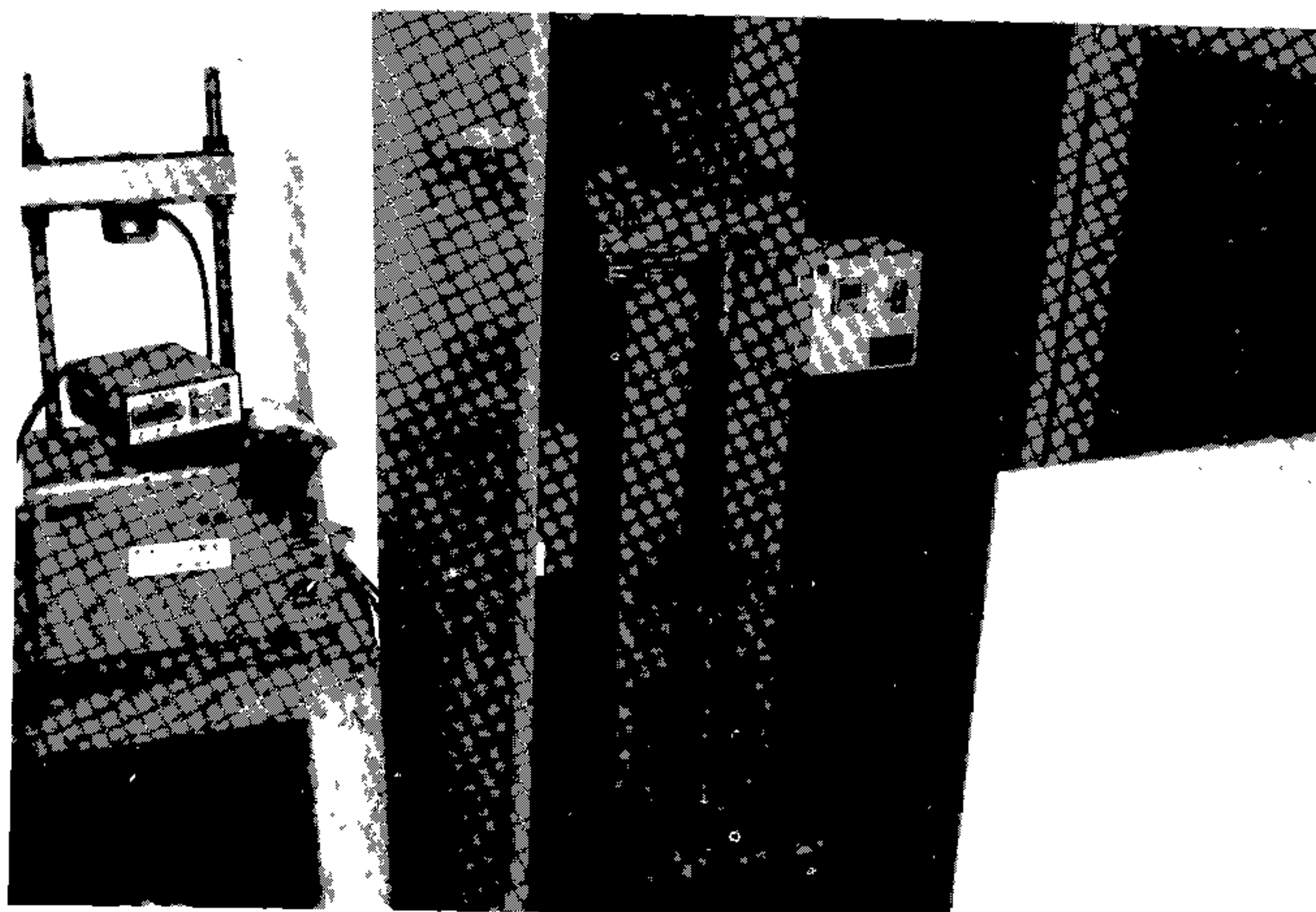


圖 3-2 自動夯壓機

(3)試體來頭爲一對半圓柱形中空鐵模，試驗時下半圓形中空鐵模置於油壓千斤頂底座上，上半圓形鐵模隔著鐵珠與壓力環接觸。

(4)流度儀由千分錶及導筒組成，測量應變稱爲馬歇爾流度值，可經由基座上之上數字幕顯示得到。

2. 夯壓設備：

(1)自動夯壓機如圖 3-2所示，以鏈條帶動夯錘，上升至 18" 後，以自由落體方式自動夯實試體。

(2)鐵模固定器，係以設有彈簧扳手裝置，可將鐵模底板，延伸套圈三者結合一體，並固定於夯壓機底座上。

3. 拌合設備：

(1)大型烘箱，可一次將所須拌合之瀝青材料、粒料、鐵模、底板及夯錘加熱，烘箱內溫度可自動調節至所須溫度。

(2)拌合機，於槽底設有加熱裝置。

4. 其他附屬設備：

(1)頂樣器，以油壓機將夯實後試體頂出。

(2)恆溫水槽，可自動調節溫度，並有循環水流裝置，可控制箱內水溫保持 $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

(3)其他如天秤、真空抽氣機、濾紙、金屬皿等。

3-3-3 馬歇爾法配合設計步驟

馬歇爾法瀝青混凝土配合設計之大略步驟如圖 3-3之流程所示，其各步驟之注意事項如下：

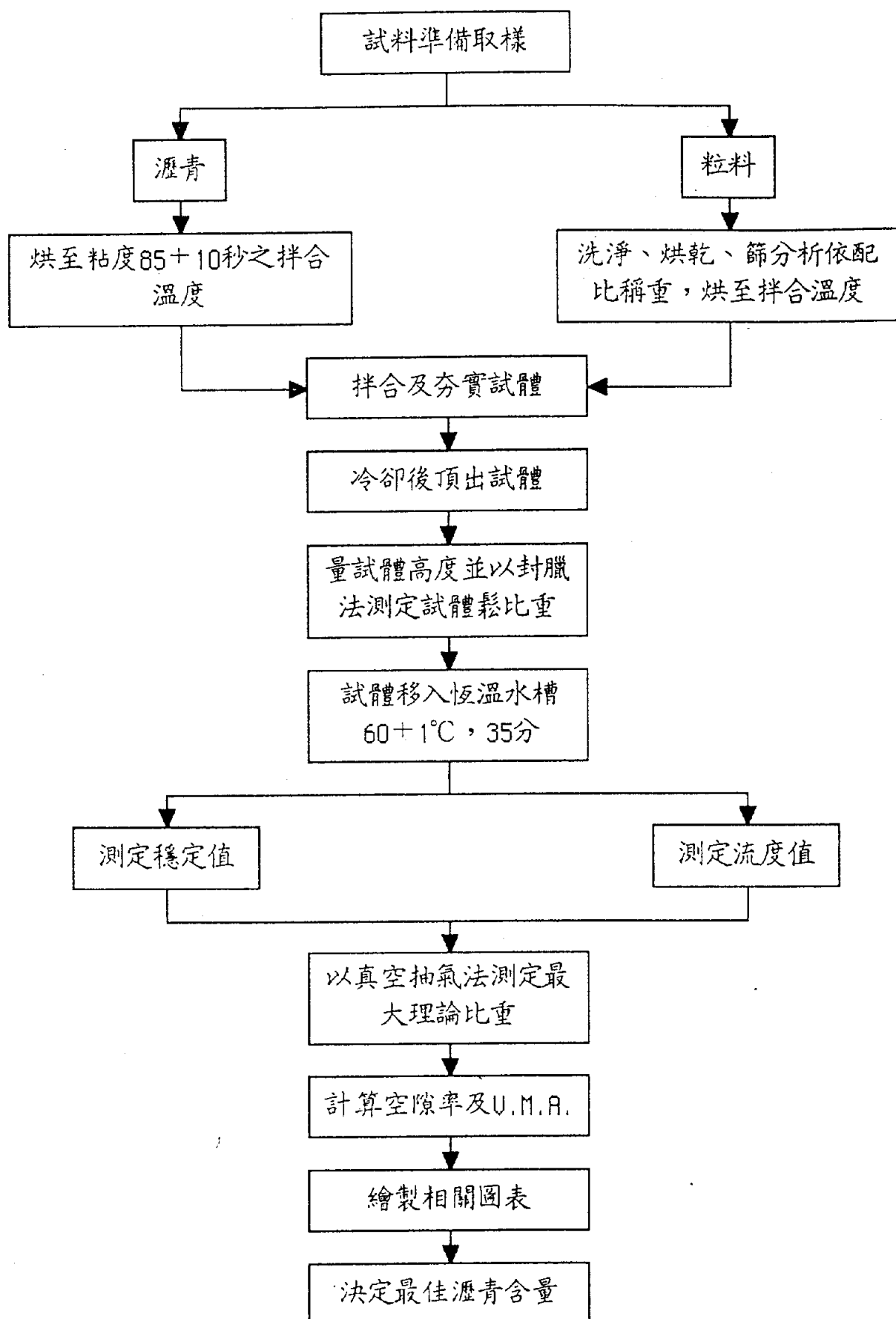


圖 3-3 馬歇爾配合設計流程圖

1. 試體製作

- (1) 每種不同瀝青含量之試體，至少準備三個，試體標準尺寸為直徑10.2cm(4")，高6.35cm(2.5")。
- (2) 拌合溫度為瀝青材料粘度在85±10秒時之溫度，大約為160°C；夯壓溫度為瀝青材料粘度在140±15秒時之溫度，大約為140°C。
- (3) 夯實試體：本研究包括III_d、IV_b及VII_a級配瀝青混凝土均採用重交通量設計每面夯壓75次，以自動夯壓機夯實。

2. 測定試體鬆比重

本研究以封腊法測定其鬆比重(G)如下式：

$$G = \frac{A}{(B - C) - [(B - A) / G_p]}$$

G_p ：石腊比重

A：試體乾重

B：封腊後試體重

C：封腊試體水中重

3. 穩定值及流度值測定

- (1) 將試體表面腊除去，置入恆溫水槽，溫度控制於60°C±1°C，時間維持35分鐘。
- (2) 將試體置於馬歇爾試驗儀上，加壓量測其穩定值及流度值。

3-4 瀝青混凝土基本力學試驗計劃

為深入瞭解瀝青混凝土受外力作用之影響，以便將來提供路面應力分析之參考，並藉以評估飛灰、爐石粉及拌

合廠回收粉塵等填充料與傳統填充料—石粉、水泥間，在瀝青混凝土路面工程上應用之效果。本研究係於馬歇爾配合設計求出各填充料在乾拌法與濕拌法拌合時瀝青混凝土之最佳含油量後，再以此最佳含油量針對密級配(IV b)以五種填充料(石粉、水泥、飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵)及兩種拌合法(乾拌法、濕拌法)拌合並夯製抗壓、抗拉、抗剪及抗彎試驗之瀝青混凝土試體，進行常溫下基本力學試驗。由於瀝青混凝土基本力學試驗缺乏規範可供依循，故本研究所用各種試驗方法，試體模、測試模具，皆參考一般材料試驗文獻及自行設計，經模具商製造而成。

3-4-1 抗壓試驗

1. 試驗原理：

利用萬能試驗機測定瀝青混凝土在不同填充料狀況下之抗壓強度。試體破壞時之最大壓力公斤數與試體橫斷面積之比即為試體之抗壓強度。如圖 3-4所示。

2. 試驗步驟：

(1) 試體製作：

試體製作參考ASTM D1074，試體高10cm，直徑10.2cm(4")參考圖 3-5所示，試體以萬能試驗機二面靜壓至試體高10cm即完成，試體先在室溫下冷卻至少24小時後頂出，頂出之試體再放入烘箱中以60°C溫度養護24小時後，取出於室溫下冷卻24小時後進行試驗。

(2) 試體模及試體如圖 3-6所示。

(3) 試驗方法：

將冷卻之試體，以游標尺測其直徑及高度後，移置於萬能試驗機上，以固定荷載速率每分鐘0.15cm，施軸向壓力於試體，測定試體破壞時之最大荷載公斤數。

3-4-2 抗拉試驗

由於 CNS與ASTM均無直接量測瀝青混凝土抗拉強度之試驗，因此本研究模仿ASTM C496採間接量測之方法，使用劈裂張力試驗來進行。

1. 試驗原理

利用萬能試驗機測定瀝青混凝土試體之側面受壓試體破壞時之最大壓力公斤數之二倍與試體總表面積之比，即為其水平張力。其公式如下所示：

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD}$$

σ_t : 劈裂張力值(kg/cm²)

P: 試體劈裂時之最大荷載公斤數

L: 試體高度(cm)

D: 試體直徑(cm)

2. 試驗步驟：

(1) 試體製作：

試體製作過程同馬歇爾法配合設計，試體高 6.35cm(2.5")，直徑 10.2cm(4")，試體二面各夯壓



圖 3-4 抗壓試驗操作情形

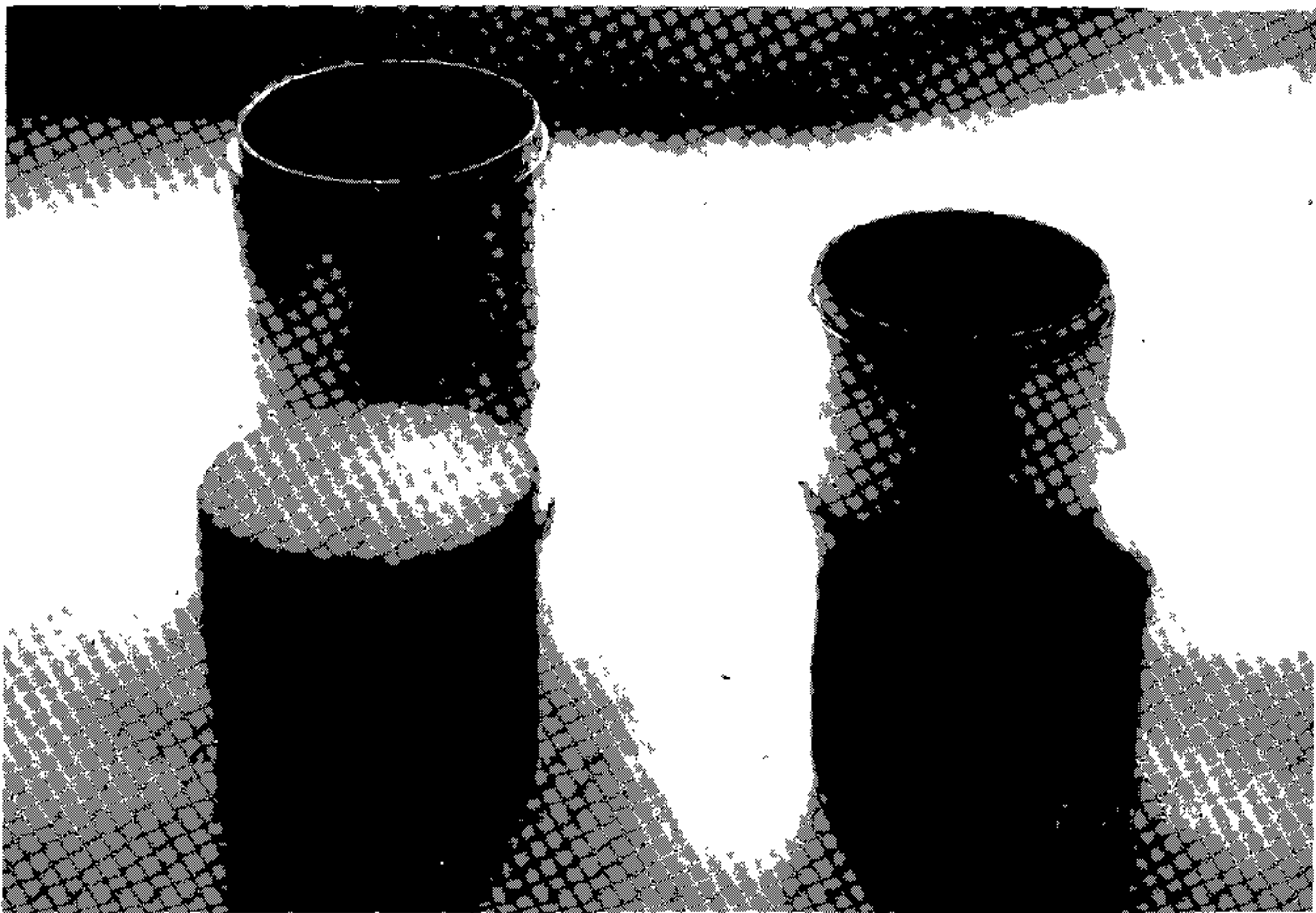


圖 3-5 抗壓試體與馬歇爾試體比較

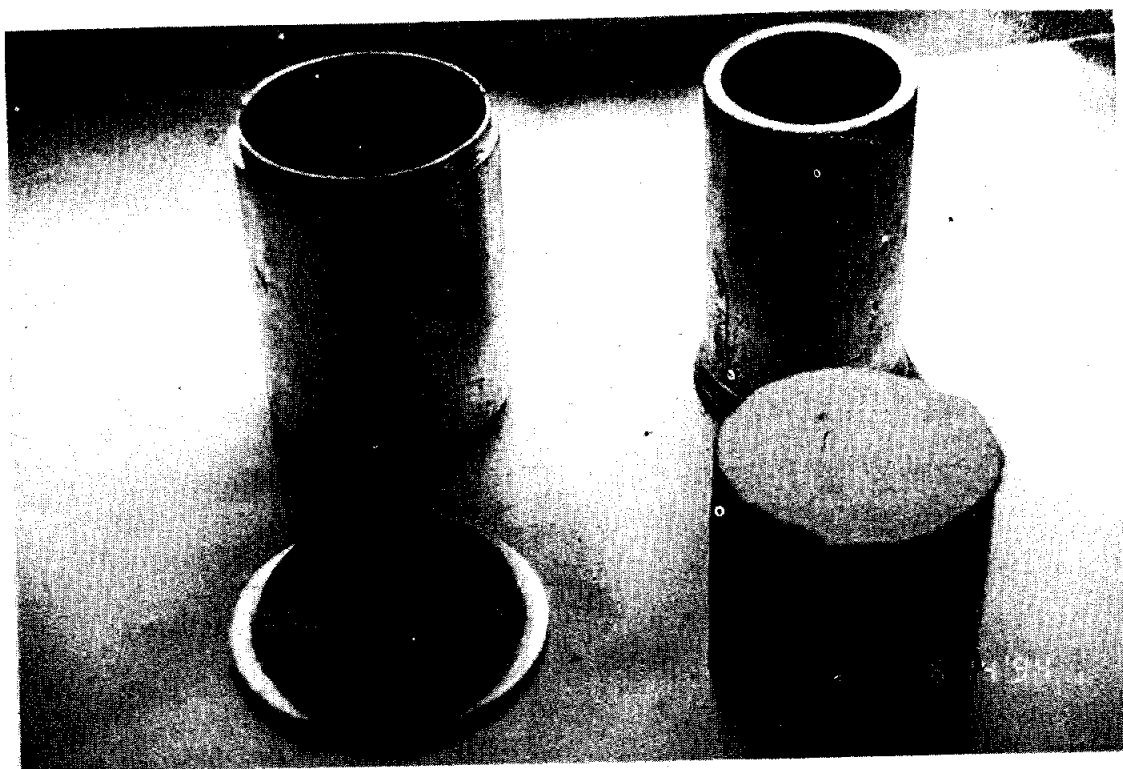


圖 3-6 抗壓試體模及試體

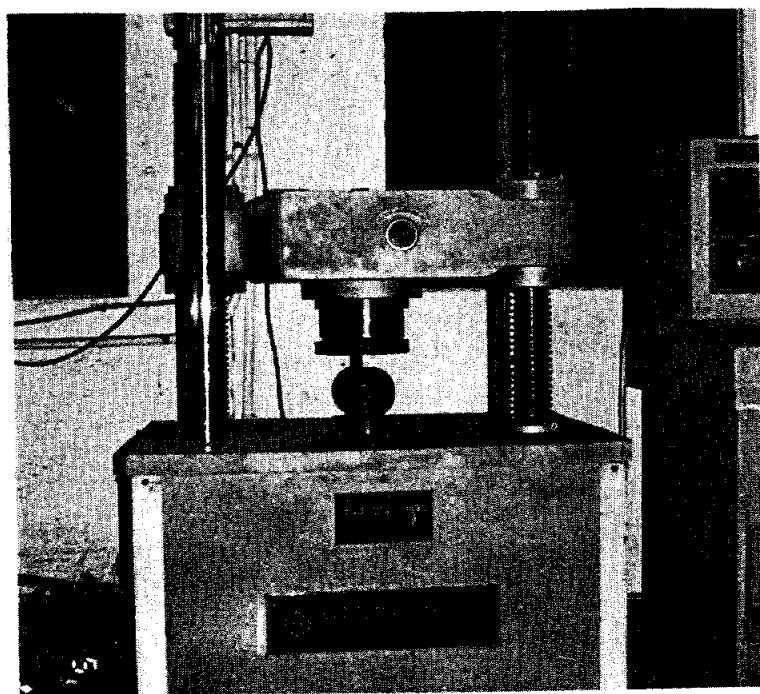


圖 3-7 抗拉試體施行劈裂試驗情形

75次，試體先在室溫下冷卻至少24小時後頂出，頂出之試體再放入烘箱中以60℃溫度養護24小時後，取出於室溫下冷卻24小時後進行試驗。

(2)抗拉試體施行劈裂試驗情形如圖 3-7所示。

(3)試驗方法：

將頂出之試體，以游標尺測其直徑及高度後，橫向側放於萬能試驗機上，並於上下徑向相對處各置一壓條，傳遞試驗機之壓力於試體，測定試體劈裂時之最大荷載公斤數。

3-4-3 抗剪試驗

1. 試驗原理[44]

利用萬能試驗機測定瀝青混凝土在不同填充料狀況下之抗貫穿剪力強度。試體破壞時之最大貫穿剪力公斤數與貫穿孔之表面積比即為試體之單位抗貫穿剪力強度如圖 3-8所示。

$$\tau = \frac{P}{\pi dh}$$

P：貫穿剪力

τ ：剪力強度

d：貫穿孔直徑

h：試體高

2. 試驗步驟：

(1)試體製作：

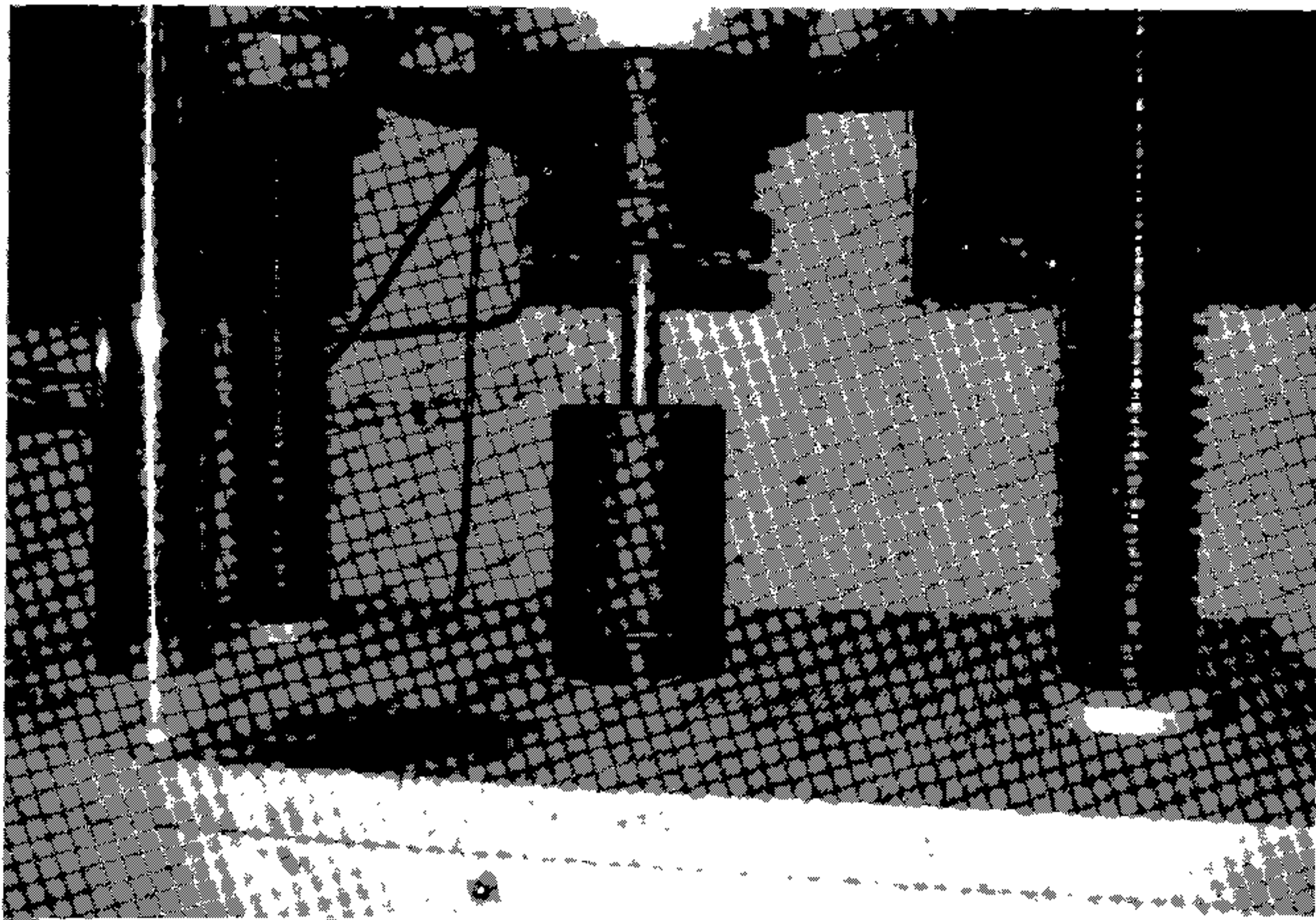


圖 3-8 抗剪試驗操作情形

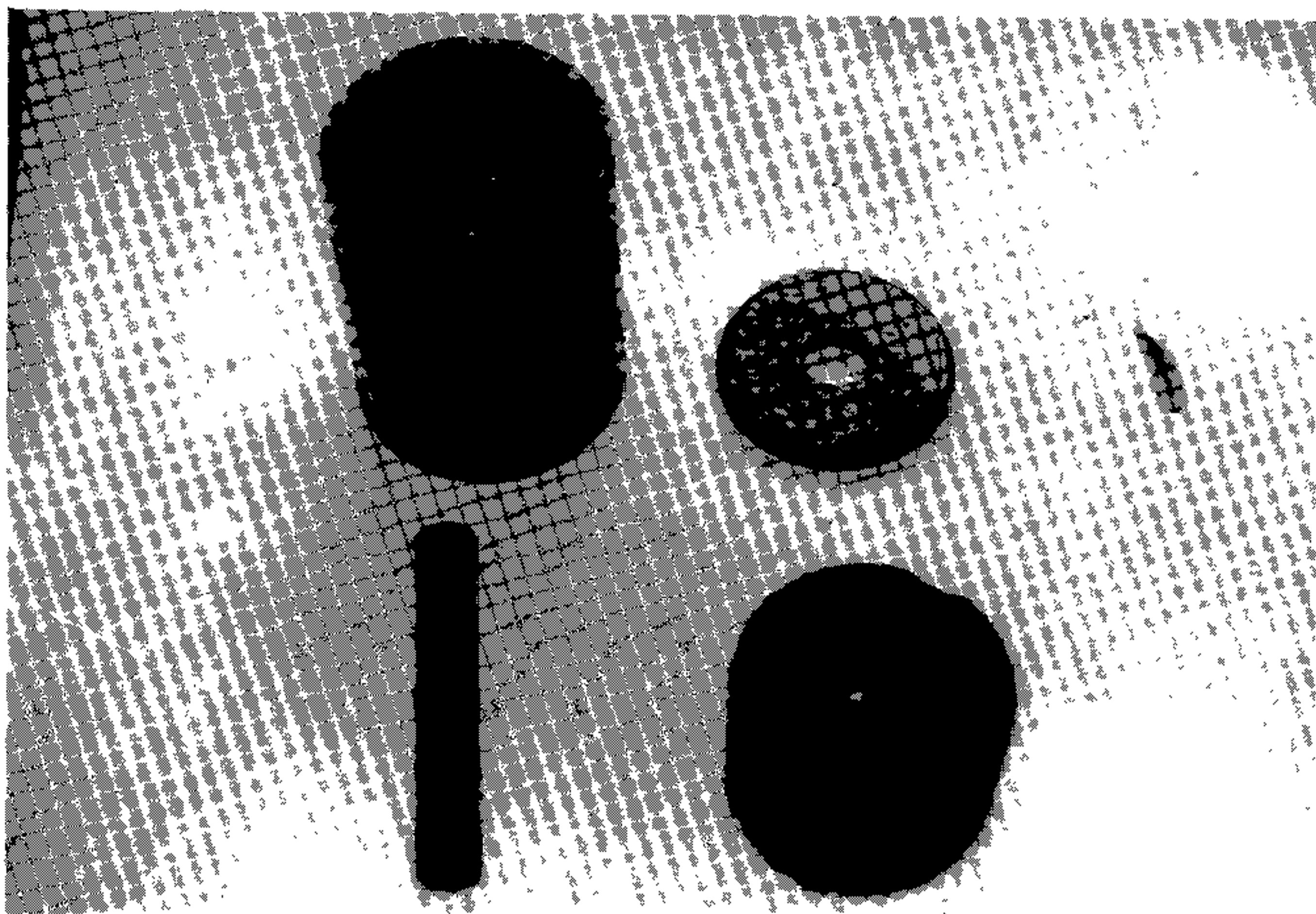


圖 3-9 抗剪試驗裝置及試體

本試驗試體尺寸、製作及養護過程同第 3-4-2 節
抗拉試驗試體之製作。

(2) 抗剪試驗裝置及試體如圖 3-9。

(3) 試驗方法：

將試體放入承壓模中，蓋上導板及穿剪試棒，如圖 3-8 所示，導板之作用在固定剪力試棒並使其垂直試體。施軸向剪力於試體，控制荷載速率每分鐘 0.15cm，測其破壞時之最大貫穿剪力公斤數。

3-4-4 抗彎試驗

1. 試驗原理：

利用萬能試驗機，測定瀝青混凝土在不同填充料狀況下之抗彎曲強度，其操作如圖 3-10 所示，並用下列公式計算：

$$\sigma_b = \frac{3PL}{2bh^2}$$

σ_b ：抗彎強度(kg/cm²)

P：試體破壞之最大公斤數

L：承壓鋼圓棒之中心距

b：試體破裂處平均寬度

h：試體破裂處平均高度

2. 試驗步驟：

(1) 試體模呈長方體；內模高 6.35cm，寬 6.35cm，長 12.7cm，將拌合試料分層搗置於模內，置於萬能試驗機上壓實，待試體 24 小時冷卻後頂出。

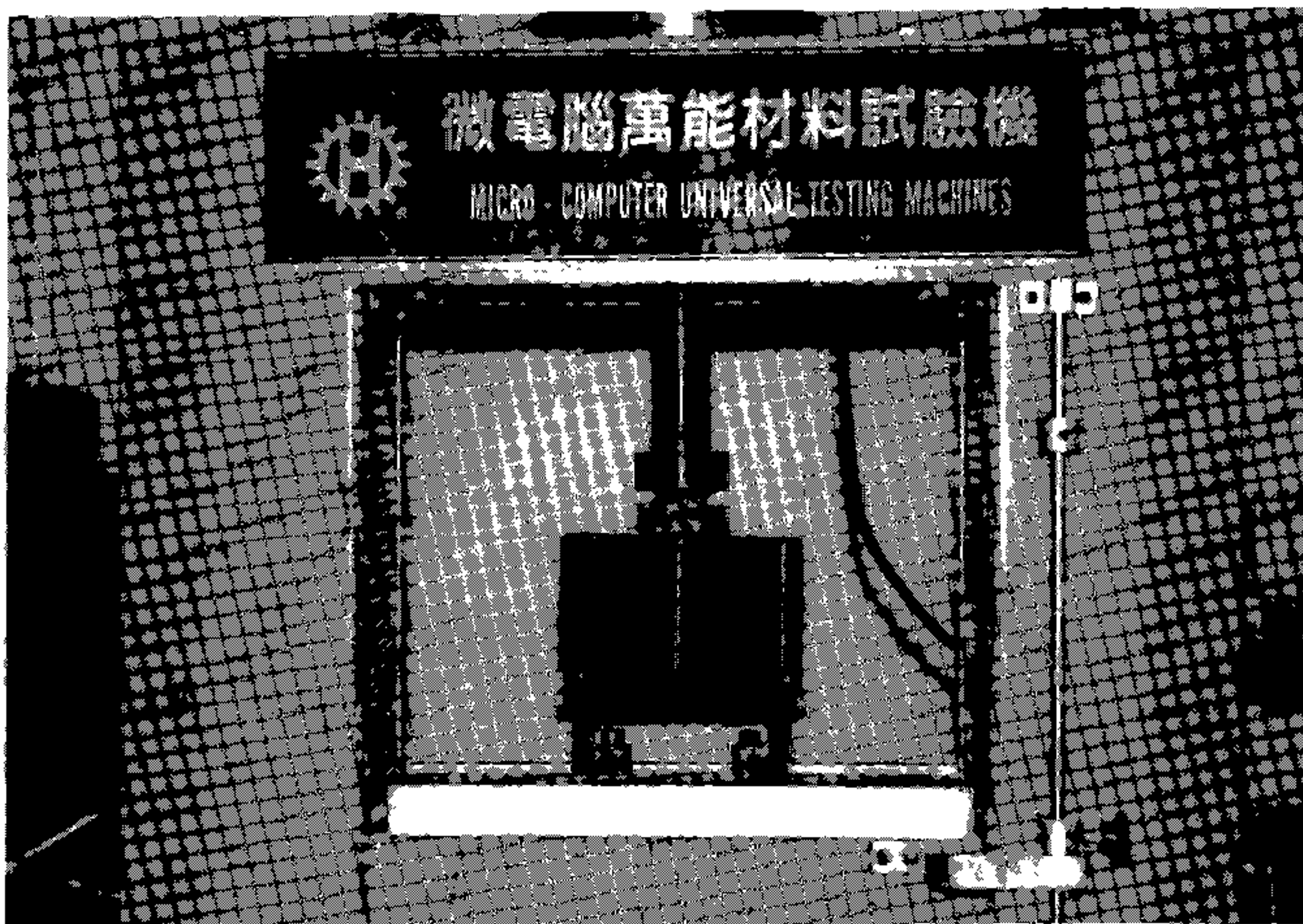


圖 3-10 抗彎試驗操作情形

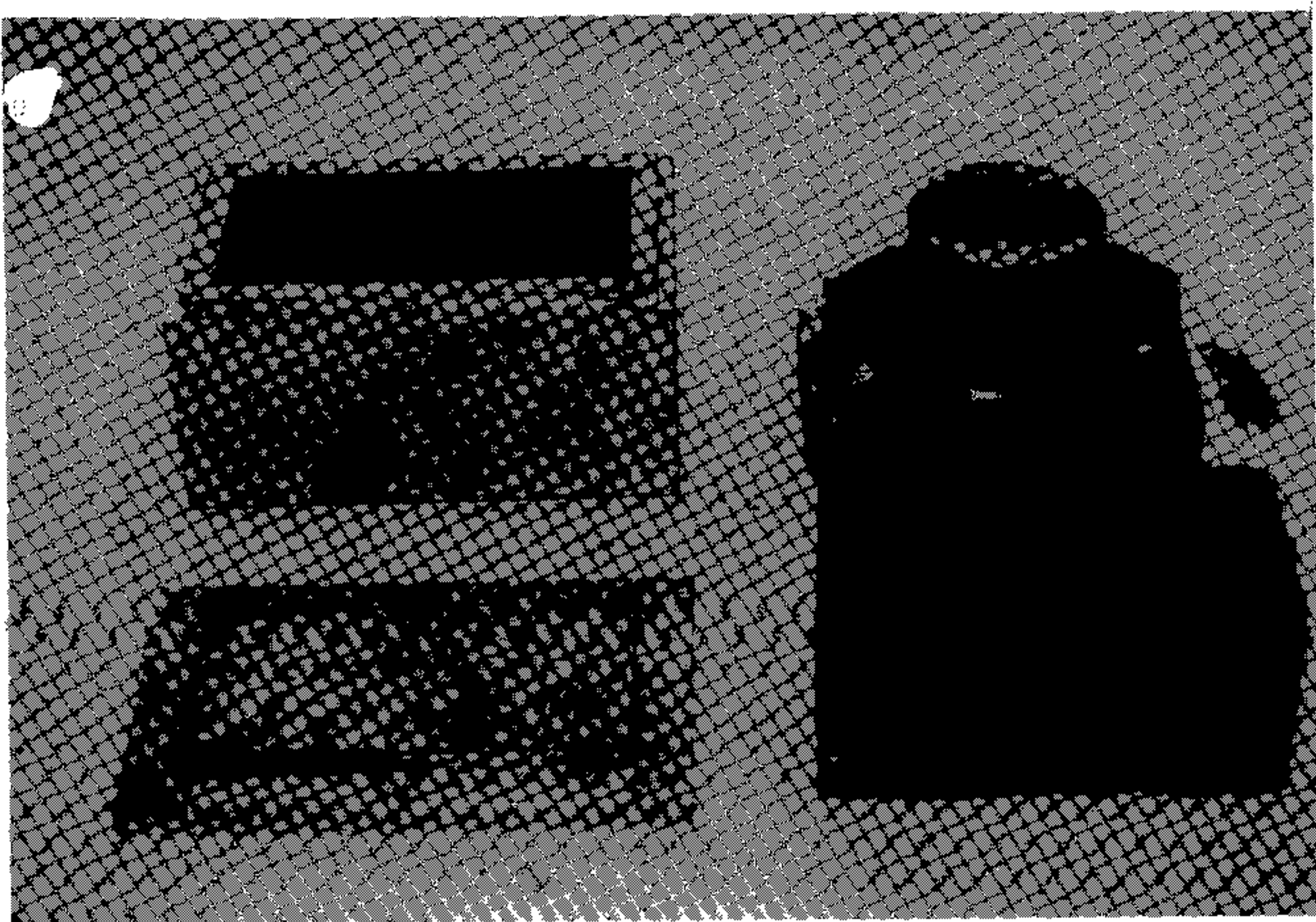


圖 3-11 抗彎試體模、承壓頭座及試體

(2)抗彎試體模、承壓頭座及試體如圖 3-11。

(3)試驗方法

將頂出之試體，置於抗彎基座上，基座之圓承軸中心距固定於 $100\text{mm} \pm 1\text{mm}$ 。將試體置於承軸上，於試體中央施壓鋼棍固定，施以軸向壓力，加載速率控制於每分鐘 0.15cm ，求其破壞時之最大公斤數，並以游標尺量度其破裂面之平均高寬度。

3-4-5 試驗應注意事項

以上四項基本力學試驗，尚須於試驗過程中注意以下事項：

- 1.瀝青混凝土為粘彈性材料，其破壞非脆性瞬間破壞，故施以不同加載速率，將產生不同之極限破壞，故加載速率須控制於同一速率均勻施壓，切忌震動。
- 2.各項試驗之承拉(壓)座及施拉(壓)座所施載重皆應垂直於試體之縱軸或橫軸及試體表面，且無偏心作用產生，使反力方向與加載方向恆保持平行。
- 3.以游標尺量度試體之各部份尺寸，須精確至 1mm 。

3-5 瀝青混凝土車轍試驗計劃

瀝青混凝土之基本力學性質，可藉馬歇爾穩定值，抗壓、抗拉、抗彎及抗剪等試驗測定之，但此等試驗對重型車輛行走所造成之流動及車轍等抵抗性無法直接表現。是

以本研究採車轍試驗來模擬實際路面在動荷重作用下之行爲，用以測定瀝青混凝土抵抗永久變形之能力。亦可求得反覆荷重次數與永久變形間之關係，本項試驗分爲試體製作及車轍模擬兩大部分。其瀝青混合料係以五種填充料依乾拌法與濕拌法所夯製之試體，進行馬歇配合設計之結果來配料。其試驗情形如圖 3-13所示。

1. 試體製作

本項試驗是模擬實際鋪築路面時鐵輪壓路機滾壓之情形，本試驗係利用日本谷藤公司專爲 TR-322M輪跡試驗儀所製造之滾壓機如圖3-12所示，進行滾壓試體。試體尺寸爲30x30x5 (cm)，滾壓輪內加裝溫度控制系統，此滾壓機可以控制之因素包括溫度、荷重應力、速度、線壓及反覆次數。滾壓荷重範圍0~1200kg，速度4.3~17cm/sec，線壓 0~40kg/cm²，視試體所要求程度而定。試體製作之步驟如下：

- ①準備試體模，試體模係以螺栓組合各鐵件成爲30cmx30cmx5cm之鋼模，內部鋪設濾紙。
- ②依最佳瀝青含量及規範要求，計算各篩號粒料重量及瀝青重量，並將所需材料秤妥備用。
- ③將粒料及瀝青分別置於兩個烘箱中預先加熱。
- ④設定拌合溫度爲140~150℃，而滾壓溫度爲140℃。
- ⑤藉調整鐵塊位置以調整滾壓輪與往復臺架之間距，使滾壓輪能確實在鐵模內試料面上滾壓。
- ⑥鐵模內部及滾壓輪面清除乾淨，不得含附不潔物。爲避免滾壓時，滾壓輪表面沾粘鐵模內試料，應先將滾壓輪

表面預熱。鐵模亦須預熱，以免混合料溫度降低，影響滾壓。

- ⑦稱出定量之瀝青混合料，由鐵模內四角隅逐漸向中心均勻填入，特別注意勿使粒料發生析離現象，用預熱之夯棒夯擊瀝青混合料表面，使具平坦狀。
- ⑧將有瀝青混合料之鐵模放置於往復臺架上。在自動計數器上，設定所欲滾壓之次數為往復 100 次。並移動重錘以設定滾壓輪壓力為 $27\text{kg}/\text{cm}^2$ 。
- ⑨開動開關，使滾壓輪在鐵模內試料面往復滾壓，直至達到所設定之滾壓次數為止。
- ⑩滾壓完成後，由往復臺架上取下鐵模，以便移置於車轍試驗機內測定瀝青混合料抵抗變形之能力，即進行車轍模擬試驗。

2. 車轍模擬試驗方法

車轍試驗機(如圖 3-13 所示)上裝設溫度控制系統，使此試驗儀可控制之因素包括：溫度、荷重應力、速度、橫方向往返移動及反覆次數等。本車轍試驗儀採用 D200xW50 標準膠輪，輪壓有 $7\text{ kg}/\text{cm}^2$ 、 $13.2\text{ kg}/\text{cm}^2$ 、 $19.4\text{ kg}/\text{cm}^2$ 及 $25.6\text{ kg}/\text{cm}^2$ 四種，前後往返速度每分鐘可變換由 0~30 次，以模擬實際交通情形。車轍試驗方法如下：

- ①試體經滾壓機製作完成後，在室溫下養治一天，使試體冷卻後測定密度。

- ②調整槓桿在試體面上之位置，再安裝加重塊於槓桿端，所加之塊數應相對於試驗之輪壓，設定輪壓荷重為 $7\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $13.2\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $19.4\text{kg}/\text{cm}^2$ 及 $25.6\text{kg}/\text{cm}^2$ 等。
- ③提升槓桿(提升至可加重塊之槓桿端)並暫時固定之，將測過密度之試體(包括鐵模)，固定在試體臺架上。
- ④設定試驗機內溫度(採用 $60^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 及 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$)，使試體保持恆溫2小時。
- ⑤設定滾壓速度為每分鐘往復30次，而滾壓次數為2000次，其中 170、340、680、1000、1360、1700、2000次均加以記錄其變形量。
- ⑥放下槓桿，使輪面完全接觸試體表面，放鬆滑動桿，將微處理機讀數歸零後，開動開關使車輪往復對試體面滾壓，直至所設定之滾壓次數為止。微處理機自動多次讀記滾壓次數及垂直向變位量，並由印表機於各設定次數時列出數據。
- ⑦以滾壓次數為橫座標，變形量為縱座標可得曲線，截取曲線之直線部份滾壓次數差與變形量之比值，即為動穩定值(Dynamic Stability)，即DS，以滾壓次數與滾壓時間之比值為變形率(Rate of Deformation)，即RD。

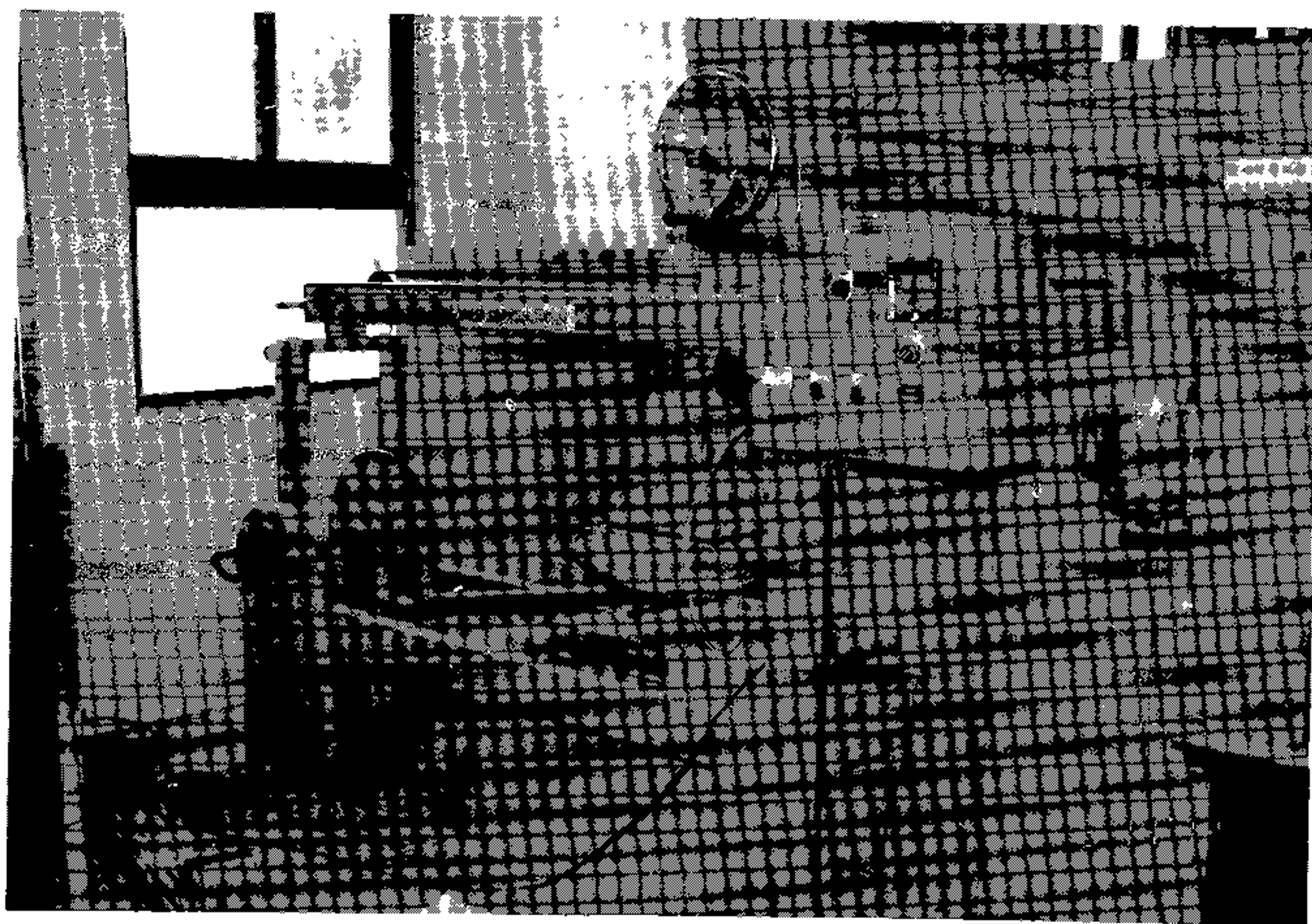


圖 3-12 車轍試體滾壓機

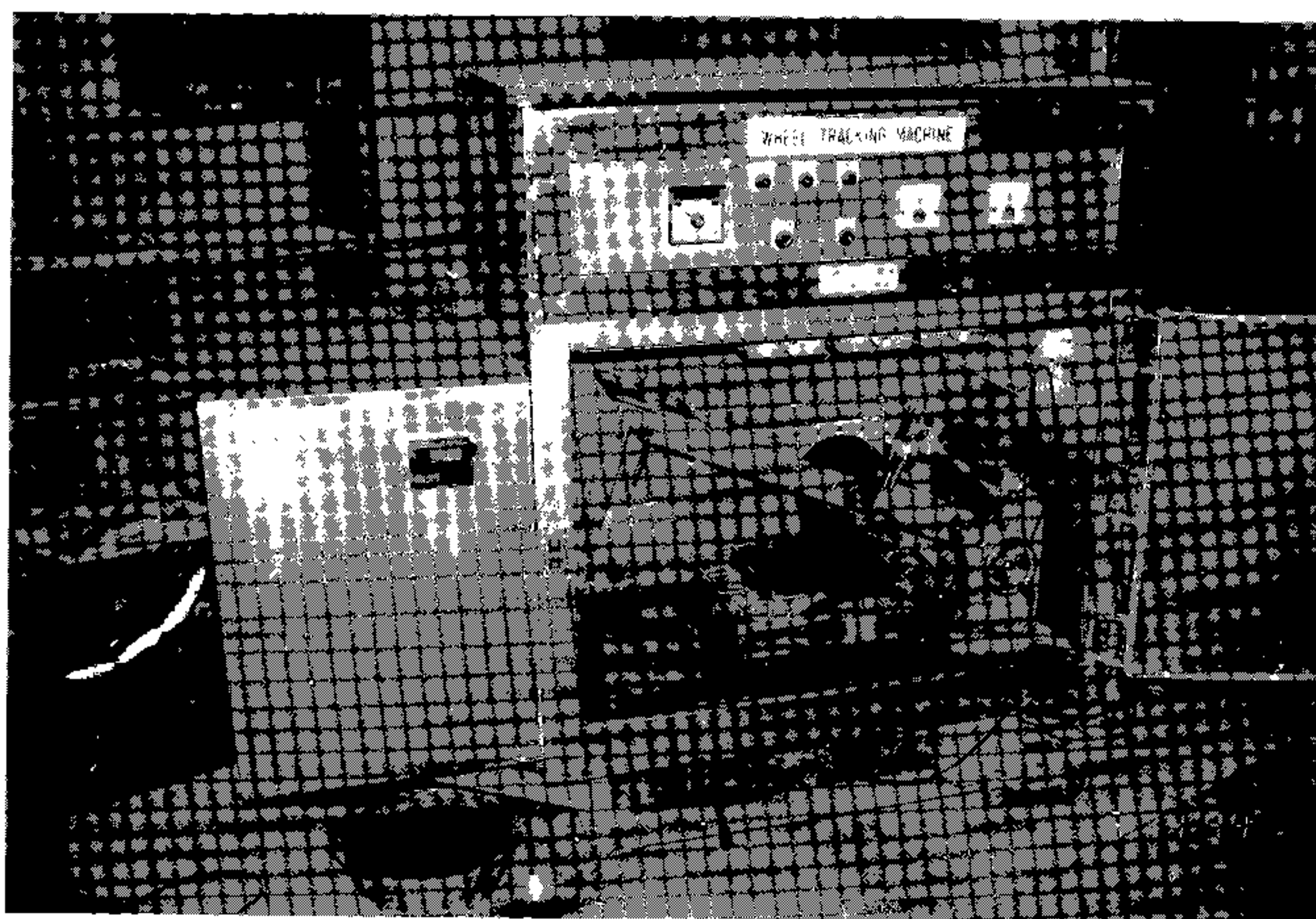


圖 3-13 車轍試驗輪跡試驗儀

第四章 試驗結果分析與討論

4-1 試驗材料基本性質分析

4-1-1 瀝青材料

本研究採用中國石油公司出產之85/100針入度瀝青膠泥作為粘結料，其物理特性經試驗後結果如表4-1 所示，將之與中國國家標準規範(CNS) 及中油85/100針入度瀝青膠泥規範比較，結果顯示本研究採用之瀝青粘結料符合規範要求。

表4-1 瀝青膠泥物性試驗結果

瀝青膠泥物性	CNS 規範*	檢驗結果
針入度 (1/100 cm)	85~100	90
比重 (25 °C)	-	1.028
軟化點 (°C)	40~60	44
延展性 (cm)	100+	100+
粘度 (秒, 150 °C)	-	119
閃火點 (°C)	232+	318
燃燒點 (°C)	-	340
溶解度 (%)	99.5+	99.7
熱損率 (%)	1.0-	0.09
殘餘針入度比 (%)	70+	79

*中油85/100針入度瀝青膠泥規範[2]

4-1-2 粒料

本研究採用之粒料是碎石級配料，包括III_d 粗級配、IV_b 密級配及VII_a 瀝青砂級配等三種，其物理特性經試驗結果列於表 4-2，表中之規範係採用美國公路及運輸官員協會(AASHTO)規範[1,38]。由表可知本研究採用之碎石級配粒料均符合瀝青混凝土粒料要求之標準。

表4-2 粒料物性試驗結果

粒料基本物性		規範*	III _d 粗級配	IV _b 密級配	VII _a 瀝青砂級配
洛杉磯磨損率(%) (b級配)		<40	20.7	20.7	20.7
硫酸鈉健性(%)		<9	0.60	0.67	0.91
比重 (g _b)	粗粒料**	-	2.603	2.572	2.597
	細粒料**	-	2.591	2.565	2.535
吸水率 (%)	粗粒料	-	1.09	1.06	1.20
	細粒料	-	1.14	2.06	2.17

註：*AASHTO規範[38]

**1.粗粒料為各級配料中停留於N0.8篩以上之粒料。

2.細粒料為各級配料中通過N0.8篩部份之粒料，但未考慮通過N0.100篩部分。

4-1-3 填充料

本研究採用石粉、水泥、飛灰、爐石粉及瀝青拌合廠回收粉塵等五種材料作為填充料，其物理特性經試驗結果如表4-3所示，由表中可知粉塵之粒徑偏高，其餘填充料均能符合78年交通部公路工程新規範有70% 通過NO.200篩之要求。

表4-3 各種填充料篩分析、比重及細度試驗結果

試 驗 篩	通 過 方 孔 試 驗 篩 之 重 量 百 分 率 (%)					
	石粉	水泥	飛灰	爐石粉	粉塵	規範*
NO.30 (0.60mm)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
NO.50 (0.30mm)	100.0	100.0	99.7	100.0	99.6	95-100
NO.100 (0.15mm)	98.9	97.3	95.7	98.8	88.7	-
NO.200 (0.075mm)	71.4	90.5	81.4	93.2	28.5	70-100
NO.270 (0.053mm)	15.3	58.7	63.9	62.8	3.0	-
NO.325 (0.045mm)	3.9	30.2	46.0	26.7	1.5	-
比 重	2.696	3.140	2.070	2.880	2.594	-
細 度 (cm ² /g)	1280	3080	3960	3750	950	-

*公路工程施工規範中填充料規範[1]

4-2 瀝青混凝土馬歇爾試驗結果分析

本研究利用填充料乾拌法及濕拌法兩種方法進行五種填充料之馬歇爾配合設計及試驗，瀝青混凝土之級配，包括III d粗級配、IVb密級配及VIIa瀝青砂級配等，此種級配命名係

國內傳統使用者，目前此種級配類似ASTM D3515中之3/4"級配料、1/2"級配料及美國瀝青學會粗片瀝青砂級配料，在我國交通部78年頒佈之「公路工程施工規範」中同意業者可參考國外各類型級配之規定[1]。

通常粗級配瀝青混凝土之特性為承載性佳，可應用於重交通量路面之底層、連結層及面層。密級配瀝青混凝土之特性為適用於路面底層及面層。瀝青砂級配瀝青混凝土適用於鋪築機場鋪面及中級或輕級交通量之路面面層，若現場粗粒料不合用時或不經濟時亦可作為底層之用[4]。

4-2-1 穩定值

瀝青混凝土之穩定值乃表示瀝青混凝土抵抗車輛重荷下變之能力，茲將III d、IV b及VII a級配之各種填充料乾拌之瀝青混凝土穩定值，彙整圖示於圖4-1 (a)、(b)及(c)，各種填充料濕拌之瀝青混凝土穩定值，彙整圖示於圖4-2 (a)、(b)及(c)。

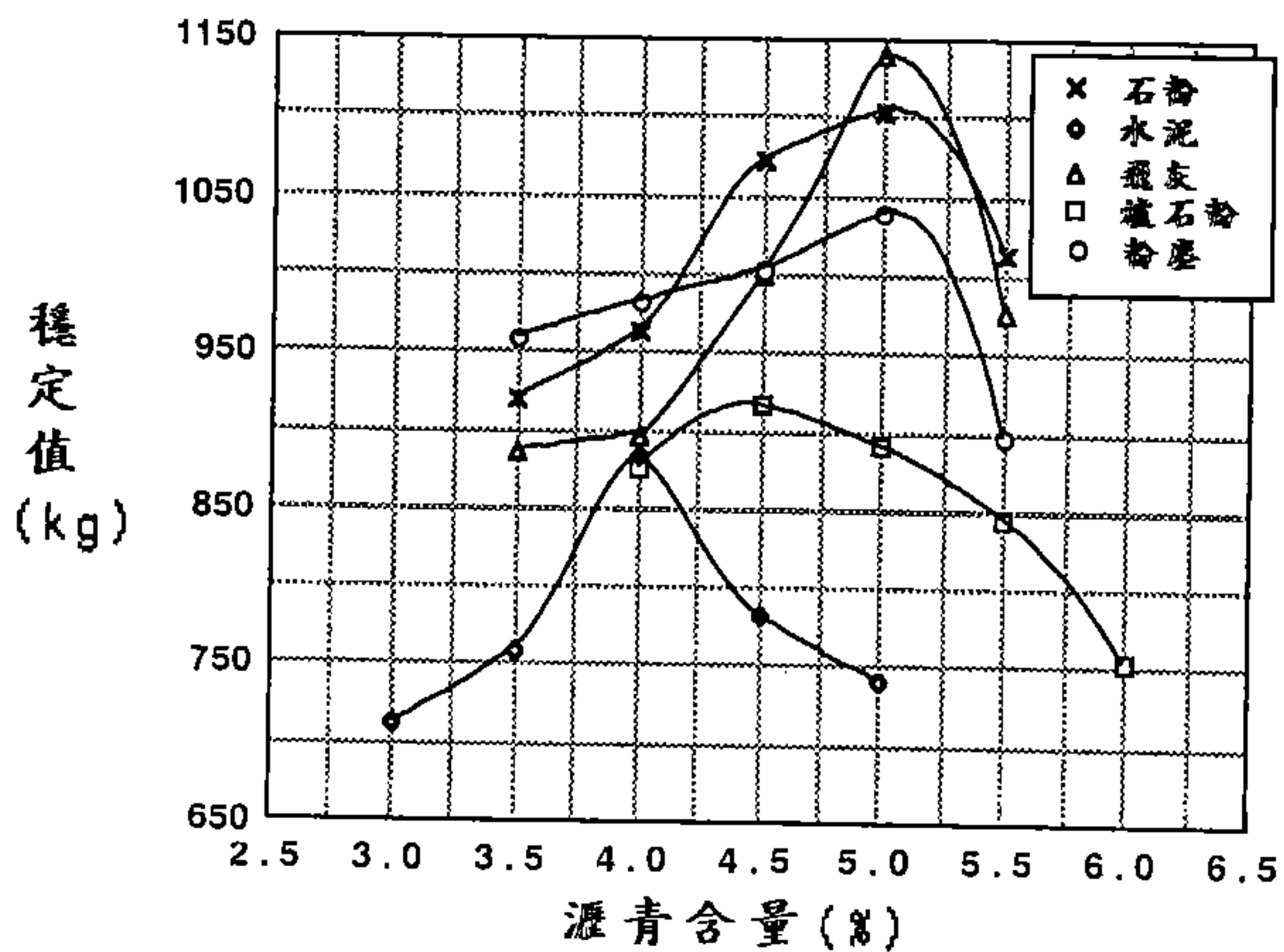
1. 乾拌法部份

在III d粗級配部份：飛灰、粉塵及石粉之變化趨勢較一致，且其最大穩定值皆發生在瀝青含量5%時，顯示若要降低路面底層之剛性可在不改變瀝青含量下而選不同之填充料來處置，由圖亦可知飛灰穩定值較高，而爐石粉及水泥穩定值較低，但使用水泥則較省瀝青。在IV b密級配部份：較無固定之規則可循但使用水泥亦較省瀝青，惟其仍可明顯地看出各種填充料平均穩定值之順序由大而小，

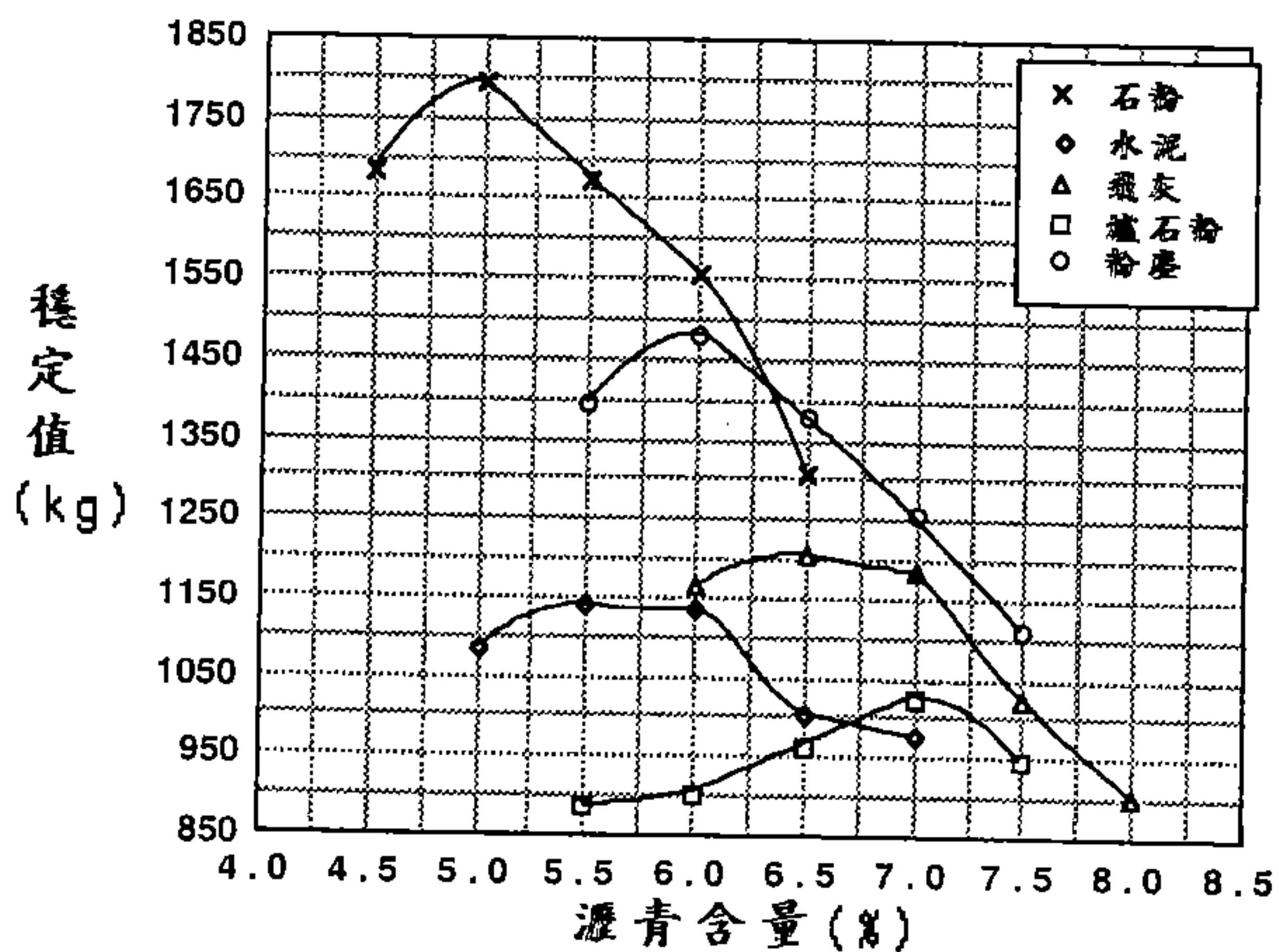
分別為石粉、粉塵、飛灰、水泥，而最小為爐石粉。在VII a瀝青砂級配部分：由圖4-1 (c) 可看出就達最高穩定值所需瀝青含量而言比IIId粗級配及IVb密級配高，此乃VIIa瀝青砂級配之細料含量多，形成單位重量之表面積大所致，尤其飛灰需油量甚高。在穩定值方面資源回收料中以粉塵最高而飛灰最低，由以上分析可知填充料之選用應配合級配，但就穩定值考慮時粉塵在各種級配中應是較穩定之填充料。

2. 濕拌法部份

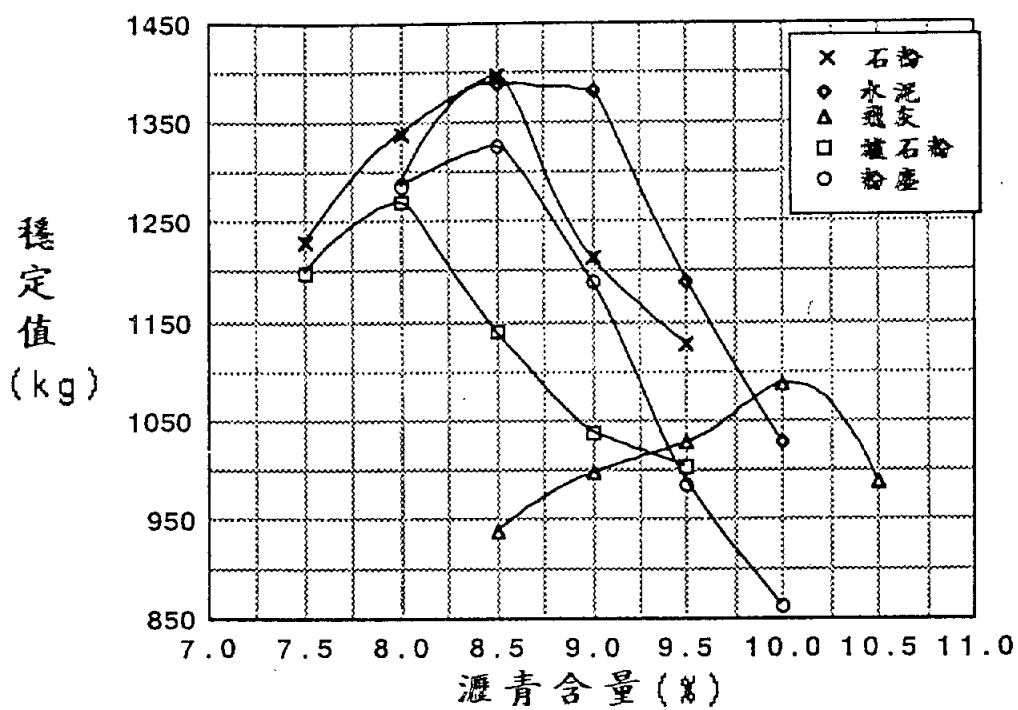
在IIId粗級配部份：由圖 4-2(a)可知，石粉及粉塵之最大穩定值甚為接近，但石粉係發生在瀝青含量4.5%處，而粉塵則發生在瀝青含量4%處，是以若要節省瀝青用量，可以使用粉塵來取代石粉。另石粉與水泥之變化趨勢較一致，而粉塵與爐石粉之變化趨勢亦較一致，且石粉與水泥之最大穩定值皆發生在瀝青含量4.5%時，而粉塵與爐石粉皆發生在瀝青含量4%時；是以此二種情形下若要降低路面底層之剛性可在不改變瀝青含量下，以不同之填充料替代之。在IVb密級配部份：由圖 4-2(b)顯示石粉之穩定值較高 且石粉與粉塵之變化趨勢較一致，且其最大穩定值皆發生在瀝青含量5.5%時，顯示若要降低路面面層之剛性可在不改變瀝青含量下而以粉塵替代石粉。另粉塵與爐石粉之最大穩定值甚為接近，是以若要節省瀝青用量可在不改變穩定值下而以爐石粉替代。在VIIa瀝青砂級配部分：由圖 4-2(c)可看出爐石粉之穩定值較高，其次為石粉、水泥、粉塵，最低者為飛灰，又爐石粉之穩



(a) 粗級配(III d)

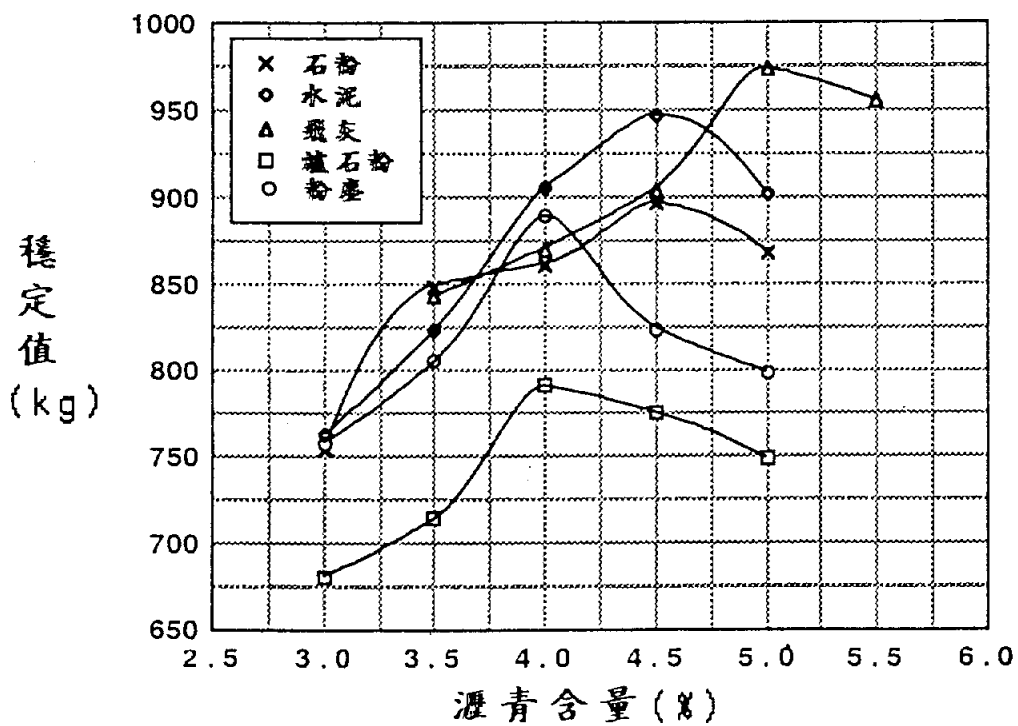


(b) 密級配(IV b)

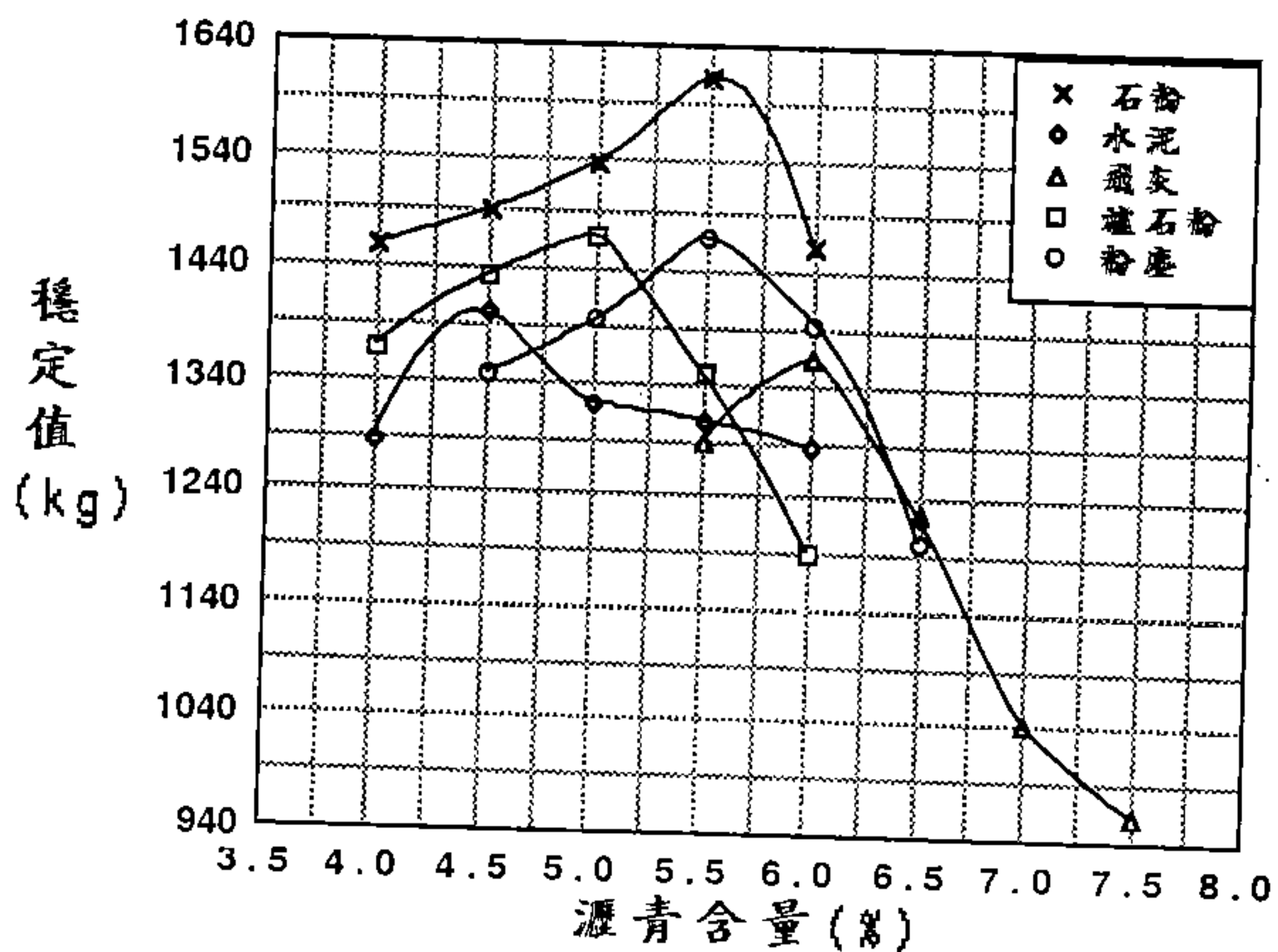


(c) 瀝青砂級配(VIIa)

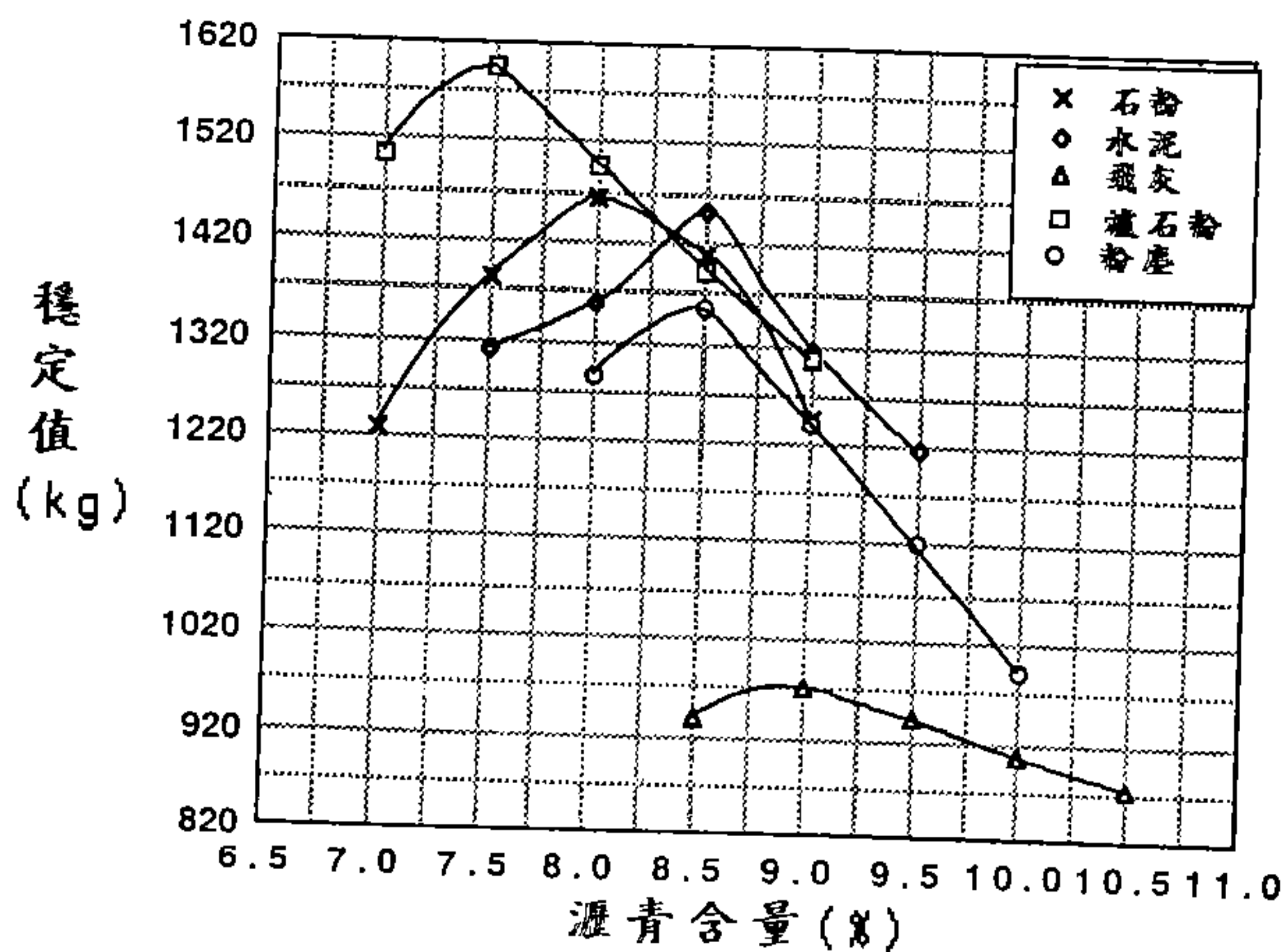
圖 4-1 填充料乾拌瀝青混凝土穩定值之比較



(a) 粗級配(IIIId)



(b) 密級配(IVb)



(c) 瀝青砂級配(VIIa)

圖 4-2 填充料濕拌瀝青混凝土穩定值之比較

定值最高但瀝青含量最低，而飛灰穩定值最低，但瀝青含量高，故以經濟考量，本級配宜以爐石粉取代石粉為較佳策略。

4-2-2 流度值

瀝青混凝土之流度值乃表示瀝青混凝土破壞時之變形量，III d、IV b及VII a級配乾拌瀝青混凝土之流度值如圖4-3 (a)、(b)及(c)所示，溼拌瀝青混凝土之流度值如圖4-4 (a)、(b)及(c)所示。

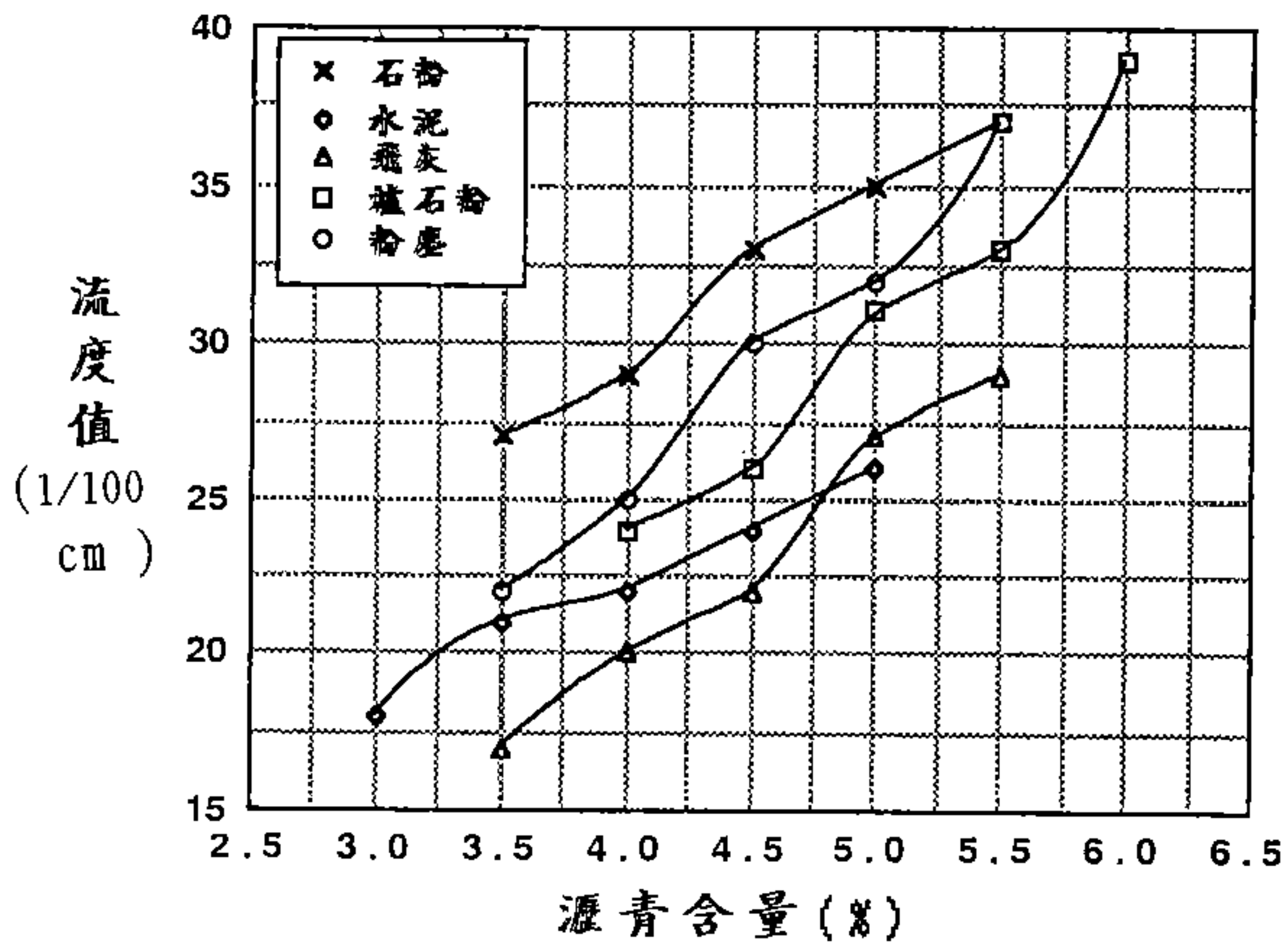
1. 乾拌法部份

在III d級配部份：由圖4-3(a)可知石粉、粉塵及爐石粉等之流度值均介於25~37之間，且上升之趨勢亦相近，顯示利用粉塵、爐石粉及石粉作填充料之瀝青混凝土柔性相近。但是在IV b級配部份：因填充料之添加量高於III d級配，故在相同流度值時，其瀝青含量較高，因其流度值大部分高於規範上限，故其柔性亦大幅增加，因此施工時除應適當地控制瀝青含量外，亦應注意填充料之使用，以防止鋪面過度柔軟而不利行車。在VII a級配部分：製作試體時需要較高瀝青含量且流度值均在30-50間，有偏高之趨勢，由圖4-3 (c)可看出飛灰、爐石粉及粉塵具有較接近規範要求之流度值。由於路面受荷重後總會下沉或上昇，故瀝青路面應具有柔性才不致裂開。大致說來，含油量高之開放級配，柔性較含油量低之密級配好。由於柔性之要

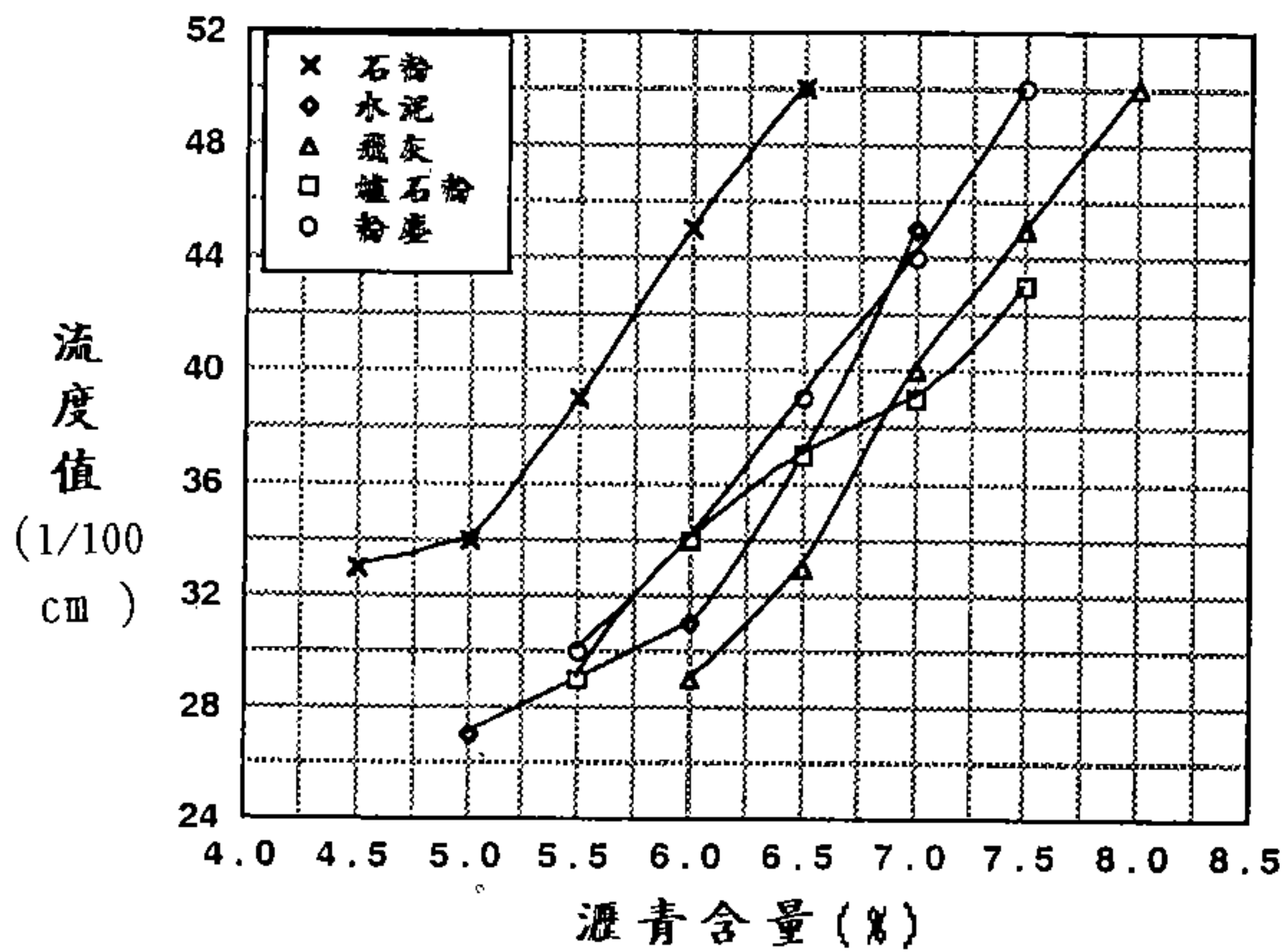
求與穩定性之要求相抵觸，故工程師必需要在其中找一個平衡點[4]。

2. 濕拌法部份

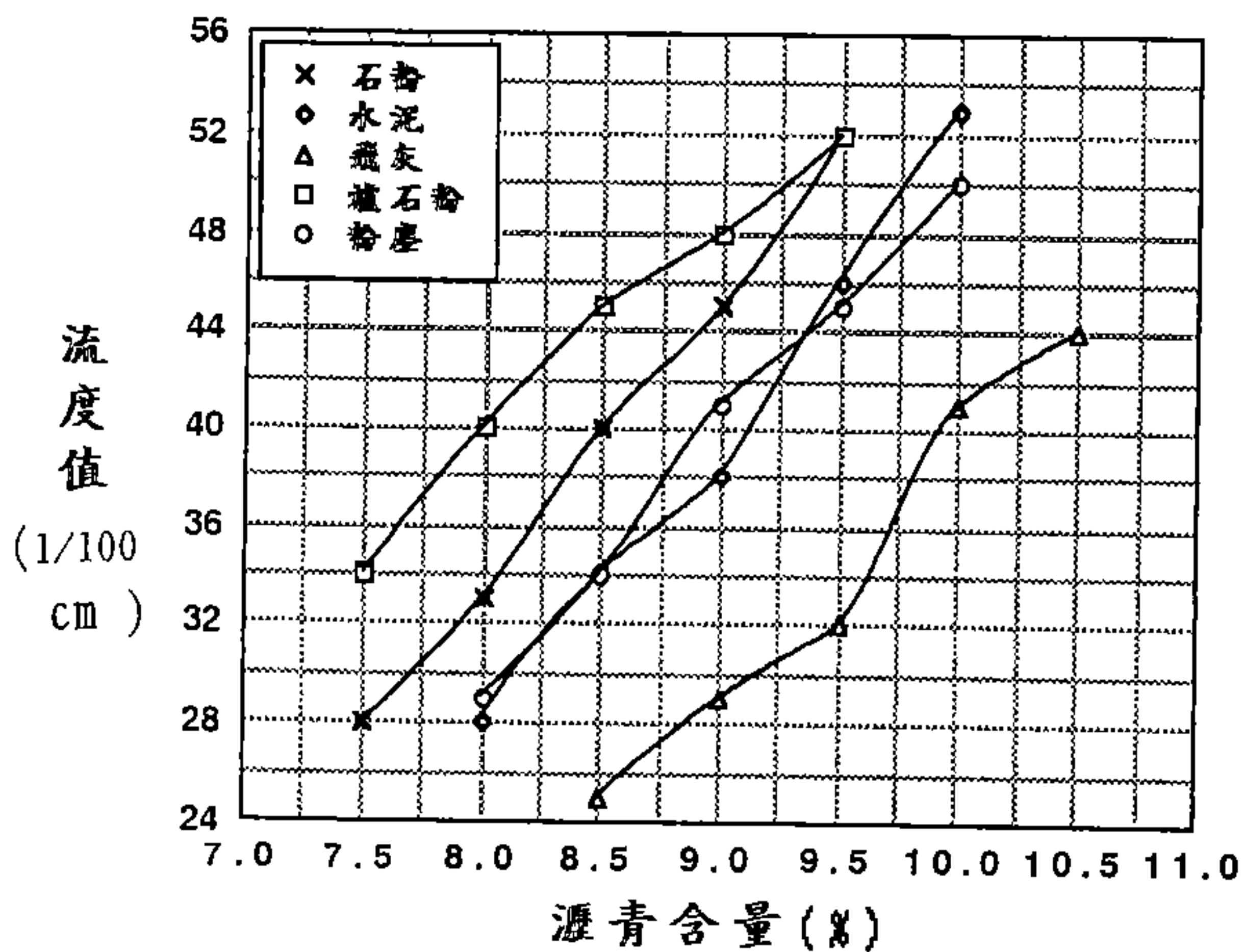
在III d粗級配部份：由圖4-4(a)顯示，粉塵、石粉、水泥及爐石粉其變化趨勢甚為一致，且皆發生在瀝青含量3~5%間，顯示若要調整路面底層之柔性時，可在不改變瀝青含量下而選用較符合理想之填充料來處置。另由圖亦可知飛灰之變化趨勢陡峭，且最大流度值偏高，蓋因飛灰之比表面積最大，且比重最輕，是以飛灰與瀝青先拌合後易造成吸油量偏高。在IV b密級配部份：由圖4-4(b)顯示，五種填充料之變化趨勢大致相同，惟其最高之流度值皆分佈在40~50之間，顯示於此填充料之用量下，其柔度值皆有偏高之趨勢，因此IV b密級配利用填充料濕拌法時，除其瀝青含量偏高外亦容易造成柔性偏高。在VII a瀝青砂級配部份：由圖4-4(c)顯示，VII a瀝青砂級配之瀝青使用量約高出IV b密級配之瀝青使用量在3%以上，且僅飛灰之流度值皆在40以內符合規範要求外，其餘四種填充料其流度值範圍約在28~53間，有偏高之趨勢；然飛灰之流度值雖可符合規範要求，但含油量稍嫌偏高，而石粉、水泥、爐石粉及粉塵其含油量雖較飛灰低，惟其流度值卻偏高。因此如何有效地將各種填充料應用於工程上，端視設計需求及工地現況予以靈活運用。



(a) 粗級配(III d)

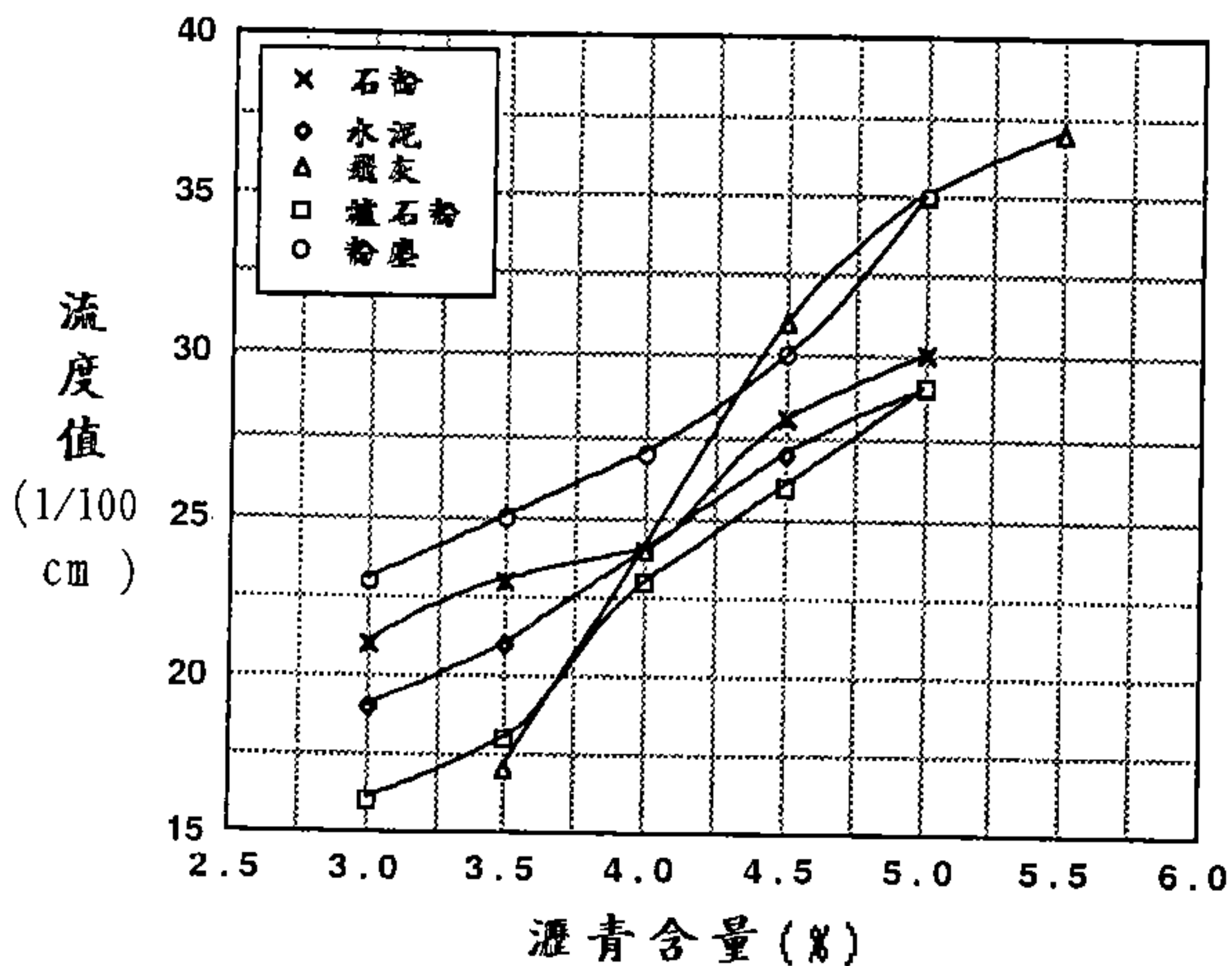


(b) 密級配(IV b)

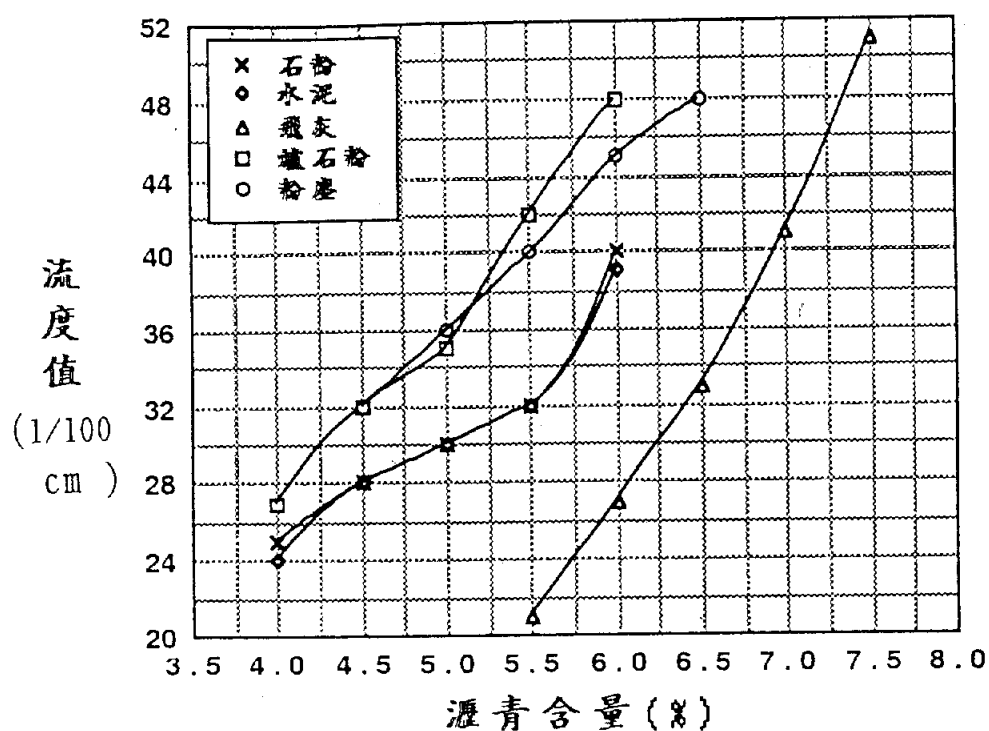


(c) 瀝青砂級配(VIIa)

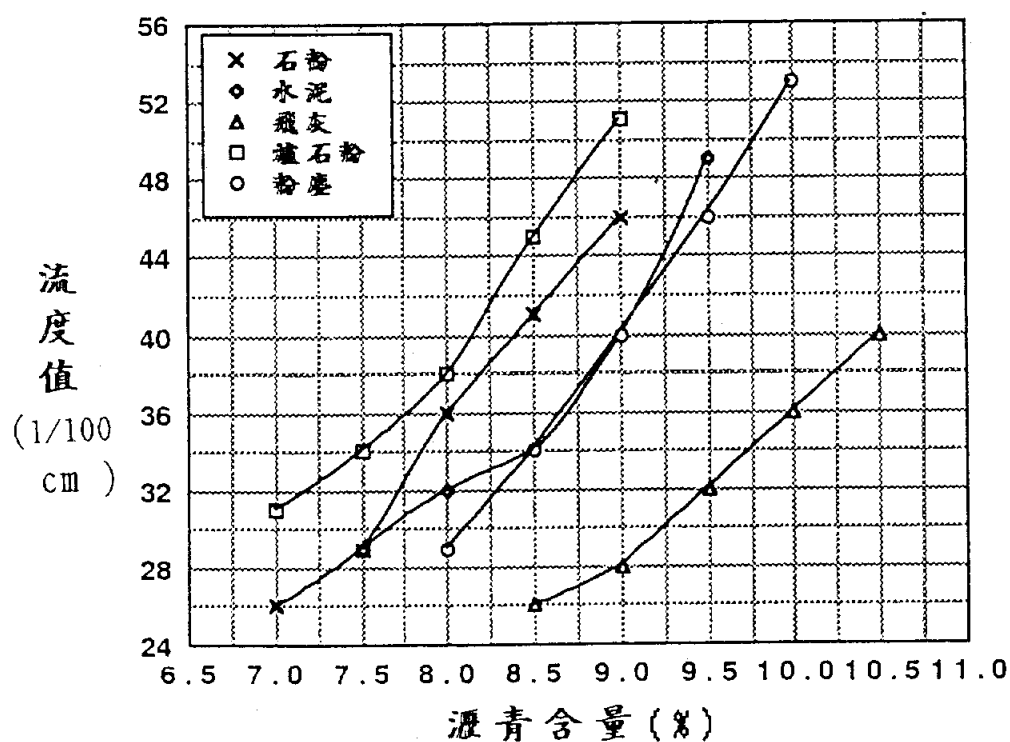
圖 4-3 填充料乾拌瀝青混凝土流度值之比較



(a) 粗級配(IIIId)



(b) 密級配(IVb)



(c) 瀝青砂級配(VIIa)

圖 4-4 填充料濕拌瀝青混凝土流度值之比較

4-2-3 單位重

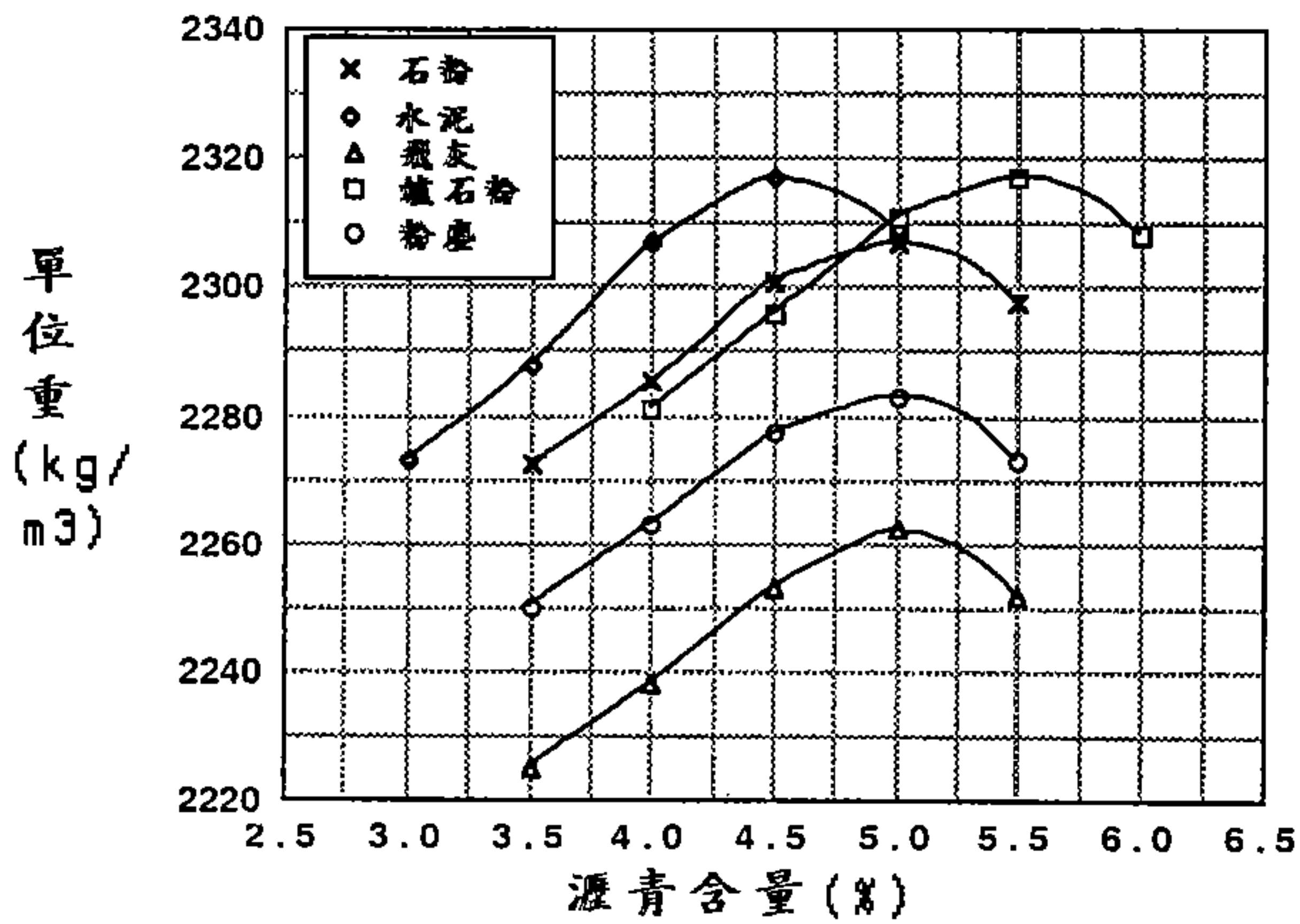
瀝青混凝土單位重或密度之測定，係配合工地瀝青混凝土之壓實度而設置者，藉此可以控制壓實度。壓實後瀝青混凝土單位重增大，通常單位重大之瀝青混凝土較能耐久，瀝青混凝土密度是以試驗室壓實密度為準，但是工地現場壓實程度，總沒有試驗室壓實得徹底，因此施工規範中規定，工地密度需要達到試驗室壓實密度之某百分比，此即所謂壓實度或壓實密度[4]。在本研究中III_d，IV_b及VII_a級配乾拌法瀝青混凝土之單位重如圖4-5 (a)、(b)及(c)所示，另溼拌法瀝青混凝土之單位重如圖4-6 (a)、(b)及(c)所示。

1. 乾拌法部份

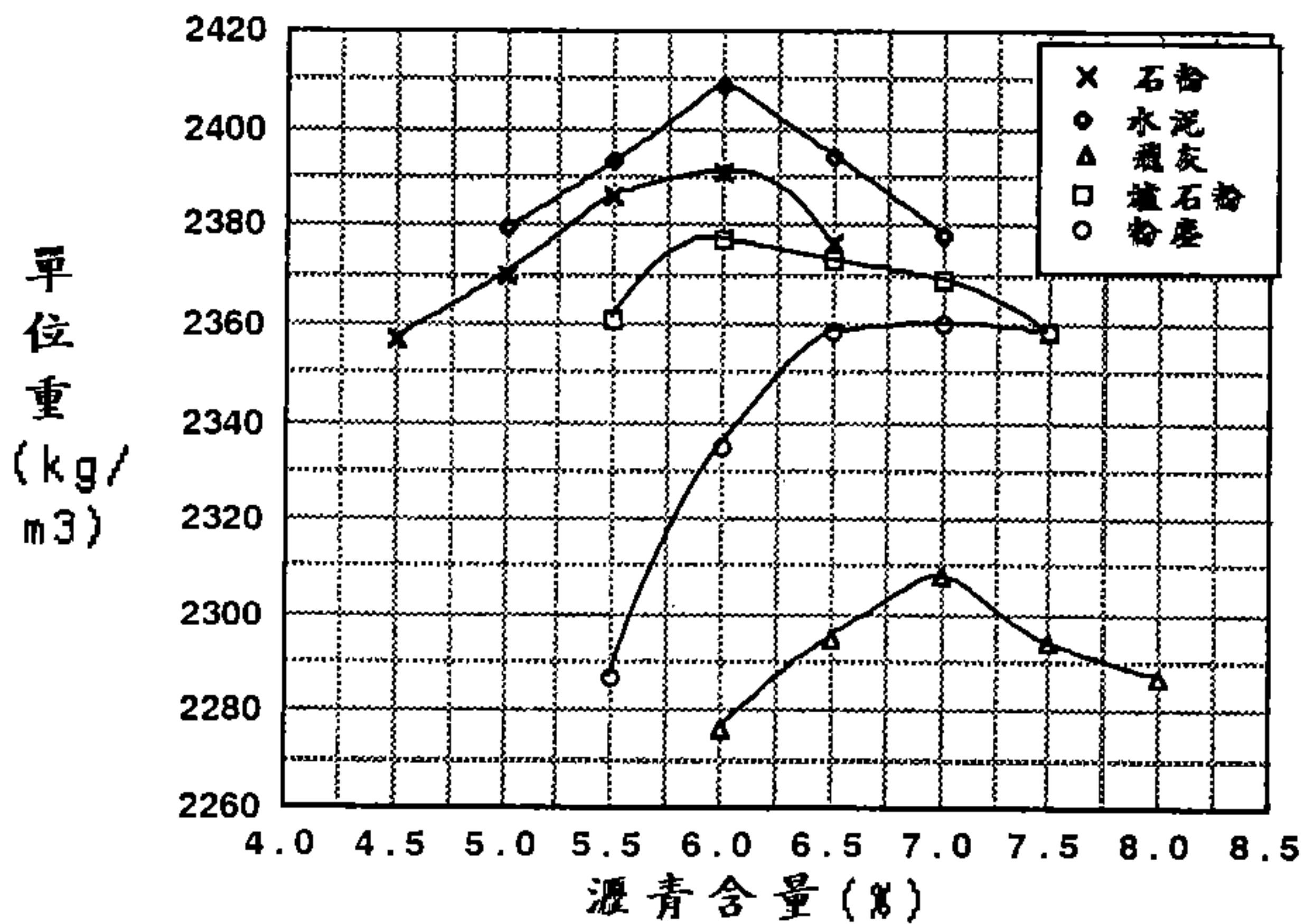
在III_d粗級配部份，以爐石粉及水泥作為填充料乾拌之瀝青混凝土單位重最大而飛灰較小在IV_b密級配部分，以水泥及石粉乾拌瀝青混凝土單位重最大而飛灰最小。在VII_a瀝青砂級配部分以爐石粉乾拌瀝青混凝土單位重最大而飛灰較小，此有可能與飛灰係五種填充料中比重最輕有關。

2. 濕拌法部份

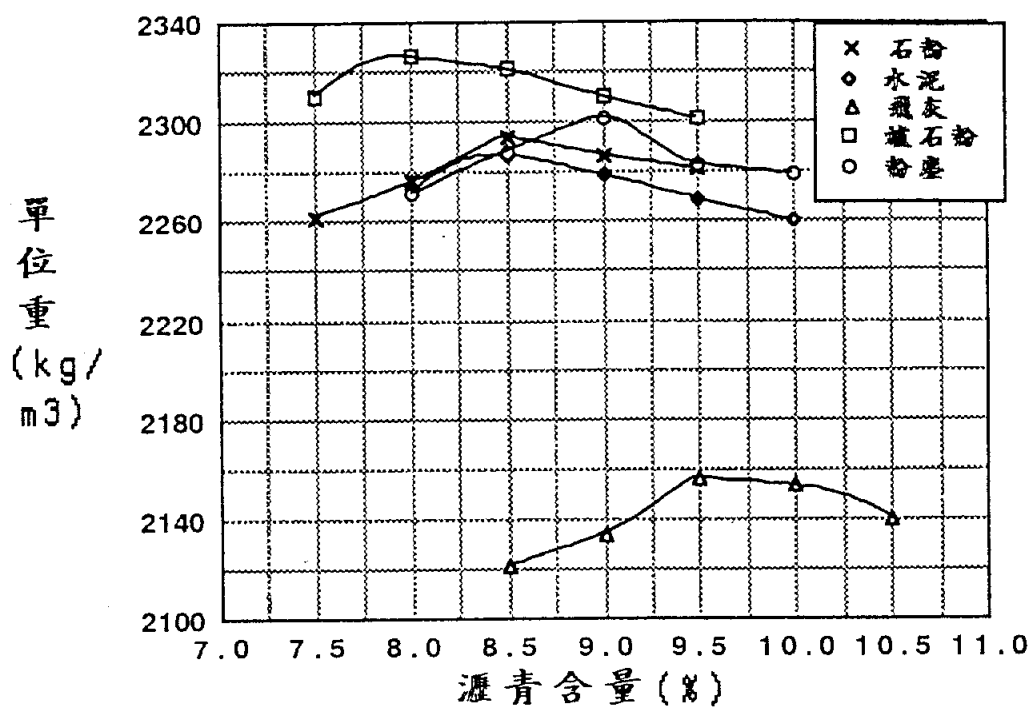
在III_d粗級配部份：由圖4-6(a)可知石粉、水泥、爐石粉及粉塵之變化趨勢幾乎相似；該等之最大單位重皆介於2310~2320kg/m³之間，且皆發生在瀝青含量4.5%時，顯見於此級配之瀝青混凝土應用於道路底層時，可在不改變瀝青含量下選取較經濟之填充料而達到相同比重之效果。在IV_b密級配部分：由圖4-6(b)可知，爐石粉、水泥



(a) 粗級配 (III d)

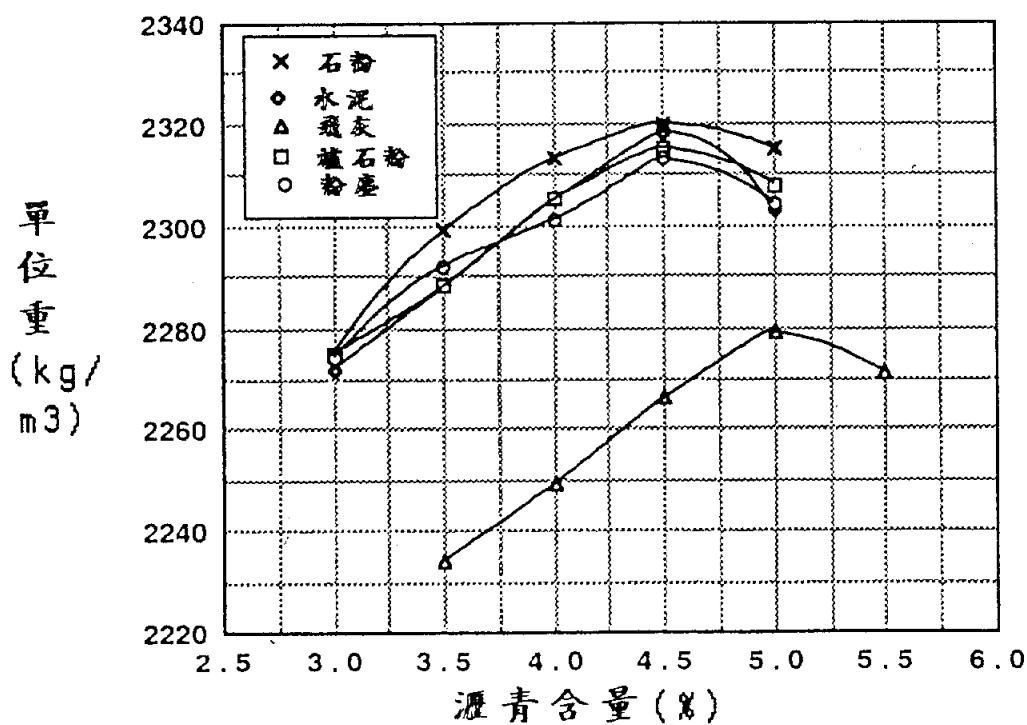


(b) 密級配 (IV b)

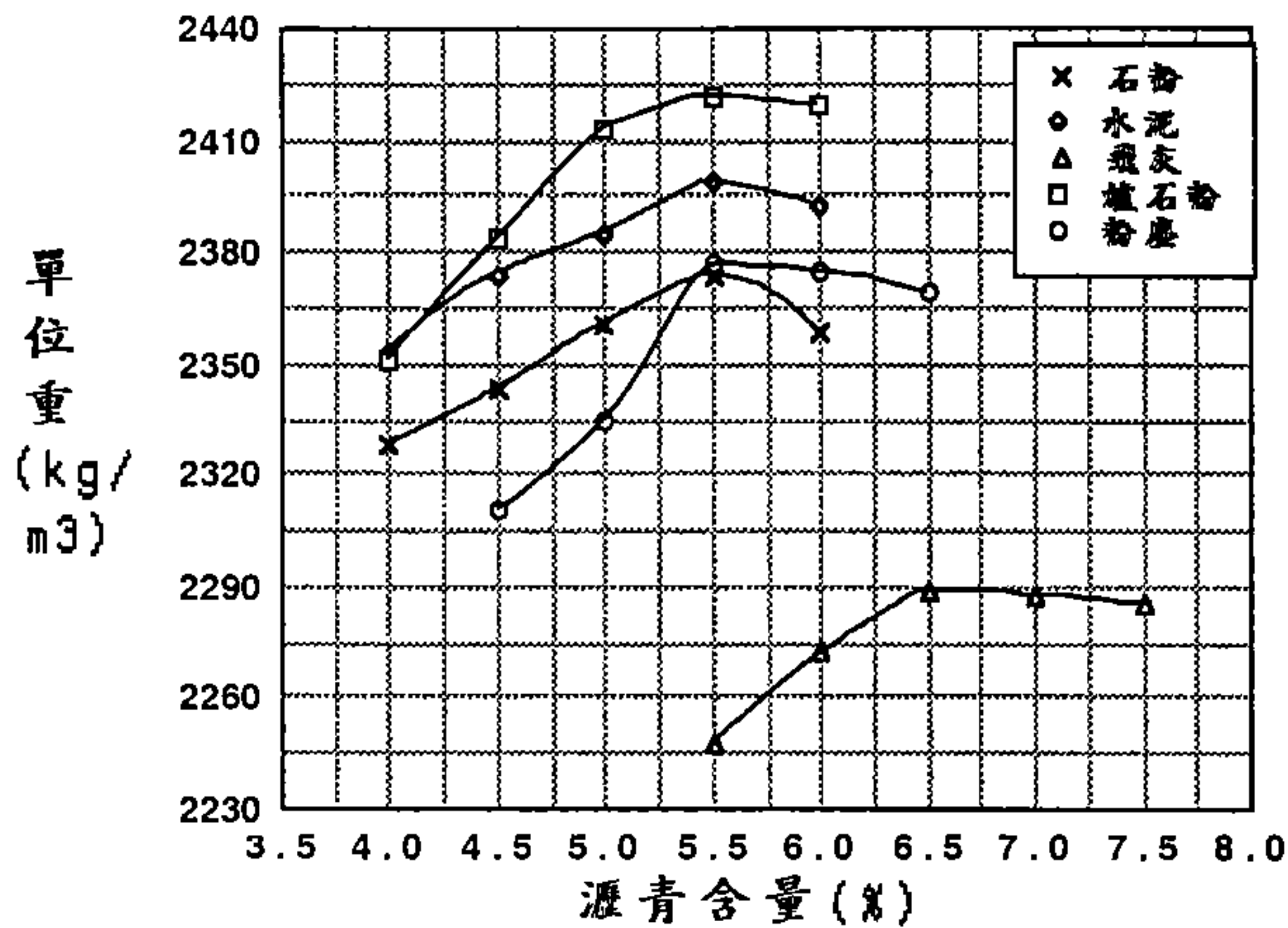


(c) 瀝青砂級配(VIIa)

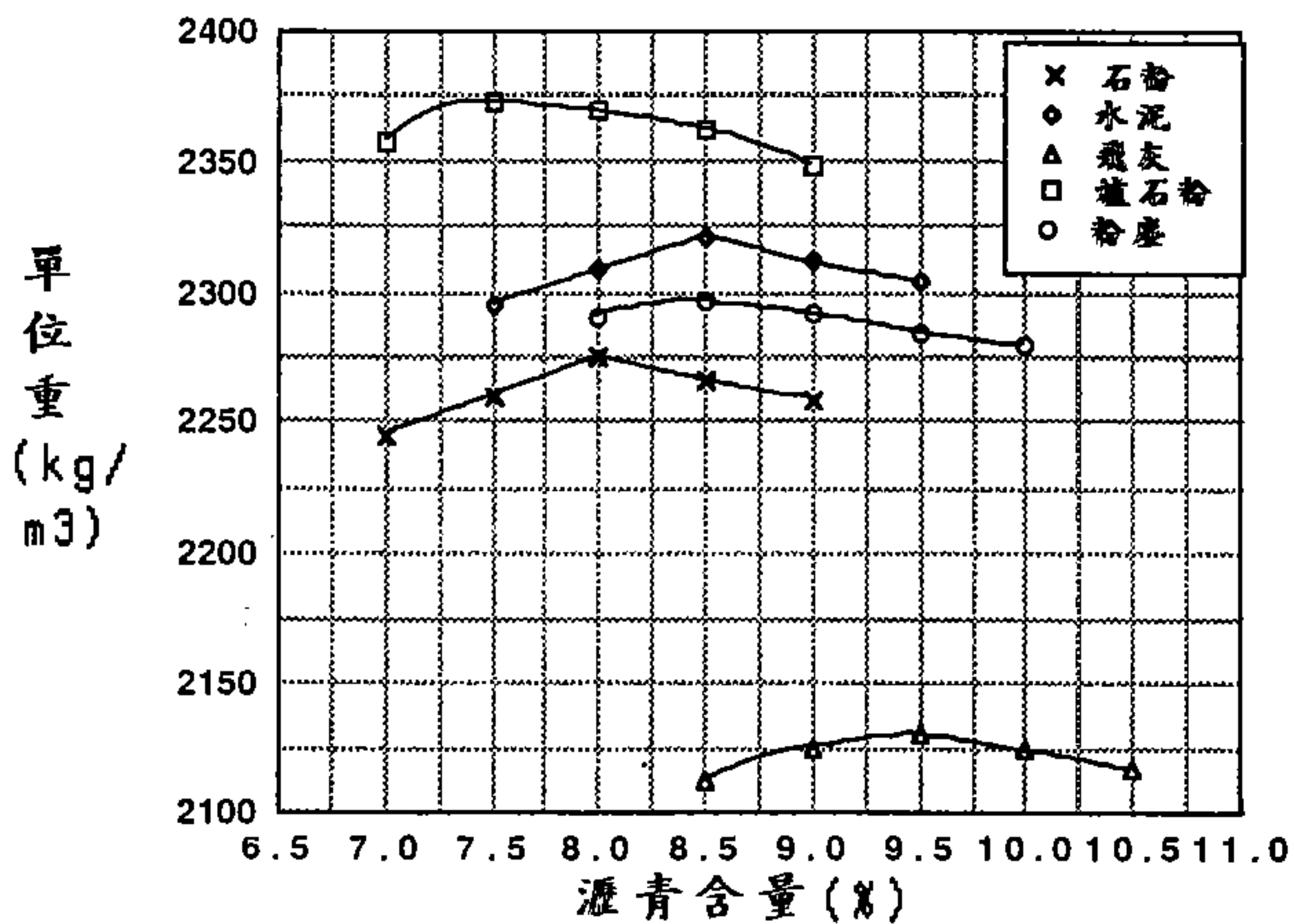
圖 4-5 填充料乾拌瀝青混凝土單位重之比較



(a) 粗級配(IIIId)



(b) 密級配(IVb)



(c) 瀝青砂級配(VIIa)

圖 4-6 填充料濕拌瀝青混凝土單位重之比較

及石粉其趨勢一致，且最大單位重皆發生在瀝青含量5.5%時，若以單位重較大之瀝青混凝土較具耐久性之情形下，可使用爐石粉來取代石粉是既經濟又有效之策略。在VIIa瀝青砂級配部分：由圖4-6(c)可知，各填充料間之趨勢並無一致，但爐石粉溼拌瀝青混凝土之單位重最大而飛灰最小，此與IVb密級配不謀而合，此係飛灰之細度最大，且比重最低之故。

4-2-4 空隙率

空隙率係指瀝青混凝土壓實後被瀝青及粒料所包圍空隙之總和，適量之空隙，可使骨材及瀝青路面受壓變形時，有足夠空間伸縮。在試驗室內用於路面面層之拌合料其容許空隙約為3~5%，底層之容許空隙約為3~8%，詳細狀況，則依各工程而異。瀝青路面之耐久性與空隙率有關，若是空隙率太高則水份與氣體容易穿透路面使瀝青老化。反之，若空隙率太低，則路面容易產生冒油現象[4]。在本研究中IIId，IVb與VIIa級配乾拌瀝青混凝土之空隙率如圖4-7(a)、(b)及(c)所示，另溼拌瀝青混凝土之空隙率如圖4-8(a)、(b)及(c)所示。

1. 乾拌法部份

由圖4-7(a)中顯示石粉及水泥作為瀝青混凝土填充料時，均比其他各種填充料空隙率低，因此極易產生冒油之現象，此亦目前國內瀝青路面常有車轍及冒油現象之主因。又由圖4-7可知當瀝青含量愈高，空隙率有降低且趨

於平緩之趨勢，顯示瀝青含量應控制得當，否則過高之瀝青含量，將使空隙率過低而發生路面冒油及光滑不佳狀況。在III_d級配中，飛灰及粉塵在各種瀝青含量時均具有最高之空隙率，而爐石粉具有較低之空隙率。在IV_b級配中飛灰亦具有最高之空隙率，在VII_a級配中以飛灰及粉塵具有較高之空隙率。由以上分析，若以飛灰及粉塵作為瀝青混凝土之填充料應可預防路面冒油之現象。

2. 濕拌法部份

由圖4-8(a)可知，在III_d，IV_b與VII_a級配中，飛灰之瀝青含量皆最高，此與飛灰之細度高而比重又最小有關，細度高比重輕故其體積大，使得吸油量亦大。另在高填充料含量之VII_a瀝青砂級配中，爐石粉可以較低之含油量，而獲得相同之空隙率，顯與爐石粉之細度大、比重高與具表面活性有關。另在IV_b密級配部分：石粉、水泥與爐石粉之變化趨勢較一致，且各空隙率值幾乎重疊，顯示於此級配中，水泥與爐石粉皆為可取代石粉之優良填充料。

4-2-5 粒料間空隙 (V.M.A.)

粒料間空隙率 (Voids In the Mineral Aggregate, V.M.A.)，係指壓實後瀝青混凝土粒料與粒料間之空隙。一般為有效瀝青量（總瀝青量扣除骨材表面吸收量）及所需空隙之和。乾燥粒料間之V.M.A.愈高，所需之瀝青量愈多。由於粒料表面瀝青層厚，瀝青老化越慢，且瀝青混凝土之耐久性亦愈佳[4]，瀝青混凝土粒料間空隙 (V.M.A.) 之值對鋪

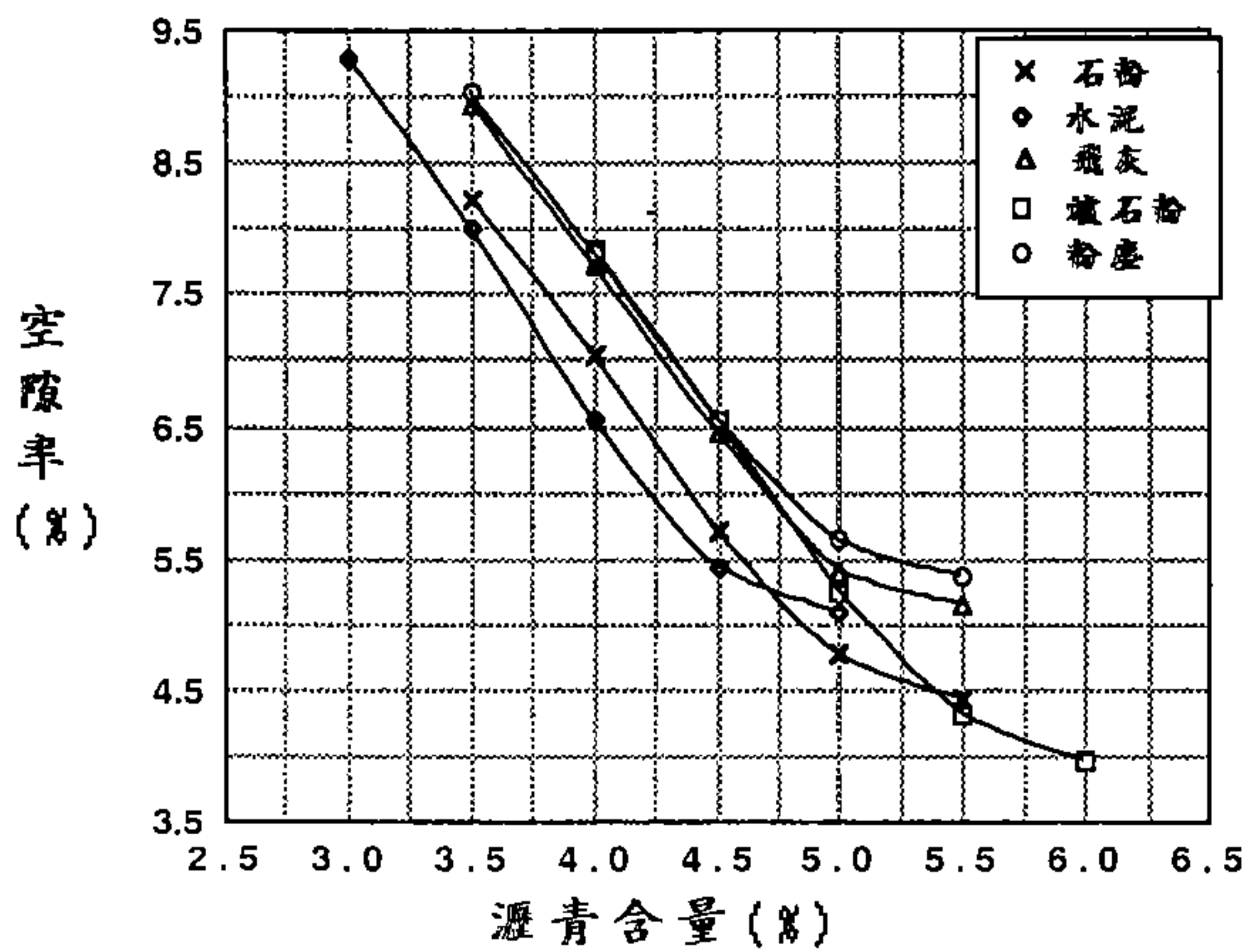
面使用之壽命有很大之影響，故V.M.A.值必須有最低限制，其限制之主要目的係保持瀝青混凝土在適當空隙率之下，不會有瀝青量缺少之現象，此種現象嚴重時會縮短路面之使用壽命。在本研究中乾拌瀝青混凝土之V.M.A.試驗結果圖示於圖4-9 (a)、(b)及(c)，另溼拌瀝青混凝土之V.M.A.試驗結果圖示於圖4-10 (a)、(b)及(c)。

1. 乾拌法部份

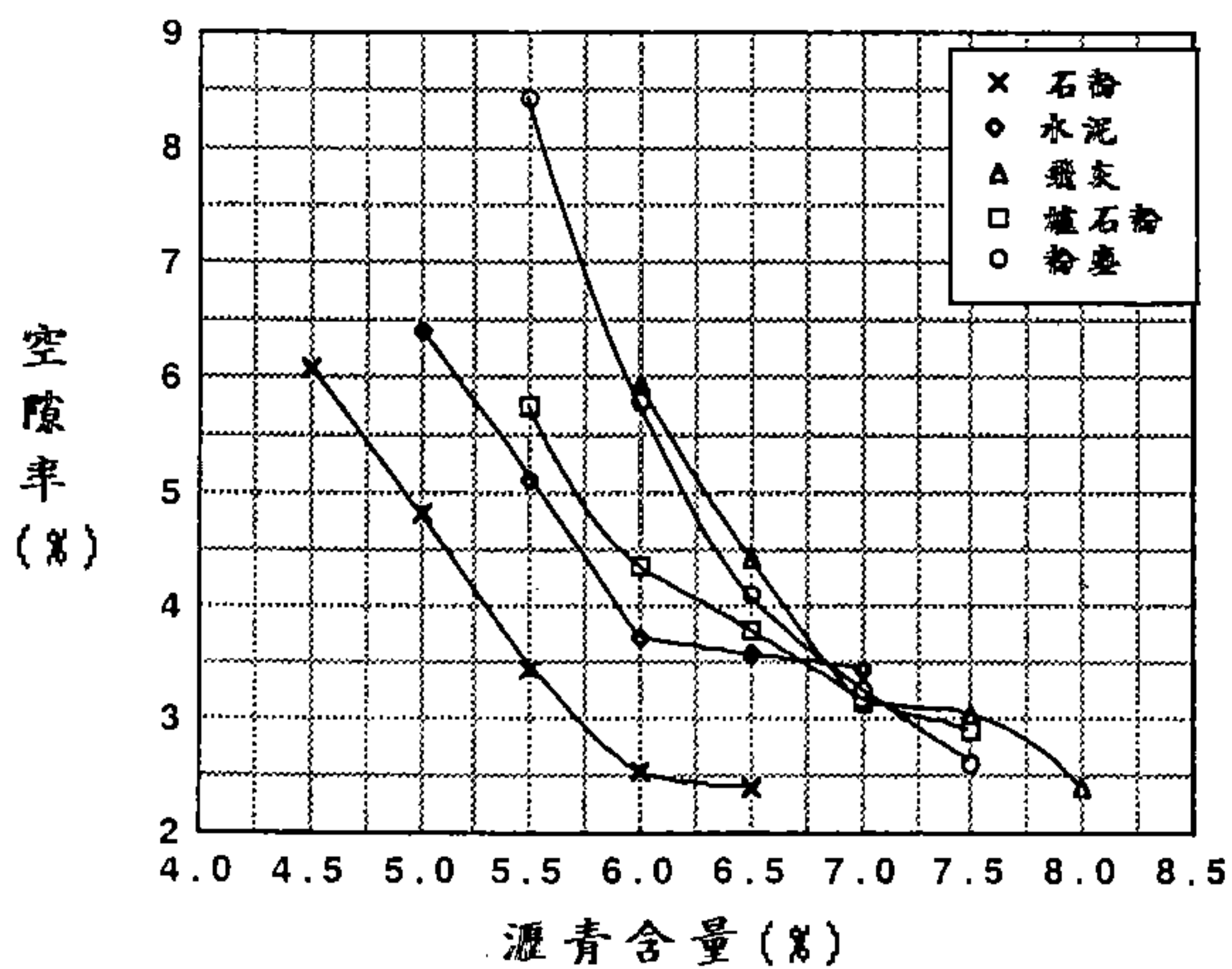
由圖 4-9得知，V.M.A.之變化皆為先降低而後升高之趨勢，且部份填充料之V.M.A.皆高於石粉及相關規範要求之值，顯見使用傳統填充料以外之粉塵、飛灰及爐石粉等填充料，不會使瀝青混凝土發生瀝青量缺少之現象，而降低路面之使用壽命。

2. 濕拌法部份

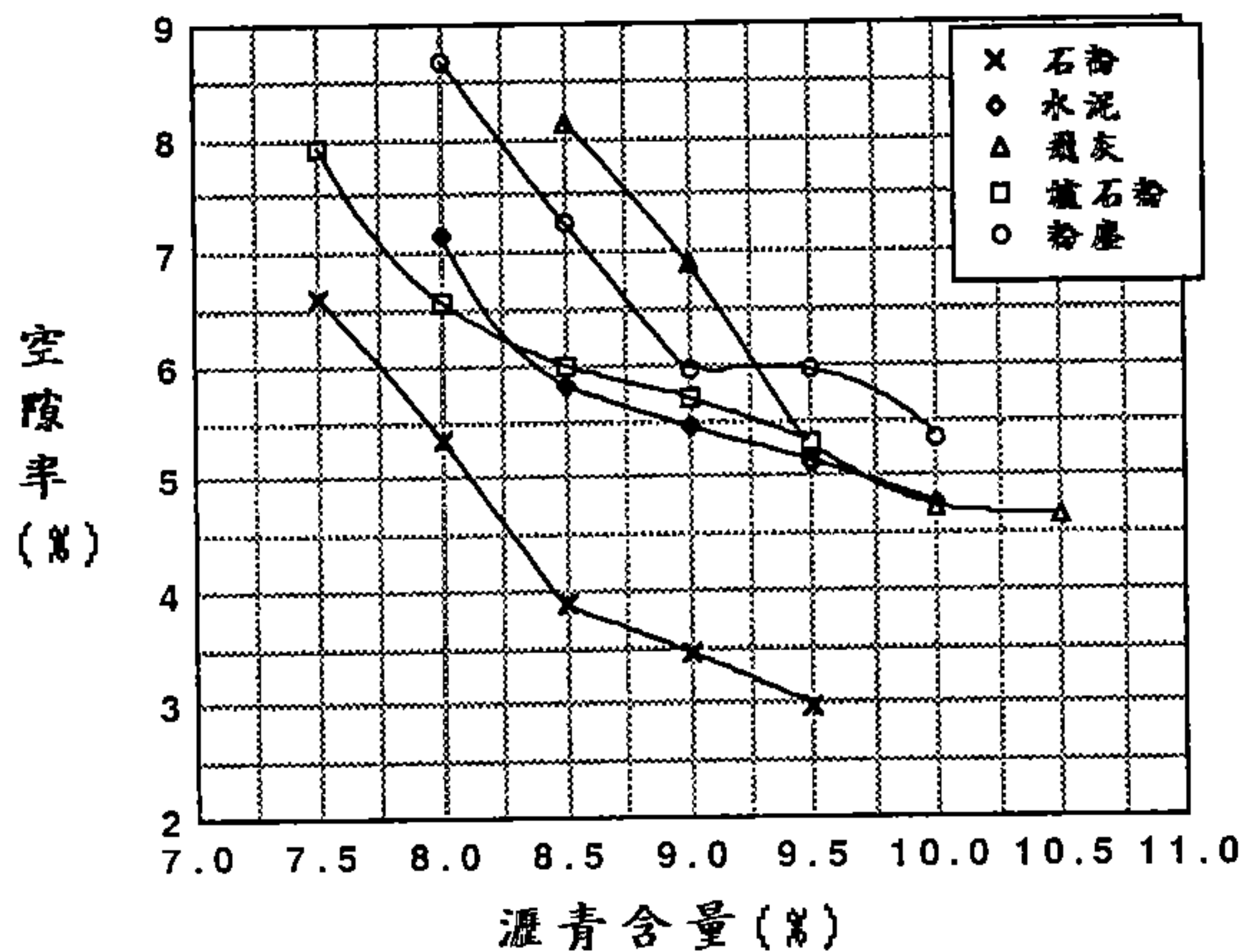
由圖4-10顯示，於各級配填充料溼拌瀝青混凝土中，飛灰之粒料間空隙皆較高，故其使用於各級配填充料溼拌瀝青混凝土鋪面時，最不會有瀝青缺少使得路面壽命減少之虞。另爐石粉，因其具有斥油性且含多量之CaO致表面活性大，故僅需較少量之瀝青即可拌合，故有V.M.A.較低之缺陷。而粉塵之V.M.A.居於其中，故於此部分資源回收細料利用之先後順序而言為：飛灰、粉塵、爐石粉。



(a) 粗級配(III d)

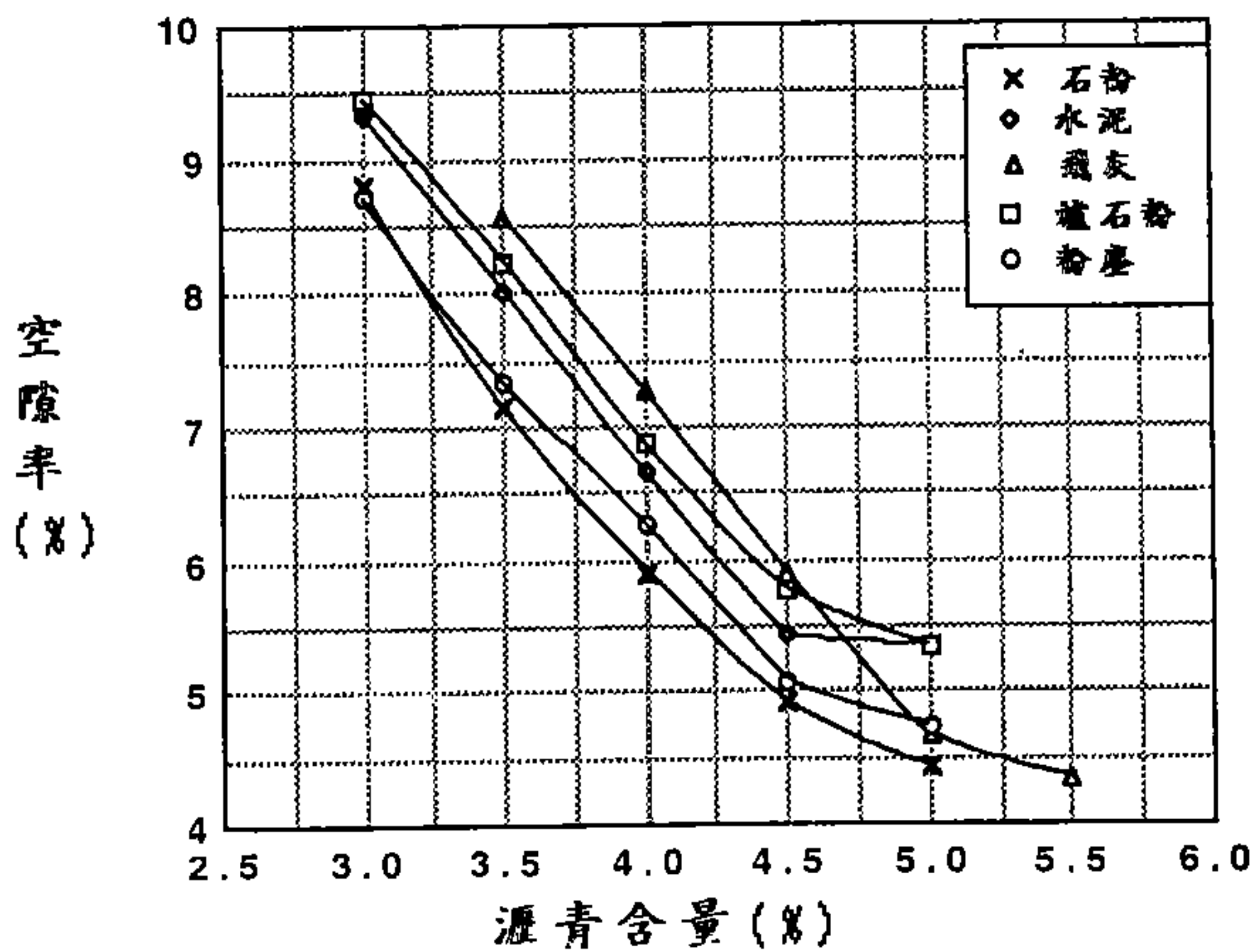


(b) 密級配(IV b)

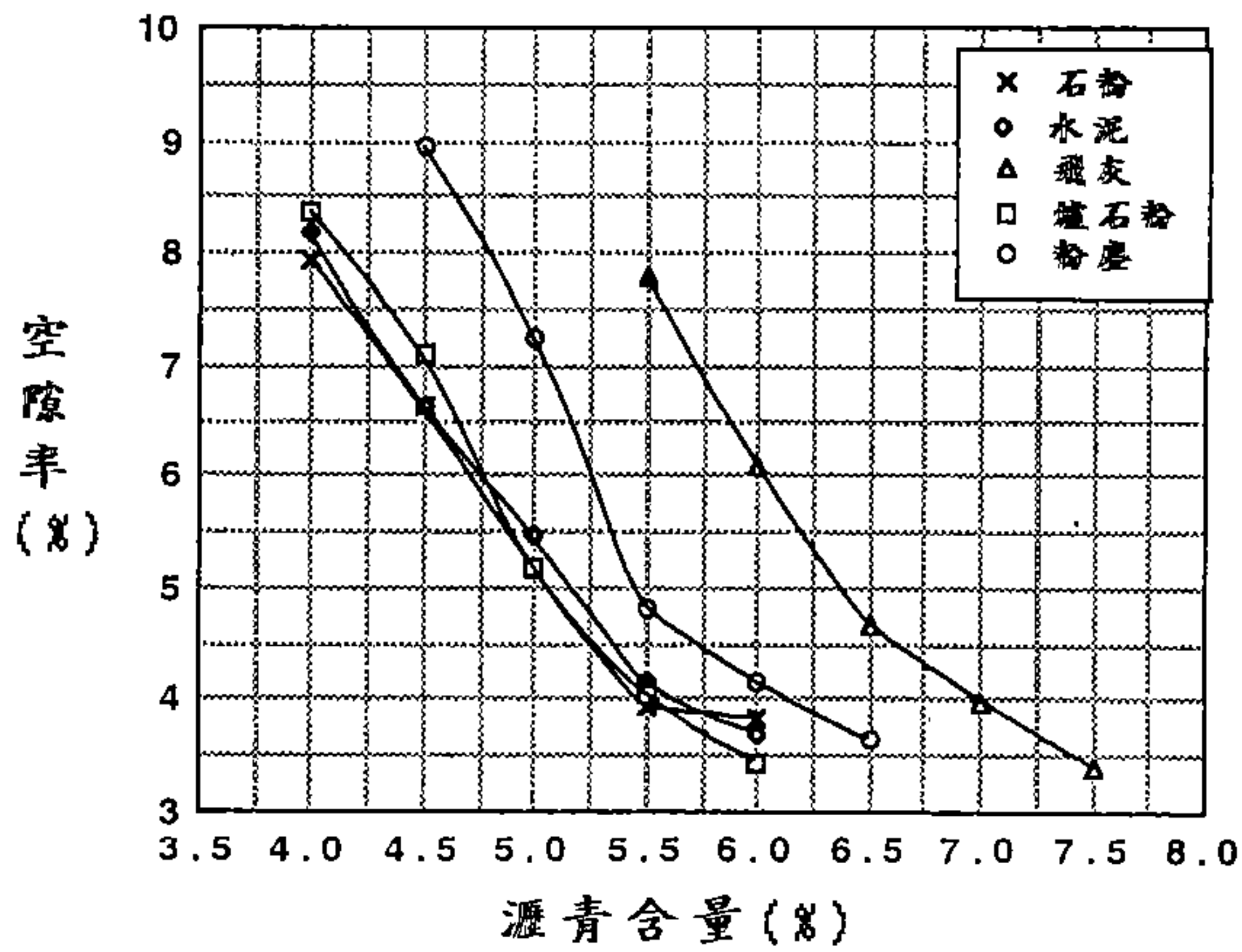


(c) 瀝青砂級配(VIIa)

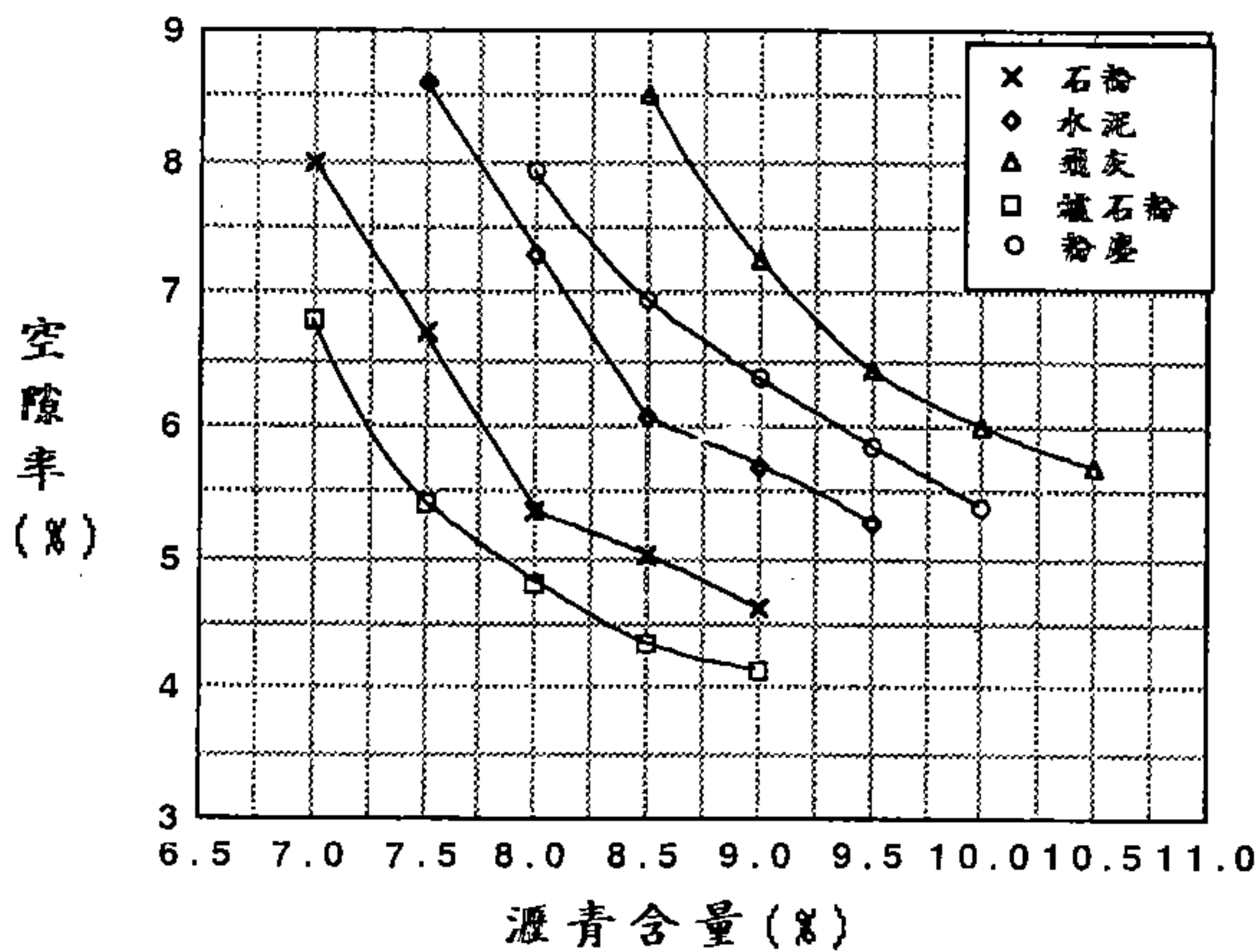
圖 4-7 填充料乾拌瀝青混凝土空隙率之比較



(a) 粗級配(IIIId)

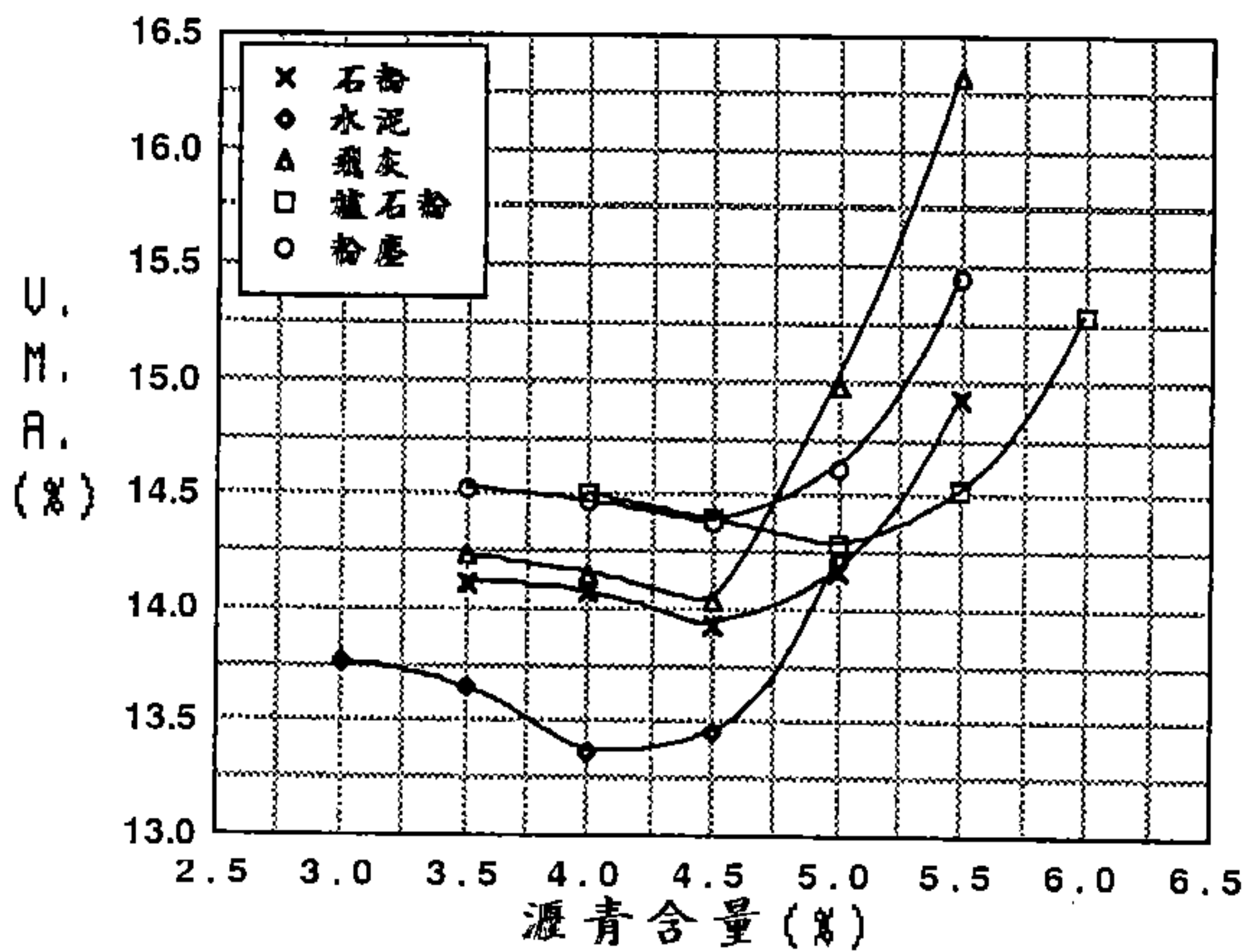


(b) 密級配(IVb)

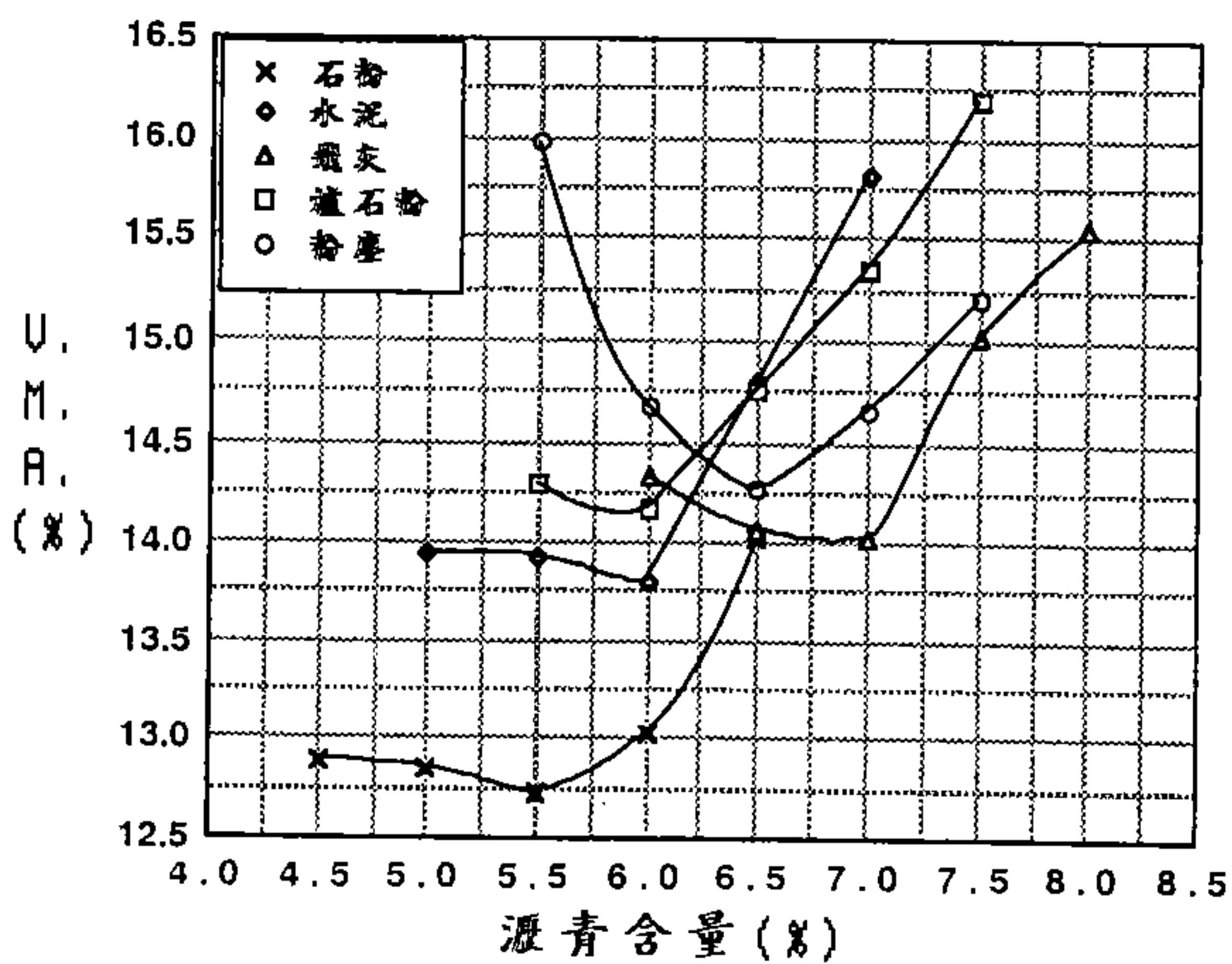


(c) 瀝青砂級配(VIIa)

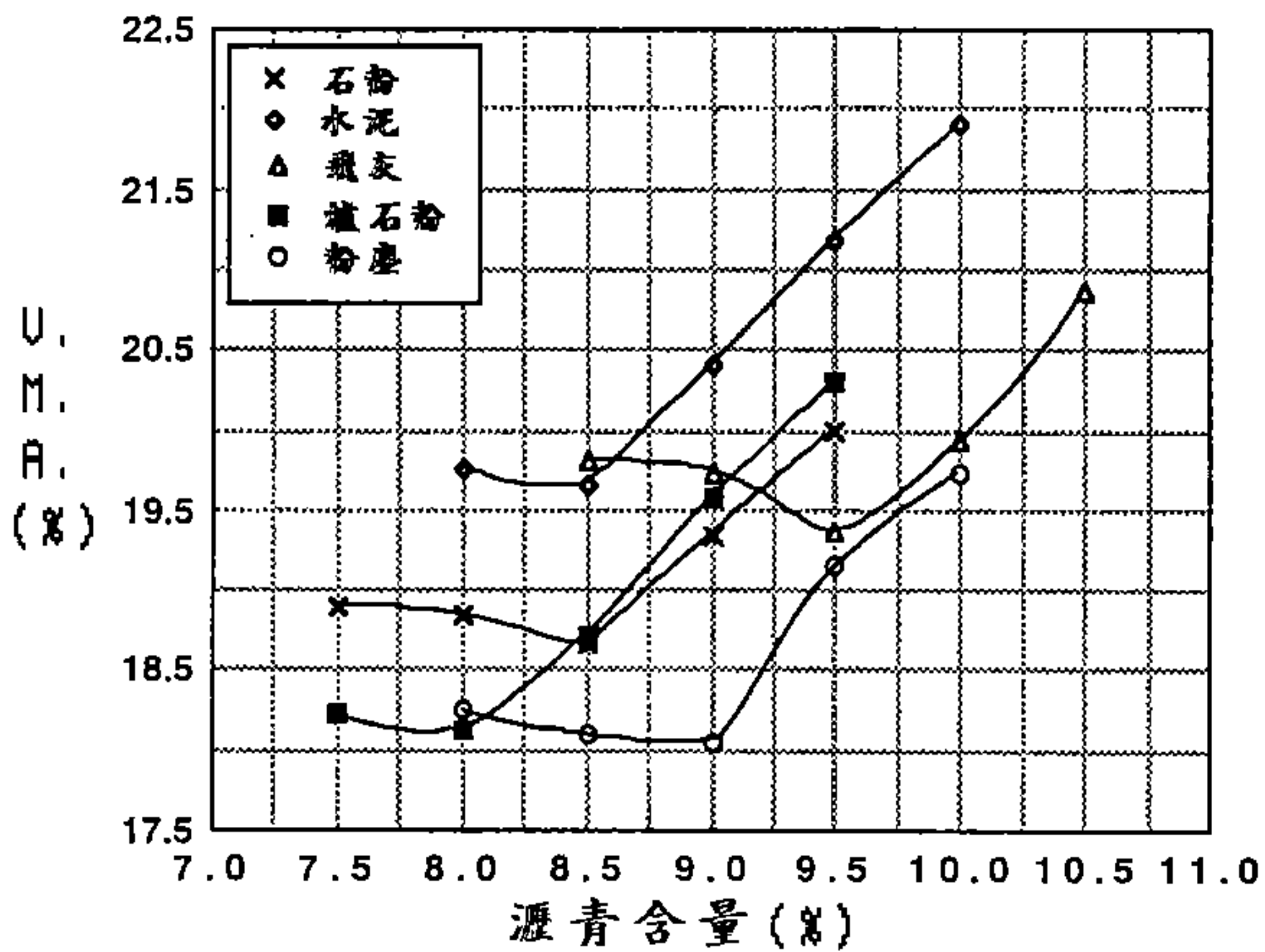
圖 4-8 填充料濕拌瀝青混凝土空隙率之比較



(a) 粗級配(III d)

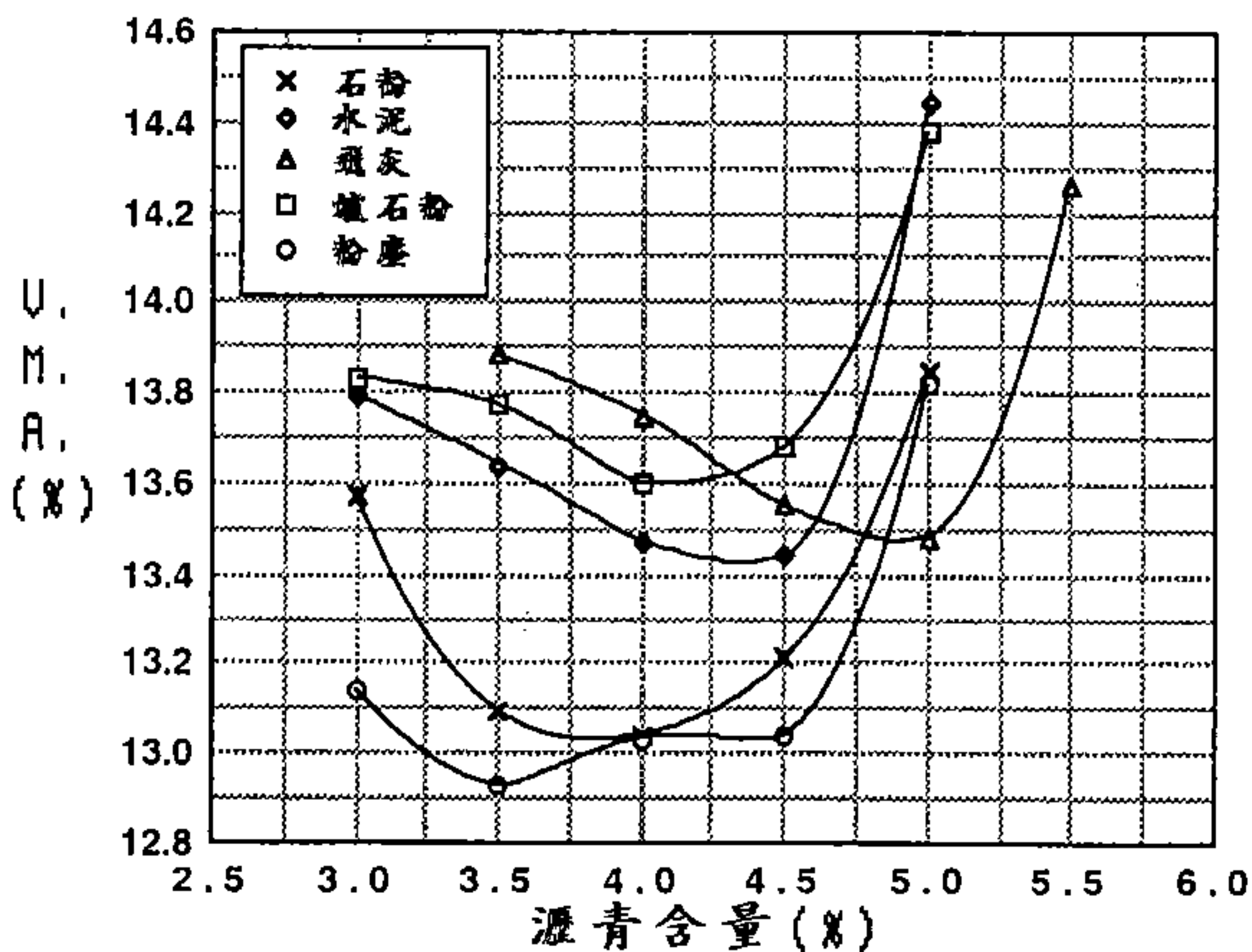


(b) 密級配(IV b)

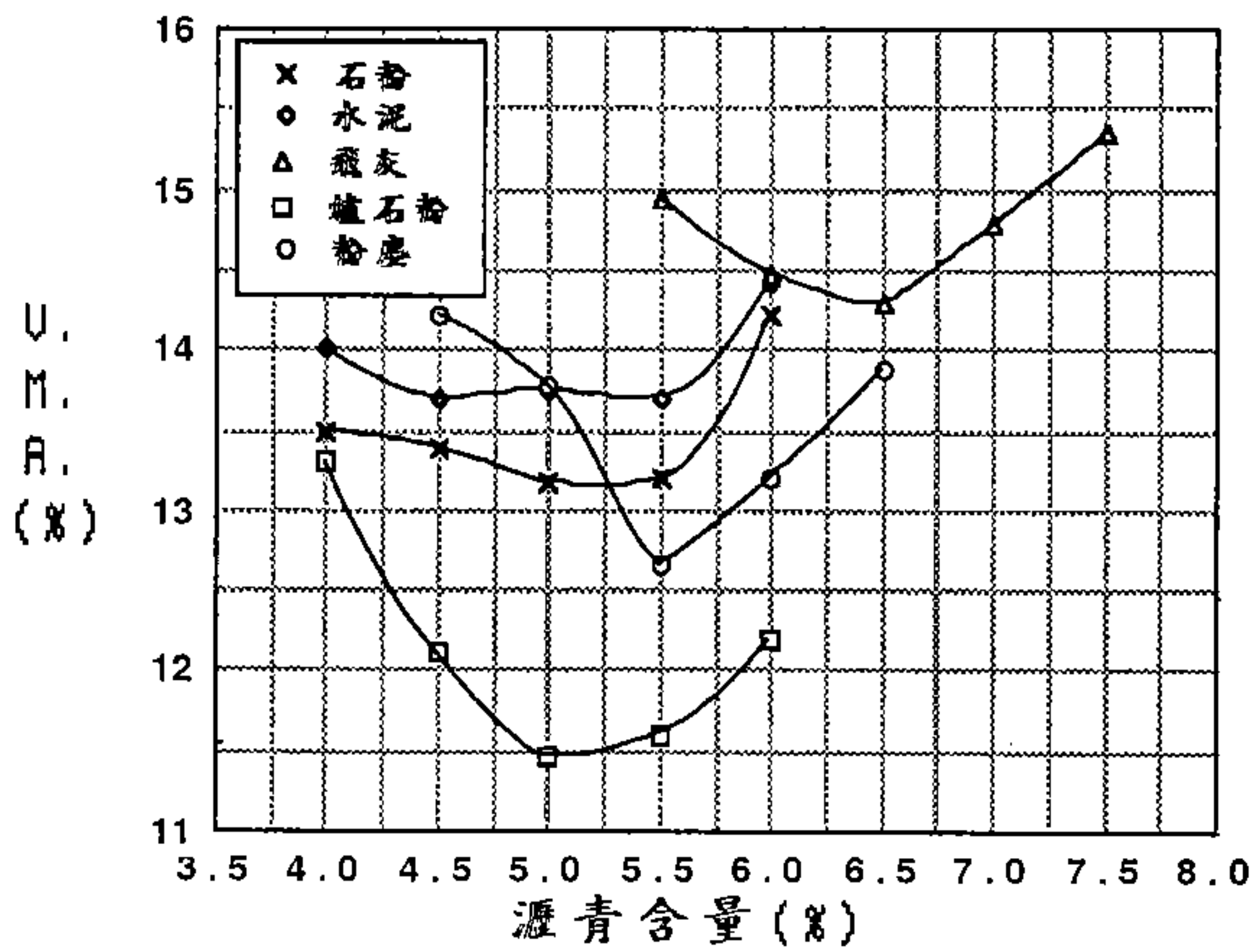


(c) 瀝青砂級配(VIIa)

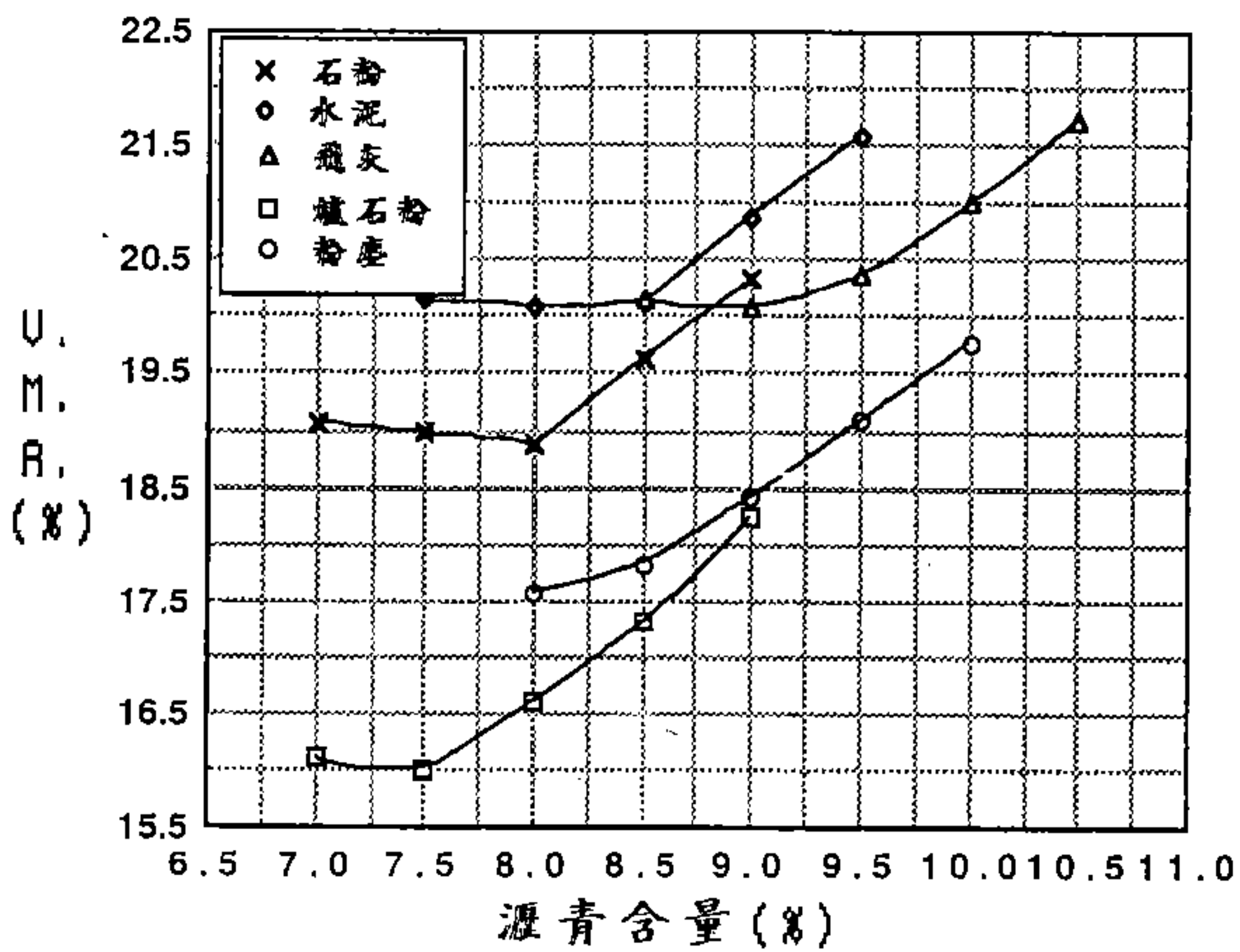
圖 4-9 填充料乾拌瀝青混凝土V.M.A.之比較



(a) 粗級配(IIIId)



(b) 密級配 (IVb)



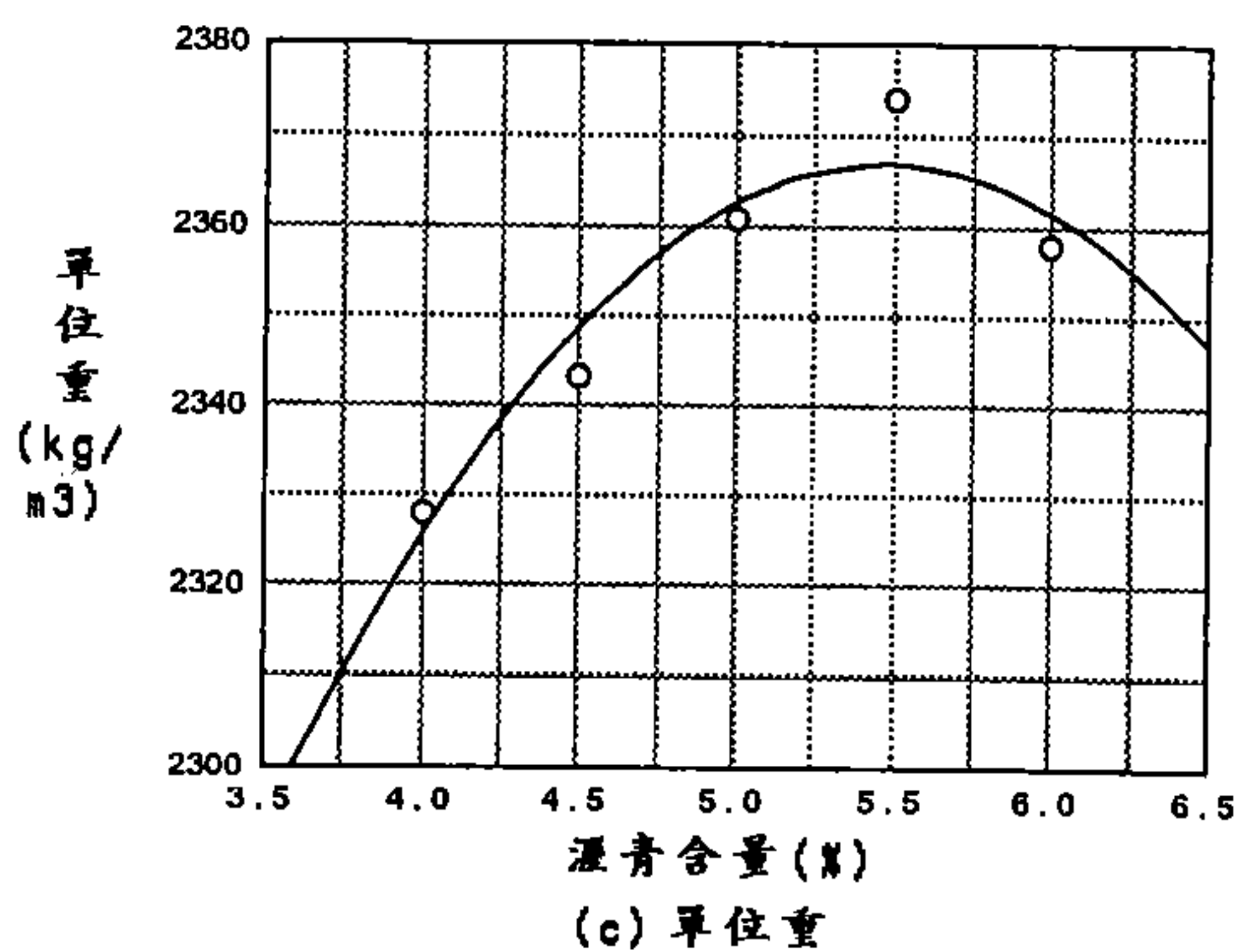
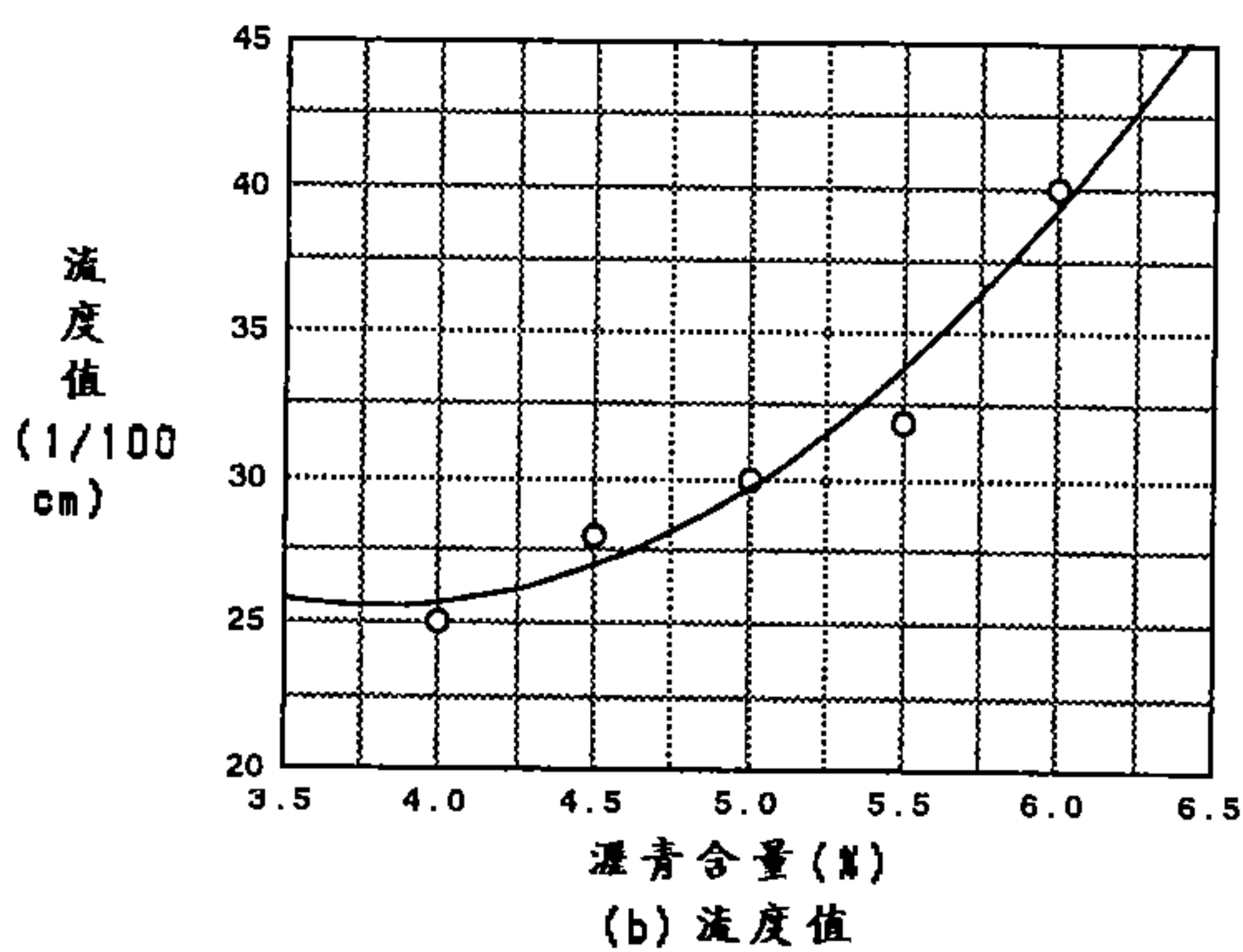
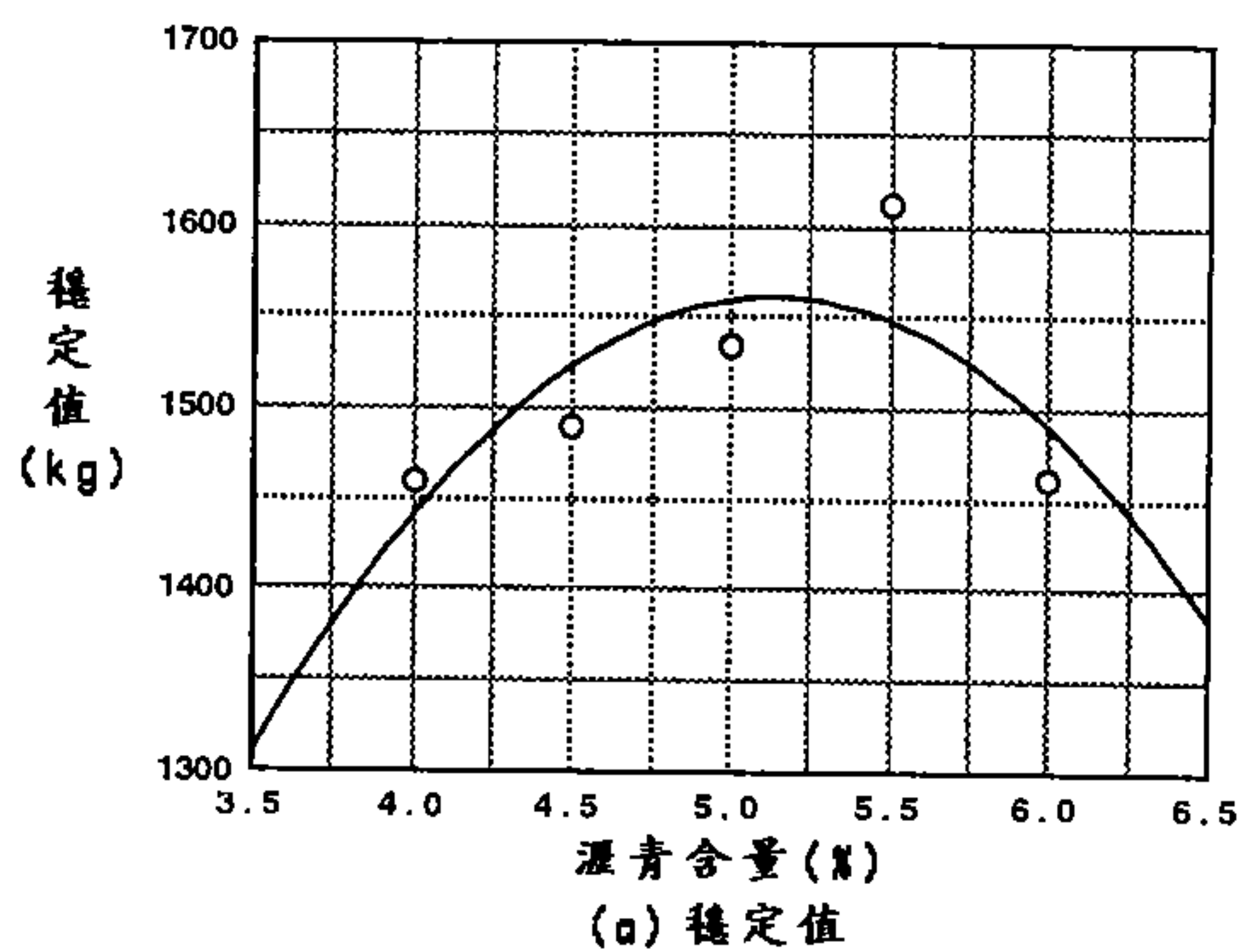
(c) 瀝青砂級配 (VIIa)

圖 4-10 填充料濕拌瀝青混凝土 V.M.A. 之比較

4-3 瀝青混凝土馬歇爾設計結果分析

4-3-1 最佳瀝青含量及馬歇爾設計值

本研究中資源回收料包括；飛灰、爐石粉及瀝青拌合廠回收粉塵，傳統填充料包括；石粉及水泥。為尋求資源回收料在瀝青混凝土路面工程上應用之途徑，本研究採用目前公路工程施工上使用之III_d粗級配、IV_b密級配及VII_a瀝青砂級配等三種瀝青混凝土作為研究探討之對象，而以資源回收料及傳統填充料作為瀝青混凝土之填充料進行馬歇爾試驗及馬歇爾法配合設計。馬歇爾配合設計係將圖4-1 至圖4-10所示之相關數據利用一元二次迴歸方程式，繪出各種馬歇爾試驗值對瀝青含量之相關曲線，如圖4-11 為密級配石粉填充料濕拌法瀝青混凝土之馬歇爾試驗值與瀝青含量之相關曲線取最大穩定值、最大單位重及規範要求空隙率平均值（IV_b級配通常為4%）對應瀝青含量之平均作為瀝青混凝土之最佳瀝青含量。所謂馬歇爾設計值乃是各圖形中最佳瀝青含量所對應之穩定值、流度值、單位重、空隙率及粒料間空隙，此等馬歇爾設計值可以分析及評估瀝青混凝土之工程性質。在本研究乾拌法各種填充料，其粗級配（III_d）瀝青混凝土馬歇爾設計值如表 4-4所示。密級配（IV_b）瀝青混凝土馬歇爾設計值如表 4-5所示。瀝青砂級配（VII_a）瀝青混凝土馬歇爾設計值如表 4-6所示；另濕拌法各種填充料，其粗級配（III_d）瀝青混凝土馬歇爾設計值如表 4-7所示。密級配（IV_b）瀝青混凝土馬歇爾設計值如表 4-8所示。瀝青砂級配（VII_a）瀝青混凝土馬歇爾設計值如表 4-9所示。



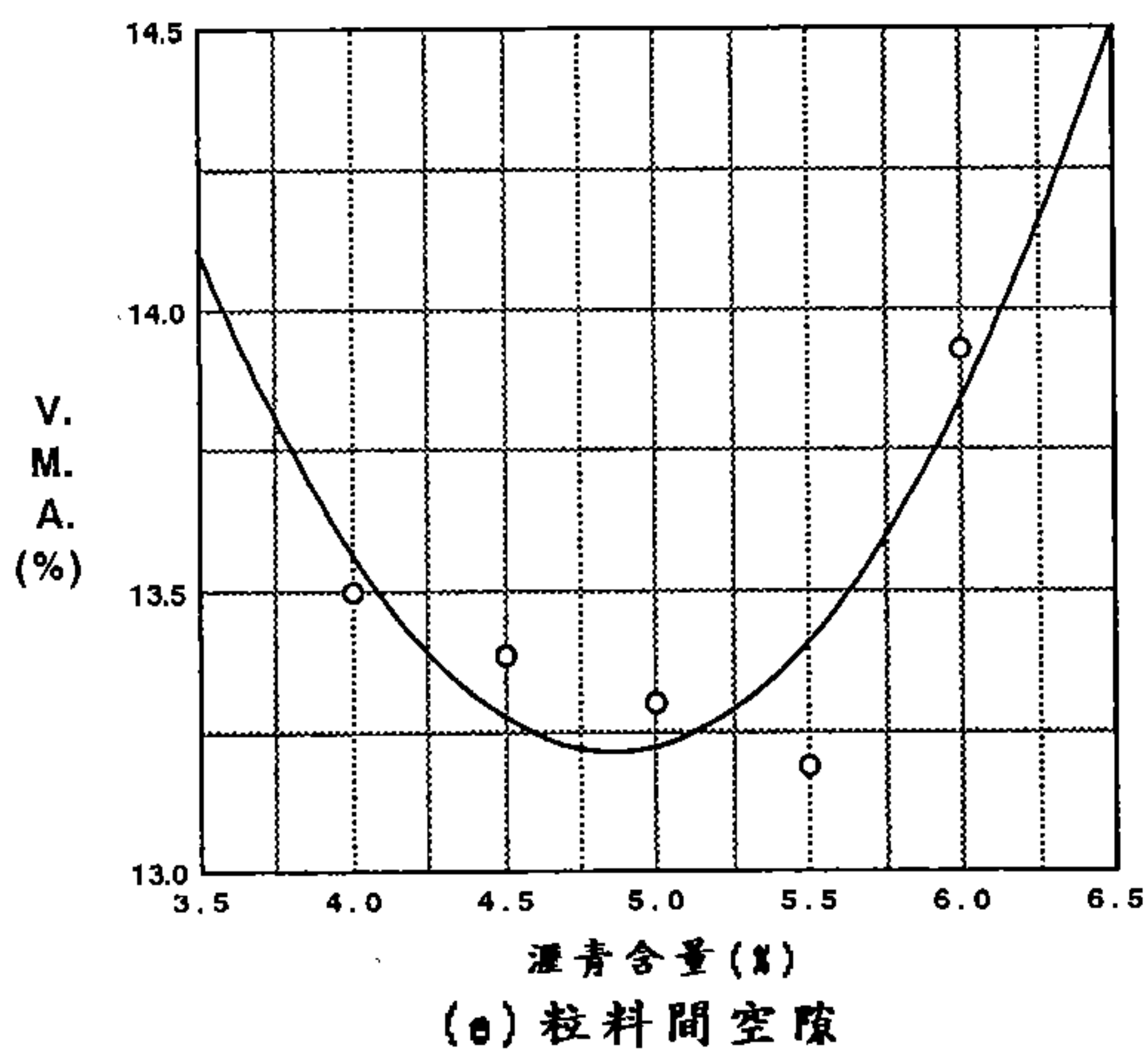
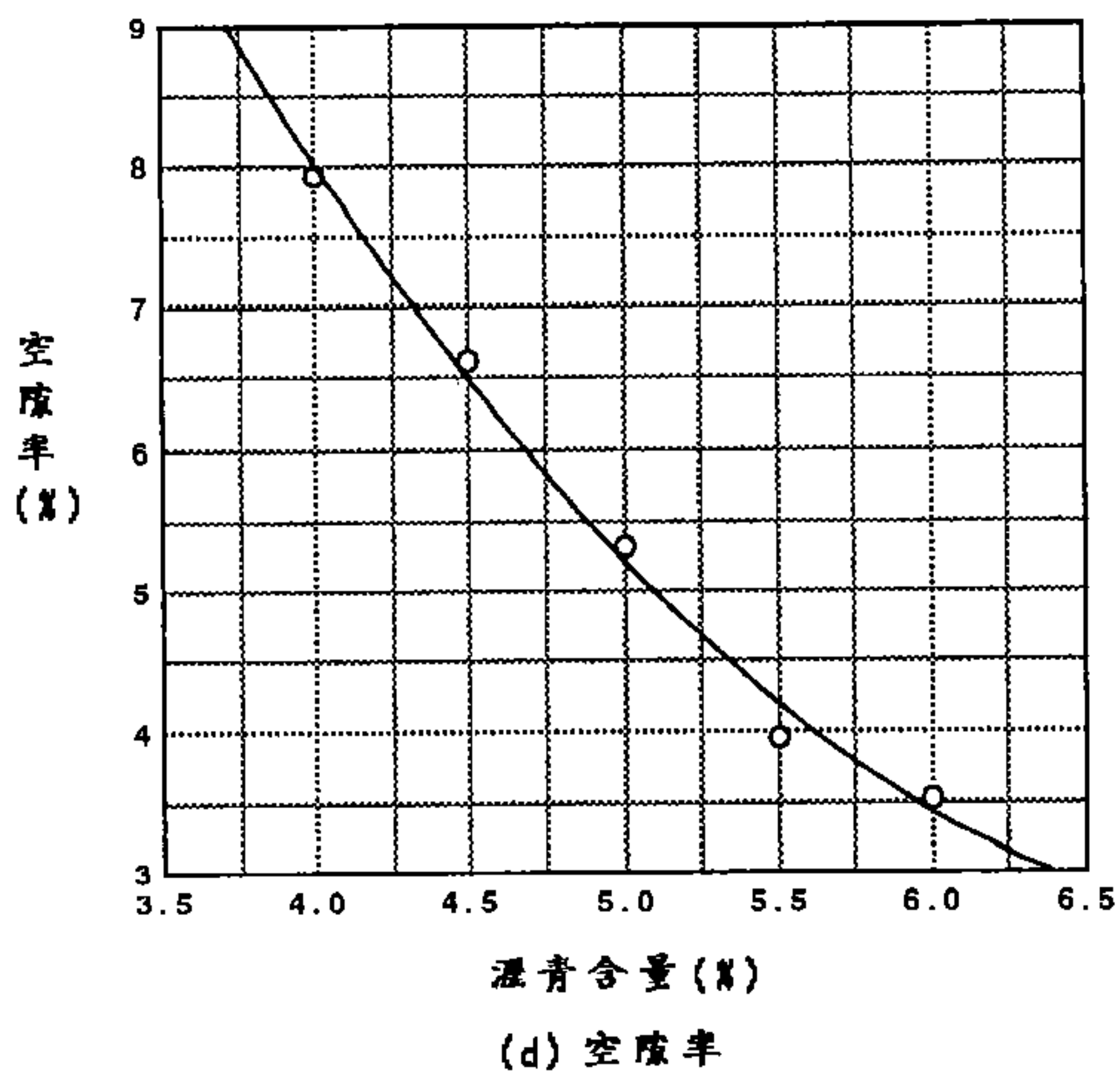


圖 4-11 密級配 (IV b) 瀝青混凝土石粉填充料濕拌法之馬歇爾試驗值迴歸曲線

表4-4 粗級配 (III_d) 瀝青混凝土各種填充料乾拌法之馬歇爾設計值

項 目	規範*	石粉	水泥	飛灰	爐石粉	粉塵
最佳瀝青含量 (%)	-	4.8	4.5	5.1	5.0	4.9
穩定值 (kg)	>680	1075	813	1045	898	995
流度值 (1/100 cm)	20-40	34	24	27	30	32
單位重 (kg/m ³)	-	2303	2313	2257	2311	2280
空隙率 (%)	3-8	5.2	5.6	5.5	5.3	5.9
V.M.A. (%)	>13	14.0	13.6	14.4	14.3	14.6

*美國瀝青學會SS-1重交通量規範 (1980年修訂) [42]

表4-5 密級配 (IV_b) 瀝青混凝土各種填充料乾拌法之馬歇爾設計值

項 目	規範*	石粉	水泥	飛灰	爐石粉	粉塵
最佳瀝青含量 (%)	-	5.4	5.8	6.8	6.2	6.5
穩定值 (kg)	>680	1724	1115	1184	1068	1393
流度值 (1/100 cm)	20-40	38	30	38	35	39
單位重 (kg/m ³)	-	2384	2402	2298	2376	2357
空隙率 (%)	3-5	3.7	4.3	3.7	4.1	4.1
V.M.A. (%)	>14	12.7	13.9	14.1	14.3	14.3

*美國瀝青學會SS-1重交通量規範 (1980年修訂) [42]

表4-6 瀝青砂級配 (VII_a) 瀝青混凝土各種填充料乾拌法之馬歇爾設計值

項 目	規範*	石粉	水泥	飛灰	爐石粉	粉塵
最佳瀝青含量 (%)	-	8.2	8.5	9.5	8.0	8.6
穩定值 (kg)	>680	1357	1388	1049	1174	1207
流度值 (1/100 cm)	20-40	36	33	34	40	36
單位重 (kg/m ³)	-	2285	2281	2152	2321	2291
空隙率 (%)	5-8	5.0	6.1	5.4	6.0	7.0
V.M.A. (%)	>16	18.7	19.9	19.5	18.3	18.1

*美國瀝青學會SS-1重交通量規範 (1980年修訂) [42]

表4-7 粗級配 (III d) 瀝青混凝土各種填充料濕拌法之
馬歇爾設計值

項 目	規範*	石粉	水泥	飛灰	爐石粉	粉塵
最佳瀝青含量 (%)	-	4.4	4.5	5.0	4.6	4.4
穩定值 (kg)	>680	889	925	924	773	853
流度值 (1/100 cm)	20-40	27	27	35	26	30
單位重 (kg/m ³)	-	2319	2311	2274	2311	2308
空隙率 (%)	3-8	5.1	5.7	5.0	5.8	5.4
V.M.A. (%)	>13	13.2	13.7	13.7	13.9	13.1

*美國瀝青學會SS-1重交通量規範 (1980年修訂) [42]

表4-8 密級配 (IV b) 瀝青混凝土各種填充料濕拌法之
馬歇爾設計值

項 目	規範*	石粉	水泥	飛灰	爐石粉	粉塵
最佳瀝青含量 (%)	-	5.3	5.4	6.5	5.5	5.8
穩定值 (kg)	>680	1552	1350	1325	1350	1420
流度值 (1/100 cm)	20-40	33	29	33	41	42
單位重 (kg/m ³)	-	2367	2394	2287	2422	2375
空隙率 (%)	3-5	4.4	4.5	4.8	4.1	4.5
V.M.A. (%)	>14	13.4	13.8	14.4	12.0	13.0

*美國瀝青學會SS-1重交通量規範 (1980年修訂) [42]

表4-9 瀝表砂級配 (VII a) 瀝青混凝土各種填充料濕拌
法之馬歇爾設計值

項 目	規範*	石粉	水泥	飛灰	爐石粉	粉塵
最佳瀝青含量 (%)	-	7.9	8.4	9.3	7.5	8.5
穩定值 (kg)	>680	1450	1410	952	1550	1313
流度值 (1/100 cm)	20-40	35	34	30	34	34
單位重 (kg/m ³)	-	2270	2316	2128	2370	2294
空隙率 (%)	5-8	5.7	6.4	6.8	5.6	7.0
V.M.A. (%)	>16	19.0	20.2	20.3	16.1	17.9

*美國瀝青學會SS-1重交通量規範 (1980年修訂) [42]

4-3-2 粗級配 (III_d) 瀝青混凝土

粗級配瀝青混凝土係由瀝青膠泥、填充料、細粒料及粗粒料組成，一般組成依重量計粗粒料約45~80%、細粒料約15~40%、填充料3~8%、瀝青含量約4~9%，其主要特性為承載性佳，可適用於輕中級路面面層，亦可應用於重交通量路面之底層、連結層及面層[33]，本研究探討之III_d粗級配係以重交通量路面之連結層及底層作為考慮，而進行比較及評估。本研究探討之III_d粗級配瀝青混凝土以適合於重交通量路面之連結層及底層使用為目的。

1. 乾拌法部分

由表4-4 可知石粉、水泥、飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵等填充料，使用填充料乾拌法所夯製出之瀝青混凝土試體，其穩定值、流度值、空隙率及V.M.A.（粒料間空隙率）均能符合美國瀝青學會SS-1重交通量規範（1980年修定）[42]及我國公路工程施工規範[1]要求。由表 4-4 亦可看出利用水泥填充料乾拌產生之瀝青混凝土，其最佳瀝青含量最低，但穩定值亦是所有填充料中最低者，故水泥雖然是水泥混凝土中最重要之材料，但應用於瀝青混凝土並不理想。而傳統上使用之石粉在最佳瀝青含量時穩定值較高，且馬歇爾設計值均符合規範要求，故石粉乃是五種填充料中較理想之瀝青混凝土填充料，粉塵之最佳瀝青含量，以及在最佳瀝青含量時之穩定值及流度值皆與石粉相當接近，顯示拌合廠回收粉塵在填充料乾拌底層瀝青混

凝土是相當適宜之填充料材料。再由表中資料顯示飛灰及爐石粉雖適合作為瀝青混凝土之填充料，惟其所需之瀝青含量均較高，其效果不若粉塵顯著。

2. 濕拌法部分

由表4-7 可知石粉、水泥、飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵等填充料，使用填充料濕拌法所夯製出之瀝青混凝土試體，其穩定值、流度值、空隙率及V.M.A.（粒料間空隙率）均能符合美國瀝青學會SS-1重交通量規範（1980年修定）[42]及我國公路工程施工規範[1]要求。由表4-7可知石粉在五種填充料中最佳瀝青含量最低，單位重最大而穩定值則居中，故傳統石粉仍是較理想之填充料；另水泥之最佳瀝青含量，以及在最佳瀝青含量時之流度值及單位重皆與石粉相當接近，且穩定值大於石粉，顯示水泥用在濕拌底層瀝青混凝土是相當適宜之填充料材料。至於拌合廠回收粉塵之最佳瀝青含量與石粉相同，而穩定值與單位重亦與石粉相當接近，顯示拌合廠回收粉塵為資源回收細料中較優良之濕拌底層瀝青混凝土填充料；另飛灰及爐石粉雖亦適合作為濕拌底層瀝青混凝土填充料，惟其效果不若粉塵顯著。

4-3-3 密級配（IVb）瀝青混凝土

密級配瀝青混凝土係由含有連續適當配比之各種粒徑之級配料與瀝青膠泥按一定比例均勻拌合鋪築而成者。其粒料組成依重量計粗粒料約20~35%、細粒料約30~65%、填充

料約7~12%，而瀝青含量約6~10%，此種瀝青混凝土適用於路面底層及面層[33]，而IVd密級配瀝青混凝土主要應用於面層，適合於重交通量下之路面使用。

1. 乾拌法部分

由表4-5 顯示；石粉、水泥、飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵等填充料，使用填充料乾拌法所夯製之瀝青混凝土試體，其穩定值、流度值、空隙率及V.M.A.亦均能符合美國瀝青學會重交通量規定[42]及我國公路工程施工規範[1]之要求。由表 4-5可知，利用瀝青拌合廠回收粉塵以乾拌法獲得之面層瀝青混凝土，其穩定值、流度值、單位重及空隙率皆與傳統填充料，即石粉之馬歇爾設計值最為接近，顯示粉塵亦適合作為道路瀝青混凝土面層之填充料。針對IVb密級配瀝青混凝土而言，石粉之最佳瀝青含量最低而穩定值最高，因此石粉乃是五種填充料中最理想之瀝青混凝土填充料，而粉塵作為瀝青混凝土填充料效果亦甚佳。至於飛灰、爐石粉及水泥作為填充料雖然效果稍差，但仍可符合規範要求，飛灰及爐石粉在瀝青混凝土之應用具有資源回收利用之意義。

2. 溼拌法部分

由表4-8 顯示；石粉、水泥、飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵等填充料，使用填充料溼拌法所夯製之瀝青混凝土試體，僅飛灰其穩定值、流度值、空隙率及V.M.A.均能符合美國瀝青學會重交通量規定[42]及我國公路工程施工規範[1]之要求。而石粉及水泥則有V.M.A.低於規範下限值，餘皆合乎前述規範；另爐石粉及粉塵則有流度值與

V.M.A. 未合於規範要求，餘皆合乎前述規範。由表4-8 可知石粉之最佳瀝青含量最低且穩定值最高，雖V.M.A.稍低，惟整體而言其仍為濕拌法面層瀝青混凝土之優良填充料。另由表4-8 顯示，飛灰之各項馬歇爾設計值均合乎規範要求，顯示飛灰為此濕拌法面層瀝青混凝土較適宜之填充料，惟其所需之瀝青含量較高為其缺點。

4-3-4 瀝青砂級配 (VIIa) 瀝青混凝土

瀝青砂與一般瀝青混凝土之區別在於含有巨量細粒料，其通過No.8篩粒料在80% 以上，因為粗粒料含量太少以致無法形成相互連鎖作用，故瀝青砂穩定值一般較低，瀝青砂係在砂料及瀝青中加入填充料均勻拌合而成，適用於鋪築機場表面或輕級及中級交通量之路面面層，若使用現場粗粒料不合用或不經濟時亦可作底層之用[33]。瀝青砂路面因其滾壓後具有平滑之表面，瀝青砂路面車輛行駛其上無噪音、路面具有防水抗凍及易清掃之特點，特別適用於街道。又由於滾壓後平坦美觀且排水良好亦適合鋪築運動場、公園、人行道及停車場等[47]。

本研究 VIIa瀝青砂級配瀝青混凝土係以適用於鋪築機場及輕級、中級或重級交通量之路面面層為考慮依據而進行評估。

1. 乾拌法部分

由表4-6 可知石粉、水泥、飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵等填充料，使用填充料乾拌法所拌製出之瀝青混凝土

土，其穩定值、流度值、空隙率及V.M.A.（粒料間空隙率）均能符合美國瀝青學會SS-1重交通量規範（1980年修定）[42]及我國公路工程施工規範[1]之要求。由表 4-6 亦可看出爐石粉及石粉利用填充料乾拌法產生之瀝青混凝土，其最佳瀝青含量較低，而利用飛灰時最佳瀝青含量偏高。粉塵則與石粉及水泥相當。在三種回收資源中以粉塵之穩定值較高，且流度值及單位重均類似石粉及水泥，而空隙率較石粉及水泥者高，亦可以防止冒油現象，因此粉塵之回收應是值得考慮之策略。

2. 濕拌法部分

由表4-9 可知石粉、水泥、飛灰、爐石粉及拌合廠回收粉塵等填充料，使用填充料濕拌法所夯製出之瀝青混凝土，其穩定值、流度值、空隙率及V.M.A.（粒料間空隙率）均能符合美國瀝青學會SS-1重交通量規範（1980年修定）[42]及我國公路工程施工規範[1]之要求。由表 4-9 可知爐石粉溼拌之瀝青混凝土，其最佳瀝青含量為五種填充料中最低，穩定值及單位重則為最高，顯示爐石粉為五種填充料中較適宜之溼拌瀝青砂面層瀝青混凝土填充料材料。由表4-9 亦可知飛灰之流度值最低且適中，又其空隙率亦較石粉及水泥高，顯示由飛灰取代傳統之填充料，可獲得路面之舒適性及防止冒油現象。另由表4-9 顯示粉塵於濕拌VIIa瀝青砂級配瀝青混凝土之效果亦佳，惟不若爐石粉及飛灰顯著。

4-4 瀝青混凝土基本力學試驗結果分析

本階段係根據馬歇爾配合設計之五種填充料乾拌法及濕拌法所求得之各別最佳瀝青含量，選用密級配(IVb)瀝青混凝土進行抗壓、抗拉、抗剪及抗彎試體之製作(其各種試製作參見3-4節)及試驗，以進一步探討其基本力學性質，並分析其試驗結果，其試驗結果如表4-10及4-11所示，以評估資源回收細料作為瀝青混凝土填充料之可行性。

表4-10密級配乾拌瀝青混凝土在常溫時基本力學試驗值

填充料 種 類	瀝青含量 (%)	抗壓試驗 (kg/cm ²)	抗拉(劈裂)試驗 (kg/cm ²)	抗剪試驗 (kg/cm ²)	抗彎試驗 (kg/cm ²)
石 粉	5.4	26.46	2.82	42.41	12.27
水 泥	5.8	25.29	2.75	39.62	12.76
飛 灰	6.8	22.63	2.59	30.96	10.46
爐石粉	6.2	19.61	2.40	34.47	11.77
粉 塵	6.5	22.51	2.44	35.72	11.36

表4-11密級配濕拌瀝青混凝土在常溫時基本力學試驗值

填充料 種 類	瀝青含量 (%)	抗壓試驗 (kg/cm ²)	抗拉(劈裂)試驗 (kg/cm ²)	抗剪試驗 (kg/cm ²)	抗彎試驗 (kg/cm ²)
石 粉	5.3	27.94	3.29	52.67	14.46
水 泥	5.4	26.15	3.63	49.83	14.14
飛 灰	6.5	21.03	3.22	40.54	12.73
爐石粉	5.5	25.69	3.24	43.92	13.45
粉 塵	5.8	25.88	3.28	45.85	13.04

4-4-1 抗壓強度

1. 乾拌法部份

由表4-10資料可知，石粉填充料乾拌瀝青混凝土之抗壓強度最高，而資源回收細料爐石粉乾拌瀝青混凝土之抗壓強度最低，水泥、飛灰及粉塵依次居於其間。又水泥填充料乾拌瀝青混凝土其抗壓強度約為石粉之95.6%，顯見傳統填充料乾拌瀝青混凝土之抗壓能力較佳。另資源回收細料中則以飛灰與粉塵之抗壓強度較佳且兩者甚為接近，約為石粉抗壓強度之85.6%，其效果尚佳。其次爐石粉抗壓強度最低，蓋因爐石粉具斥油性，會增加粒料潤滑效果，而使粒料之粘結力減低，以致強度較低且差，約為石粉抗壓強度之74.1%。

2. 濕拌法部份：

由表4-11資料可知，填充料濕拌法瀝青混凝土之抗壓強度，亦為石粉填充料濕拌瀝青混凝土強度最高而資源回收細料飛灰濕拌瀝青混凝土之抗壓強度最低。而居其間之水泥、粉塵及爐石粉等濕拌瀝青混凝土其抗壓強度相差無幾，約在2%以內，且強度為石粉之92~94%間，顯見資源回收細料之粉塵及爐石粉於濕拌法抗壓強度有顯著之效果。其次飛灰填充料濕拌瀝青混凝土。濕拌過程中，飛灰先與瀝青混拌，因飛灰比重輕，細度高，故其瀝青用量較其他填充料大，以致混合後形成瀝青粘結料不足之現象，而降低瀝青與骨材之粘結力，使得其抗壓強度最差。

4-4-2 抗拉強度

1. 乾拌法部份

由表4-10資料可知，五種填充料乾拌法瀝青混凝土抗拉試體其抗拉強度依序為石粉最高，其次依序為水泥、飛灰、粉塵，而爐石粉最低。惟其抗拉強度最高與最低間相差僅約14.9%，是以顯示資源回收細料填充料與傳統填充料石粉於乾拌法抗拉強度之效果較為接近，其於乾拌法瀝青混凝土之抗拉效果尚稱適宜。

2. 濕拌法部份

由表4-11資料可知，五種填充料濕拌法瀝青混凝土抗拉試體之抗拉強度與乾拌法抗拉強度趨勢不甚相同，其抗拉強度依序為水泥最高，其次為石粉、粉塵、爐石粉，而飛灰居末，惟抗拉強度間相差無幾。至於濕拌法抗拉強度水泥高過石粉，蓋因水泥比重較石粉大，其細度亦較石粉高，故在相同百分比之填充料添加量下，水泥填充料與瀝青混合後，其粘結效果高過石粉，是以其抗拉強度高於石粉填充料濕拌法。

4-4-3 抗剪強度

1. 乾拌法部份

由表4-10資料顯示，五種填充料乾拌法瀝青混凝土之抗剪強度仍以傳統填充料石粉及水泥高居一二位，而資源回收細料則以粉塵較高，爐石粉居次，飛灰最低，整體而言分居三、四、五位。而其中飛灰之抗剪強度約為石粉

抗剪強度之73%，相去甚遠，蓋因飛灰之比重為五種填充料中最小，比表面積最大，故其試體之密度最小，雖然瀝青混合料結構外表密實，但其破壞行為接近脆性，是以受力破壞後之試體，常用手即可輕易予以掰開。

2. 濕拌法部份

由表4-11資料顯示，五種填充料濕拌法瀝青混凝土其平均抗剪強度高於五種填充料乾拌法瀝青混凝土，濕拌法約為乾拌法之1.27倍。其強度之排序依序為石粉、水泥、粉塵、爐石粉及飛灰，以強度最低之飛灰來說，已接近石粉乾拌法瀝青混凝土之抗剪強度，因此資源回收細料應以濕拌法製造較能抵抗剪力。

4-4-4 抗彎強度

瀝青混凝土作為鋪面材料時除應具備支持車輛荷重之能力外，並且對車輛行駛時因揉搓及衝擊所產生之上壓應力及下張應力，或上張應力及下壓應力具有足夠之抵抗能力，此種能力亦即是抗彎強度。

1. 乾拌法部份

由表4-10可知，傳統填充料乾拌法瀝青混凝土其抗彎強度仍優於資源回收細料。觀察各試體破壞之情形發現大部份之破壞其裂紋呈 45° 之斜拉應力破壞，如圖4-12(a)所示。而呈 90° 裂紋之開裂彎矩破壞，其強度會較低，如圖4-12(b)所示。

2. 濕拌法部份

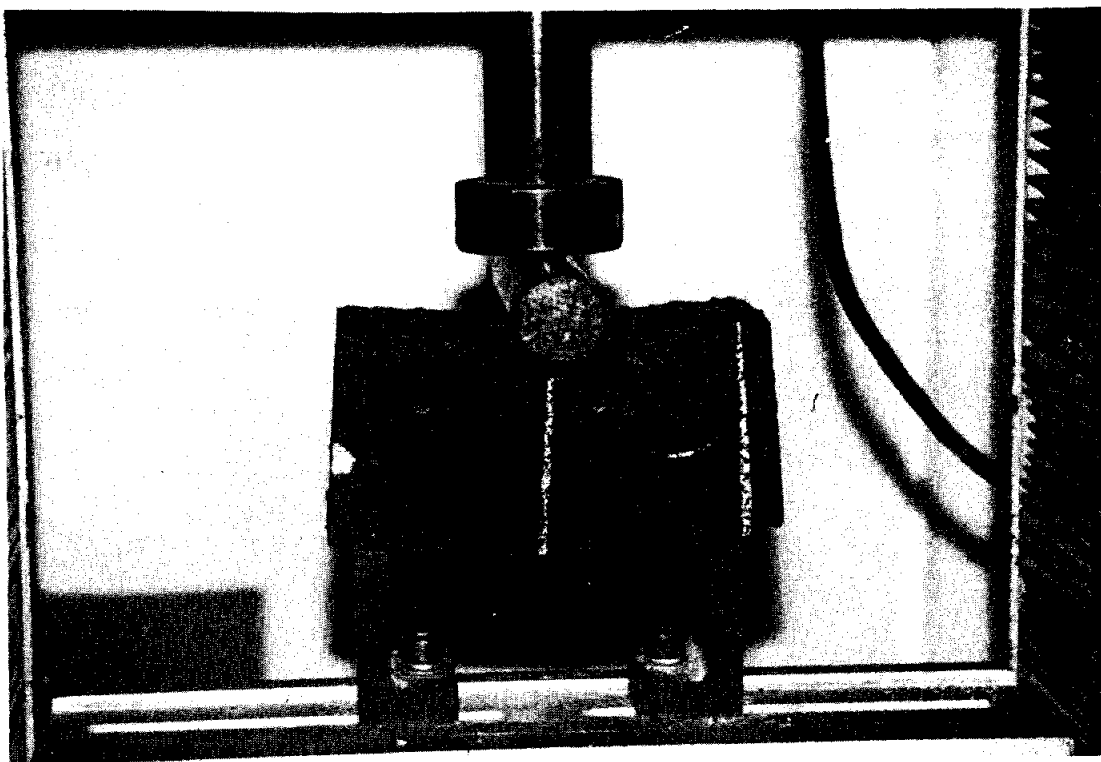


圖 4-12(a)抗彎試體呈45° 裂紋破壞情形

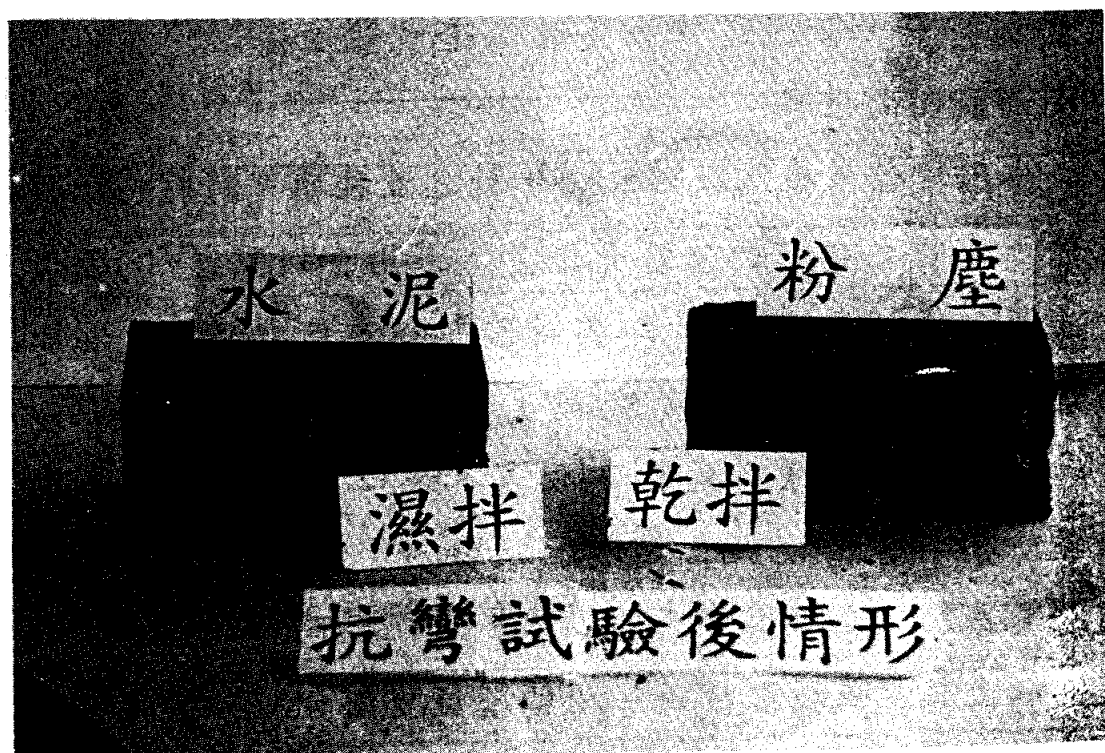


圖 4-12(b)抗彎試體呈90° 裂紋破壞情形

由表4-11可知，此五種填充料濕拌法瀝青混凝土之抗彎強度均甚為平均且接近，又均高於五種填充料乾拌法瀝青混凝土之抗彎強度。根據破壞試體觀察，其破壞之裂紋亦皆呈 45° 之斜拉應力破壞，且含有少數小顆粒骨材破裂，是以填充料濕拌法其骨材與瀝青粘結較乾拌法佳，是以抗彎強度優於乾拌法。

4-5 瀝青混凝土車轍試驗結果分析

瀝青混凝土鋪面抵抗車轍變形，最重要者乃是增加瀝青材料抵抗溫度變化之能力及提高鋪面支承輪重之強度。當溫度增加時會使鋪面產生軟化及老化，使瀝青混凝土之抗剪強度減少，變形量增大、粘結性亦降低，如在重交通量過度負荷下，會造成剪力失敗而造成塑性變形，並沿著剪力面形成側向位移。

本階段係根據馬歇爾配合設計之五種填充料乾拌法及濕拌法所求得之各別最佳瀝青含量，選用密級配(IVb)瀝青混凝土進行車轍試體之製作(其試體製作參見3-5節)，並以 25°C 及 60°C 兩種試驗溫度及載重 $7.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $13.2\text{kg}/\text{cm}^2$ 及 $19.4\text{kg}/\text{cm}^2$ 等三種不同輪壓載重下進行車轍試驗，各填充料乾、濕拌瀝青混凝土試體於試驗前，需先置於各試驗溫度 25°C 或 60°C 之烘箱中養護2小時後再進行車轍試驗。

以上二種試驗溫度及三種輪壓載重組合之車轍試驗，其變形量記錄如表4-12～表4-15所示，變形量如圖4-13～圖4-18所示，而動穩定值及變形率如表4-16及4-17所示。

表4-12 試驗溫度攝氏25度乾拌法車轍試驗值

單位:mm

輪壓	次數	石粉	水泥	飛灰	爐石粉	粉塵
7 kg/cm ²	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	170	0.06	0.05	0.07	0.11	0.06
	340	0.08	0.08	0.11	0.35	0.15
	680	0.14	0.15	0.17	0.41	0.23
	1000	0.19	0.21	0.24	0.51	0.30
	1360	0.24	0.28	0.32	0.56	0.38
	1700	0.28	0.36	0.38	0.63	0.46
	2000	0.33	0.42	0.46	0.70	0.53
13.2 kg/cm ²	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	170	0.09	0.04	0.24	0.31	0.16
	340	0.16	0.09	0.32	0.46	0.27
	680	0.21	0.27	0.41	0.54	0.35
	1000	0.25	0.35	0.47	0.60	0.46
	1360	0.31	0.40	0.53	0.67	0.58
	1700	0.37	0.52	0.64	0.76	0.67
	2000	0.45	0.58	0.69	0.89	0.76
19.4 kg/cm ²	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	170	0.15	0.32	0.25	0.49	0.27
	340	0.21	0.53	0.38	0.75	0.37
	680	0.35	0.70	0.49	0.95	0.53
	1000	0.44	0.78	0.58	1.09	0.65
	1360	0.51	0.83	0.70	1.22	0.78
	1700	0.55	0.84	0.81	1.26	0.92
	2000	0.61	0.87	0.90	1.41	1.09

表4-13 試驗溫度攝氏25度溼拌法車轍試驗值

單位:mm

輪壓	次數	石粉	水泥	飛灰	爐石粉	粉塵
7 kg/cm ²	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	170	0.04	0.07	0.05	0.09	0.06
	340	0.07	0.12	0.09	0.13	0.11
	680	0.12	0.16	0.16	0.20	0.19
	1000	0.15	0.21	0.23	0.27	0.26
	1360	0.21	0.27	0.30	0.38	0.34
	1700	0.24	0.32	0.35	0.46	0.39
	2000	0.28	0.35	0.41	0.54	0.45
13.2 kg/cm ²	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	170	0.10	0.15	0.22	0.40	0.13
	340	0.19	0.25	0.33	0.48	0.18
	680	0.22	0.29	0.42	0.57	0.31
	1000	0.24	0.35	0.48	0.63	0.43
	1360	0.27	0.42	0.50	0.68	0.48
	1700	0.32	0.47	0.53	0.72	0.52
	2000	0.38	0.51	0.55	0.74	0.57
19.4 kg/cm ²	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	170	0.10	0.42	0.27	0.57	0.52
	340	0.17	0.62	0.48	0.70	0.67
	680	0.24	0.69	0.62	0.77	0.79
	1000	0.34	0.72	0.68	0.84	0.81
	1360	0.43	0.77	0.72	0.89	0.83
	1700	0.50	0.79	0.75	0.95	0.86
	2000	0.58	0.82	0.80	1.03	0.89

表4-14 試驗溫度攝氏60度乾拌法車轍試驗值

單位:mm

輪壓	次數	石粉	水泥	飛灰	爐石粉	粉塵
7 kg/cm ²	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	170	1.66	1.39	1.16	1.68	1.39
	340	2.04	2.02	1.69	2.51	1.96
	680	2.62	2.49	2.55	3.29	2.89
	1000	2.80	3.07	3.48	4.18	3.58
	1360	3.02	3.91	4.65	5.32	4.11
	1700	3.17	4.26	5.24	6.14	4.62
	2000	3.35	4.64	5.69	6.78	5.08
13.2 kg/cm ²	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	170	1.42	2.13	2.14	2.57	2.11
	340	2.04	3.05	3.05	3.89	3.04
	680	2.95	3.72	4.10	5.21	3.79
	1000	3.56	4.26	4.96	6.43	4.53
	1360	4.30	5.31	6.00	7.56	5.28
	1700	4.88	6.15	6.91	8.48	5.83
	2000	5.36	6.80	7.72	9.06	6.43
19.4 kg/cm ²	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	170	2.09	3.55	3.66	4.07	3.02
	340	3.15	4.81	5.52	5.85	4.12
	680	4.08	6.14	7.33	8.82	5.42
	1000	4.87	7.22	8.32	10.32	6.14
	1360	5.75	8.11	9.02	11.48	7.97
	1700	6.40	8.84	10.37	12.63	8.69
	2000	7.25	9.47	11.42	13.30	9.29

表4-15 試驗溫度攝氏60度溼拌法車轍試驗值

單位:mm

輪壓	次數	石粉	水泥	飛灰	爐石粉	粉塵
7 kg/cm ²	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	170	0.84	1.05	0.73	0.83	1.20
	340	1.29	1.54	1.18	1.46	1.47
	680	1.68	2.01	1.74	2.13	1.71
	1000	2.01	2.48	2.37	2.65	2.03
	1360	2.42	2.99	3.05	3.45	2.54
	1700	2.60	3.20	3.49	3.81	2.92
	2000	2.78	3.43	3.80	4.27	3.25
13.2 kg/cm ²	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	170	1.18	1.53	1.23	1.47	1.17
	340	1.86	2.11	2.06	2.15	1.91
	680	2.20	2.66	2.84	2.92	2.48
	1000	2.61	3.31	3.52	4.10	3.19
	1360	3.37	4.24	4.38	5.05	4.06
	1700	3.78	4.73	5.13	5.91	4.69
	2000	4.13	5.29	5.84	6.60	5.05
19.4 kg/cm ²	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	170	2.09	2.37	1.51	2.00	1.83
	340	2.87	3.20	2.41	2.95	2.77
	680	3.73	4.16	3.41	4.25	3.49
	1000	4.28	4.78	4.34	5.31	4.36
	1360	5.00	5.42	5.17	6.15	5.08
	1700	5.40	6.08	6.12	7.22	5.81
	2000	5.78	6.62	7.01	8.13	6.36

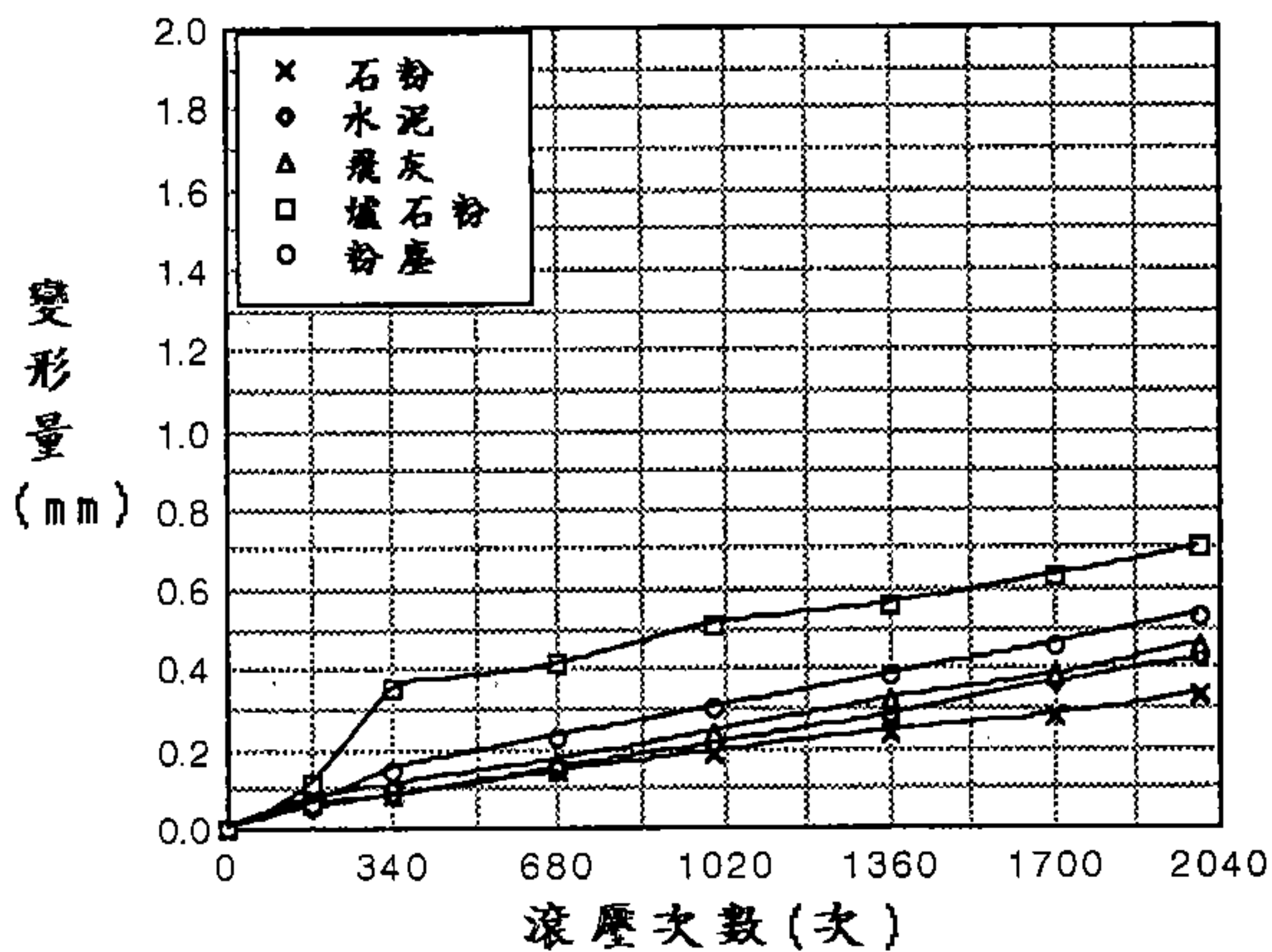


圖 4-13(a) 密級配乾拌瀝青混凝土25°C輪壓 7 kg/cm²車轍試驗變形圖

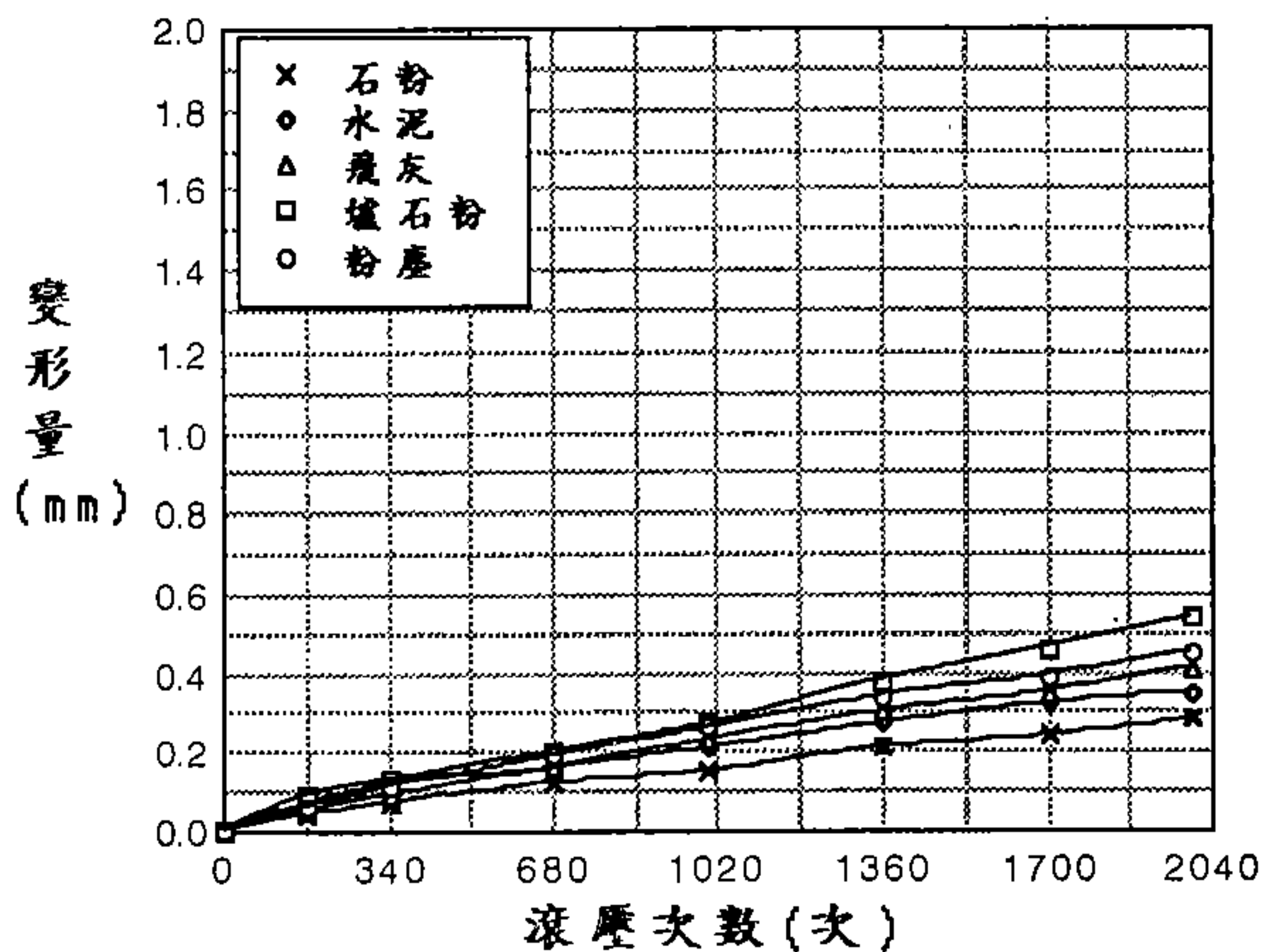


圖 4-13(b) 密級配濕拌瀝青混凝土25°C輪壓 7 kg/cm²車轍試驗變形圖

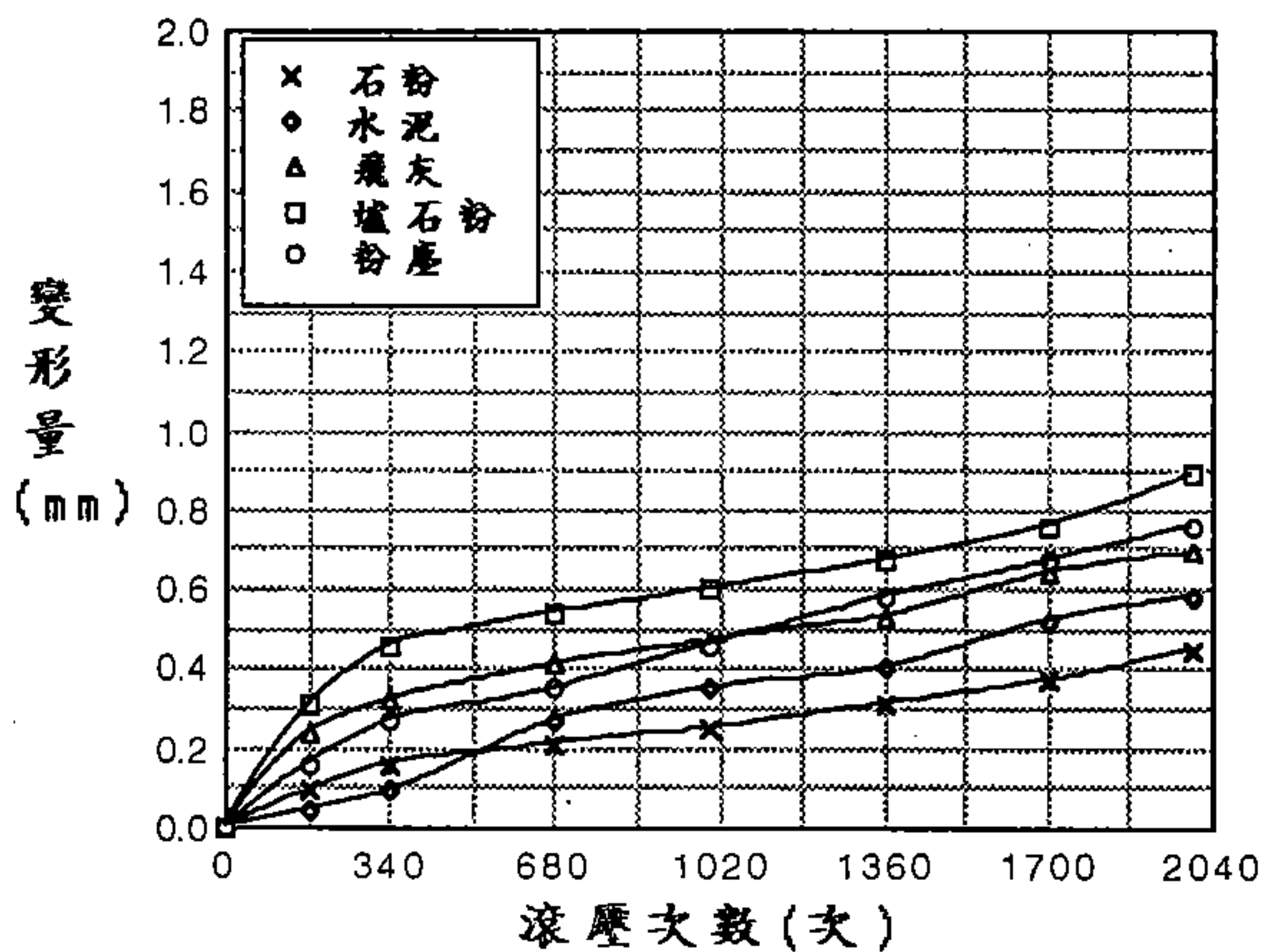


圖 4-14(a) 密級配乾拌瀝青混凝土25°C輪壓13.2kg/cm²車轍試驗變形圖

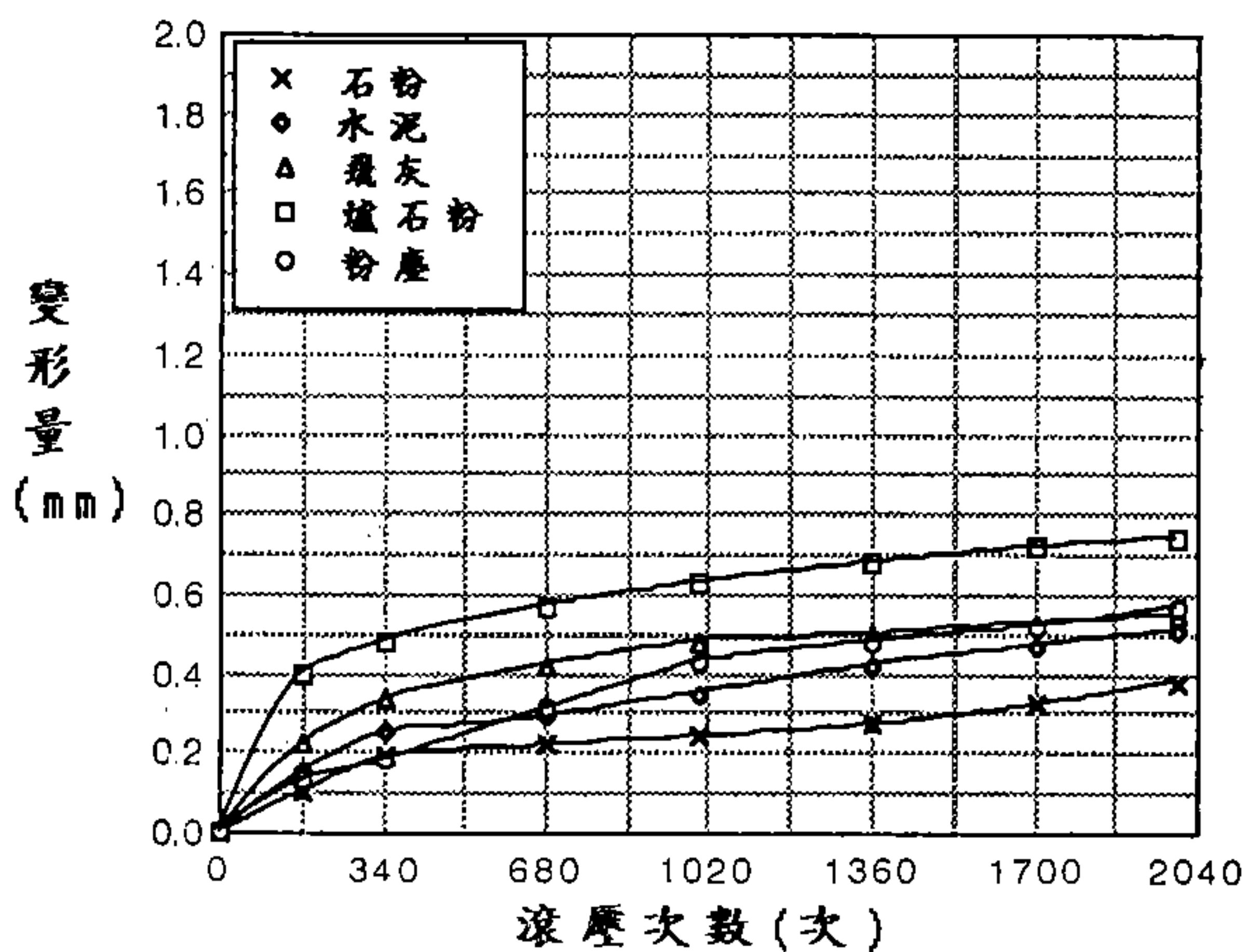


圖 4-14(b) 密級配濕拌瀝青混凝土25°C輪壓13.2kg/cm²車轍試驗變形圖

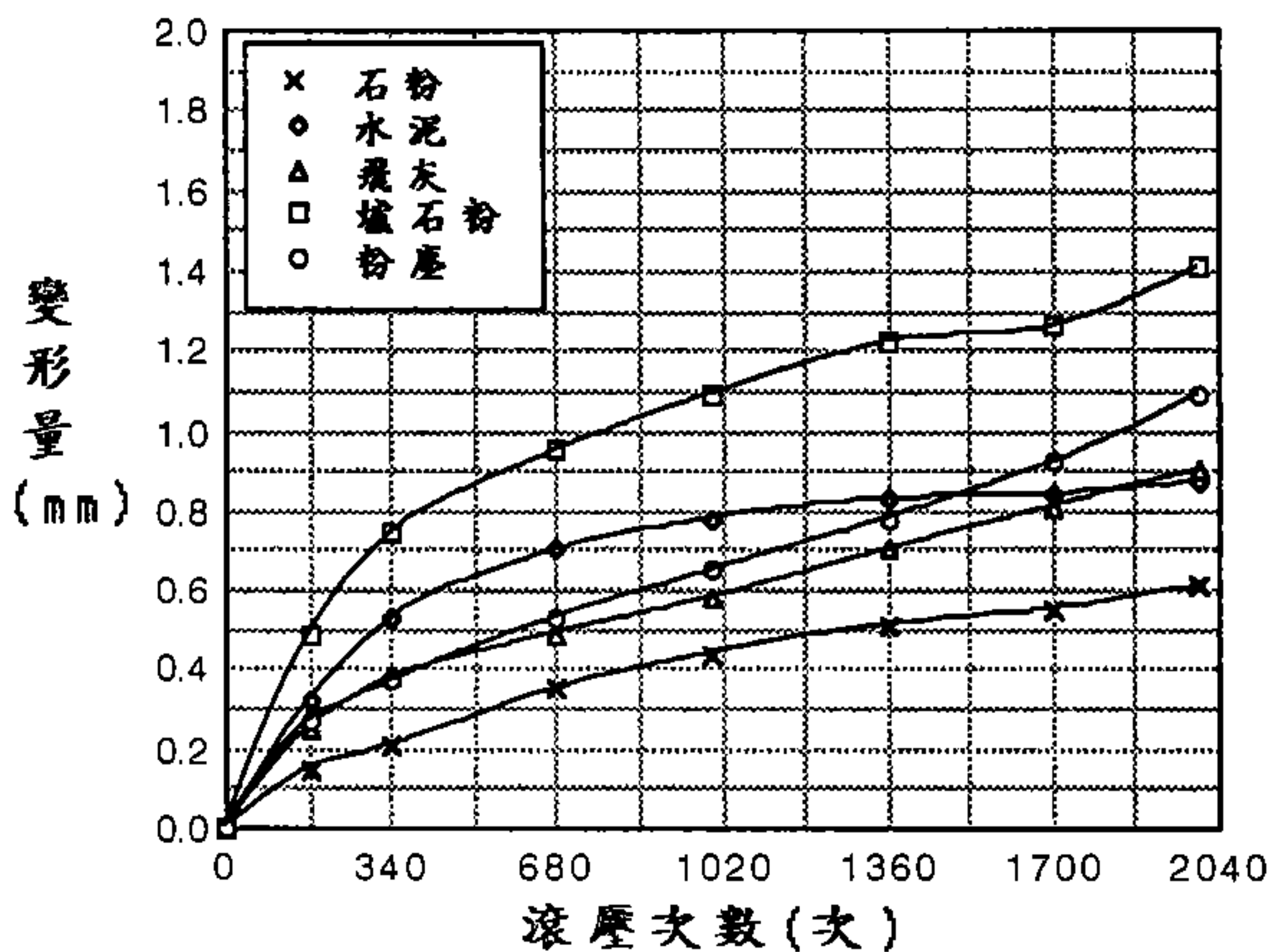


圖 4-15(a) 密級配乾拌瀝青混凝土25°C輪壓19.4kg/cm²車轍試驗變形圖

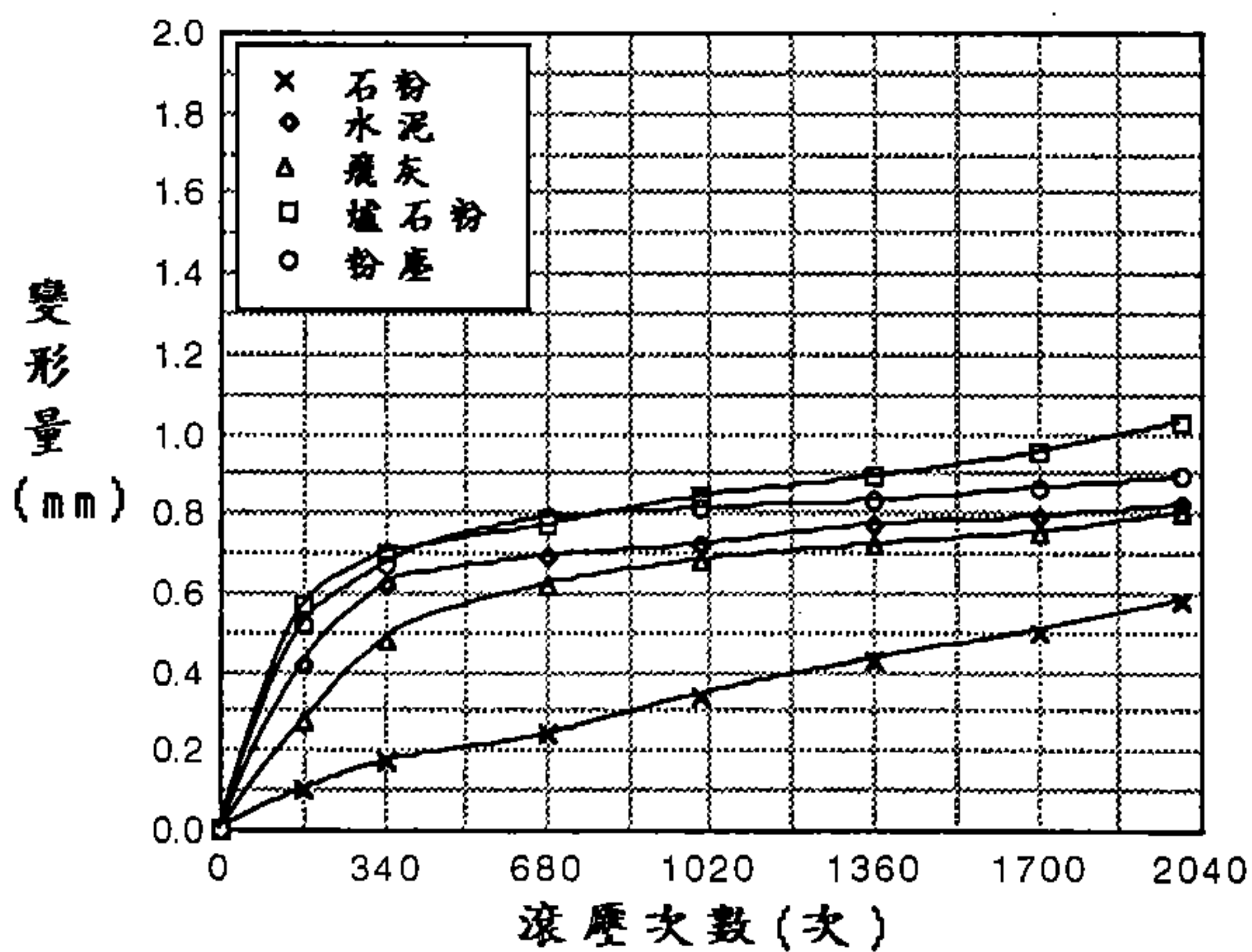


圖 4-15(b) 密級配濕拌瀝青混凝土25°C輪壓19.4kg/cm²車轍試驗變形圖

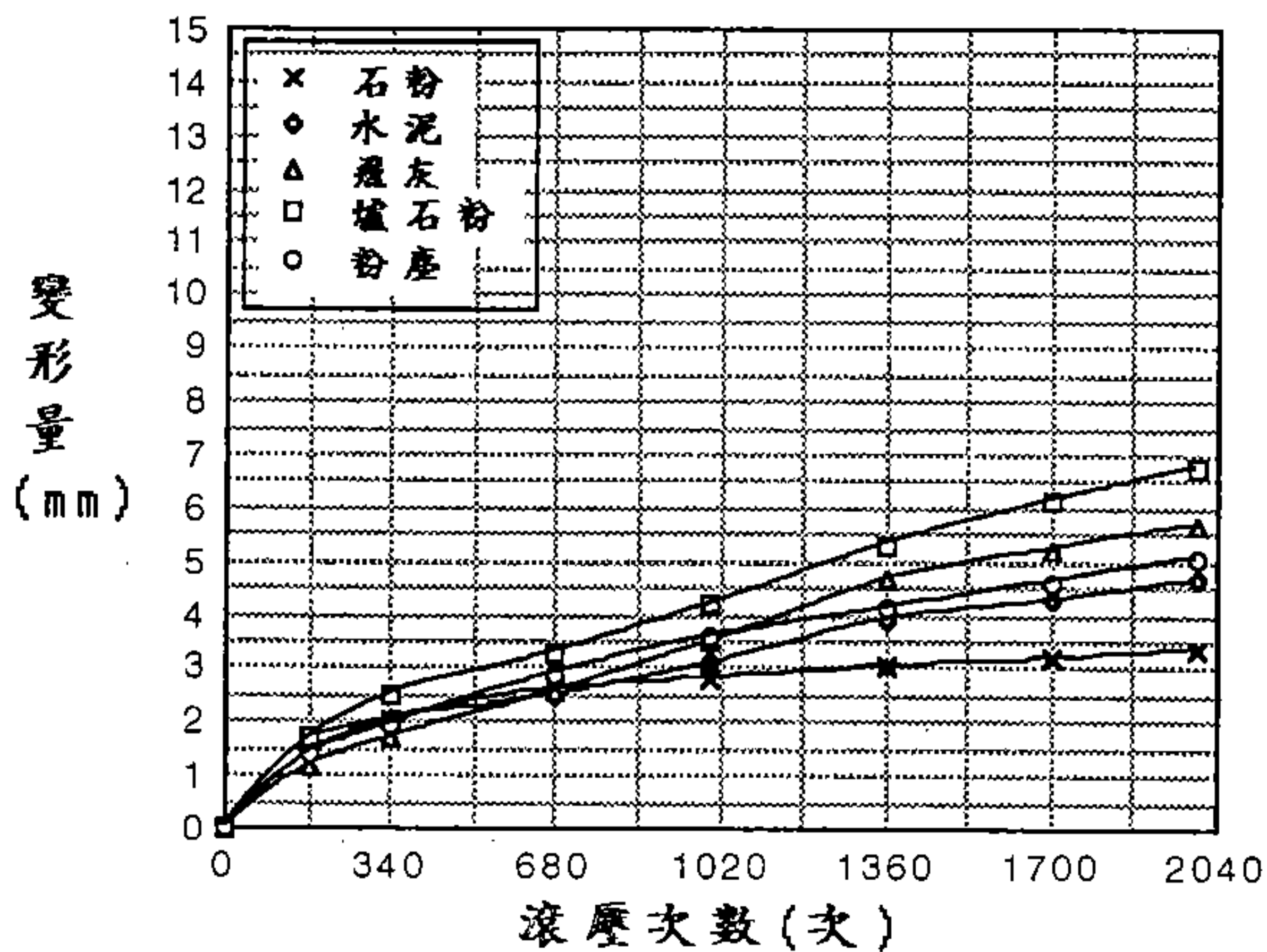


圖 4-16(a) 密級配乾拌瀝青混凝土60°C輪壓 7 kg/cm²車轍試驗變形圖

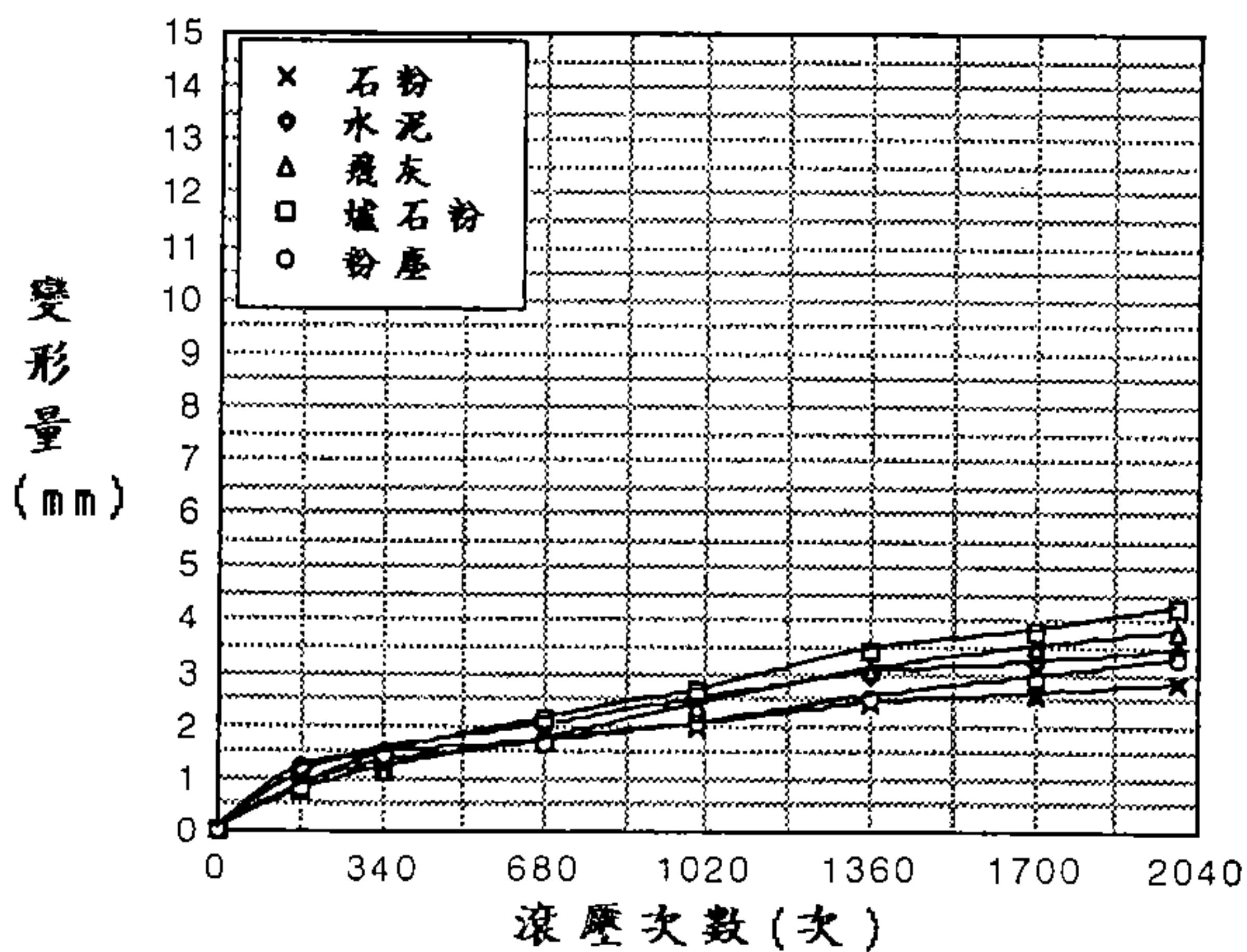


圖 4-16(b) 密級配濕拌瀝青混凝土60°C輪壓 7 kg/cm²車轍試驗變形圖

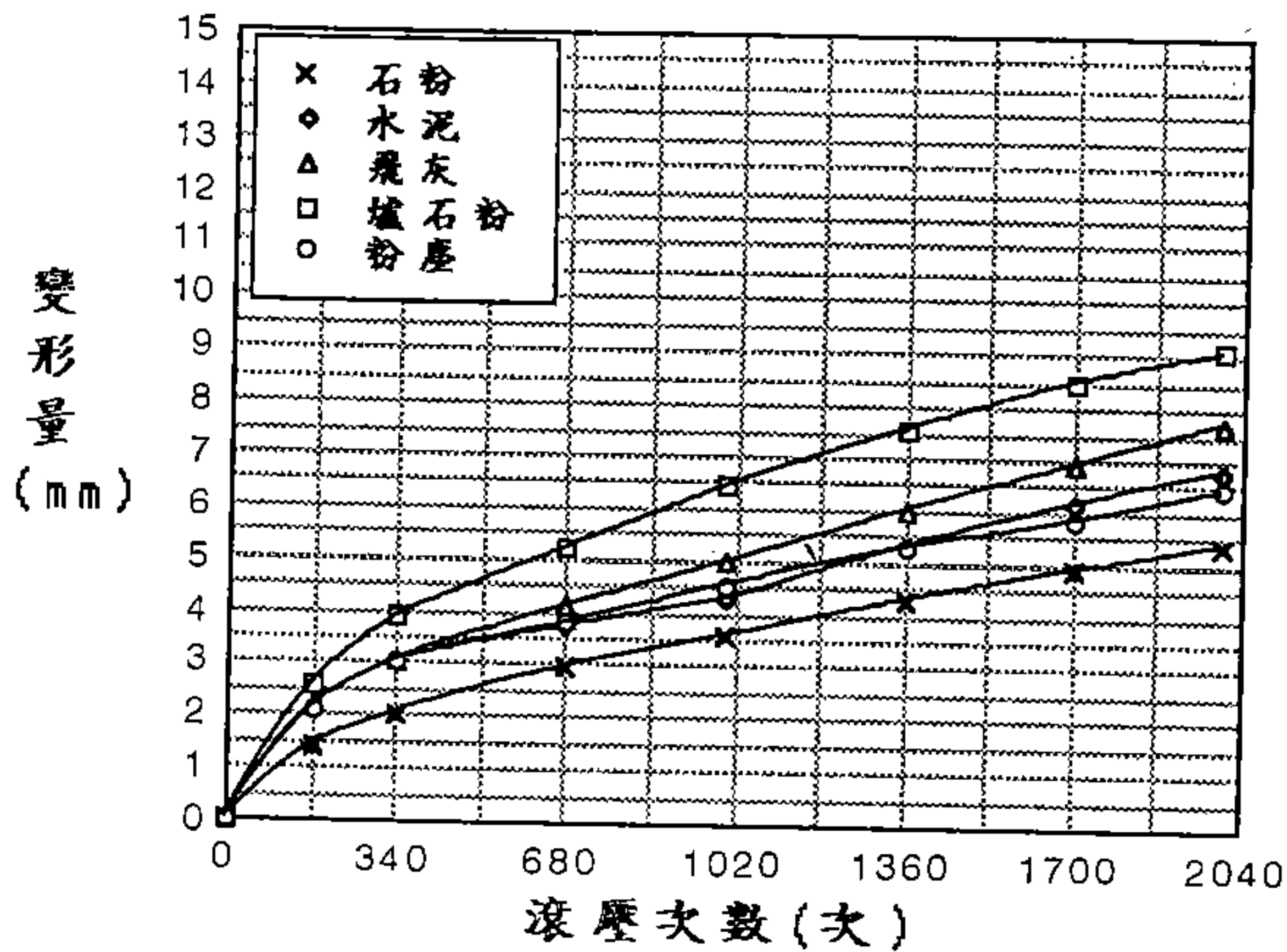


圖 4-17(a) 密級配乾拌瀝青混凝土60°C輪壓13.2kg/cm²車轍試驗變形圖

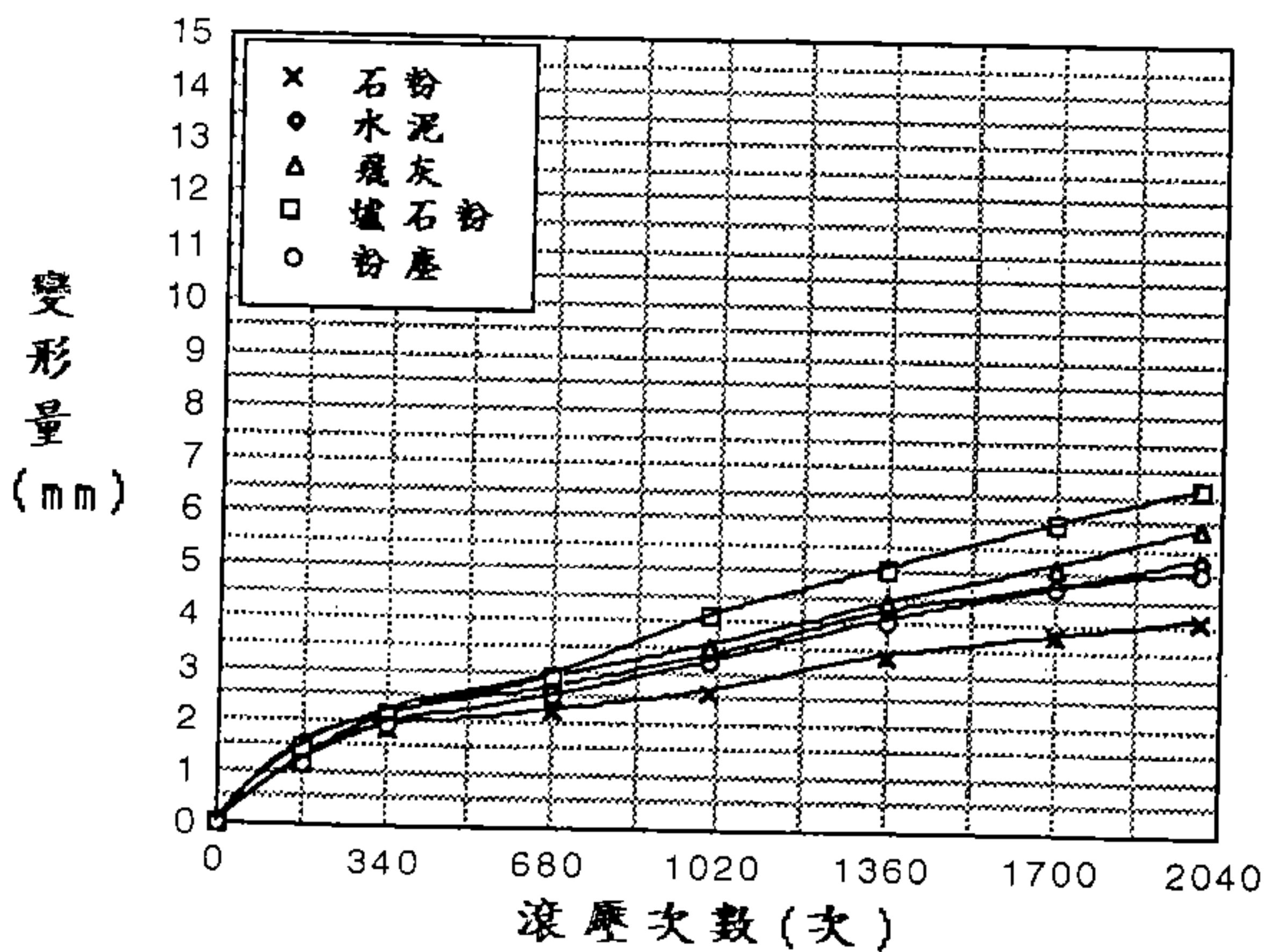


圖 4-17(b) 密級配濕拌瀝青混凝土60°C輪壓13.2kg/cm²車轍試驗變形圖

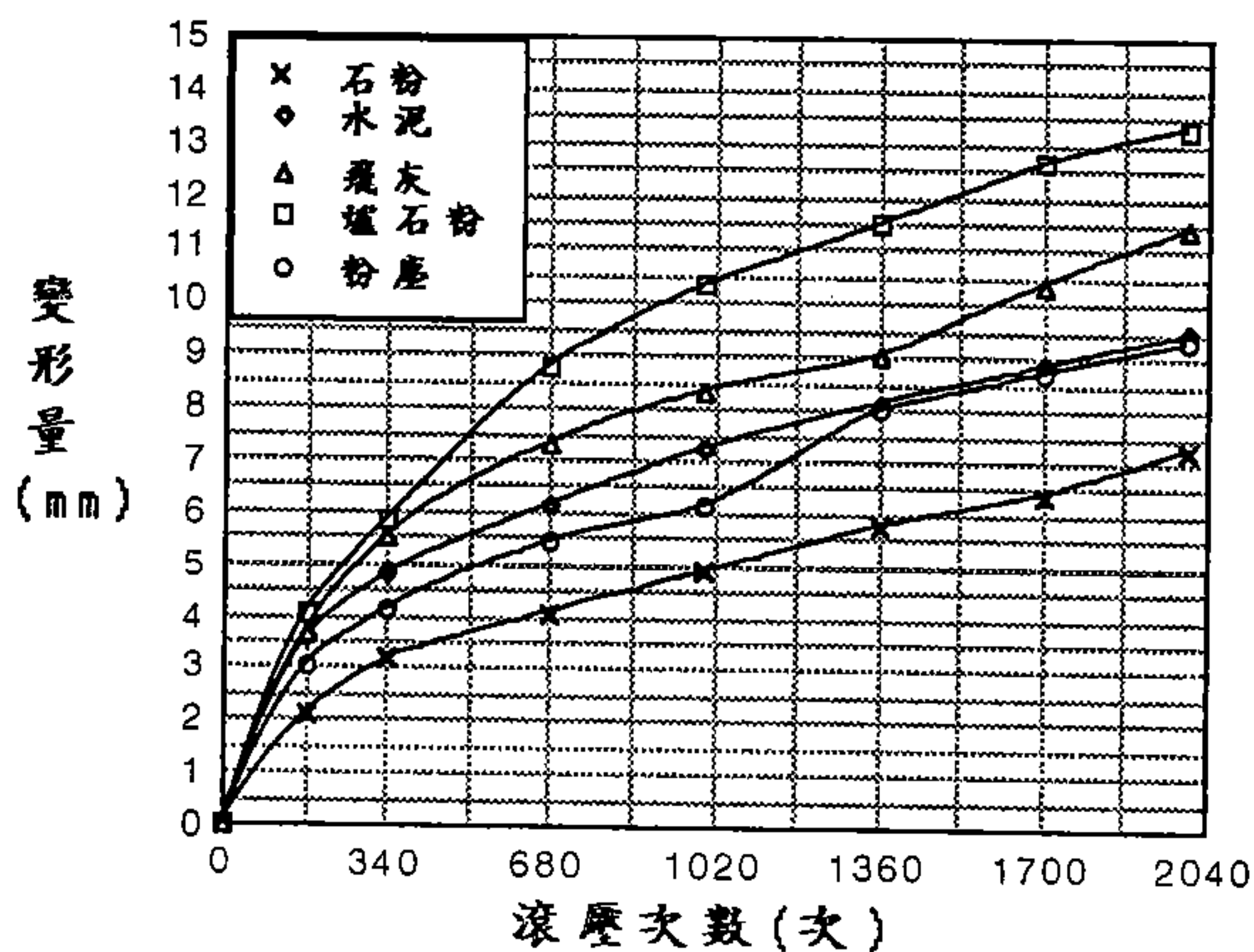


圖 4-18(a) 密級配乾拌瀝青混凝土60°C輪壓19.4kg/cm²車轍試驗變形圖

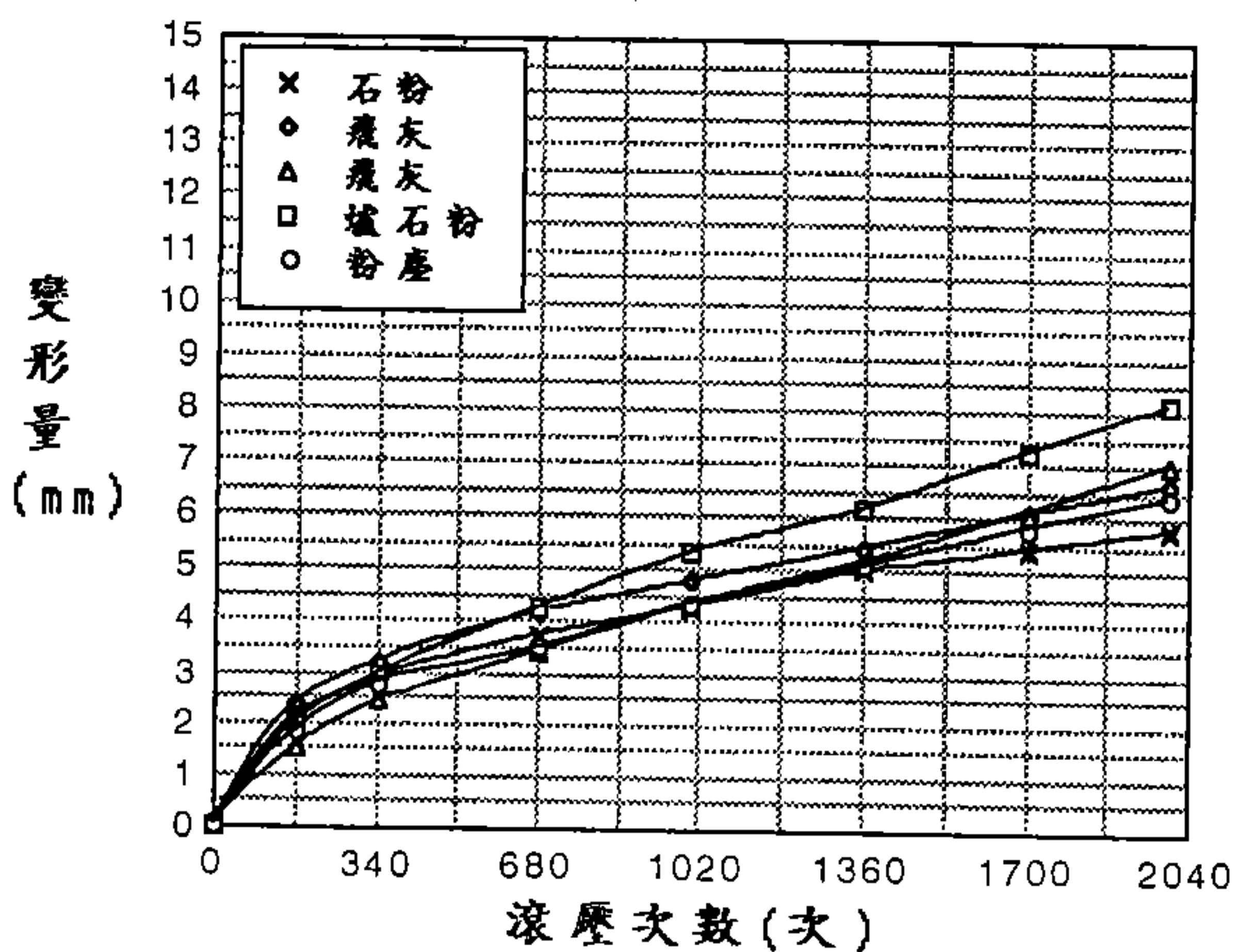


圖 4-18(b) 密級配濕拌瀝青混凝土60°C輪壓19.4kg/cm²車轍試驗變形圖

4-5-1動穩定值

動穩定值(Dynamic Stability, DS)係滾壓次數與變形量之比值，在瀝青混凝土中動穩定值與車轍變形量成反比，動穩定值愈高，則變形量愈小，顯示其抵抗車轍變形之能力愈高；反之動穩定值愈低，則其抵抗車轍變形之能力亦低。

1. 試驗溫度25°C時

(1)乾拌法部份

由表4-16可知，石粉乾拌法車轍試體之動穩定值最高，其次為水泥、飛灰及粉塵，而爐石粉居末，另參考圖13(a)、14(a)及15(a)顯示，石粉之變形量最小，依次遞增，分別為水泥、飛灰、粉塵及爐石粉變形量最大。故可知於此部份抵抗車轍變形能力由優至差之排序為石粉、水泥、飛灰、灰粉塵及爐石粉。又爐石粉其CaO含量高，致使其表面活性較其他填充料大，因此極易與瀝青及粗、細骨材拌合，是以其活性高雖可提升其柔度，但卻降低其粘結力，參考4-2節可知，爐石粉乾拌瀝青混凝土之穩定值為五種填充料中最低者，故可印證其抵抗車轍能力較差之原因。

另由圖4-19之動穩定值趨勢圖可知，各填充料乾拌之瀝青混凝土車轍試體其動穩定值於輪壓加重時，其下降趨勢尚稱一致，而水泥與飛灰於輪壓19.4kg/cm²時動穩定值幾近重疊，且飛灰於輪壓13.2~

19.4kg/cm²之間其下降斜率趨緩，故可知飛灰填充料乾拌瀝青混凝土其為鋪面材料時，對於重車有較穩定之抵抗能力。

(2) 濕拌法部份

由表4-13及表4-16得知，五種填充料於濕拌法車轍試驗之變形量及動穩定值可知，各填充料瀝青混凝土抵抗車轍變形之能力，依高低分別為石粉、水泥、飛灰、粉塵及爐石粉，且其抵抗車轍變形能力亦優於填充料乾拌法瀝青混凝土之抗車轍變形之能力。

另由圖4-20之趨勢圖觀察，各填充料之動穩定值下降趨勢趨於一致，又飛灰與水泥於輪壓19.4kg/cm²時，其動穩定值重疊在一起，可知飛灰在重車車轍抵抗能力方面有趕上水泥之趨勢。

2. 試驗溫度60°C時

(1) 乾拌法部份

由表4-16可知，於此60°C試驗溫度下，各填充料乾拌法車轍試驗值之動穩定值皆急劇下降，顯示在此溫度下，車轍變形量亦急劇升高，甚至如爐石粉乾拌法瀝青混凝土其車轍變形量有高達13.3mm者(參照表4-15)。惟參考林登峰、林志棟、鄭根福[32]於文獻中所提及美國地區車轍控制標準，一般公路其變形量須在19mm以下，可知其尚在理想狀況之中；但以英國高速公路車轍變形量須小於10mm之狀況下，可知其不可應用於高速公路之鋪面材料上。另飛灰之車轍變形量亦高

達11.42mm(參照表4-15)，可知其於此填充料用量下亦不可應用於高速公路之鋪面材料上。

另由圖4-22之趨勢圖顯示，輪壓在13.2~19.4kg/cm²時，其動穩定值下降趨勢較一致。又粉塵於輪壓7kg/cm²時，其動穩定值小於水泥，惟於輪壓13.2kg/cm²時，其動穩定值大於水泥，及至輪壓至19.4kg/cm²，又與水泥重疊一致。

(2) 濕拌法部份

由表4-17亦可知五種填充料濕拌瀝青混凝土試體在此60°C試驗溫度下，其穩定值亦急劇下降，且車轍變形量亦急劇升高，而抵抗車轍變形能力由高至低則分別為石粉、粉塵、水泥(二者相差甚微)、飛灰及爐石粉。由圖4-16、圖4-17及圖4-18顯示，濕拌法之車轍變形量較乾拌法之低。另據圖4-21之動穩定值趨勢圖，可看出濕拌法之動穩定值皆高於乾拌法，且其於輪壓13.2~19.4kg/cm²間，其動穩定值之下降趨勢一致趨緩，顯見五種填充料濕拌法瀝青混凝土應用於鋪面時，對於高溫重壓時有較乾拌法優良之車轍抵抗能力較乾拌法優良。

4-5-2 變形率

變形率(Rate of Deformation, RD)係變形量與滾壓時間之比值，在瀝青混凝土中變形率與車轍變形量成正比，變形率高則變形量高，顯示其抵抗車轍之變形力愈低；反

之變形率低，變形量亦低，則其抵抗車轍變形之能力亦高。

1. 試驗溫度25°C時

(1) 乾拌法部份

由表4-17可知在溫度25°C時，五種填充料乾拌瀝青混凝土之變形率皆甚為微小。顯示於此溫度下，車轍對各填充料乾拌瀝青混凝土之影響較小。另根據圖4-23之變形趨勢圖，觀察飛灰之變形率位居五種填充料之中間部位，其上昇趨勢平緩；其餘四種填充料於輪壓13.2 kg/cm²處有折點，於前段 7~13.2 kg/cm²間，上昇趨勢較陡。顯示常溫時，重車較能影響車轍變位。

(2) 濕拌法部份

由圖4-24顯示，五種填充料濕拌瀝青混凝土之變形率較五種填充料乾拌瀝青混凝土變形率為低，且其變形率之上昇趨勢均較一致且平緩。是以可得知填充料濕拌法之抗車轍變形能力優於填充料乾拌法。

2. 試驗溫度60°C時

(1) 乾拌法部份

由圖4-25顯示，五種填充料乾拌瀝青混凝土其變形率較25°C時劇增，此時各填充料乾拌瀝青混凝土之車轍變形量隨輪壓之增加而增加。另由圖上可觀察到，傳統填充料石粉，其乾拌瀝青混凝土車轍試驗變形率最低，上昇亦最平緩，仍為較適宜之填充料選擇方案。

(2) 濕拌法部份

表 4-16 密級配瀝青混凝土車轍試驗動穩定值

填充料 種類	溫度	25℃			60℃		
	輪壓	7.0	13.2	19.4	7.0	13.2	19.4
石粉	乾拌	6060.61	4444.44	3278.69	597.01	373.13	275.86
	溼拌	7142.86	5263.16	3448.28	719.42	484.26	346.02
水泥	乾拌	4761.90	3448.28	2298.85	431.03	294.12	211.19
	溼拌	5714.29	3921.57	2439.02	583.09	378.07	302.11
飛灰	乾拌	4347.83	2898.55	2222.22	351.49	259.07	175.13
	溼拌	4878.05	3636.36	2500.00	526.32	342.27	285.31
爐石粉	乾拌	2857.14	2247.19	1418.44	294.99	220.75	150.38
	溼拌	3703.70	2702.70	1941.75	468.38	303.03	246.00
粉塵	乾拌	3773.58	2631.58	1834.86	393.70	311.04	215.29
	溼拌	4444.44	3508.77	2247.19	615.38	396.04	314.47

*動穩定值(cycle/mm)=滾壓次數(cycle)/變形量(mm)

輪壓單位=kg/cm²

表 4-17 密級配瀝青混凝土車轍試驗變形率

填充料 種類	溫度	25℃			60℃		
	輪壓	7.0	13.2	19.4	7.0	13.2	19.4
石粉	乾拌	0.0050	0.0068	0.0092	0.0503	0.0804	0.1088
	溼拌	0.0042	0.0057	0.0087	0.0417	0.0620	0.0867
水泥	乾拌	0.0063	0.0087	0.0131	0.0696	0.1020	0.1421
	溼拌	0.0053	0.0077	0.0123	0.0515	0.0794	0.0993
飛灰	乾拌	0.0069	0.0104	0.0135	0.0854	0.1158	0.1713
	溼拌	0.0062	0.0083	0.0120	0.0570	0.0876	0.1052
爐石粉	乾拌	0.0105	0.0134	0.0212	0.1017	0.1359	0.1995
	溼拌	0.0081	0.0111	0.0155	0.0641	0.0990	0.1220
粉塵	乾拌	0.0080	0.0114	0.0164	0.0762	0.0965	0.1394
	溼拌	0.0068	0.0086	0.0134	0.0488	0.0758	0.0954

*變形率(mm/min)=變形量(mm)/滾壓時間(min)

滾壓時間(min)=滾壓次數(cycle)/滾壓速度(30 cycle/min)

輪壓單位=kg/cm²

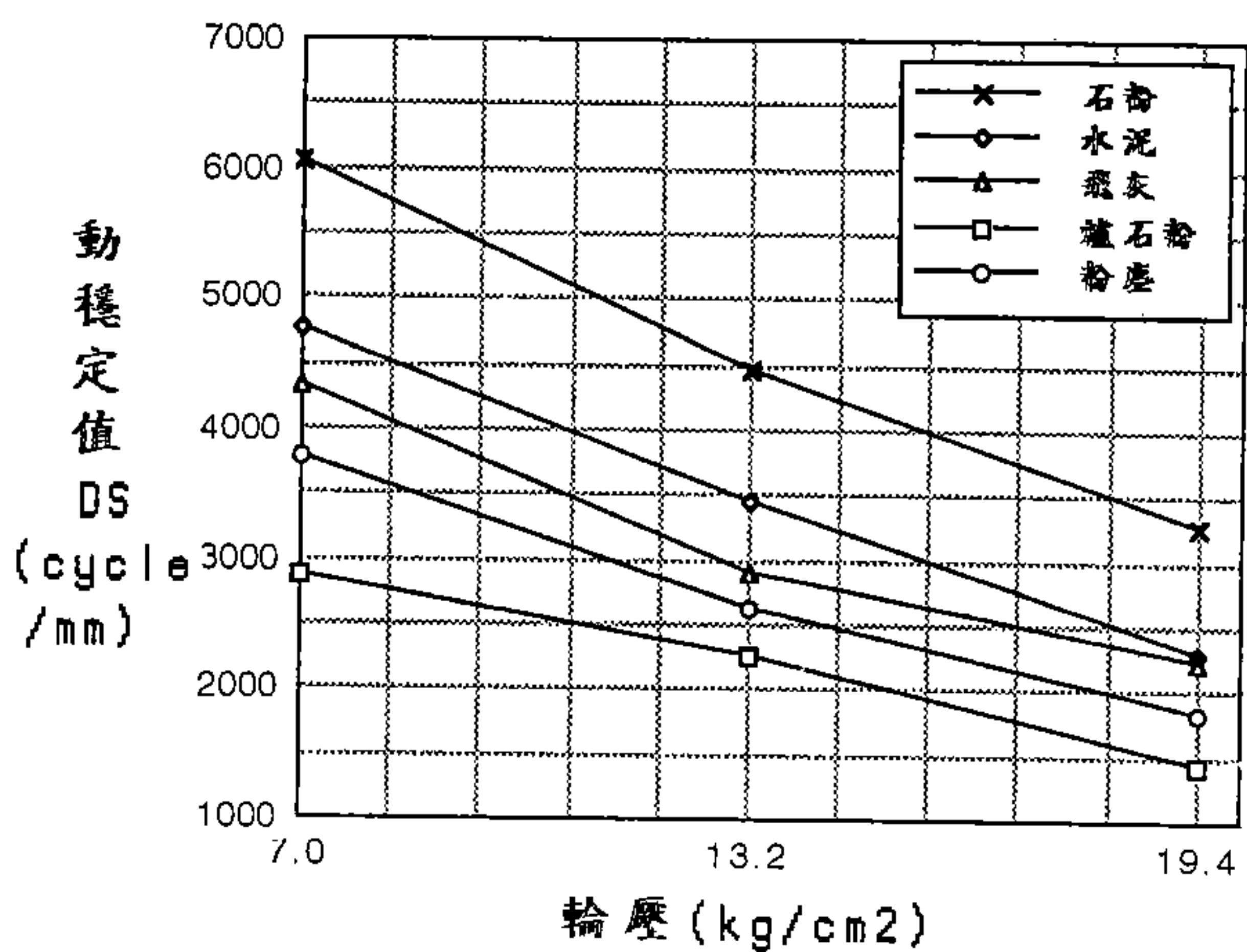


圖 4-19 25°C 時乾拌法車轍試驗動穩定值趨勢圖

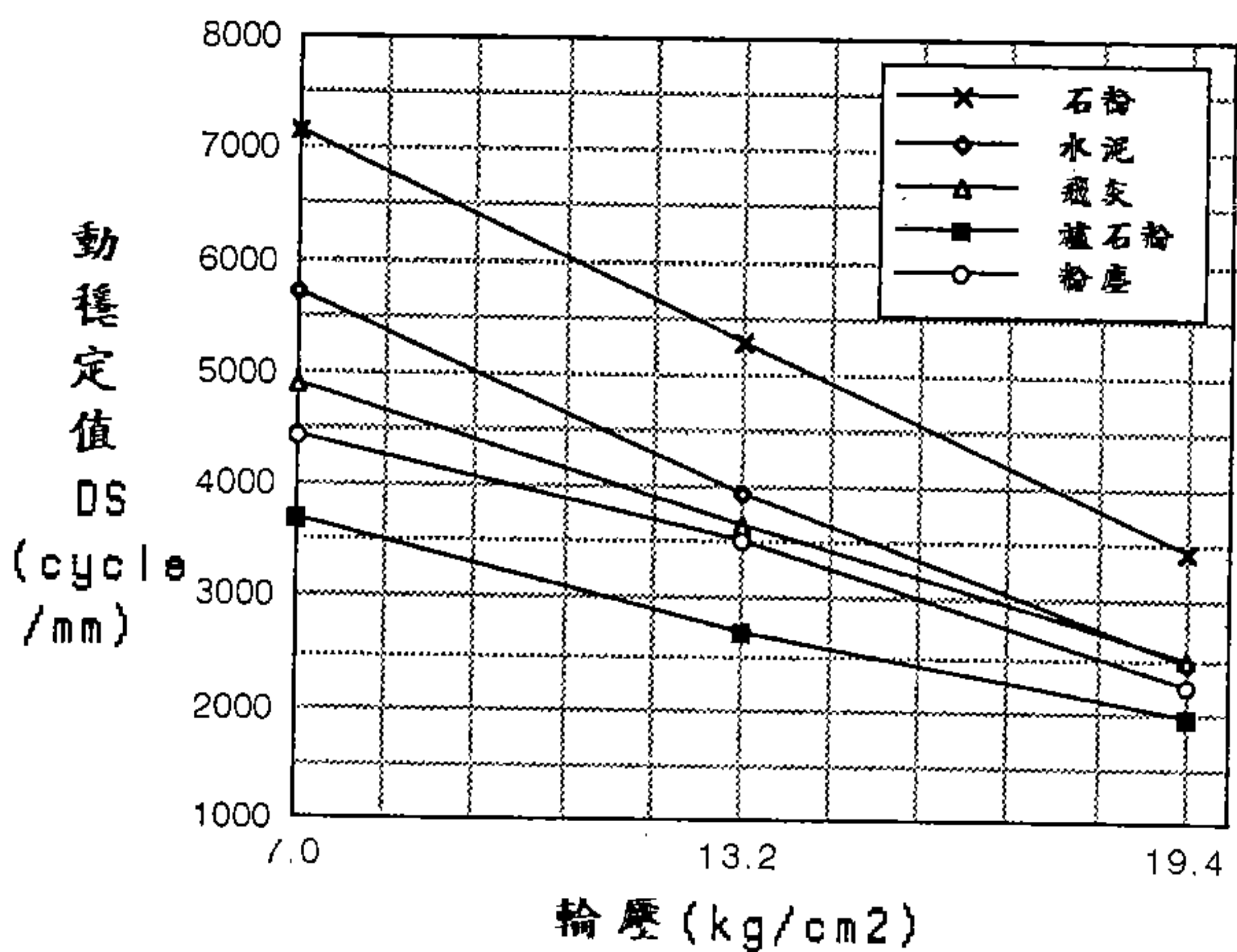


圖 4-20 25°C 時溼拌法車轍試驗動穩定值趨勢圖

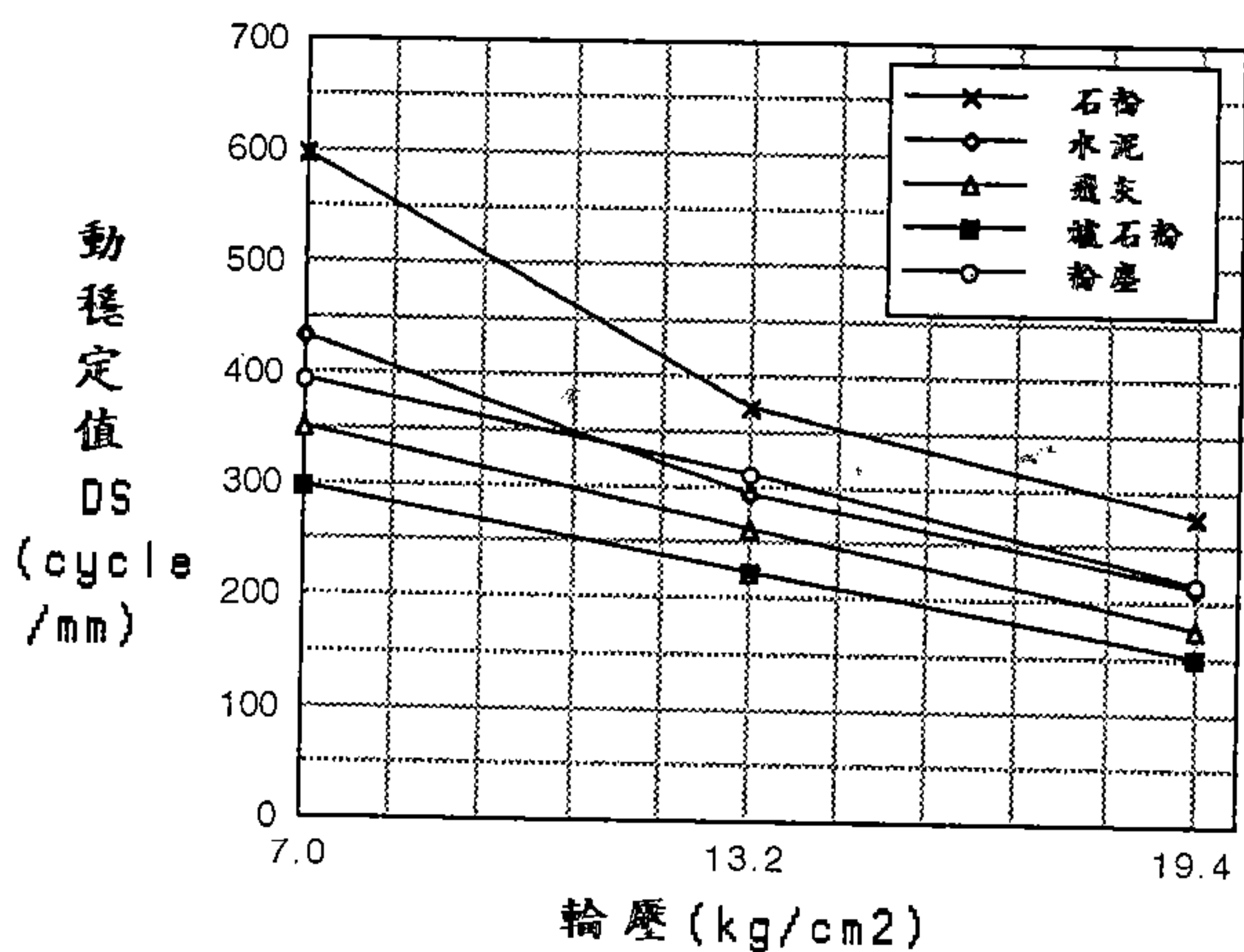


圖 4-21 60°C 時乾拌法車轍試驗動穩定值趨勢圖

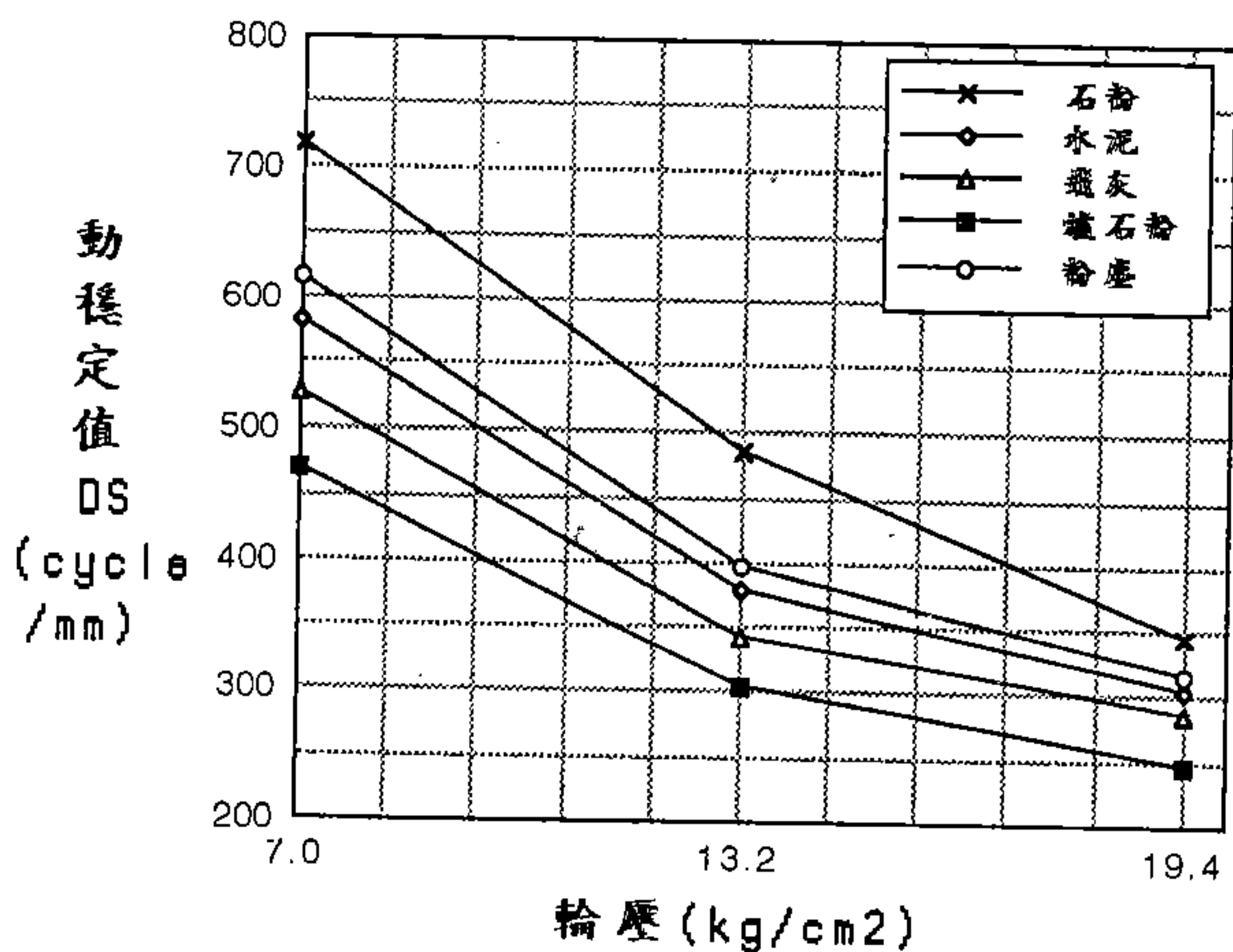


圖 4-22 60°C 時溼拌法車轍試驗動穩定值趨勢圖

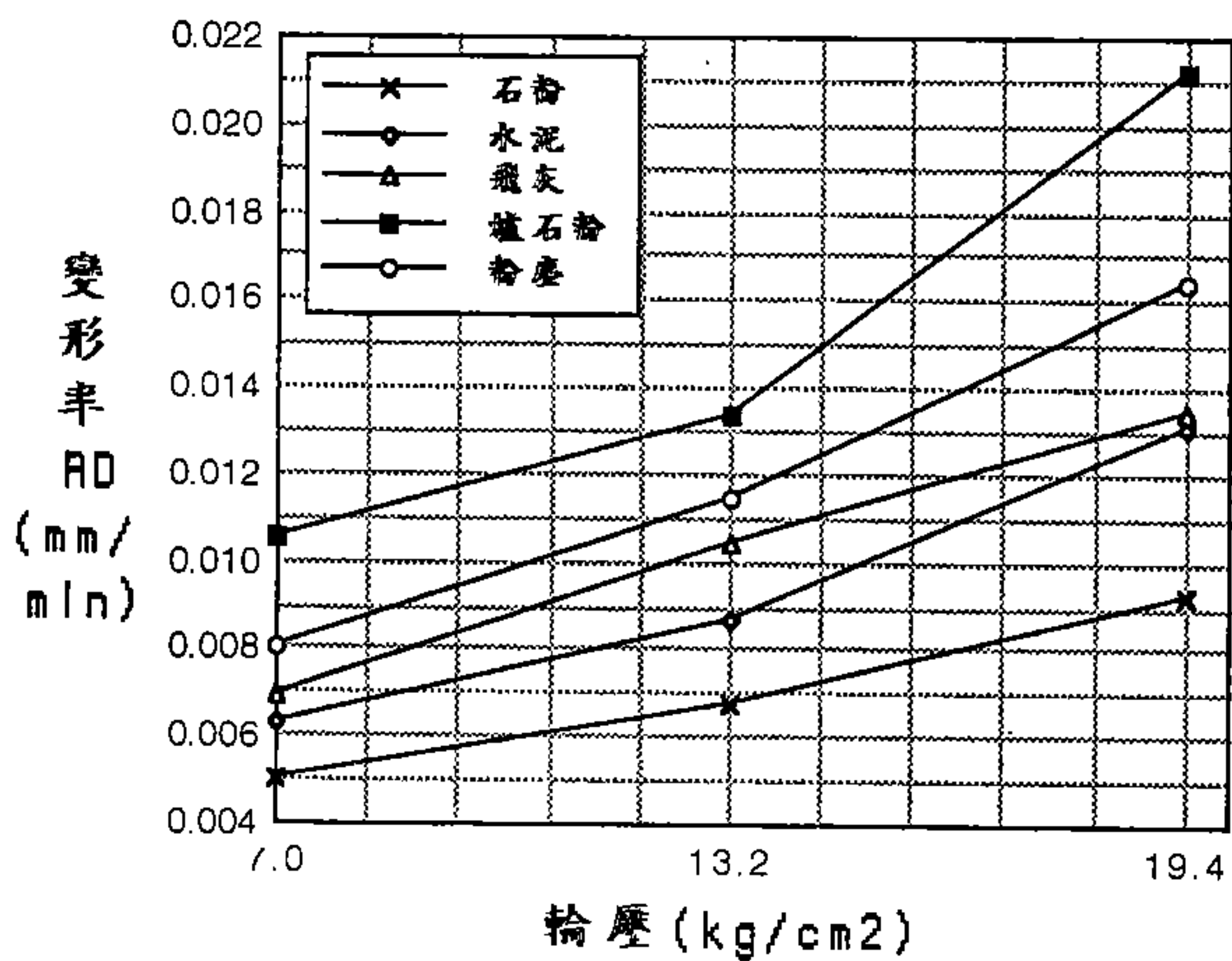


圖 4-23 25°C 時乾拌法車轍試驗變形率趨勢圖

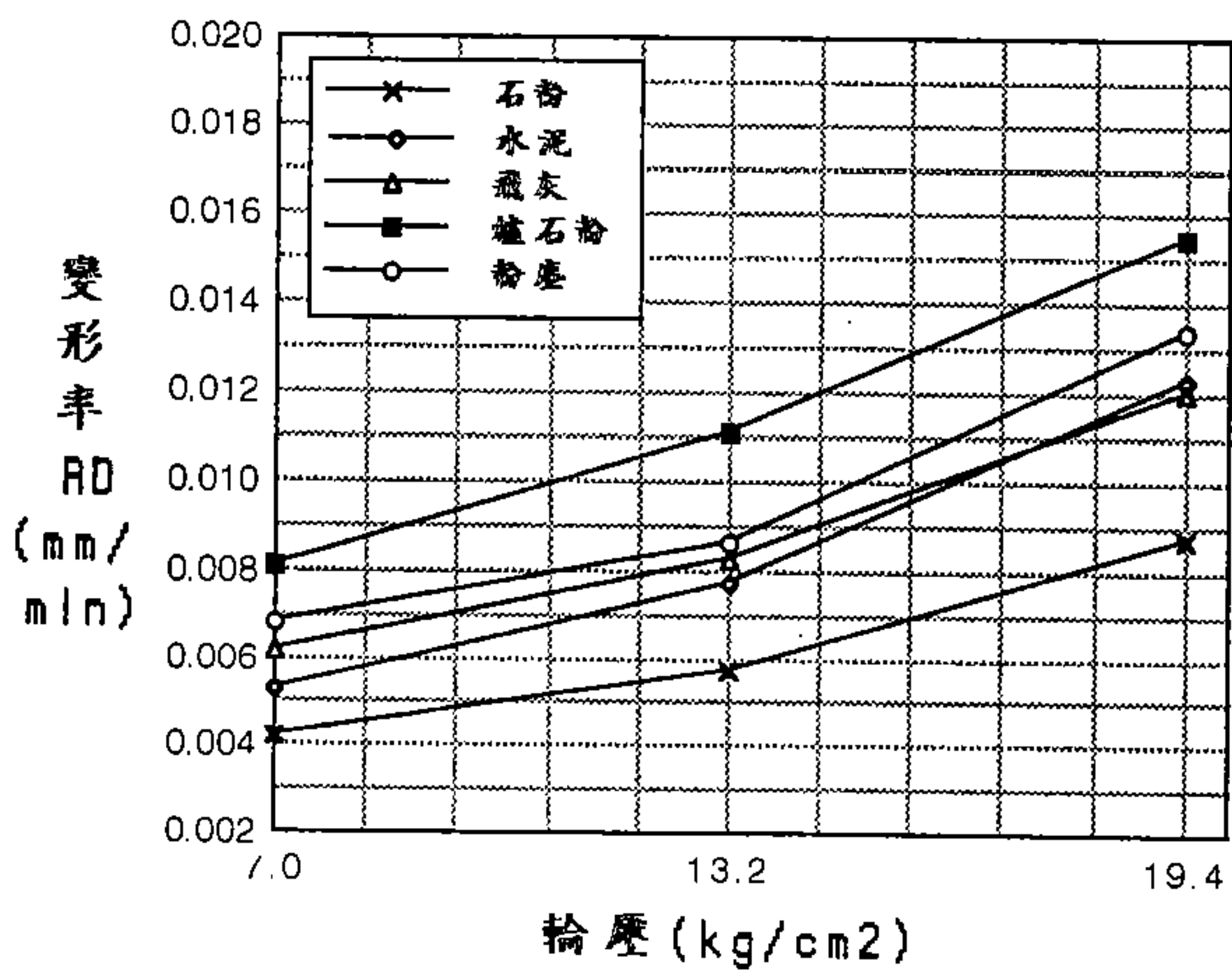


圖 4-24 25°C 時溼拌法車轍試驗變形率趨勢圖

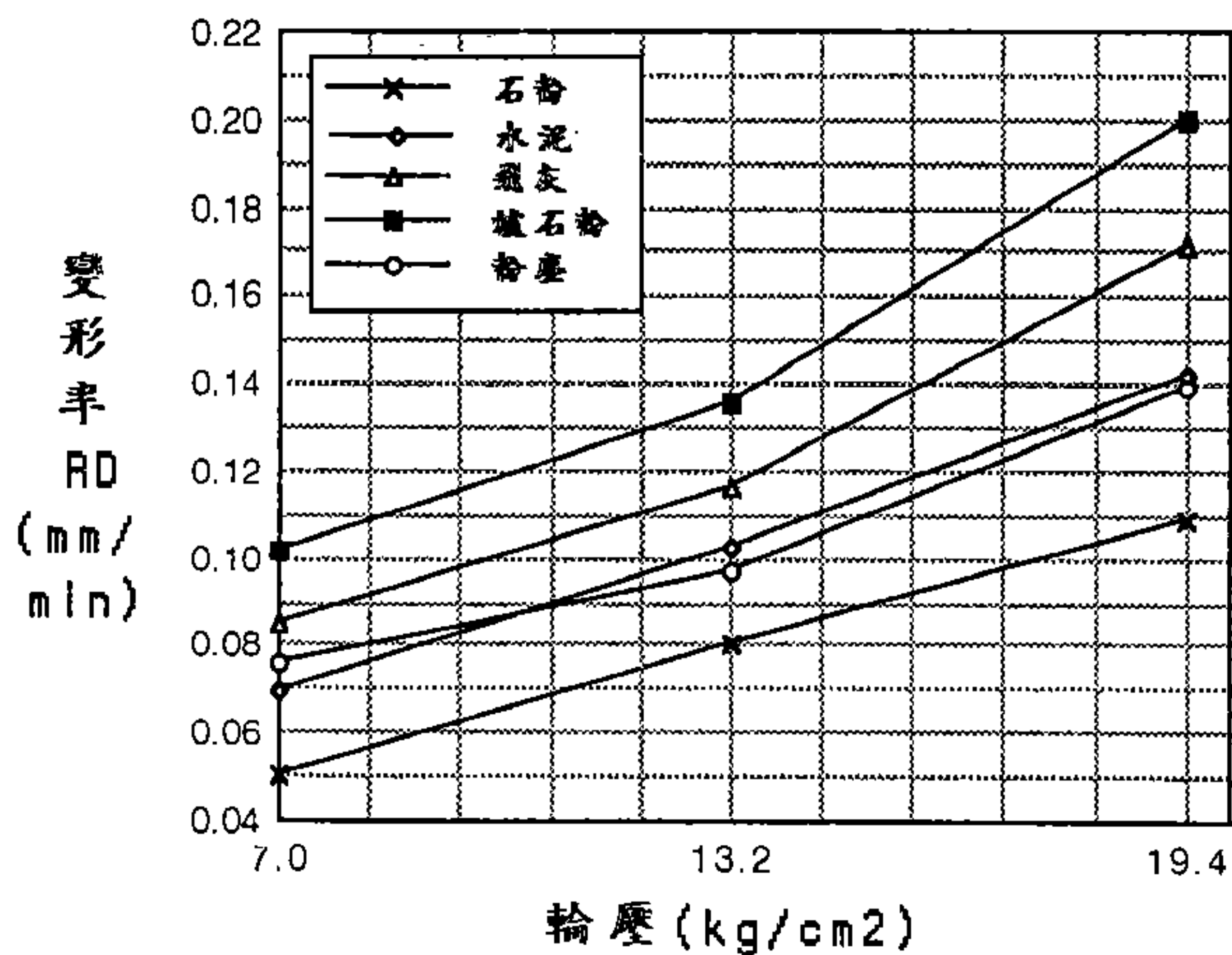


圖 4-25 60°C 時乾拌法車轍試驗變形率趨勢圖

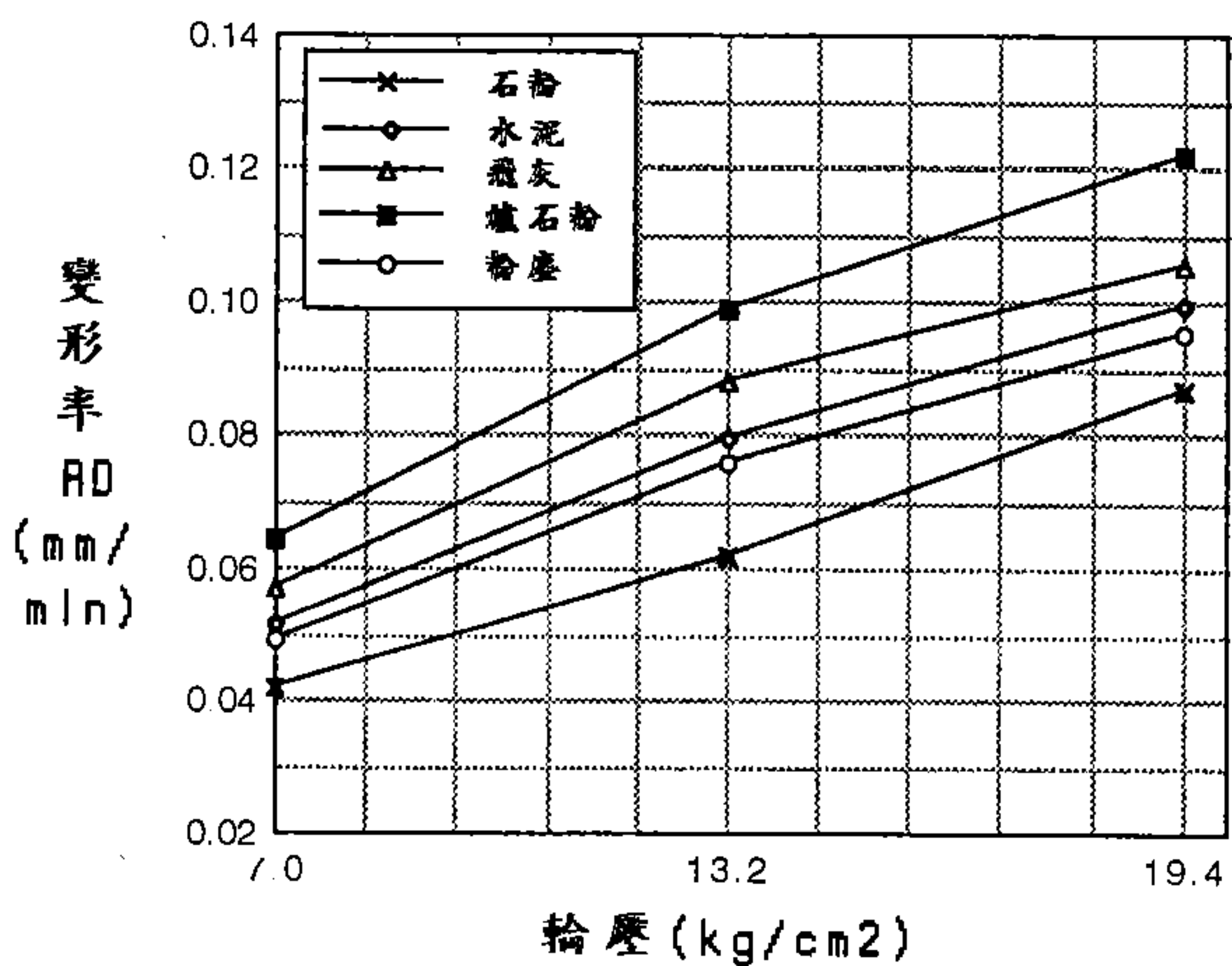


圖 4-26 60°C 時溼拌法車轍試驗變形率趨勢圖

由圖4-26顯示，五種填充料之濕拌瀝青混凝土其變形率較乾拌瀝青混凝土為低，且其於輪壓13.2~19.4kg/cm²間之變形率反有折減之趨勢。是以可得知於高溫(60°C)階段，填充料濕拌法之抗車轍變形能力亦優於填充料乾拌法。

4-5-3輪跡外觀

本階段五種填充料以乾、濕拌製作之瀝青混凝土車轍試體，經25°C、60°C二種試驗溫度及7kg/cm²，13.2kg/cm²，19.4kg/cm²等三種輪壓試驗下，其試體表面之輪跡，依據林登峰、林志棟、鄭根福之文獻[32]來分類，在25°C試驗溫度下之乾、濕拌試體經試驗後大部份為壓密車轍，參考圖4-27 (a) 照片；又在60°C試驗溫度下之乾、濕拌試體經試驗後絕大部份為橫向推擠，參考圖4-27 (a) 照片，茲轉載林登峰、林志棟、鄭根福[32]之車轍機理如下，以作參考：

所謂「車轍」係指輪胎滾壓於車道路面面層所產生之下陷現象瀝青混凝土路面有兩種主要車轍現象，分別為壓密車轍(Consolidation Rutting)及橫向推擠(Transverse Shoving)現象。

1. 壓密車轍

在高荷重砂石車或高輪胎滾壓重複作用下，瀝青混凝土路面輪跡處會因壓密而導致純垂直下陷，路面呈現槽狀變形稱為壓密車轍，如圖4-28(a)所示。此現象通常係因



圖 4-27(a) 25°C 乾、濕拌瀝青混凝土車轍試驗輪跡外觀

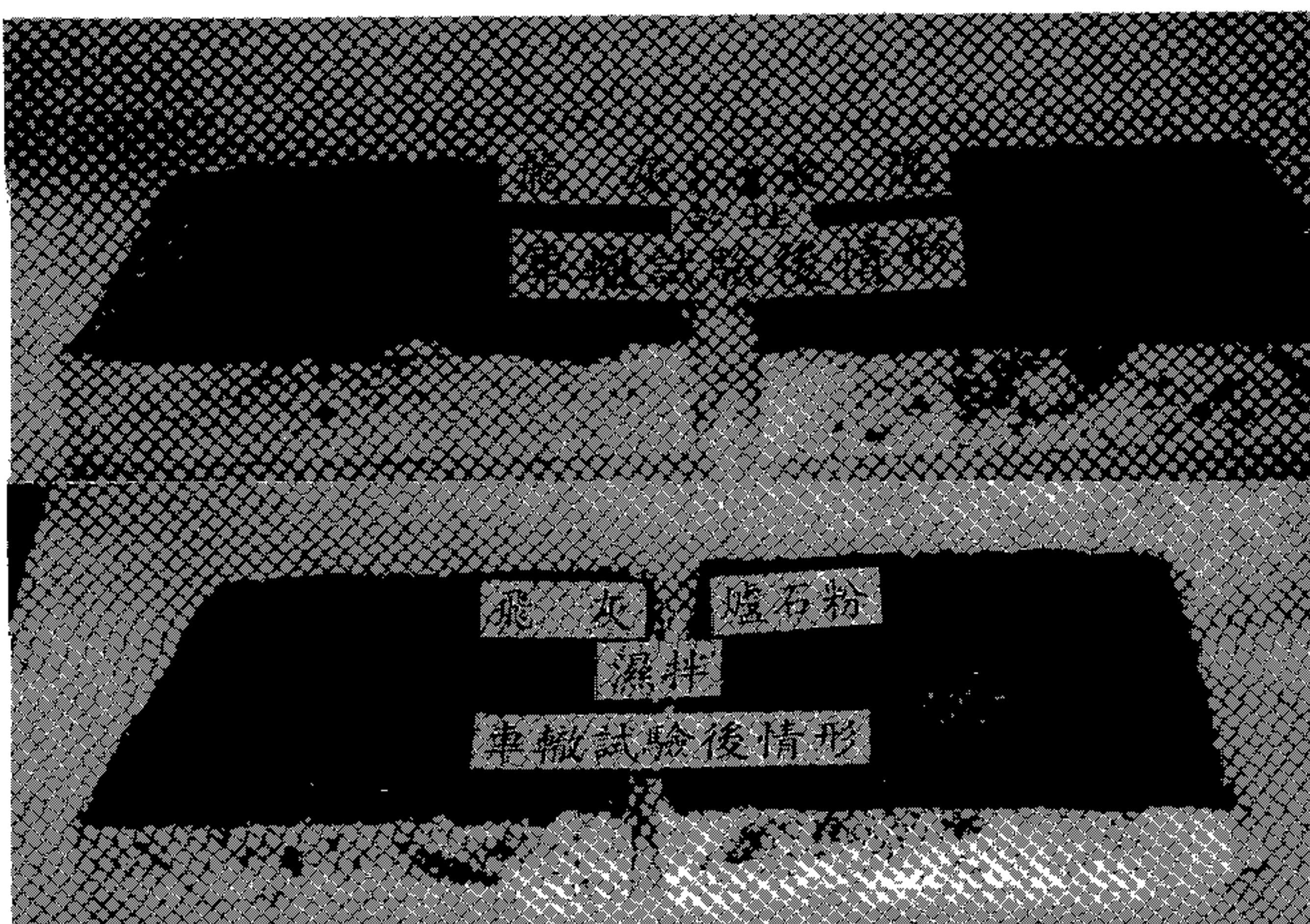


圖 4-27(b) 60°C 乾、濕拌瀝青混凝土車轍試驗輪跡外觀

瀝青混凝土路面空隙率偏高或基層及底層因施工時壓實不當或路面厚度不足，經開放交通後，路面產生壓密車轍而導致路面凹陷。

2. 橫向推擠

在輪胎荷重滾壓處正下方路面呈凹陷，而輪跡處兩側發生隆起之現象稱為橫向推擠，如圖28(b)所示。其發生此原因係瀝青混凝土路面受過大應力而產生塑性變形，即瀝青混凝土受外力作用產生之剪應力大於瀝青混凝土結構材料之抗剪強度，而產生之塑性變形。此一現象常發生於高溫地區瀝青混凝土路面面層空隙率偏低路段。

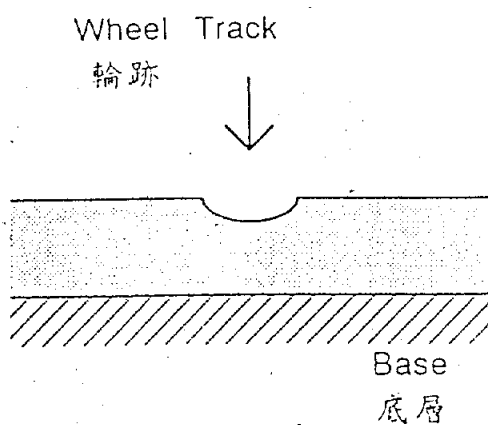


圖4-28(a) 壓密車轍

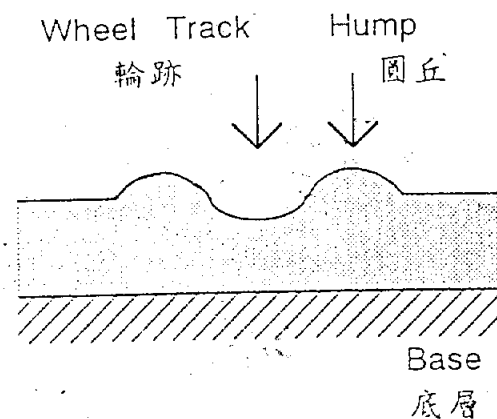


圖4-28(b) 橫向推擠

4-6 填充料拌合技術及拌合效果評估

傳統填充料石粉、水泥及資源回收細料飛灰、爐石粉及粉塵作為填充料，以乾拌及濕拌兩種方法製作成各種瀝青混凝土試體，經過馬歇爾配合設計試驗，基本力學試驗及車轍試驗等三階段試驗，而獲得一連串數據及結果，茲以強度及經濟性評估資源回收細料作為瀝青混凝土細料之可行性並比較其拌合方式，進而評估拌合技術。

4-6-1 填充料可行性分析

1. 穩定值

綜觀五種填充料於粗級配(III_d)，密級配(IV_b)及瀝青砂級配(VII_a)等三種級配，以乾拌及濕拌二法製作之瀝青混凝土試體，其穩定值均高出規範之要求甚多。

2. 流度值

五種填充料大都能符合流度值之規範要求，僅爐石粉於密級配(IV_b)濕拌及瀝青砂級配(VII_a)乾拌時之流度值有少許超出規範要求。

3. 單位重

瀝青混凝土單位重之測定係配合工地瀝青混凝土之壓實度而設置者，藉此可以控制壓實度，且通常單位重高之瀝青混凝土較能耐久。由於五種填充料其平均單位重相差在 0.2 T/m^3 以內，故知各填充料含量於此部份尚稱合適。

4. 空隙率

適量之空隙可使骨材及瀝青路面受壓變形時，有足夠空間伸縮，綜觀五種填充料於各級配瀝青混凝土之孔隙率皆能符合規範要求。

5. 粒料間空隙

各級填充料在粗級配(III d)及瀝青砂級配(VII a)時其V.M.A.皆能符合規範要求，惟於密級配(IV b)乾拌瀝青混凝土中有石粉及水泥在V.M.A.一項中低於規範，於密級配(IV b)濕拌瀝青混凝土中則多達石粉、水泥、爐石粉及粉塵等四種填充料其V.M.A低於規範，故於此部份需注意瀝青之添加量，以防止瀝青缺少使得路面使用壽命縮短。

6. 最佳瀝青含量

在粗級配(III d)瀝青混凝土中瀝青含量以3~6%為宜，密級配(IV b)瀝青混凝土其瀝青含量以3.5~7%為宜，另瀝青砂級配(VII a)瀝青混凝土其瀝青含量以7~11%為宜。由表4-4~表4-9中可知各填充料之最佳瀝青含量皆在上述要求範圍內。

綜合以上所述，傳統填充料石粉、水泥，其各項馬歇爾試驗值之穩定性均較資源回收細料填充料飛灰、爐石粉及粉塵為高，但資源回收飛灰、爐石粉及粉塵在各項馬歇爾試驗值中大多可符合規範要求。惟爐石粉之使用宜注意其添加量，以免瀝青混凝土過於柔軟而不利行車；又飛灰之添加量亦應注意，以免降低瀝青混凝土之耐久性。但飛灰拌合之瀝青混凝土單位重最輕，對橋樑工程上加鋪瀝青混凝土可能有利。

4-6-2填充料應用效果之比較

在本節擬以工程性質、強度、經濟性及耐久性等四項，利用馬歇爾配合設計試驗值、基本力學試驗值、最佳瀝青含量及車轍試驗值等，以評分方式來比較五種填充料應用之效果。

馬歇爾試驗值以穩定值、流度值、單位重、空隙率及V.M.A.為評比項目，除V.M.A以大於下限值一律加2分，小於下限值一律為0分作評分外，其餘四個評分項目則從優至劣，分別評以5,4,3,2,1分之方式，以乾、濕拌分開評比，再累加做總評比；最後再以總評比成績，由高至低分別給予5,4,3,2,1分。其評比結果詳參表4-19～表4-25。

基本力學試驗值係以抗壓、抗拉、抗剪及抗彎等為評比項目，以乾、濕拌分開評比，從強度高至低，分別給予5,4,3,2,1之評分，最後累加做總評比；再以總評比成績，由高至低分別給予5,4,3,2,1分，其評比結果詳參表4-27～表4-29。

最佳瀝青含量係以粗級配(III_d)、密級配(IV_b)及瀝青砂級配(VII_a)等為評比項目，將乾、濕拌一起評比，從瀝青含量由低至高，分別給予5,4,3,2,1之評分，最後累加做總評比；再以總評比成績，由高至低分別給予5,4,3,2,1分，其評比結果詳參表4-26。

另車轍試驗值則以各試驗輪壓滾壓2000次之最終變形量(mm)為評比項目，以乾、濕拌分開評比，以變形量低為優、高為差，分別給予5,4,3,2,1之評分，最後累加做總評

表4-18 填充料應用於瀝青混凝土效果總評比

項目 評分 填充料	馬歇爾 試驗	基本力 學試驗	最佳含 油 量	車轍 試驗	總計	排名
石 粉	3	5	5	5	18	1
水 泥	5	4	4	4	17	2
飛 灰	2	1	1	2	6	5
爐石粉	4	2	3	1	10	4
粉 塵	3	3	2	3	11	3

表4-19 粗級配乾拌瀝青混凝土評分表

評分	穩定值	流度值	單位重	空隙率	V.M.A.	總計	名次	給分
石 粉	5	2	3	2	2	14	3	3
水 泥	1	1	5	4	2	13	4	2
飛 灰	4	3	1	5	2	15	2	4
爐石粉	2	5	4	3	2	16	1	5
粉 塵	3	4	2	1	2	12	5	1

* 流度值及空隙率之得分以接近規範上下限平均值為優劣評比依據

表4-20 粗級配溼拌瀝青混凝土評分表

評分	穩定值	流度值	單位重	空隙率	V.M.A.	總計	名次	給分
石 粉	3	4	5	2	2	16	3	3
水 泥	5	4	4	4	2	19	1	5
飛 灰	4	2	2	1	2	11	5	1
爐石粉	1	3	4	3	2	13	4	2
粉 塵	2	5	3	5	2	17	2	4

* 流度值及空隙率之得分以接近規範上下限平均值為優劣評比依據

表4-21 密級配乾拌瀝青混凝土評分表

評分	穩定值	流度值	單位重	空隙率	V.M.A.	總計	名次	給分
石 粉	5	3	4	4	0	16	1	5
水 泥	2	5	5	4	0	16	1	5
飛 灰	3	3	1	4	2	13	3	3
爐石粉	1	4	3	5	2	15	2	4
粉 塵	4	2	2	5	2	15	2	4

* 流度值及空隙率之得分以接近規範上下限平均值為優劣評比依據

表4-22 密級配溼拌瀝青混凝土評分表

評分	穩定值	流度值	單位重	空隙率	V.M.A.	總計	名次	給分
石 粉	5	4	2	4	0	15	2	4
水 泥	3	5	4	3	0	15	2	4
飛 灰	2	4	1	2	2	11	4	2
爐石粉	3	3	5	5	0	16	1	5
粉 塵	4	2	3	3	0	12	3	3

* 流度值及空隙率之得分以接近規範上下限平均值為優劣評比依據

表4-23 瀝青砂級配乾拌瀝青混凝土評分表

評分	穩定值	流度值	單位重	空隙率	V.M.A.	總計	名次	給分
石 粉	4	3	3	2	2	14	4	2
水 泥	5	5	2	5	2	19	1	5
飛 灰	1	4	1	3	2	11	5	1
爐石粉	2	2	5	4	2	15	3	3
粉 塵	3	3	4	4	2	16	2	4

* 流度值及空隙率之得分以接近規範上下限平均值為優劣評比依據

表4-24 瀝青砂級配溼拌瀝青混凝土評分表

評分	穩定值	流度值	單位重	空隙率	V.M.A.	總計	名次	給分
石 粉	4	3	2	2	2	13	4	2
水 泥	3	4	4	5	2	18	1	5
飛 灰	1	5	1	4	2	13	4	2
爐石粉	5	4	5	1	2	17	2	4
粉 塵	2	4	3	3	2	14	3	3

* 流度值及空隙率之得分以接近規範上下限平均值為優劣評比依據

表4-25 馬歇爾試驗值總評表

評 分	粗 級 配		密 級 配		瀝青砂級配		總計	名次	給分
	乾拌	溼拌	乾拌	溼拌	乾拌	溼拌			
石 粉	3	3	5	4	2	2	19	3	3
水 泥	2	5	5	4	5	5	26	1	5
飛 灰	4	1	3	2	1	2	13	4	2
爐石粉	5	2	4	5	3	4	23	2	4
粉 塵	1	4	4	3	4	3	19	3	3

表4-26 最佳含油量值總評表

評 分	粗 級 配		密 級 配		瀝青砂級配		總計	名次	給分
	乾拌	溼拌	乾拌	溼拌	乾拌	溼拌			
石 粉	3	5	5	5	4	4	26	1	5
水 泥	5	4	4	4	3	3	23	2	4
飛 灰	1	3	1	1	1	1	8	5	1
爐石粉	2	3	3	3	5	4	20	3	3
粉 塵	4	5	2	2	2	2	17	4	2

表4-27 密級配乾拌瀝青混凝土基本力學評分表

評分	抗 壓	抗 拉	抗 剪	抗 彎	總計	名次	給分
石 粉	5	5	5	4	19	1	5
水 泥	4	4	4	5	17	2	4
飛 灰	1	2	1	1	5	5	1
爐石粉	2	1	2	3	8	4	2
粉 塵	3	3	3	2	11	3	3

表4-28 密級配溼拌瀝青混凝土基本力學評分表

評分	抗壓	抗拉	抗剪	抗彎	總計	名次	給分
石粉	5	4	5	5	19	1	5
水泥	4	5	4	4	17	2	4
飛灰	1	1	1	1	4	5	1
爐石粉	2	2	2	3	9	4	2
粉塵	3	3	3	2	11	3	3

表4-29 基本力學總評分表

評分	乾拌	溼拌	總計	名次	給分
石粉	5	5	10	1	5
水泥	4	4	8	2	4
飛灰	1	1	2	5	1
爐石粉	2	2	4	4	2
粉塵	3	3	6	3	3

表4-30 乾拌瀝青混凝土車轍試驗評分表

輪壓 評分	7.0kg/cm ²		13.2kg/cm ²		19.4kg/cm ²		總計	名次	給分
	25 C	60 C	25 C	60C	25C	60 C			
石粉	5	5	5	5	5	5	30	1	5
水泥	4	4	4	3	4	3	22	2	4
飛灰	3	2	3	2	3	2	15	4	2
爐石粉	1	1	1	1	1	1	6	5	1
粉塵	2	3	2	4	2	4	17	3	3

表4-31 溼拌瀝青混凝土車轍試驗評分表

輪壓 評分	7.0kg/cm ²		13.2kg/cm ²		19.4kg/cm ²		總計	名次	給分
	25 C	60 C	25 C	60C	25C	60 C			
石粉	5	5	5	5	5	5	30	1	5
水泥	4	3	4	3	3	3	20	2	4
飛灰	3	2	3	2	4	2	16	4	2
爐石粉	1	1	1	1	1	1	6	5	1
粉塵	2	4	2	4	2	4	18	3	3

表4-32 車轍試驗總評分表

評分	乾拌	溼拌	總計	名次	給分
石粉	5	5	10	1	5
水泥	4	4	8	2	4
飛灰	2	2	4	4	2
爐石粉	1	1	2	5	1
粉塵	3	3	6	3	3

比；再以總評比成績，由高至低分別給予5,4,3,2,1分，其評比結果詳參表4-30～表4-32。

前述馬歇爾配合設計試驗值、基本力學試驗值、最佳瀝青含量及車轍試驗值等四個部分之評比，總合結果如下表4-18。結果仍以傳統填充料石粉、水泥為佳，而資源回收細料則以粉塵效果最佳，爐石粉次之，而飛灰較差。

4-6-3填充料拌合技術可行性分析

根據調查結果發現國內瀝青混凝土拌合廠所採用之拌合方式大多為乾拌法，乾拌法拌合所產生之塵埃量甚大，是以近年來在政府環保政策及國民環保意識高漲下，環保單位大力推動工業污染防治方案，瀝青拌合廠自然成為加強督導管制之對象；故拌合廠除應注重生產品質外，尚需對污染防制問題加以考量，目前國內拌合廠大多加裝集塵設備，將拌合過程中所產生之溢散粉塵予以回收、控制排放，以達環保法規之排放標準。

然而在裝置初期，集塵設備尚能達到環保要求，但隨著時間之增長，在長期大量粉塵及廢油煙之負荷下，造成集塵設備之集塵效果降低，使得環保問題再度凸顯。因此本研究目地在改變填充料拌合方式，採用填充料濕拌法（即於瀝青混凝土拌合過程中，先將填充料與預熱之瀝青混拌成瀝青膠漿，再與加熱之粗細粒料拌合成瀝青混合料）以減低拌合時產生之塵埃量，如此不但可以減少集塵設備之負荷，更可與之搭配而達到環保要求，並延長設備壽命，

本研究以填充料乾拌法與濕拌法製作之瀝青混凝土進行馬歇爾配合設計、基本力學及車轍等試驗，其試驗結果參見表 4-4～表4-15，以評估填充料濕拌法之可行性及比較填充料乾拌法與濕拌法之優缺點。

4-6-3-1 馬歇爾配合設計試驗

1. 穩定值

由表4-4～表4-9可知，在III_d級配部份：各填充料濕拌法瀝青混凝土之穩定值較乾拌法低，但穩定值皆在規範要求之上。另在IV_b及VII_a級配部份：各填充料濕拌法瀝青混凝土之穩定值皆較乾拌法高。綜合上述，填充料濕拌法於此部份來說其效果優於乾拌法。

2. 流度值

由表4-4～表4-9可知，此部份以較接近規範要求上下限之平均值30為較優來評估時，在III_d及IV_b級配瀝青混凝土部份：填充料乾、濕拌法之流度值互有消長，顯示在此級配時效果接近。在 VII_a級配部份：明顯的看出各填充料濕拌法瀝青混凝土之流度值較低且接近平均值，其效果優於乾拌法，顯示填充料濕拌法瀝青混凝土於此級配有較適宜之柔度及剛性。

3. 單位重

由表4-4～表4-9可知，於III_d、IV_b及VII_a各級配中，填充料乾拌法與濕拌法瀝青混凝土之單位重，相差皆在2% 以內，顯示填充料濕拌法瀝青混凝土於鋪面之壓實度與乾拌法相當。

4. 空隙率

由表4-4～表4-9可知，於III d、IV b 及VII a各級配中，填充料濕拌法與乾拌法瀝青混凝土之空隙率皆在規範要求範圍之內，顯示濕拌法與乾拌法瀝青混凝土皆有適宜之空隙以提供路面受載重時伸縮之空間，可減少路面冒油之現象。

5. 粒料間空隙(V.M.A.)

由表4-4～表4-9可知，於III d及VII a二級配中，填充料濕拌法與乾拌法瀝青混凝土之V.M.A.，皆高於規範要求；顯示於此二級配中，填充料濕拌法與乾拌法瀝青混凝土，於鋪面上不會有瀝青缺少使得路面壽命降低之虞。惟於IV b級配中，填充料乾拌法有石粉及水泥，濕拌法則有石粉、水泥、爐石粉及粉塵等瀝青混凝土之V.M.A.低於標準，因此於IV b級配應用時宜注意瀝青之添加量。

6. 最佳瀝青含量

由表4-4～表4-9可知，於III d、IV b 及VII a各級配中，填充料濕拌法皆較乾拌法之最佳瀝青含量為低（亦即省油），顯示濕拌法較乾拌法節省成本。

4-6-3-2 基本力學試驗

由表4-10及表4-11之試驗數據可知，於抗壓、抗拉（劈裂）、抗剪及抗彎等試驗，填充料濕拌法瀝青混凝土試體強度皆較乾拌法高。

4-6-3-3 車轍試驗

由表4-12～表4-15中兩種試驗溫度25℃、60℃及重車輪壓19.4kg/cm²之2000次車轍變形量可知，填充料濕拌法之變形量皆較乾拌法為低，顯示濕拌法於車轍之抵抗能力優於乾拌法

4-6-4 填充料拌合技術比較及評估

瀝青混凝土之填充料拌合方式有二種：一為乾拌法(填縫理論)，一為濕拌法(膠漿理論)。然根據調查，國內瀝青拌合廠目前所使用之拌合方式絕大多數為乾拌法，然而乾拌法於拌合時易產生大量之塵埃，是以為顧及環保之需求，應多安裝濾袋式集塵機以因應之。然若使用濕拌法，將能夠減少拌合所產生之塵埃量。惟使用濕拌法時瀝青與填充料如何儲存，拌合是一個重要之關鍵，根據審查會中專家學者意見綜合看來，濕拌法有儲存及塞管之困擾，因瀝青比重約1.02，而填充料比重以最輕之飛灰而言其比重亦有2.07，因此瀝青加熱拌合後若不能持續攪拌，則填充料可能會有沈澱情形。且瀝青與填充料拌合後，此粘結材料其粘度增加，易遲滯而造成噴油管之阻塞。

填充料濕拌法瀝青混凝土於馬歇爾配合設計試驗，基本力學試驗及車轍試驗皆有不錯之效果，若能改善上述之障礙，則濕拌法將有良好之發展。本研究在改進方面建議如後述，首先於拌合鼓中先放入填充料，再噴入瀝青與之混合均勻，然後再放入粗、細骨材拌合，即可達到濕拌法之效果，其僅須將原有設備稍作改裝，使之能控制填充料、

瀝青及粗、細骨材進入拌合機之順序，如此即可達成濕拌法之效果。傳統拌合方式如圖4-29所示，本研究建議之拌合方式如圖4-30所示。

茲將填充料乾拌瀝青混凝土及填充料濕拌瀝青混凝土於馬歇爾配合設計試驗，基本力學試驗及車轍試驗等之試驗值，予以評估填充料乾、濕拌法之拌合技術如下述：

1. 馬歇爾配合設計試驗值

由表4-4～表4-9可知，於粗級配(III_d)，密級配(IV_b)及瀝青砂級配(VII_a)可得知，各填充料濕拌法之最佳含油量皆低於乾拌法，顯見濕拌法較乾拌法節省瀝青使用量。又由圖4-31、4-32及4-33各填充料乾、溼拌瀝青混凝土於穩定值之比較可知，於III_d粗級配部分：乾拌法瀝青混凝土之穩定值優於濕拌法瀝青混凝土。於IV_b密級配部分：則為濕拌法瀝青混凝土之穩定值優於乾拌法瀝青混凝土。VII_a瀝青砂級配部分；亦為濕拌法瀝青混凝土之穩定值優於乾拌法瀝青混凝土。故綜合上述結果可知，濕拌法應用在瀝青混凝土上之效果是較優於乾拌法。

2. 基本力學試驗值

由圖4-34～圖4-37顯示，填充料濕拌之瀝青混凝土其於抗壓、抗拉(劈裂)、抗剪及抗彎等力學強度上皆明顯地優於填充料乾拌之瀝青混凝土。因此於此部份濕拌法明顯優於乾拌法。

3. 車轍試驗值

由圖4-38～4-40顯示，在本試驗最大輪壓及於25℃、60℃等試驗溫度下，填充料濕拌之瀝青混凝土其車

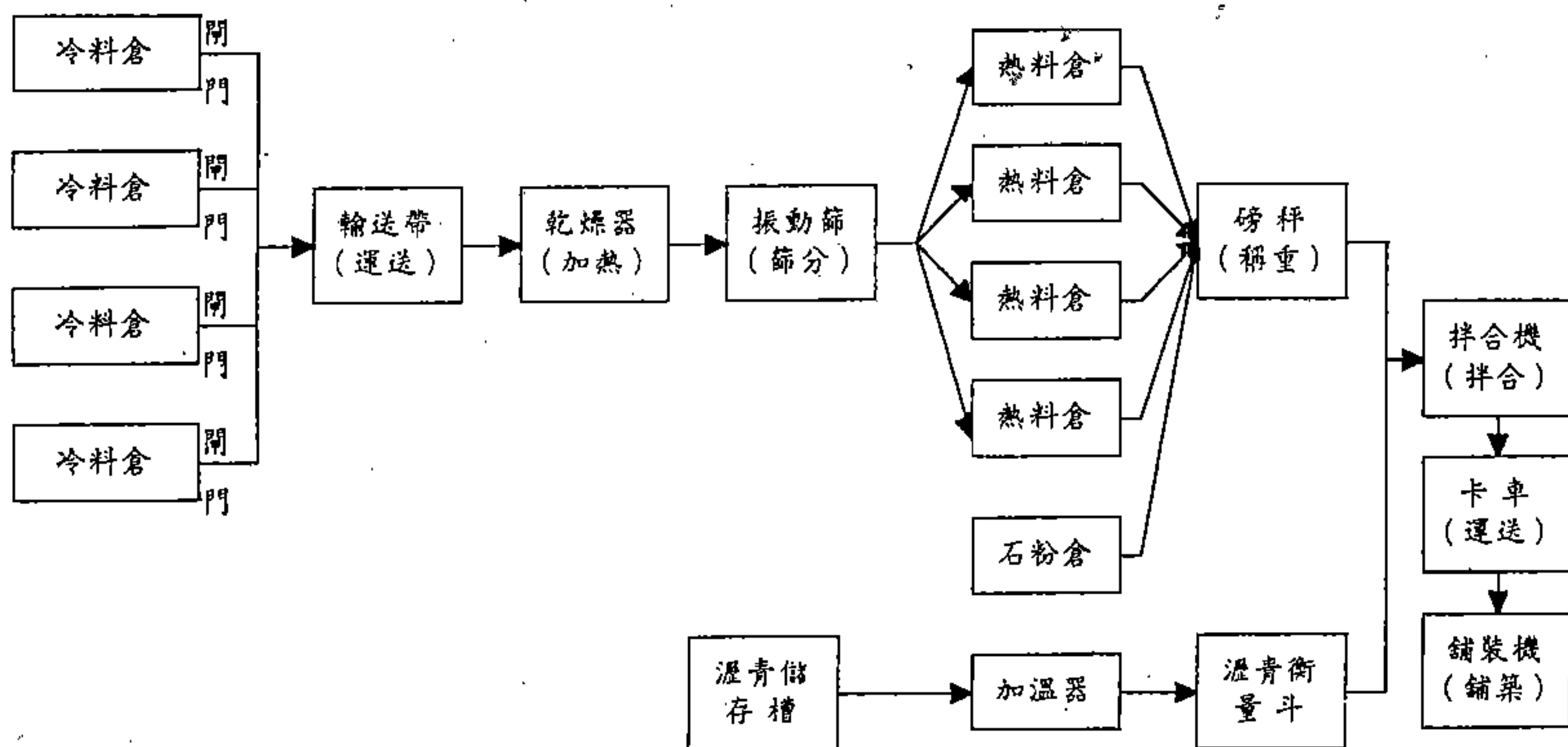


圖 4-29 原衡量式瀝青混凝土拌合廠生產流程

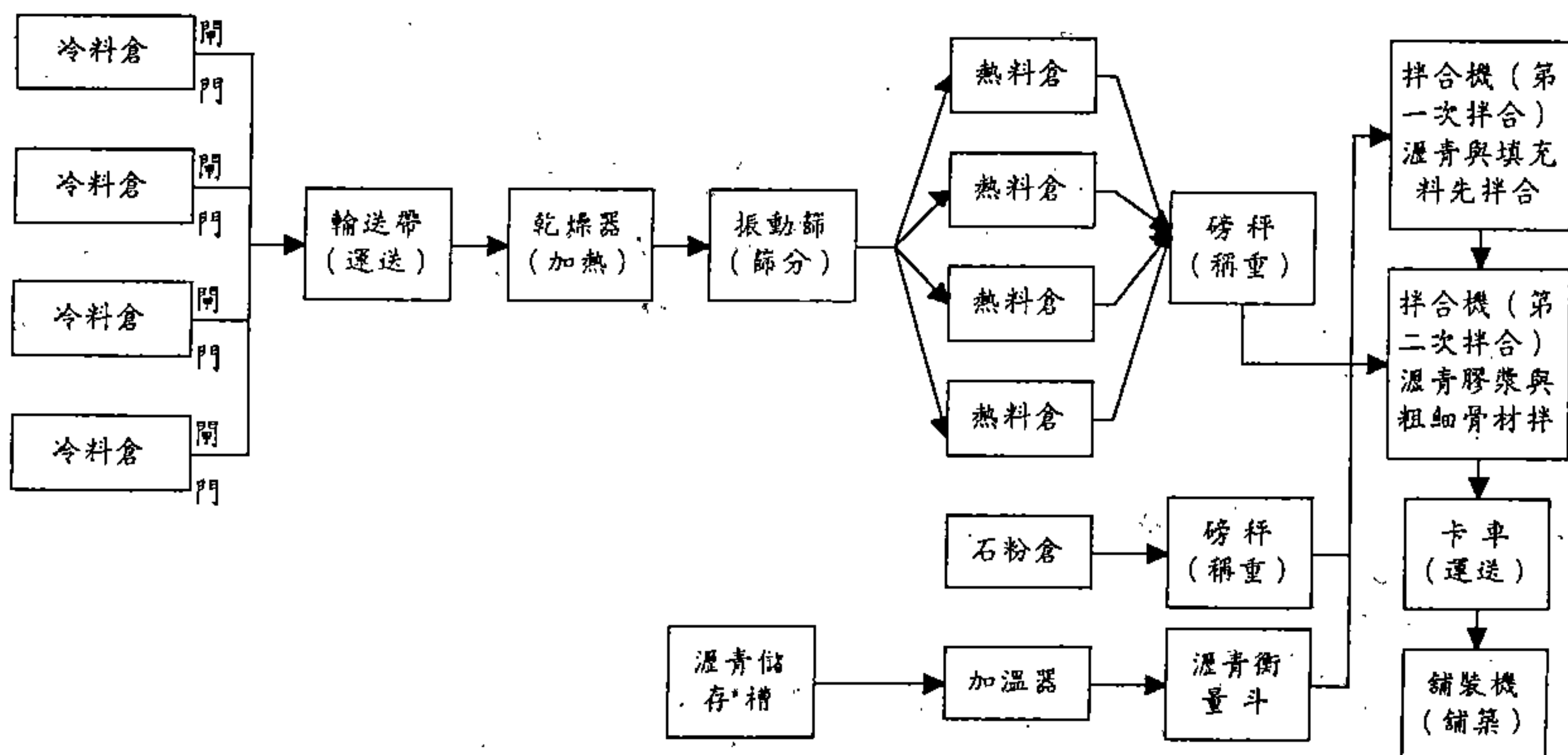


圖 4-30 建議修改後之衡量式瀝青混凝土拌合廠生產流程

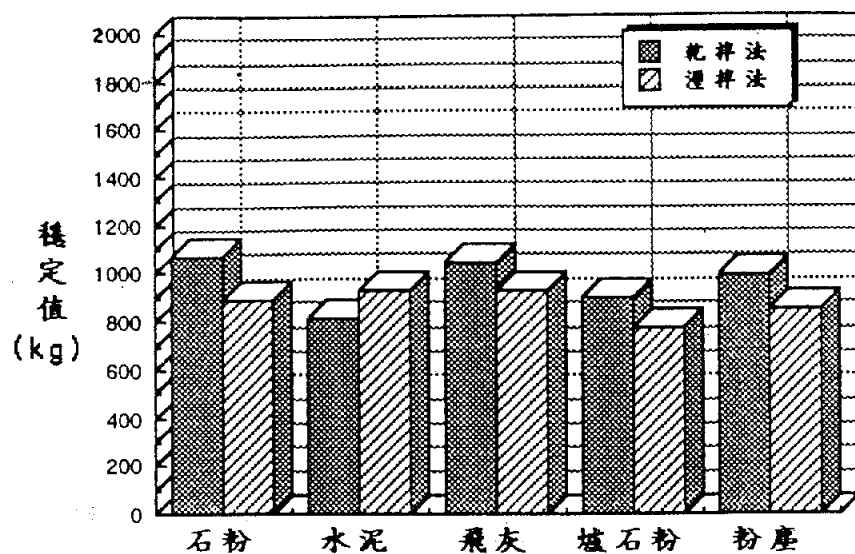


圖 4-31 粗級配 (III d) 乾、溼拌瀝青混凝土穩定值比較

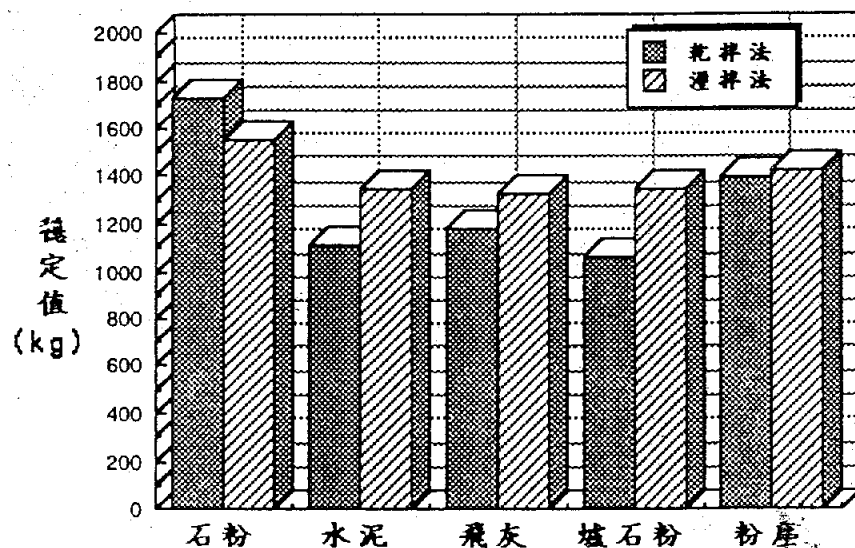


圖 4-32 密級配 (IV b) 乾、溼拌瀝青混凝土穩定值比較

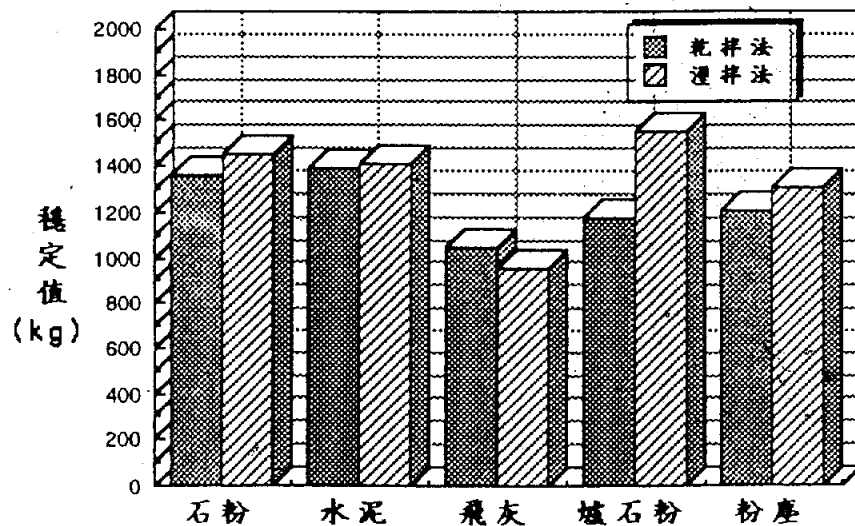


圖 4-33 瀝青砂級配 (VII a) 乾、溼拌瀝青混凝土穩定值比較

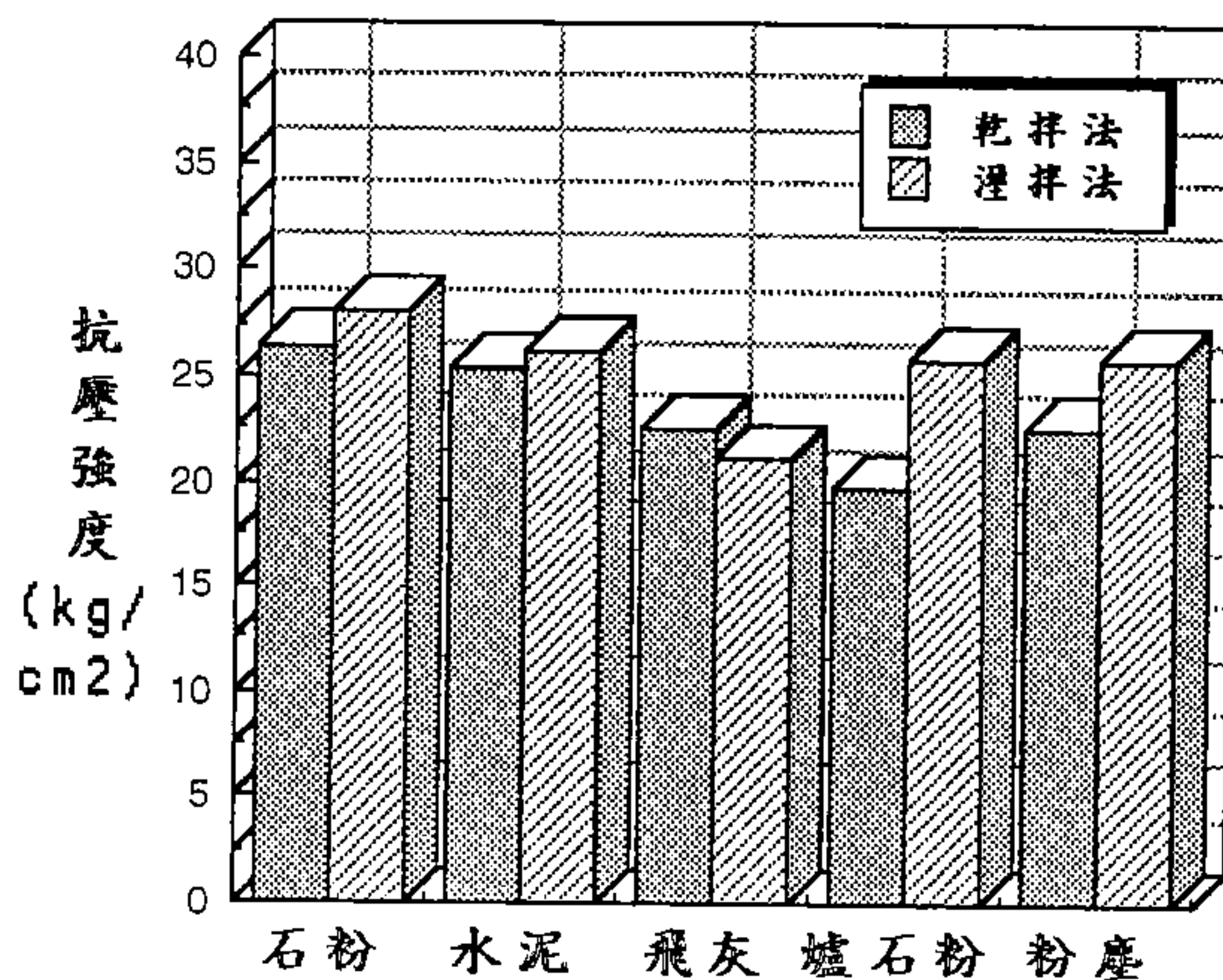


圖 4-34 密級配 (IV b) 乾、溼拌瀝青混凝土抗壓強度比較圖

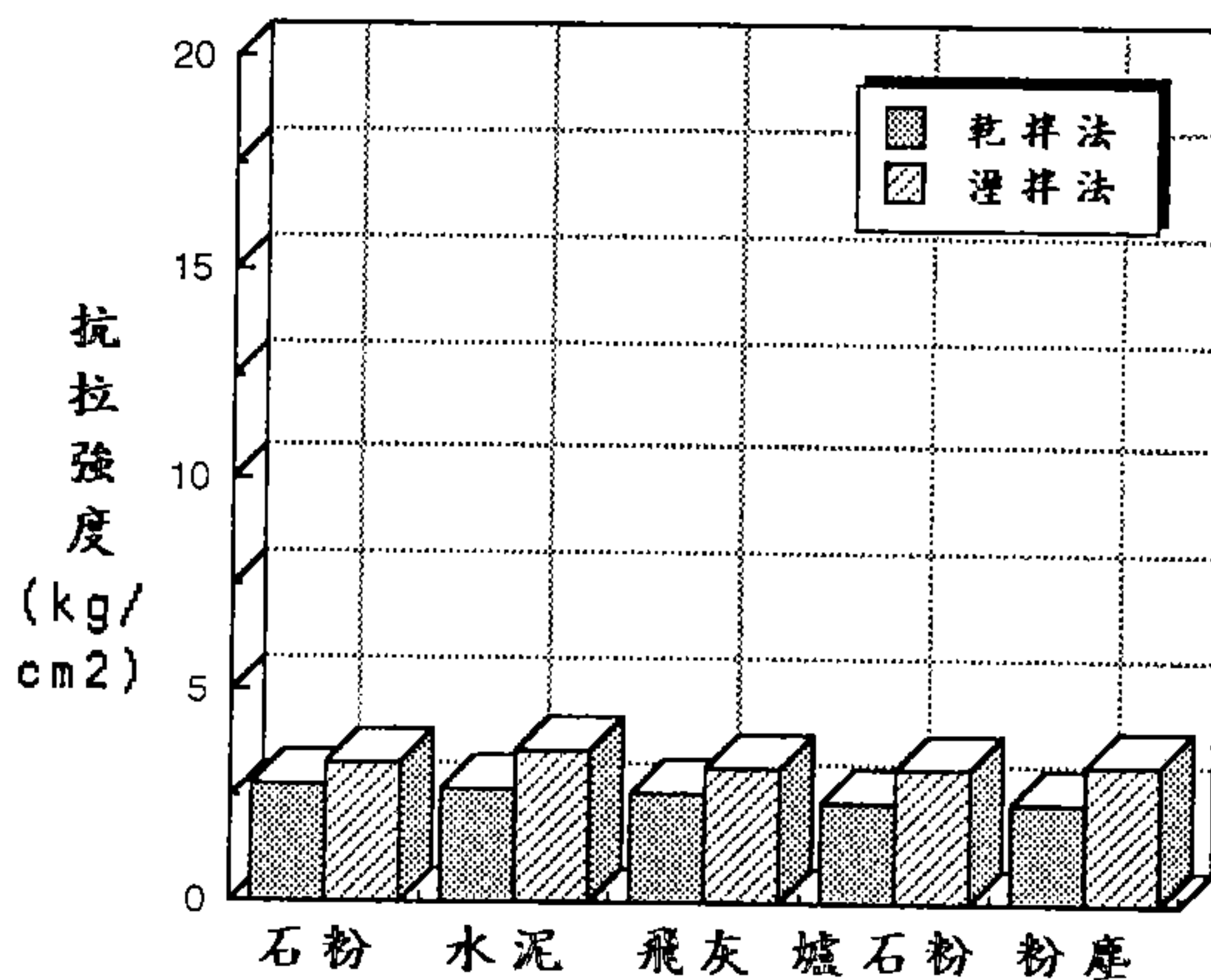


圖 4-35 密級配 (IV b) 乾、溼拌瀝青混凝土抗拉強度比較圖

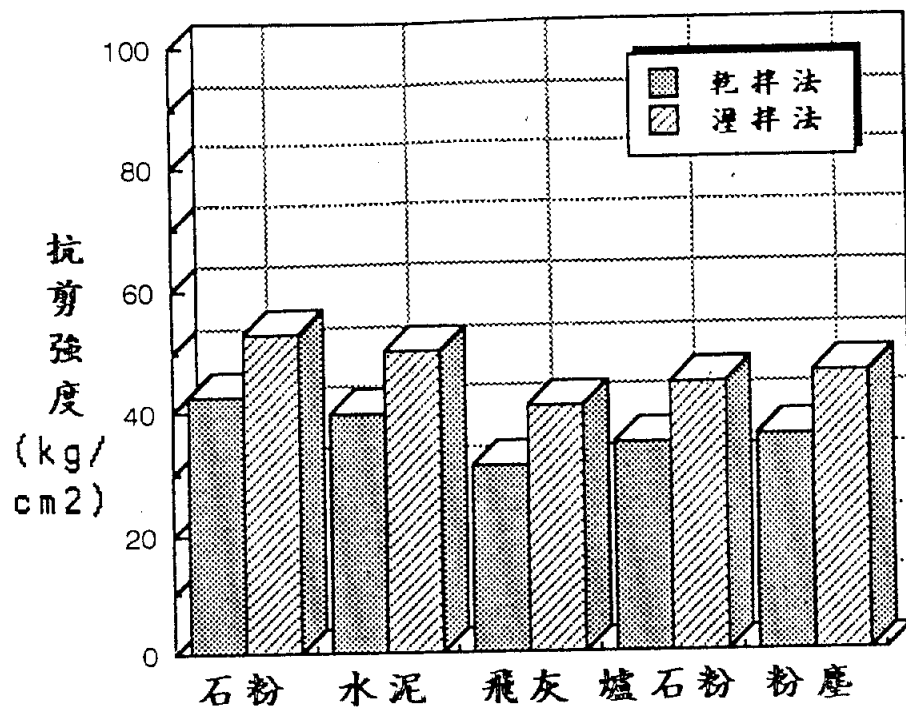


圖 4-36 密級配 (IV b) 乾、溼拌瀝青混凝土抗剪強度比較圖

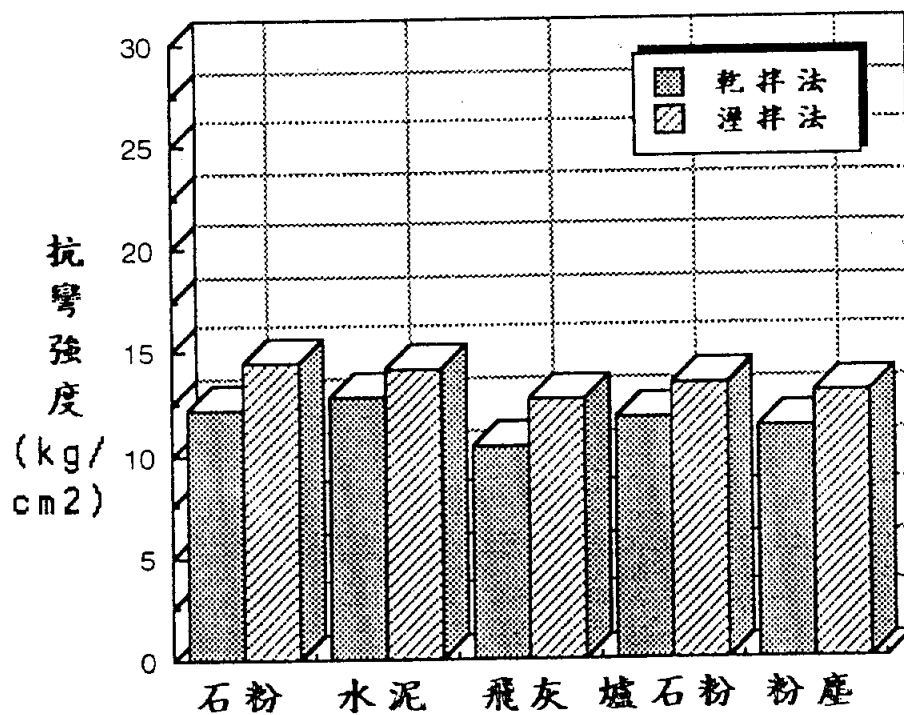


圖 4-37 密級配 (IV b) 乾、溼拌瀝青混凝土抗彎強度比較圖

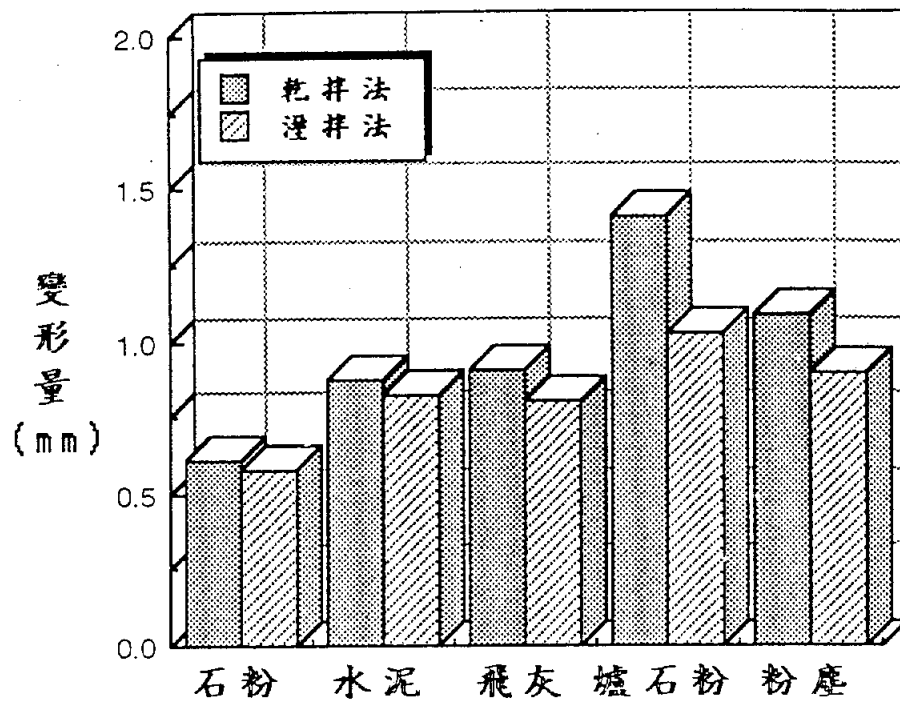


圖 4-38 25°C 輪壓 19.4kg/cm²之車轍變形量比較圖

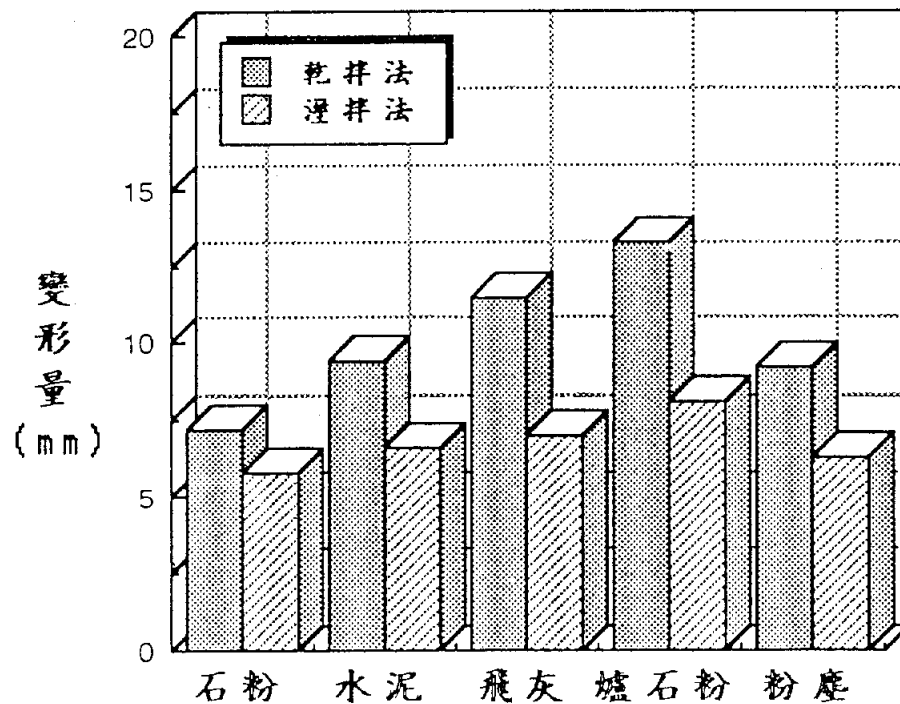


圖 4-39 60°C 輪壓 19.4kg/cm²之車轍變形量比較圖

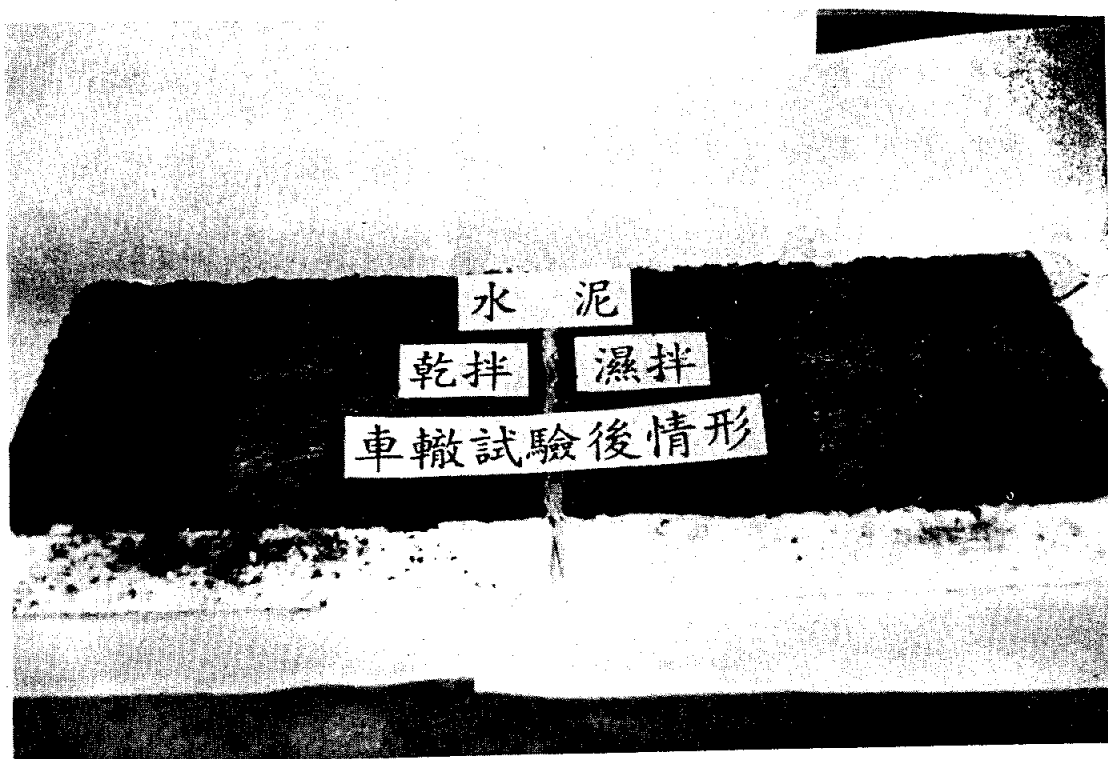


圖 4-40(a)乾、濕拌車轍試體試驗後輪跡之比較

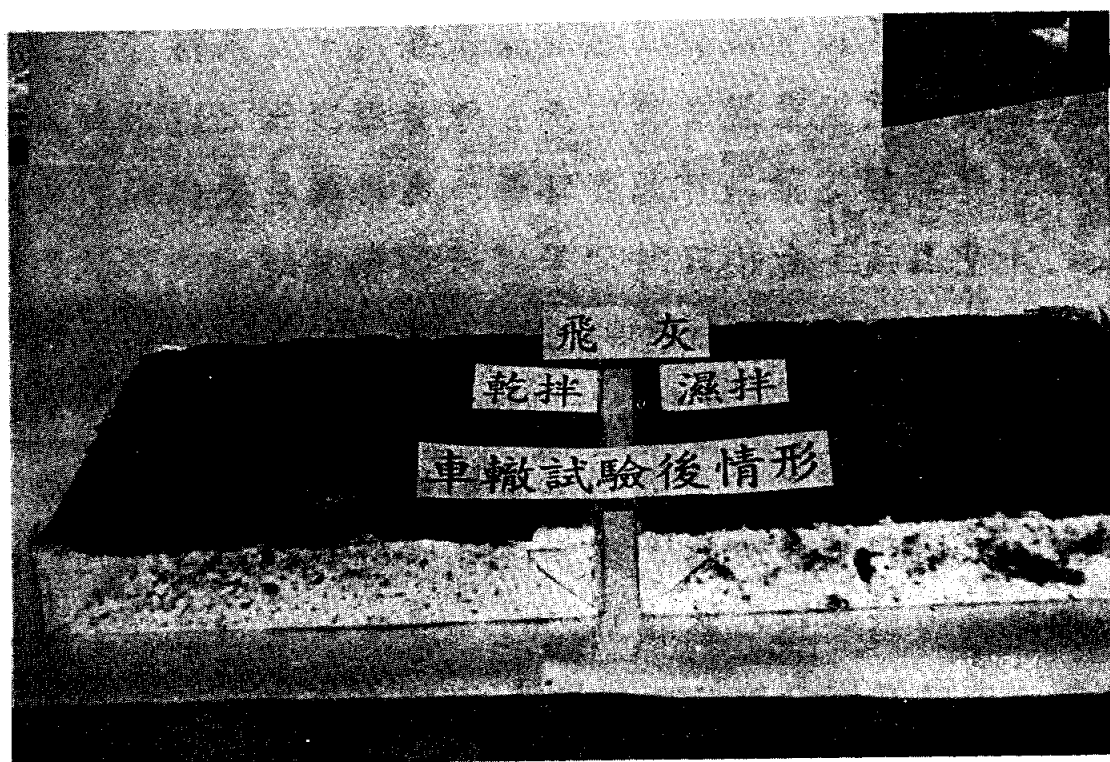


圖 4-40(b)乾、濕拌車轍試體試驗後輪跡之比較

轍變形量(mm)，皆小於乾拌法；蓋因使用填充料濕拌法瀝青先與填充料充分拌合後，再與粗、細骨材拌合，較能完全將骨材充分包裹起來，故其抵抗車轍變形能力較乾拌法高。

綜合上述馬歇爾配合設計試驗值、基本力學試驗值及車轍試驗值之填充料乾拌法及濕拌法於瀝青混凝土上之應用效果可知，本研究使用填充料濕拌法之效果顯然優於乾拌法。

4-7 改質瀝青之可行性分析

瀝青混凝土係指以瀝青材料作為粘結料，與粗細級配粒料、填充料按一定比例均勻拌合以滿足特定物理性質與績效之混合料，瀝青混凝土經鋪築機按照一定之標準鋪築而成之路面稱為瀝青混凝土路面。瀝青混凝土之應用起自西元1931年美國建築廠拌瀝青路面，由於發展歷史短，理論缺乏，受溫度、氣候及時間等因素影響甚鉅，品質控制不易，故在工程界喻為「難侍候的人」[5]。

近年來由於現代化科學之進步，施工機具之改良及品質管制技術之應用，瀝青混凝土品質已日趨完美。目前瀝青混凝土之應用普受世界各國重視，瀝青混凝土應用之範圍已不限於道路一途，在機場跑道、港灣閘壩、鐵路工程及建築工程各方面均有大量使用之趨勢。為期經濟有效地應用瀝青混凝土，研究瀝青混凝土之特性及實施品質管制，保證施工品質乃是當急之務。[5]

觀諸瀝青混凝土之組成材料，瀝青材料通常為天然碳氫化合物、人造碳氫化合物或其所衍生之非金屬衍生物及混合物，因其具有一定之工程性質，已成目前主要之鋪面材料。又粗細級配粒料及填充料，其物性及品質亦皆可控制在規範要求範圍內，似乎可達成完美之組合材料。然瀝青材料在瀝青混凝土中僅作為黏結材，所佔比例不高，但因軟化點低、感溫性高、耐衝擊性低等等特性之影響，對路面之成敗具有決定性之關係。是以為因應高胎壓且重載車輛之增加而產生之路面變型破壞，改質瀝青不失為一個改善之方法。所謂「改質瀝青」即在一般瀝青材中加入瀝青改良添加劑或礦物粉末，以改變其工程性質之謂。在本研究中，以本研究使用之傳統填充料石粉、水泥及資源回收細料飛灰、爐石粉及粉塵等作為瀝青改良添加劑，其添加量以重量為比例，與瀝青之比為1：5；亦即5份瀝青1份填充料，在 140°C之溫度下混煉成瀝青膠漿，再進行瀝青膠漿物性試驗及馬歇爾配合設計試驗，以探討填充料之活性機能及其對瀝青混凝土物理性質之影響。

4-7-1改質瀝青膠漿物性試驗結果及分析

以85/100針入度瀝青與佔瀝青量 20%之石粉、水泥、飛灰、爐石粉及粉塵分別在140°C溫度下混煉，得到之各填充料瀝青混合膠漿依3-2-1節進行改質瀝青膠漿物性試驗，其試驗結果如表4-33。由表資料可知添加五種填充料後之

各改質瀝青，其針入度及延展性皆有下降趨勢，軟化點及粘度提高，茲詳述如下：

1. 針入度

由表4-33得知，各改質瀝青之針入度皆低於原瀝青，顯示改質瀝青相對原瀝青較不受溫度變化影響，在夏天高溫時減低流動性，可防止發生軟化變形之危險，並可減少冒油之現象。另其改善程度由高至低排序為飛灰、粉塵、石粉水泥及爐石粉。

2. 比重

由表4-33得知，各改質瀝青其比重皆高於純瀝青，其比重由大至小排序為水泥、爐石粉、石粉、粉塵及飛灰。

3. 軟化點

軟化點試驗係檢驗瀝青材料抵抗高溫軟化之能力，由表4-33可知，各改質瀝青之軟化點皆高於原瀝青，顯示各改質瀝青有較高之抗溫度變化能力；其由高至低排序分別為粉塵、飛灰、石粉、水泥及爐石粉。

4. 延展性

由表4-33得知，各改質瀝青之延展性皆較原瀝青低，可見改質瀝青之粘性及彈性較原瀝青低，其優點為夏天高溫時有提昇抗車輛輾壓之變形量，惟其缺點為若在寒冷冰點溫度區，有增加脆裂之缺點。其延展性由高至低分別為石粉、粉塵、水泥、爐石粉及飛灰。

5. 粘度

由表4-33得知，各改質瀝青之粘度皆較原瀝青高出甚多，粘度增加會增加與粒料之粘結力，使得瀝青與粒料容易結合，不容易剝離，可增加瀝青混凝土路面之穩定性。但是由於粘度之增加，亦會增加施工之困難。因此改質瀝青之添加量宜加控制，其粘度增加由高至低為飛灰、粉塵、水泥、石粉及爐石粉。

表4-33 改質瀝青物性試驗結果

基本物性	規 範	原瀝青	石 粉	水 泥	飛 灰	爐石粉	粉 塵
佔瀝青量%	—	100	20	20	20	20	20
針 入 度 (1/100cm)	85—100	90.0	73.7	76.0	67.3	76.4	68.3
比重 (25°C)	—	1.028	1.137	1.147	1.113	1.140	1.133
軟化點(°C)	40—60	44.0	48.2	47.8	49.0	47.7	50.1
延展性(cm)	100+	100+	75	70	66	68	72
黏度(150°C)	—	119	179	181	194	165	183

4-7-2 改質瀝青膠漿馬歇爾配合設計試驗結果分析

本階段之瀝青混凝土選用密級配(IVb)，填充料使用傳統石粉填充料，與添加石粉、水泥、飛灰、爐石粉及粉塵等改質瀝青拌合製作馬歇爾配合設計試驗，以瞭解改質瀝青對於瀝青混凝土工程性質之影響，經試驗後其與原添加石粉填充料純瀝青混凝土比較結果，列於表4-34，並分析其結果如下：

1. 穩定值

由表4-34可知，純瀝青混凝土之穩定值皆大於改質瀝青混凝土，其原因可能係填充料添加量過多所致；惟五種改質瀝青混凝土其強度起伏不大，且穩定值皆高於規範甚多，約2倍以上，顯示改質瀝青不僅能獲得很高之穩定值，且品質穩定。

2. 流度值

由表4-34可知，改質瀝青混凝土之流度值皆低於石粉乾拌瀝青混凝土流度值，但均符合規範要求。流度值乃為瀝青混凝土破壞時變形量，因此流度值過低，表示瀝青混凝土過硬，會降低行車之舒適性；若流度過高，表示瀝青混凝土過軟，不僅會增加車轍，且會增加行車之阻力。改質瀝青混凝土之流度值與原瀝青混凝土相差不大，且在規範要求之內，顯示改質瀝青混凝土之柔性適當，且其硬度提高，較能抵抗車轍之變形能力，此與4-7-1節所述針入度提高可相互印證。

3. 單位重

由表4-34可知，改質瀝青混凝土之單位重稍低於石粉乾拌瀝青混凝土單位重，惟相差甚微。另其單位重由大至小，排序分別為水泥、爐石粉、粉塵與石粉（二者幾近相等），飛灰最低，此與改質瀝青之比重大小排列幾近相同。

4. 空隙率

IVb密級配瀝青混凝土，其空隙率規範要求在3～5%，係因瀝青路面之耐久性與空隙率有關，若是空隙率

太高則水份與氣體容易穿透路面使瀝青老化。反之，若是空隙率太低，則路面容易產生冒油現象。是以由表可知，五種改質瀝青混凝土中僅有水泥之空隙率勉強合於上限值要求，餘皆超出規範上限，因此有可能造成水氣穿透路面使瀝青較易老化，因此除水泥以外，其餘填充料改質劑添加量需要再予降低，以使瀝青有較多用量去包裹填塞孔隙，而達到改質之目的。

5. 粒料間空隙(V.M.A)

由表4-34可知，改質瀝青混凝土之粒料間空隙，皆高於石粉乾拌純瀝青混凝土之粒料間空隙，是以改質瀝青混凝土除水泥一種外，皆在規範要求之上，顯見其瀝青含量足夠，不會有縮短路面使用之壽命。惟水泥改質瀝青混凝土，其粒料間空隙稍低於規範，故應注意其瀝青使用量。

表4-34 改質瀝青馬歇爾配合設計試驗值

項 目	規 範	原瀝青	石 粉	水 泥	飛 灰	爐石粉	粉 塵
穩定值(kg)	>680	1724	1354	1555	1568	1494	1455
流 度 值 (1/100cm)	20—40	38	26	28	29	29	28
單 位 重 (kg/m ³)	—	2384	2343	2353	2334	2347	2344
空隙率(%)	3~5	3.70	5.35	4.94	5.70	5.16	5.29
V.M.A.(%)	>14	12.7	14.24	13.86	14.55	14.07	14.18

第五章 結論與建議

5-1 結論

1. 本研究採用石粉、水泥、飛灰、爐石粉及瀝青拌合廠回收粉塵等五種材料作為瀝青混凝土之填充料，除粉塵粒徑稍大外，五種材料應用在瀝青路面工程上均能符合施工規範之要求。
2. 經由瀝青混凝土III_d粗級配、IV_b密級配及VII_a瀝青砂級配之填充料乾拌法馬歇爾配合設計試驗結果顯示；填充料除傳統所採用之石粉及水泥，其效果甚佳外，資源回收細料如飛灰、爐石粉及粉塵等其於IV_b密級配及VII_a瀝青砂級配瀝青混凝土之流度值有合於規範但偏於上限值之趨勢，會造成柔性稍高之瑕疵，但其於各級配之穩定性及空隙率均有良好之品質；故資源回收細料粉塵、爐石粉及飛灰亦是乾拌法瀝青混凝土可取代石粉之優良填充料。
3. 瀝青混凝土III_d粗級配、IV_b密級配及VII_a瀝青砂級配之填充料濕拌法馬歇爾配合設計試驗結果顯示；除傳統填充料石粉及水泥仍能維持其一貫之品質外，資源回收細料飛灰、爐石粉及粉塵，其於三種級配之穩定值甚至有凌駕之趨勢，顯示資源回收細料於濕拌法瀝青混凝土是可取代石粉之優良填充料。
4. 基本力學試驗時，選擇IV_b密級配之填充料乾拌法、濕拌法製作瀝青混凝土試體進行抗壓、抗拉(劈裂)、抗剪及

抗彎等試驗結果顯示；綜合上述四項力學試驗，若依強度高低為使用先後之順序時，則選用之順序依次為石粉、水泥、粉塵、爐石粉及飛灰。

5. 於車轍試驗時，選擇IVb密級配之填充料乾拌法、濕拌法製作瀝青混凝土試體進行試驗。由車轍試驗結果顯示；溫度對各填充料乾、濕拌法瀝青混凝土之車轍變形量影響均甚大，於25°C之試驗溫度時，各填充料乾拌瀝青混凝土並無太大之變形。但於60°C之試驗溫度時，其車轍變形量顯著增加；試驗結果為石粉抗車轍變形量能力最佳，其他依序分別為粉塵、水泥、飛灰及爐石粉。
6. 依據馬歇爾配合設計，基本力學及車轍等三階段試驗結果顯示；填充料乾拌法瀝青混凝土於馬歇爾配合設計試驗結果與濕拌法各有高低，惟於基本力學及車轍等試驗階段，濕拌法均優於乾拌法，顯見濕拌法若能推廣應用，或許可改善現存瀝青混凝土道路工程之瓶頸及給予各瀝青拌合廠有較多之選擇。
7. 依據改質瀝青之物性試驗結果顯示；單一瀝青材料添加改質劑(採用本研究使用之五種填充料)成為複合材料後，能夠改善或加強其物理性質，諸如改質瀝青其較原瀝青之針入度降低，軟化點升高，有助於抵抗車轍變形量之能力。
8. 依據改質瀝青混凝土之馬歇爾配合設計試驗結果顯示；改質瀝青混凝土相對於原瀝青混凝土有降低流度值及提升V.M.A.之效果，惟其空隙率稍高，使用時應注意。

5-2 建議

1. 本研究所採用之資源回收細料飛灰，雖然是取代石粉之優良填充料，惟瀝青使用量較其他填充料偏高，因此使用飛灰作為填充料時宜考慮其使用量與品質之關係，以減少瀝青用量而符合經濟原則。
2. 綜觀馬歇爾配合設計結果；填充料於VIIa瀝青砂級配乾、濕拌瀝青混凝土之流度值雖符合規範要求，但有偏上限值之趨勢，因此填充料於VIIa瀝青砂級配使用時，皆宜減低各填充料之用量。
3. 參考林登峰、林志棟、鄭根福於「1994年瀝青混凝土路面及材料特性研討會」所發表之"瀝青混凝土路面車轍評估及防止對策"一文中提出，英國於車轍深度之控制標準，高速公路應小於10mm，一般公路應小於20mm來看，本研究五種填充料乾、濕拌瀝青混凝土，其車轍變形量均符合一般公路之應用。但飛灰及爐石粉乾拌法瀝青混凝土其車轍變形量超過10mm，故此二種填充料乾拌法瀝青混凝土於本研究使用之IV b密級配及填充料用量，皆不宜作為高速公路之面層材料。
4. 改質瀝青混凝土其馬歇爾配合設計試驗值中有空隙率偏高但穩定定值符合規範之要求情形，可依文獻[2，4]之建議，使用修正粒料級配，使之接近最大密度曲線而加以改善。
5. 濕拌法之效果不亞於乾拌法，因此本研究建議於原有之乾拌瀝青拌合廠設備中，稍微改變流程以達到濕拌之效果。以衡量式瀝青混凝土拌合廠之生產流程之改變為例可

參考圖4-29及圖4-30，另拌合機若能採水平式拌合則效果更佳。

6. 今後研究方向：

- (1) 瀝青混凝土填充料拌合技術在拌合廠上應用之研究。
- (2) 瀝青混凝土填充料濕拌法於路面工程上應用之研究。
- (3) 填充料改質瀝青混凝土策略之研究。
- (4) 填充料改質瀝青混凝土工程特性分析。
- (5) 填充料改質瀝青混凝土於路面工程上應用之研究。
- (6) 資源回收細料取代瀝青混凝土填充料耐久性之研究。

參考文獻

- 1.交通部，(1989)，"公路工程施工規範"，幼獅文化事業公司。
- 2.蔡攀鰲，〈1984〉，"瀝青混凝土"，三民書局，PP.107-110。
- 3.沈得縣，〈1983〉，"瀝青材料在營建工程之利用"，營建工程第六期，pp.61-79。
- 4.林志棟，〈1980〉，"瀝青混凝土配合設計及其原理"，台灣省公路局材料試驗所。
- 5.沈得縣，〈1985〉，"瀝青混凝土材料品質管制"，道路工程材料品質管制研討會論文集，PP.197-264。
- 6.蔡攀鰲，〈1985〉，"道路工程材料概論"，道路工程材料品質管制研討會論文集，PP.113-146。
- 7.王櫻茂，〈1976〉，"土木材料學"，成大土木系。
- 8.沈得縣，〈1987〉，"水泥混凝土工程"，榮工處土木工程品質管制訓練班講義。
- 9.胡長慶，〈1981〉，"煤燃料廢物處理"，台電工程月刊，第221期，pp.56-58。
- 10.郭淑德，〈1981〉，"煤炭的利用"，台電工程月刊，第399期，pp.1-11。
- 11.Berry, E.E., and Malhotra, V.M., 〈1980〉, "Fly Ash for Use in Concrete-A Critical Review", ACI Journal, March-April, PP.59-73.
- 12.潘德華，〈1980〉，"飛灰不是廢料"，台電工程月刊，第385期，pp.17 - 19。

13. 陳銘鑑, 蘇義雄, <1982>, "煤灰於道路之利用", 台電工程月刊, pp.6-10。
14. 黃兆龍, <1984>, "高爐熟料的性質及在混凝土工程上的應用", 營建世界, 第34期, pp.55-59。
15. 黃兆龍, 林草英, 張靖, <1988>, "水淬爐石物化性變動對水泥品質影響及預防對策之研究", 國立臺灣工業技術學院, 技合建字第0352號。
16. 王和源, 黃兆龍, 林草英, <1985>, "爐石製程及添加方式對水泥強度的影響", 國立臺灣工業技術學院營建材料論文序列002。
17. 沈得縣, 黃兆龍, <1986>, "爐石在瀝青混凝土路面工程上應用之研究", 財團法人台灣營建研究中心, TR74003。
18. 江慶陞, <1981>, "爐石的資源化", 技術與訓練, 第6卷9期, pp.37-49。
19. 廖昌業, <1991>, "瀝青拌合廠煙塵處理與粉塵回收利用之探討", 第五屆路面工程學術研討會論文集, pp.727-749。
20. 林志棟, <1991>, "含回收細料瀝青混合物之工程特性", 第五屆路面工程學術研討會論文集, pp.225-254。
21. 吳昭煌, 林志棟, 姜榮彬, <1992>, "瀝青拌合廠集塵回收細料對瀝青膠化物性影響之研究", 第六屆路面工程學術研討會論文集, pp.203-226。
22. 蔡攀熬, <1970>, "公路工程學", 成大土木系。

23. 林炳森, 褚炳麟, 李泰明, <1985>, "飛灰與石粉填充料對瀝青混凝土特性影響之研究", 土木水利, 第十二卷第一期, pp.23-34。
24. 沈得縣, 黃兆龍, <1987>, "高爐石取代瀝青混凝土中砂石級配料策略之研究", 第二屆路面工程學術研討會論文集, pp.545-573。
25. 沈得縣, 黃兆龍, 馬中訓, <1985>, "全爐石瀝青混凝土基本力學性質之研究", 第一屆路面工程學術研討會論文集, pp.321-345。
26. 黃兆龍, 沈得縣, <1987>, "高爐石作為瀝青混凝土級配料之可行性研究", 土木水利, 第十四卷第三期, PP.21-34。
27. 沈得縣, <1986>, "瀝青混凝土基本力學性質之研究", 土木水利, 第十三卷第三期, PP.37-48。
28. 中國土木水利學會, <1986>, "台灣區瀝青混凝土路面施工說明書研討會論文集", 中壢市, 中大土木系。
29. 周權英, <1982>, "瀝青混凝土所用填充料之探討", 公路工程, 第九卷第三期, PP.143-148。
30. 賴正義, 郭淑德, <1990>, "含煤灰之流動性填料在土木工程上的應用", 台電工程月刊, 第507期, pp.45-52。
31. 沈得縣, <1980>, "瀝青材料添加輪胎廢料之特性及在鋪面上應用之研究", 國立成功大學碩士論文。
32. 林登峰, 林志棟, 鄭根福, <1994>, "瀝青混凝土路面車轍評估及防止對策", 1994年瀝青混凝土路面及材料特性研討會論文集, pp.395-410。

33. 蔡攀鰲, (1970), "公路工程學", 成大土木系。
34. 吳啓週, <1988>, "路面再生工法品質檢驗之研究", 國立臺灣工業技術學院碩士論文。
35. 呂學士, <1994>, "橡化瀝青混凝土應用於爬坡路段之路面工程", 1994年瀝青混凝土路面及材料特性研討會論文集, pp.193-206。
36. 鄭正成, 張宇博, <1986>, "熱拌瀝青混凝土拌合廠設備及其檢查與生產控制之介紹與認識", 公路工程月刊, 第13卷3,4,5期。
37. Puziauskas, V.P. [1983] "Filler in Asphalt Mixtures", Asphalt Institute, Reserch Report No.69-2.
38. AASHTO, <1974>, "Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Part II", 11th, Edition, 1974.C
39. ASTM, <1986>, "Roofing, Waterproofing, and Bituminous Materials", ASTM Standards, Vol.04,04.
40. Sargious, M., <1975>, "Pavement and Surfacing for Highways and Airports", Applied Science Publisher L.T.D.
41. Asphalt Institute, (1988) "Mix Design Method for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types", MS-2.
42. Asphalt Institute, <1980>, "Model Construction Specifications for Asphalt Concrete and Other Plant-Mix Types, SS-1.

43. Asphalt Institute, <1979> , "Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types".
44. Milliam L. Hewitt., <1965>, "Analysis of Flexible Paving Mixture by Theoretical Design Procedure Based on Shear Strength", HRR.No.104, PP.63-75.
45. Moavenzadeh F. and O.B.B.Sendze., <1965>, "Effect of Degree of Aging Creep and Relaxation Behavior of Sand-Asphalt Mixtures", HRR.No.104, pp.105-140.
46. Lal N.B.; W.H.Goetz and M.E.Harr, <1967>, "Invariant Properties of a Sheet-Asphalt Mixture", HRR.No.158, pp.63-75.
47. Kamran Majidzadeh, <1969> , "Effect of Water on Behavior of Sand-Asphalt Mixtures Under Repeated Loading", HRR. No.273, pp.99-109.
48. Huang Y.H., <1967>, "Deformation and Volume Change Characteristics of a Sand-Asphalt Mixture Under Constant Direct and Triaxial Compressive Stresses", HRR. No.17, pp.60-74.
49. Schmidt, R.J., W.J. Kari, H.C.Bower, and T.C. Hein, <1960>, "Behavior of Hot Asphalt Concrete Under Steel-Wheel Rollers", HRB Bulletin.No.251, pp.18-37.
50. Besson, F.S., (1923) , "City Pavements", McGraw-Hill Book Co.

51. Tunnicliff , D.G. , (1962), "A Review of Mineral Filler," AAPT, Vol. 31, PP. 118-150.
52. Tunnicliff, D.G. , (1967) "Binding Effects of Mineral Filler," AAPT, Vol. 36, PP. 114.
53. Gietz, R.H. and Lamb, D.R. , (1987) "Effects of Filler Composition on Binder Viscosity and Mixture Stability," HRR, VOL. 256, PP. 1-14.

附錄(一) 期中簡報

「瀝青混凝土填充料拌合技術之研究」期中簡報會議紀錄

一、日期：民國八十三年二月一日(星期二)

二、時間：上午九時三十分

三、地點：交通部運輸研究所六樓會議室

四、主席：馮副所長正民

紀錄：黃萬益

五、出席人員：沈得縣教授 陳式毅副主任

林志棟主任 蔡攀鰲教授

張達德教授 侯和雄組長

六、主席致詞：略

七、評審委員意見：

陳式毅副主任：

1. 填充料在AC中所佔比例雖然不高，但對AC之工程性質有重大影響，本研究對添加不同填充料AC性質有詳細探討，對相關技術發展亦具有實際之貢獻。
2. 本研究所用級配為國內普遍採用者，但我國公路標準規範在五六年前曾作修改，因此級配名稱宜加修改。
3. 填充料採用濕拌法可望增加均勻性及減少粉塵污染，但拌成膠漿後會增加粘度，在泵送及噴灑上可能發生塞管問題，宜加注意。
4. 拌合廠回收之粉塵可能具有塑性，特別在細粒料含泥量偏高情況，選用時宜加注意。
5. 抗壓試驗試體高度及抗彎試驗試體長度略嫌偏低。

林志棟主任：

1. 拌合廠實際作業以乾拌為主，濕拌時若配合其他改質劑處理，應考慮沈澱問題。
2. 填充料之化學組成及物理基本性質建議作進一步試驗。
3. 填充料之添加量應考慮其工作性，添加量與拌合溫度有密切關係。
4. 瀝青混凝土添加不同填充料會導致不同之空隙率及VMA，與拌合及夯實溫度關係密切請加以考慮。
5. 馬歇爾法評估瀝青混凝土可行性值得探討。

張達德教授：

1. 填充料細度如何控制。
2. 水泥、石粉、爐石粉、飛灰及粉塵是否均為代表性材料。
3. 本研究之飛灰係Class F或其他。
4. 小於NO.100篩部分使用填充料是否仍依公路標準。

蔡攀鰲教授：

1. 由於石灰具有抗剝脫功效且其單價低於水泥，當時為何不考慮石灰作為本研究之填充料。
2. 文中提到AC-85瀝青是否指針入度85等級瀝青材料。
3. 是否增加說明目前瀝青拌合廠常用填充料拌合方法，並分析其優缺點。

4. 填充料細度對瀝青膠漿特性影響很大，是否以細度為考量因素。
5. 目前對填充料拌合技術方面之研究仍未深入，建議再補強。

侯和雄組長：

1. 研究單位已按計劃進度執行並完成期中報告，本所承辦單位曾赴研究單位之實驗室參觀瞭解，發現現場備有相當多之試體正要作馬歇爾試驗；另外力學試驗、車轍試驗亦在積極籌劃中，相信在期末報告中應有更好之表現。
2. 濕拌法是填充料與預熱瀝青膠漿處理之方式，可解決瀝青拌合廠在環境污染方面之困擾，值得研究其可行性。
3. 請探討現行拌合廠拌合技術之現況並將乾拌法與濕拌法作優劣點比較。
4. 建議在填充料項目中可否增加石灰，使填充料之研究更加齊全。

八、計畫主持人答覆：(摘要)

沈得縣教授：

1. 我國交通部78年頒佈之「公路工程施工規範」中瀝青混凝土級配係彙整國外各類型級配而成，本研究採用之Ⅲd粗級配合乎ASTM D3515之3/4"級配範圍，Ⅳb密級配合乎ASTM D3515之1/2"級配範圍，

而VIIa級配亦在美國瀝青學會之粗片瀝青砂級配範圍之內，因此期末報告將予以明確註明。

2. 本研究所採用之濕拌法係於拌合過程中，先將填充料與預熱之瀝青混拌成膠漿，隨後將粗、細骨材加入拌合而成瀝青混合料者，並不預先備料，因此應無所謂塞管問題。
3. 本研究除利用傳統填充料石粉及水泥製造瀝青混凝土以比較拌合技術之優劣外，並且擬以資源回收為目的進行飛灰、爐石粉及粉塵等細料取代填充料探討其再生利用之可行性，並不期望效果會比傳統填充料石粉好，但由初步試驗結果顯示，粉塵填充料瀝青混凝土之效果甚佳。
4. 本研究基本力學試驗之目的主要在於各種瀝青混凝土強度互相比較，但若有規範可依循則依規範執行，經重新評估後本研究擬依ASTM D1074採用4" ϕ \times 4" 試體模，以萬能試驗機依靜壓方式製作試體並執行抗壓試驗，至於抗彎試驗時則仍維持原案不作變更。
5. 本研究建議採用之填充料濕拌法因係在填充料與瀝青材料拌合完成後立即與粗細粒料拌合，而不必將膠漿儲放備用，因此並無填充料沈澱問題。
6. 本研究中填充料之試驗擬依研究計畫進行篩分析、比重及細度試驗。
7. 填充料之添加量與瀝青混凝土之工作性及其他物理性質有關，但因研究計畫執行期限有限，本期不考

慮探討填充料添加量與瀝青混凝土性質之關係。

8. 瀝青混凝土之拌合溫度及夯壓溫度與瀝青材料之粘度有關，本研究係以瀝青材料塞氏粘度在 $85 \pm 10 \text{sec}$ ($170 \pm 20 \text{cst}$)時之溫度，約 160°C 作為拌合溫度，在 $140 \pm 15 \text{sec}$ ($280 \pm 30 \text{cst}$)時之溫度，約 140°C 作為夯壓溫度。採用塞氏粘度為基準係以目前工程實務應用為主要考量。
9. 馬歇爾法在國內實際應用已有多多年之實績，因此利用此法評估較易讓人接受且效果顯著。
10. 瀝青混凝土填充料係指用以填塞瀝青混凝土中級配粒料孔隙之材料，依我國「公路工程施工規範」規定填充料應為粒徑至少有70% 以上通過NO.200篩之礦物粉末或灰塵。
11. 石粉與水泥均係由台北市區建材行隨機購買，飛灰為台電興達火力發電廠提供，爐石粉為中聯公司提供係中鋼水淬爐石粉，粉塵由台北市養工處景美瀝青拌合廠提供，均採隨機取樣，因此研究之成果可提供工程界參考，但實際應用時仍應依合約規定再進行材料品質檢驗。
12. 本研究採用之飛灰為F級飛灰。
13. 由於本研究中採用之填充料約有95% 以上通過NO.100篩，且我國「公路工程施工規範」規定填充料之級配為通過NO.50篩者95~100% 通過NO.200篩者至少有70% ，故本研究將粒徑小於NO.100篩之細粒料以填充料取代。

14. 石粉與水泥係傳統採用之瀝青混凝土填充料，其在工程界已應用多年，在此不多作陳述，國內目前已有部分廠商使用石灰作為瀝青混凝土填充料，由於尚在研究開發階段，且石灰並不是資源回收料，因此本研究未列入探討對象。
15. 期中報告中所提「AC-85瀝青」表示方法因易與粘度等級混淆，因此在期末報告中將更正為「85/100針入度瀝青膠泥」之表示方法。
16. 本研究擬針對目前瀝青拌合廠乾拌法拌合過程與建議改善之濕拌法拌合過程均以流程圖表示，並分析其優缺點。
17. 本研究之研究重點在於藉五種填充料之拌合效果印證濕拌法優於乾拌法，並探討資源回收料再生利用之可行性。因此，變化填充料細度不擬列入本研究範圍內，至於填充料細度之探討對瀝青膠漿特性影響之探討，可請運研所列入後續研究計畫內。
18. 本次簡報只是期中報告內容之說明，因此許多研究成果或許不完整或不成熟，包括填充料拌合技術方面之內容均將在期末報告內補強。
19. 現行國內瀝青拌合廠拌合方式大部分係採用填充料乾拌法，因填充料先直接與粗細粒料混合再與瀝青拌合，因此有空氣污染之現象，若能改用填充料濕拌法使填充料先與瀝青混拌再與粗細粒料拌合，則空氣污染之現象可以克服，本研究相關人員將進行

瀝青拌合廠現場訪查，以深入瞭解國內瀝青拌合廠之拌合方式。

20. 國內目前有部分廠商使用石灰作為瀝青混凝土填充料，但效果仍有待評估，且石灰不是資源回收料，亦不被列入傳統常用之填充料中，尤其在有限之研究期限及研究經費下，本年度將石灰列入研究範圍內可能有問題，建議能列入下一年度研究。

九、結論

1. 請研究單位參酌各專家學者意見，儘量在研究範疇內予以納入。
2. 本研究之關鍵填充料及拌合技術，請參照大家意見補強說明，填充料特性及在台灣可能之來源，拌合技術方面請就台灣狀況作比較分析。
3. 本研究所述及之五種填充料及二種拌合技術，國外理論上及實務上發展到何種階段，現行台灣有無實施拌合料之研究分析，請就第二章部份加強國內外經驗分析。
4. 本研究結果可否作為政府現行公路規範修改之參考，請研究單位作成建議，另產業界接受之可行性亦請作成建議(包括材料來源、設備增加及技術可行性等)，最後，後續需繼續深入探討之研究(含計畫名稱)亦請作成建議列入研究報告中。

十、散會。

附錄(二) 期末簡報

「瀝青混凝土填充料拌合技術之研究」期末簡報會議紀錄

一、日期：民國八十三年六月二十五日(星期六)

二、時間：上午九時三十分

三、地點：交通部運輸研究所六樓會議室

四、主席：侯和雄組長

紀錄：黃萬益

五、出席人員：沈得縣教授 陳式毅副主任

林志棟主任 蔡攀鰲教授

李英豪教授

六、主席致詞：略

七、評審委員意見：

陳式毅副主任：

1. 本研究內容充實，試驗證實飛灰、爐渣粉及回收粉塵可以有效地應用於瀝青混凝土，對於工程建設與資源再利用有積極貢獻。
2. 本研究提出濕拌法頗具創意，惟其實務作業技術仍值商榷。
3. 乾拌法添加飛灰很容易造成粉塵污染，其技術仍值研究，曾有廠商將木質纖維製成小包裝再逐一投入打碎拌合，似可參考試用。
4. 一般所謂改質瀝青大都指添加傳統材料以外者，本研究利用填充料濕拌，其定義是否有所不同。

林志棟主任：

1. 拌合溫度是否有考慮。
2. 均勻性如何評估。
3. 抗剪、抗彎及抗壓等力學試驗是否合理化。
4. 粉塵是否具代表性。
5. 車轍試驗結果與耐久性之關係如何，車轍壓力是如何決定。

李英豪教授：

1. 報告內容詳實嚴謹，對國內瀝青混凝土填充料之拌合與應用極有貢獻。
2. 試體製作個數如何，本研究將三點取平均值再求迴歸曲線是否可考慮採用原始資料求曲線。
3. 粉塵粒徑較高與規範不同是否考慮未來研究。

蔡攀鰲教授：

1. 期中報告各委員所提建議，宜說明解決方法或不能克服之原因及是否已納入研究報告中。
2. 本研究主題包括拌合技術之研究及不同填充料之使用，而本文內容大多在拌合技術之研究，填充料之使用內容較少。
3. 剪力試驗所採用之規範出處宜加以說明。
4. 本研究採用馬歇爾試驗之穩定值，請考量可否改用勁度值替代。
5. 乾拌法與濕拌法何者較佳，請增加比較分析之篇幅。

八、計畫主持人答覆：(摘要)

1. 本研究所採用之填充料濕拌法係在拌合過程中先將填充料與預熱之瀝青混拌成膠漿，即第一次拌合，隨即將粗細骨材加入瀝青膠漿中作第二次拌合，類似先將砂與水泥漿拌成水泥砂漿，再將石子放入水泥砂漿內拌成混凝土。
2. 本研究建議可在原有乾拌式瀝青拌合廠設備中，稍微改變拌合作業流程，而達到填充料濕拌之效果。若以衡量式瀝青拌合廠為例，可參考圖4-29及圖4-30，目前瀝青拌合廠之拌合機大多採用垂直旋轉式拌合，若能改為水平旋轉式拌合則效果更佳。
3. 乾拌法添加飛灰及在拌合過程中很容易造成空氣污染，因此本研究建議瀝青拌合廠應採用填充料濕拌方式。至於是否有廠商採用小包裝投入拌合之方式，未曾聽過，但包裝飛灰之袋子應如何取出可能又會產生新問題。
4. 所謂「改質瀝青」乃是指在原來瀝青中加入瀝青改良劑而形成之新瀝青，此種瀝青具有改善原來瀝青特性者。此處所謂瀝青改良劑可以包括聚合物、橡膠、纖維及礦物填充料等。
5. 本研究係以瀝青材料在塞氏粘度 $85 \pm 10 \text{sec}$ (即 $170 \pm 20 \text{cst}$)時之溫度，約 160°C 作為拌合溫度。在塞氏粘度 $140 \pm 15 \text{sec}$ ($280 \pm 30 \text{cst}$)時之溫度，約 140°C 作為夯壓溫度。

6. 本研究在試體製作時均依規範要求力求拌合均勻及夯壓確實，目前試體均勻性之評估可採用超音波試驗來進行。
7. 為深入瞭解瀝青混凝土受外力作用之影響，及比較各種填充料在路面工程上應用之效果，本研究亦進行基本力學試驗。由於瀝青混凝土基本力學試驗目前缺乏規範可供依循，故本研究所用之各種試驗方法，除抗壓試驗依ASTM D1074進行外，抗彎、抗拉及抗剪試驗，皆參考一般材料試驗文獻及自行設計模具而執行試驗。
8. 粉塵係指瀝青拌合廠利用濾袋式集塵機所回收之微細粉末，本研究所採用之粉塵是取自台北市養工處景美瀝青拌合廠回收之粉塵。基於資源回收再利用之考慮，因此並不刻意挑選良好之粉塵而是採用隨機取樣。
9. 本研究車轍試驗機採用D200×W50標準膠輪，輪壓有7kg/cm²、13.2kg/cm²及19.4kg/cm²等三種。本研究車轍試驗採用模擬車輪滾壓2000次(來回為一次)求其沈陷量，若沈陷量愈小，顯示其動穩定值愈高，亦即抵抗車轍之能力愈高，是以較能耐久使用。
10. 本研究中試體製作之個數，原則上圖中一點是三個試體為一組平均之結果。以馬歇爾試驗為例，每一個含油量製作三個試體，以三個試體結果平均，但所求出之值亦不一定是採取平均值之方式，亦有以

較接近之二個數據平均而剔除另一不佳數據，或以三個接近值之數據平均而得到一點。若不取平均值而進行迴歸，則很難在同一圖上進行多條曲線之比較。

11. 本研究中粉塵粒徑較高，而被採用作為試驗材料乃是基於資源回收利用可行性之考量，因此不刻意挑選，若一定要符合規範要求則可以採用先篩分析之方法去除較大粒徑部分，但如此作會增加使用成本。
12. 期中簡報時各委員所提之建議，均已儘量納入期末報告內加以討論，若有遺漏部份仍請各位委員提出指正。
13. 填充料之應用在第四章各節均有所討論，填充料之應用可針對不同之工程性質、力學性質及車轍抵抗等項目加以評估及選用。
14. 本研究之穿孔剪力試驗法可參考文獻[44]，穿孔剪力在鋼筋混凝土平版構造中設計柱支承非常重要，本研究依此種理念而決定採用穿孔剪力試驗。
15. 由於馬歇爾穩定值是目前路面工程上評估瀝青混凝土品質之主要指標，已有確定之評估準則可資依循，而勁度值之名詞並未普遍應用於工程上，勁度值之合格標準尚無資料可查，因此用勁度值取代穩定值目前時機恐未成熟。
16. 本研究報告在第4-6節已對填充料乾拌法及填充料濕拌法兩種拌合技術作詳細之比較及分析，而得知

濕拌法效果優於乾拌法。本研究在定稿之前將再針對各位評審委員之意見進行探討並納入期末報告內。

九、結論：

1. 本研究報告初稿內容豐富，可見研究過程中研究單位已花費大量之人力於試體製作與實驗之執行，用心可嘉。
2. 各審查委員所提建議均為目前一般工程界之微結，相當中肯，請研究單位視實際情形酌予補強說明。
3. 本研究強調資源回收再利用之可行性，請就回收材料再作補充說明。
4. 拌合技術中乾拌法與濕拌法比較分析部分請補強，濕拌法實用技術之落實，可待後續研究克服。
5. 抗剪試驗之方法及儀器請再補充介紹說明。

十、散會。