



CONSTRUCTION
INDUSTRY COUNCIL
建造業議會



混凝土和水泥砂漿 生產用河砂替代品研究 (第二階段) 最終報告

行政總結

過量開採河砂會對環境產生負面影響並可能影響河堤安全。基於此原因，限制河砂開採已經成為全球趨勢。對於香港本地而言，由於從大陸入口的河砂受到限制，導致在混凝土和砂漿生產中作為細骨料使用的河砂短缺。有鑑於此，建造業議會分兩階段（第一階段和第二階段）開展本項研究項目，探索可用於混凝土和砂漿生產的河砂替代品。第一階段的研究已於二〇一三年四月完成。本份報告是第二階段研究的總結。

在第一階段的研究，已對現有的混凝土和砂漿用骨料標準進行了詳細的文獻綜述。但在完成了第一階段研究後，又先後發表了四部新標準。這四部新標準的文獻綜述包含在本份報告中。在這些標準中，篩尺寸和粗細骨料劃分各有不同。由於在英國標準（香港也使用）和中國標準中對篩尺寸和粗細骨料劃分非常接近，並且有部分石礦場同時向香港和大陸市場供應骨料，沿用英國標準中對篩尺寸和粗細骨料劃分的規定應是更好的選擇。實際上，香港建築標準 CS3: 2013 基本上也是遵循了英國標準。

在各類標準中，對微細粉含量限值的規定和對微細粉含量有害性的評估是主要關注的問題。由於尚未有很好的方法對骨料中的微細粉進行有害性評估，因此通常的做法是限制微細粉含量，希望以此降低在骨料中存在有害物的風險。對於河砂而言，由於其微細粉含量受到流水的沖洗，其微細粉含量會比碎石粉（即將石塊粉碎得到的細骨料）的微細粉含量低。另一個重要問題是，由於要求的不同，為混凝土用骨料訂立的建築標準 CS3: 2013 並不適用於砂漿用骨料。因此，有需要專門為砂漿用骨料訂立一部新的建築標準。同時，由於碎石粉中較高的微細粉含量會對砂漿工程造成一定影響，因此有必要進一步降低砂漿用骨料的微細粉含量限值。

在第一階段的研究中，已發現可用於混凝土中替代河砂的碎石粉並不十分適合用於水泥砂漿，原因在於其過高的微細粉含量。即使是用於混凝土，碎石粉中過量的微細粉也可能造成影響。所以，最好的方法是對碎石粉進行處理以降低和控制它的微細粉含量來滿足不同的應用，並通過加工來改善粒形和級配，從而提高性能。經過這些處理後的碎石粉，稱之為機製砂。而機製砂或者是混凝土和砂漿用河砂和碎石粉最好的替代品。

在第二階段的研究，開展了關於微細粉含量對混凝土和砂漿性能影響的試驗研究。針對混凝土的試驗，結果顯示：（1）微細粉含量對和易性有著顯著的不利影響；（2）微細粉含量對強度的影響較小，除了在很低的水灰比之下（可能是

由於較難振搗的原因)；(3)微細粉含量對黏聚性和抗離析性有著一定的有利影響。整體而言，10%的微細粉含量是一個較為合適的限值。當然，高於10%的限值也未嘗不可，但須要進行試配來保證和易性要求得到滿足的同時又不會過量使用減水劑。另一方面，針對砂漿的試驗，結果顯示：(1)砂漿的抹灰性能受砂漿的濕潤度影響很大，而濕潤度受水含量的影響似乎大於微細粉含量的影響；(2)達到8%的微細粉含量對抹灰性能和強度仍沒有不利影響。整體而言，對所有砂漿用細骨料，將其微細粉含量限制在3%是沒有必要的。不過，仍建議將砂漿用細骨料的微細粉含量限制在5%，以避免微細粉太大的變化。

另外，在第二階段也開展了關於粉碎廢玻璃和回收細骨料作為河砂替代品的試驗研究。關於粉碎廢玻璃的研究表明：(1)以50%粉碎廢玻璃細骨料來生產強度等級45 MPa的預製鋪路磚是可行的，而以100%粉碎廢玻璃細骨料來生產強度等級35 MPa的預製鋪路磚也是可行的；(2)以50%粉碎廢玻璃細骨料來生產用於抹灰工程的砂漿是可行的。另一方面，關於回收細骨料的研究表明：(1)用於混凝土，以100%回收細骨料生產強度等級30 MPa的混凝土時，微細粉含量不應超過5%，而生產強度等級20 MPa的混凝土時，微細粉含量不應超過10%；(2)用於砂漿，以50%的回收細骨料來生產用於抹灰工程的砂漿是可行的，但微細粉含量不應超過5%。

由熟手工人進行的關於機製砂和河砂的現場試驗也同期開展。現場試驗表明：機製砂和河砂均適合生產用於抹灰工程的砂漿。相對而言，最大粒徑為2.36毫米的機製砂在進行混凝土垂直牆面和天花板抹灰時的效果較好。整體而言，機製砂的抹灰性能與河砂的抹灰性能非常接近。

一部針對砂漿用骨料的建議規格初稿已於本研究的初期撰寫完成。為了可與建築標準CS3: 2013相配合，該建議規格的初稿遵循了CS3: 2013的整體要求並採用了其中的試驗方法。該建議規格的初稿已於2013年發給相關持份者進行諮詢。諮詢過後，對初稿作了少量修改並進行了第二輪的諮詢。在第二輪諮詢中沒有收到須要進一步修改的要求，因此修改後的建議規格原則上通過。

最後，我們對三家公司進行了訪問。一家公司已遵照上述建議規格的要求進行了機製砂的生產。另外兩家公司表示有興趣開展粉碎廢玻璃和回收細骨料的生產，但希望政府在這方面能有更多支援。

目錄

	頁碼
1. 背景	1
2. 研究目標簡述	1
3. 河砂和河砂替代品綜述.....	1
4. 最新標準的文獻綜述.....	3
4.1 香港建築標準 CS3: 2013.....	3
4.2 歐洲標準 BS EN 12620: 2013.....	4
4.3 歐洲標準 BS EN 13139: 2013.....	4
4.4 美國標準 ASTM C33/C33M-13.....	5
4.5 小結與建議.....	6
5. 關於細骨料中微細粉含量對混凝土和砂漿影響的試驗研究.....	7
5.1 關於細骨料中微細粉含量對混凝土性能的試驗研究.....	8
5.2 關於細骨料中微細粉含量對砂漿性能的試驗研究.....	10
6. 關於粉碎廢玻璃和回收細骨料的可行性研究.....	14
6.1 關於粉碎廢玻璃的可行性研究.....	14
6.2 關於回收細骨料的可行性研究.....	17
7. 將機製砂用於抹灰工程的現場試驗.....	19
8. 訪問持份者.....	21
8.1 對文輝泰集團有限公司的訪問.....	21
8.2 對嘉華建築材料有限公司的訪問.....	22
8.3 對深圳市綠發鵬程環保科技有限公司的訪問.....	23
8.4 總結.....	23

9. 討論	24
9.1 機製砂作為河砂替代品	24
9.2 粉碎廢玻璃的可行性	25
9.3 回收細骨料的可行性	26
10. 建議規格	27
10.1 建議規格草案初稿	27
10.2 對持份者的諮詢	28
11. 結論	30
11.1 對文獻綜述的結論	30
11.2 對混凝土用細骨料的結論	31
11.3 對砂漿用細骨料的結論	31
11.4 對粉碎廢玻璃可行性的結論	32
11.5 對回收細骨料可行性的結論	33
11.6 對機製砂作為河砂替代品的結論	33
附錄 A 對發表於 2013 年關於混凝土和砂漿用骨料的最新規格的文 獻綜述 (香港 CS3, 歐洲 BS EN 12620, 歐洲 BS EN 13139 和 美國 ASTM C33/33M)	35 - 48
附錄 B 關於細骨料中微細粉含量的影響, 以及粉碎廢玻璃和回收細 骨料的試驗報告	49 - 89
附錄 C 機製砂和河砂用於抹灰工程的現場試驗報告	90 - 96
附錄 D 砂漿用骨料建議規格	97 - 105
附錄 E 持份者對砂漿用骨料的建議規格的反饋	106 - 115

1. 背景

如很多地方一樣，香港也把河砂作為一種廣泛使用的建築材料。但是，過量開採河砂會對環境產生負面的影響並可能導致河堤失穩。基於此原因，限制河砂開採已經成為全球趨勢。對於香港本地而言，由於從中國大陸入口河砂受到限制，導致在混凝土和水泥砂漿生產中作為細骨料使用的河砂短缺。

有鑑於此，建造業議會開展了本項研究項目：“混凝土和水泥砂漿生產用河砂替代品研究”，探索適合於香港本地作為細骨料使用的河砂替代品。研究的最終目的是為了找出可替代河砂的合適材料和產品，並建立相關的指引和規格來指導河砂替代品在工務工程和非工務工程中的應用。

本項目分為兩個階段。第一階段的目標在於從天然和回收材料中找出經處理可作為河砂替代品用於本地建築工程的材料。該階段的研究已於2013年4月完成。第二階段的研究旨在通過綜合實驗室測試和現場試驗，發展可作為河砂替代品的產品，並草擬河砂替代品的建議規格。本報告便是對第二階段研究成果的說明。

2. 研究目標簡述

“混凝土和水泥砂漿生產用河砂替代品研究（第二階段）”的研究目標包括：

- (1) 基於現有歐洲、英國和中國標準，草擬一部適用於香港本地的砂漿用骨料標準；
- (2) 開展微細粉含量對混凝土的影響研究，以確定最理想和允許的微細粉含量，由此草擬混凝土用細骨料的通用指引；
- (3) 開展微細粉含量對不同類型砂漿的影響研究，以確定最理想和允許的微細粉含量，並由此草擬一部適合不同類型砂漿的骨料規格，以及草擬一部關於機製砂的分類規定；
- (4) 研究粉碎並處理後的回收廢玻璃作為砂漿骨料使用的可行性；
- (5) 研究粉碎並處理後的廢舊混凝土作為混凝土和砂漿骨料使用的可行性。

3. 河砂和河砂替代品綜述

在建築工程中，河砂被用於生產混凝土和水泥砂漿。在混凝土的生產中，河砂被作為細骨料使用，而在砂漿的生產中，其被作為唯一的骨料使用。河砂通常是通過挖掘河床取得。其特點在於：由於受到常年的磨蝕，它的粒形較為圓滑；也由於常年的沖刷，其含泥量較低。

這兩個特點使得河砂能夠比起其他材料（例如碎石粉）更好地提高混凝土和砂漿的和易性。基於這個原因，在指定的和易性要求下，河砂的使用可以減少需水量和減水劑需要量，從而可以在配合比設計中減少水含量和水泥含量。此外，由於太多的泥會對混凝土和砂漿的和易性以及強度產生負面影響，而河砂的含泥量較低，因此河砂的使用可以提高混凝土或砂漿生產的質量。

但是，河砂同樣具有兩個缺點：第一，由於河砂是從河流上游不同地方由流水攜帶而來，如果上游存在不同的礦物學情況，那麼對判斷所使用的河砂是否會引起鹼骨料反應存在一定困難。第二，從接近海域的河口處採掘的河砂可能會受到鹽污染，從而導致所生產的混凝土或砂漿的氯化物含量過高。

但是，香港本地的建築行業，如很多其他地方一樣，已經使用了河砂幾十年。事實上，香港混凝土或砂漿的生產經驗主要都是基於河砂的。使用那些特性可能與河砂有很大不同的河砂替代品，對本地建築行業而言，難免需要一段適應時間。因此，除了要確定合適的河砂替代品以外，確定河砂替代品的特性以及確定河砂替代品對混凝土或砂漿性能的影響也非常重要。當了解這些後，河砂替代品的潛在用家才會對河砂替代品與河砂之間的不同有更清楚的認識。

借此發展河砂替代品是難得的契機，我們找到的可能不僅僅是河砂的替代品，甚至還可能是比河砂更好的材料。例如，通過篩分後再混合的方法來控制粒徑的分佈情況，是有可能優化粒徑分佈，從而獲得混凝土或砂漿最好的整體性能。此外，通過風選或水洗的方法，有可能降低和控制含泥量，從而降低混凝土和砂漿生產中的需水量和減水劑用量。同時，在理論上也可以通過對骨料顆粒進行一定的研磨，使其形狀更加圓滑，從而提高細骨料的堆積密實度（提高堆積密實度可以減少所用水泥漿體體積，從而減少水泥的消耗和碳足跡，以及提高尺寸穩定性）和提高混凝土或砂漿的和易性。這種通過加工處理並稱之為“機製砂”的細骨料，或許能為我們帶來更綠色、更高性能的混凝土和砂漿，而這正是普通河砂所不能做到的。

顯然，最合適的河砂替代品是碎石粉，尤其是再經過處理後達到一定規格要求的“機製砂”。機製砂作為河砂替代品的規格要求應根據實際應用的情況確定，且對生產成本和所須達到的性能之間要有一個平衡。由於河砂替代品只是建議用於普通混凝土（不包括高強混凝土和高性能混凝土），預製鋪路磚和隔牆砌塊的砂漿，以及抹灰和打底的砂漿，本項目中制訂的規格，將遵循在保證可用性的前提下對要求盡可能少的原則，以使機製砂的生產成本控制在合理水平。關國雄教授已與一些石礦場營運商進行過溝通，並了解到按照本研究草擬的建議規格進行生產的機製砂的成本不會比現有河砂的價格高（在撰寫本報告時，香港河砂的價格是每噸 HK\$150）。

如果用家希望獲得比建議規格草稿中所規定的機製砂有更優性能的機製砂，來生產高強混凝土、高性能混凝土、長距離泵送混凝土和自流平砂漿等，則建議用家可與供應商就特別要求進行溝通協商。對這些特殊要求，需要用家與供應商自行開展相關研究，而不在本項目的研究之列。

另一方面，仍有存量巨大的惰性固體廢棄物，例如：從用後玻璃瓶中產生的廢玻璃，從建築廢料中來的廢舊混凝土等。這些惰性固體廢棄物會被倒入堆填區，並在不久的將來，將堆填區填滿。這些廢棄物，經過嚴選和處理，作為河砂替代品用於混凝土和砂漿生產是完全有可能的。使用這些回收廢棄物，不但可以緩解堆填區的壓力，還可以減少香港對河砂的使用。所以，粉碎廢玻璃和回收細骨料作為河砂替代品的可行性也在本項目的研究之中。但須要指出的是，廢物回收利用行業仍需要政府在政策方面的大力支援。

4. 最新標準的文獻綜述

對混凝土或砂漿用骨料的詳細綜述已在本項目的第一階段完成。但是，完成第一階段研究（2013 年 4 月）後，又相繼發表了四部相關標準。這些標準包括：

- (1) 香港建築標準 CS3: 2013 Aggregates for concrete
- (2) 歐洲標準 BS EN 12620: 2013 Aggregates for concrete
- (3) 歐洲標準 BS EN 13139: 2013 Aggregates for mortar
- (4) 美國標準 ASTM C33/C33M-13 Standard specification for concrete aggregates

我們已對這些與本項目有密切相關的標準進行了深入研究。對於 CS3: 2013，關注的重點在於：針對砂漿用骨料的各項條款的適用性，以及如何兼容混凝土用骨料的要求和砂漿用骨料的要求。對於 BS EN 12620: 2013 和 ASTM C33/C33M-13，關注的重點在於：歐洲和美國對級配、微細粉含量、粉體質量的最新要求。對於 BS EN 13139: 2013，關注的重點在於：對級配、微細粉含量、粉體質量的最新要求，以及這些要求在香港的適用性。

一份對最新標準的詳細文獻綜述報告已附在附錄 A 中。為求簡明，在此為簡短小結。

4.1 香港建築標準 CS3: 2013

香港建築標準 CS3: 2013 混凝土用骨料是香港現行唯一的一部針對骨料的標準。香港至今尚無針對砂漿用骨料的標準。CS3: 2013 很大程度上是參考了英國標準 BS 882: 1992，並替代該英國標準。

該標準中對標準篩尺寸、對細骨料和微細粉的定義都與英國標準 BS 882: 1992 中的相同，但與歐洲標準 BS EN 12620: 2013 和 BS EN 13139: 2013 中的完全不同。不過，CS3: 2013 和 BS 882: 1992 中還是有兩處較大的不同。首先，BS 882: 1992 規定：對重載地面層，細骨料中的微細粉含量不應大於 9%；而一般情況下，細骨料中的微細粉含量不應大於 16%。不同的是，CS3: 2013 規定：對重載地面層，細骨料中的微細粉含量不應大於 10%；而一般情況下，細骨料中的微細粉含量不應大於 14%。其次，BS 882: 1992 不要求檢查細骨料的清潔度。但 CS3: 2013 規定，如果微細粉含量大於 10%，需進行亞甲藍試驗，且試驗值應不大於 1.4。

為了與 CS3: 2013 相配合，任何針對砂漿用骨料的規定或新標準中對標準篩尺寸、對細骨料和微細粉的定義都應與 CS3: 2013 中所描述的相同。此外，採用的試驗方法也應相同。

4.2 歐洲標準 BS EN 12620: 2013

該標準是混凝土用骨料的最新歐洲標準。該標準是對 BS EN 12620: 2002 的更新，並已在英國取代了英國標準 BS 882: 1992。

相比 2002 版，新標準對標準篩尺寸、粗細骨料的劃分、微細粉的定義都沒有改動。但比較英國標準和香港建築標準，標準篩尺寸、粗細骨料的劃分、微細粉的定義則完全不同。

和 2002 版的要求一樣，BS EN 12620: 2013 要求骨料生產商對所生產的細骨料典型級配等級進行聲明，同時採用公差限值來控制細骨料的變化。但在 BS EN 12620: 2013 中的公差限值與 BS EN 12620: 2002 中的有較大不同。

和 2002 版要求的一樣，BS EN 12620: 2013 沒有對骨料的微細粉含量的限值做規定。骨料生產商允許按規定類別對最大微細粉含量進行聲明。但在 2013 版中，增加了一個規定類別 f_6 （微細粉含量不大於 6%）。由此可見，BS EN 12620: 2013 對微細粉含量的分類更細。

和 2002 版要求的一樣，BS EN 12620: 2013 沒有對微細粉含量、砂當量值、和亞甲藍試驗限值進行規定來確保骨料的清潔度。這些限值應根據骨料使用所在地當地的相關標準建立。

4.3 歐洲標準 BS EN 13139: 2013

該標準是砂漿用骨料的最新歐洲標準。該標準是對 BS EN 13139: 2002 的更新，並已在英國取代了英國標準 BS 1199 和 1200: 1976。

相比 2002 版，新標準對標準篩尺寸、粗細骨料的劃分、微細粉的定義都沒有改動。但比較英國標準和香港建築標準，標準篩尺寸、粗細骨料的劃分、微細粉的定義則完全不同。

和 2002 版的要求一樣，BS EN 13139: 2013 要求骨料生產商對所生產的細骨料典型級配進行聲明，同時採用公差限值來控制細骨料的變化。但在 BS EN 13139: 2013 中的公差限值與 BS EN 13139: 2002 中的有較大不同。

和 2002 版的要求一樣，BS EN 13139: 2013 沒有對骨料的微細粉含量的限值做規定。骨料生產商允許按規定類別對最大微細粉含量進行聲明。但是，2013 版中的規定類別與 2002 版中的並不相同，且不同如下。

在 2002 版中，最大微細粉含量的規定類別包括：

類別 1 - 微細粉含量 ≤ 3%；

類別 2 - 微細粉含量 ≤ 5%；

類別 3 - 微細粉含量 ≤ 8%；

類別 4 - 微細粉含量 ≤ 30%；

此外，對不同類別下細骨料的使用作了規定：

類別 1：地坪、噴射、修補砂漿、灌漿（所有骨料均可）

類別 2：打底砂漿，抹灰砂漿（所有骨料均可）

類別 3：砌築砂漿（不含碎石粉骨料）

類別 4：砌築砂漿（碎石粉骨料）

在 2013 版中，最大微細粉含量的規定類別包括：

類別 f_3 - 微細粉含量 ≤ 3%；

類別 f_5 - 微細粉含量 ≤ 5%；

類別 f_8 - 微細粉含量 ≤ 8%；

類別 f_{22} - 微細粉含量 ≤ 22%；

但對不同類別下細骨料的使用不再做規定。

和 2002 版要求的一樣，BS EN 13139: 2013 沒有對微細粉含量、砂當量值、亞甲藍試驗限值進行規定來確保骨料的清潔度。這些限值應根據骨料使用所在地當地的相關標準而確定。這些要求與在 BS EN 12620: 2013 中所描述的完全相同。

4.4 美國標準 ASTM C33/C33M-13

該標準是 2013 年混凝土用骨料的最新美國標準。該標準中的標準篩尺寸與英國標準 BS 882: 1992 和香港建築標準 CS3: 2013 中的相似。

該標準中，粗細骨料的劃分是以粒徑 4.75 毫米為界。此外，微細粉定義為粒徑小於 75 微米的顆粒。這些規定與英國標準 BS 882: 1992 和香港建築標準 CS3: 2013 中的相似。但是，與英國標準 BS 882: 1992 和香港建築

標準 CS3: 2013 不同的是，美國標準僅規定了一種類型的級配等級。如無特別說明，微細粉含量的限值是 3%。對於不易遭受磨損的混凝土，微細粉含量可放寬至 5%。

對於機製細骨料（即碎石細骨料），如果微細粉中含有塵土，尤其是黏土或頁岩粉，則對於易遭受磨損的混凝土而言，微細粉含量的限值为 5%；對於不易遭受磨損的混凝土而言，微細粉含量的限值为 7%。該限值非常低，且與中國標準 GB/T 14684: 2001 和 JGJ 52: 2006 中的接近。

對於提高了微細粉含量的機製細骨料，需要對其進行必要評估，以保證微細粉均來源於相同的母岩，而不含有過量的粘土礦物或有害物質。亞甲藍吸附試驗和比重計分析試驗是可對微細粉進行特徵分析和確定是否適合用於混凝土的可靠試驗。小於 2 微米的顆粒含量低於 4%，且亞甲藍吸附值低於 5 mg/g 的機製細骨料被認為是可用於混凝土的細骨料。不過，超過上述限值的機製細骨料也可使用，只要混凝土的新拌和硬化性能達到要求即可。

4.5 小結與建議

從上述的文獻綜述可知，標準篩尺寸、粗細骨料劃分和微細粉定義在不同標準中各有不同。由於香港多年來沿用英國標準中的標準篩尺寸、粗細骨料劃分和微細粉定義，且英國標準中的這些規定與中國標準非常接近，又由於一些石礦場同時向香港和中國大陸市場供應骨料，從市場的角度，沿用英國標準中對標準篩尺寸、粗細骨料劃分和微細粉定義的規定會更好。同時，這可以避免由於更改標準造成的不必要麻煩，減少購買新設備的成本和可沿用以往在骨料使用中所積累的經驗。

通常來說，給混凝土用骨料和砂漿用骨料規定的要求是不同的。這是因為：混凝土與砂漿所要求的性能不盡相同，且細骨料的品質對於混凝土和砂漿的影響各有不同。因此，混凝土用骨料和砂漿用骨料應明確地區分。

對於混凝土用骨料和砂漿用骨料，關鍵問題可能在於對微細粉含量限值的規定以及如何評估微細粉的有害性。微細粉含量需要被限制基於以下原因：對於混凝土而言，微細粉中的有害物質（如黏土）會對混凝土的耐磨性、強度、耐久性等產生負面影響。此外，由於微細粉有著很大的比表面積，這會影響需水量和減水劑劑量，進而影響混凝土的和易性。對於砂漿而言，粘土或過量的微細粉都會影響砂漿的耐磨性、強度和和易性。此外，由於高微細粉含量導致的高需水量會迫使工人添加更多的水來提高砂漿和易性，但這會使得硬化後的砂漿產生更大的乾縮，並提高產生收縮裂縫的風險。更麻煩的是，過量的微細粉還會提高砂漿的黏聚性和漿體體積，這會使得砂漿過於粘滑而容易粘住泥刀並下滑，這會對抹灰工程造成影響。

另一方面，至今尚未有很好的方法來評估骨料中微細粉的有害性，也無建立相關驗收標準來認定微細粉的無害性。標準 BSI PD 6682-3 建議，骨料有害微細粉的評估可以通過限制微細粉含量或給出滿足使用的證據來實現。這或許是避免對評估方法和驗收標準爭論的一個務實方法。因此，限制微細粉含量的另一個重要原因是減少骨料中的有害物質。

最後，在標準 BS 1199: 1976，BS 1200: 1976，BS 882: 1992 和 CS3: 2013 中規定的細骨料的粒徑是 5.0 毫米，而在 BS EN 13139: 2002 和 BS EN 13139: 2013 中規定的細骨料的粒徑分別是 4.0 毫米和 2.0 毫米。雖然我們沒有必要嚴格遵循歐洲標準的規定，但基於謹慎原則，將細骨料的粒徑按使用情況的不同分為兩種（5.0 毫米和 2.36 毫米）也未嘗不可。

基於以上原因，建議為砂漿用骨料專門制訂一部本地建築標準。當然，該標準應與 CS3: 2013 相配合，使得兩本標準中的術語意思統一，對混凝土用骨料和砂漿用骨料的試驗方法相同，以及部分骨料產品可同時用於混凝土和砂漿。此外，與之前針對混凝土或砂漿用骨料的標準不同（這些標準規定細骨料的粒徑為 5.0 毫米），本標準規定的細骨料的粒徑可以是 5.0 毫米或 2.36 毫米，以此滿足不同的需要。最後，雖然之前的標準對可允許的微細粉含量的最大限值有著不小的分歧，而新的歐洲標準 BS EN 13139: 2013 既沒有對微細粉含量作明確的規定，也取消了在不同微細粉含量下使用的說明，但基於謹慎原則，筆者仍堅持認為，應基於標準 BS 1199: 1976，BS 1200: 1976，BS EN 13139: 2002 和 BSI PD 6682-3: 2003（對這幾部標準中微細粉含量限值的小結可參看附錄 A 的表 11），對微細粉含量限值作相應的規定。

5. 關於細骨料中微細粉含量對混凝土和砂漿影響的試驗研究

該試驗研究需要實現如下兩個目標：

目標（2）：研究微細粉含量對混凝土的影響，從而確定最理想和可允許的微細粉含量，用於草擬混凝土用細骨料的通用指引。

目標（3）：研究微細粉含量對不同砂漿的影響，從而確定最理想和可允許的微細粉含量，用於草擬針對不同砂漿的骨料標準和機製砂的分類規定。

為達成以上目標，一個綜合的試驗研究方案已實施。研究方案和試驗結果已附在附錄 B 中。為求簡明，在此為簡短小結。

5.1 關於細骨料中微細粉含量對混凝土性能的試驗研究

從文獻綜述中可以看到，在各個標準中對混凝土用骨料的微細粉含量最大限值的規定不盡相同。在歐洲標準中，沒有對微細粉含量最大限值進行規定，而在中國標準和美國標準中，對微細粉含量最大限值的規定又非常嚴格。直到現在，仍沒有形成關於微細粉含量對混凝土性能影響的普遍共識，所以，對混凝土用骨料中微細粉含量的可允許範圍仍具有爭議。

為了研究細骨料中微細粉含量對混凝土各項性能的影響，我們開展了一項研究。在這個研究的方案中，水灰比有四種變化（0.30，0.40，0.50 和 0.60），漿體體積有三種變化（25%，30%和 35%），微細粉含量有四種變化（6%，9%，12%和 15%），高效減水劑（SP）有兩種變化：無 SP 和有 SP（SP 劑量會從水灰比 0.60 時的 1.0 litre/m³ 上升到水灰比 0.30 時的 4.0 litre/m³）。在實驗過程中，有些混凝土會因過乾而無法進行試驗，因此，實際進行試驗的混凝土一共有 80 組。

試驗中使用的細骨料和粗骨料均為本地市場供應的粉碎花崗岩骨料。這些骨料與香港混凝土生產商使用的並無不同。細骨料的樣品也被送去現成派安混凝土有限公司和金門建築有限公司進行亞甲藍試驗。從現成派安混凝土有限公司得到的試驗結果為 0.8，從金門建築有限公司得到的試驗結果是 1.0。因此，或許可以認定所使用的細骨料中的微細粉所含的有害物質很少，具有較好品質。

為了獲得微細粉含量為 6%，9%，12%和 15%的細骨料，採取的辦法是：首先，用機械篩分法將細骨料中的微細粉全部篩出；隨後，按所規定的微細粉含量把微細粉加回到細骨料中。

所使用的水泥為普通硅酸鹽水泥（其強度等級為 52.5 MPa，符合標準 BS EN 197-1: 2000）。水泥的比重按照標準 BS EN 196-6: 2010 測得為 3.11。所使用的減水劑為香港本地較常使用的一款聚羧酸高效減水劑，其固體含量為 20%，比重為 1.03。

該試驗選用盤式攪拌機對混凝土進行攪拌，選用電子稱對混凝土各組分的重量進行稱量。在攪拌過程中，所有的固體組分一次加入，並攪拌 1 分鐘。隨後加入水，並攪拌 2 分鐘。如果 SP 也需添加，則會在最後加入，並額外再攪拌 2 分鐘。

攪拌完後，將對新拌混凝土試樣進行坍落擴展度試驗。坍落擴展度試驗所使用的坍落度桶符合標準 BS EN 12350-8: 2010（在歐洲標準中，坍落度的測定與標準 CS1: 2010 中的相同，但對擴展度的測定則非常不同）。試驗中，當新拌混凝土裝滿坍落度桶後，將把坍落度桶豎直提起，混凝土坍落的高度定義為坍落度（混凝土變形性的指標），混凝土流動所形

成的餅狀物的平均直徑定義為擴展度（混凝土流動性的指標）。因為坍落度桶底部的直徑為 200 毫米，如果測得的擴展度為 200 毫米，則說明混凝土完全無流動性。

坍落擴展度試驗後，還將觀察所形成的混凝土餅狀物，看是否存在離析現象。如果在餅狀物的外延形成一圈只含淨漿或砂漿的條狀帶，則該條狀帶的寬度將會測量並作為離析寬度記錄下來。如果離析寬度不大於 10 毫米，則認為是可接受的；如果離析寬度大於 10 毫米，則離析被認為是不可接受。

同時，另一批新拌混凝土試樣將從攪拌機中取出並進行篩析穩定性試驗。該試驗採用符合 BS EN 12350-11: 2010（該試驗已成為自密實混凝土的標準試驗）標準的尺寸為 5 毫米的標準篩。從篩孔通過並落入底部接盤的混凝土重量將被記錄下來，且該重量占往標準篩上倒下的混凝土重量的百分比也將被計算，該百分比被定義為篩析指數。如果篩析指數不大於 10%，則認為可以接受；若篩析指數大於 10%，則離析被認為不可接受。

最後，在完成了坍落擴展度試驗和篩析穩定性試驗後，所有的新拌混凝土試樣將會倒回到攪拌機中重新攪拌。隨後，將澆築 6 個 100 毫米邊長混凝土立方體試塊。澆築後，試塊將被妥善封蓋和保存在實驗室。24 小時後，將對試塊進行拆模，並放入鹼飽和水養護箱中養護（養護溫度控制在 $27 \pm 2^\circ\text{C}$ ）。6 個試塊中的 3 個將進行 7 天抗壓強度試驗，剩餘 3 個將進行 28 天抗壓強度試驗。7 天或 28 天所測得的 3 個試塊的平均抗壓強度被定義為 7 天或 28 天立方體抗壓強度。

對混凝土（不管是有減水劑還是無減水劑）的試驗表明，微細粉含量對混凝土的各項性能有如下影響：

- （1）微細粉對和易性有顯著的不利影響，在坍落度和流動度很低時除外。因為在坍落度和流動度很低時，試驗已無法反映微細粉對和易性的影響。
- （2）微細粉對強度的影響很小，但在水灰比 = 0.30 時除外。在水灰比 = 0.30 時，不低於 12% 的微細粉含量會對混凝土強度產生顯著的不利影響，而原因在於過量的微細粉會使得混凝土難以振搗。
- （3）雖然離析寬度和篩析指數均表明所測混凝土不發生離析且有較高的黏聚性。但從親身經驗可知，含有更多微細粉的混凝土的粘性更大，或者說有更大的黏聚性或抗離析性。因此，微細粉含量對提高混凝土的黏聚性和抗離析性具有一定的有利影響。

整體來說，在細骨料中高含量的微細粉會降低混凝土的和易性，但如果微細粉含量不超過 10%，降低的和易性可通過添加減水劑來彌補。因此，或許可說：若微細粉的質量較好且有害物質很少，微細粉含量達到 10% 仍是可以接受的。

超過 10%的微細粉含量仍可接受，只要混凝土試配時仍能保持所需的和易性而不使用過量減水劑。即使是這樣，仍需要考慮給微細粉含量設一個最大限值。在標準 CS3: 2013 中，對於一般使用條件下，微細粉含量的最大限值被定為 14%（附加要求是：微細粉含量大於 10%時，亞甲藍試驗限值不大於 1.4）；對於重載地面層，微細粉含量的最大限值定為 10%。這些最大限值非常合理。需要給微細粉含量設一個最大限值的另一個原因是，在實際應用中，微細粉會發生明顯的團聚現象。如果團聚過於明顯，會使得混凝土的和易性經常發生變化，這會對混凝土生產商調整減水劑劑量來補償和易性變化造成困難。基於這個原因，混凝土生產商被建議定期（甚至對每批次的細骨料）檢查細骨料的微細粉含量。

另外，在試驗中發現，在水灰比 = 0.30 時，不低於 12%的微細粉含量會對混凝土強度產生顯著的不利影響，而原因在於過量的微細粉會使得混凝土難以振搗。由於高強混凝土的水灰比較低，因此建議在生產高強混凝土時，微細粉含量不應高於 10%。換句話說，微細粉含量限制在 10% 不僅是對重載地面層的要求，也是對高強混凝土的要求。

5.2 關於細骨料中微細粉含量對砂漿性能的試驗研究

未經處理的碎石粉並不是可用於砂漿的合適骨料。原因有二：第一，其微細粉含量會對砂漿的需水量有很大影響；第二，雖然更細粒徑的骨料會對提升砂漿的抹灰性能有幫助，但有關微細粉含量和細骨料最大粒徑對砂漿性能影響的研究仍較少。

從文獻綜述中可以發現，在各個標準中對砂漿用骨料的微細粉含量最大限值的規定不盡相同。在英國標準 BS 1199: 1976 和 BS 1200: 1976 中，對於用於打底和抹灰工程的砂漿用碎石粉，微細粉含量限值為 5%；對於砌築砂漿用 S 類砂，微細粉含量限值為 10%；對於砌築砂漿用 G 類砂，微細粉含量限值為 12%。在歐洲標準 BS EN 13139: 2002 中，規定砂漿用細骨料需分為四類：類別 1（微細粉含量 ≤ 3%），類別 2（微細粉含量 ≤ 5%），類別 3（微細粉含量 ≤ 8%），類別 4（微細粉含量 ≤ 30%）。對於不同類別，建議的應用領域是：類別 1：地坪、噴射、修補砂漿、灌漿；類別 2：打底砂漿，抹灰砂漿；類別 3：砌築砂漿；類別 4：砌築砂漿。在中國標準 GB/T 14684 和 JGJ 52 中，沒有特別對混凝土用骨料和砂漿用骨料進行區分，但按骨料的來源，對微細粉含量的限值做了嚴格的規定。直到現在，仍沒有形成關於微細粉含量對砂漿性能影響的普遍共識，所以，對砂漿用細骨料中微細粉含量的可允許範圍仍具有爭議。

為研究微細粉含量和細骨料最大粒徑對砂漿各項性能的影響，我們開展了一項研究。在這個研究的方案中，水灰比有四種變化（0.30，0.40，0.50 和 0.60），漿體體積有兩種變化（42%和 48%），骨料最大粒徑有兩種變化（2.36 毫米和 5.0 毫米），微細粉含量有四種變化（2%，5%，8%

和 10%)。試驗中不添加減水劑。在實驗過程中，有些砂漿會因過乾而無法進行試驗。此外，試驗也發現漿體體積 42%對於抹灰工程而言有些太少，而最大粒徑 5.0 毫米會使抹灰表面過於粗糙。因此，原計劃中針對漿體體積 42%和最大粒徑 5.0 毫米的砂漿試驗取消。由此，實際進行試驗的砂漿一共有 36 組。

試驗中使用的細骨料是由本地市場供應的粉碎花崗岩細骨料。該細骨料與香港混凝土生產商所使用的細骨料相同。細骨料的原有最大粒徑為 5.0 毫米。為了獲得最大粒徑為 2.36 毫米的細骨料，採用了機械篩分法篩去了粒徑大於 2.36 毫米的部分。細骨料的比重為 2.54。細骨料的吸水率為 1.81%，而含水率會不時進行測定。吸水率和含水率會被用於計算砂漿所需添加的水量。

細骨料的樣品被送去現成派安混凝土有限公司和金門建築有限公司進行亞甲藍試驗。從現成派安混凝土有限公司得到的試驗結果為 0.8，從金門建築有限公司得到的試驗結果是 1.0。因此，或許可以認定所使用的細骨料中的微細粉所含的有害物質很少，具有較好品質。

為了獲得微細粉含量為 2%，5%，8%和 10%的細骨料，採取的辦法是：首先，用機械篩分法將細骨料中的微細粉全部篩出；隨後，按所規定的微細粉含量把微細粉加回到細骨料中。這種對微細粉進行控制的細骨料或許可被定義為機製砂（或經處理後的碎石粉）。

所使用的水泥為普通硅酸鹽水泥（其強度等級為 52.5 MPa，符合標準 BS EN 197-1: 2000）。水泥的比重按照標準 BS EN 196-6: 2010 測得，為 3.11。

該試驗選用霍巴特攪拌機對砂漿進行攪拌，選用電子稱對砂漿各組分的重量進行稱量。在攪拌過程中，所有的固體組分一次加入，並攪拌 1 分鐘。隨後加入水，並攪拌 2 分鐘。

在攪拌完成後，會對新拌砂漿試樣進行迷你坍落流動度試驗。砂漿用迷你坍落流動度試驗與混凝土用坍落流動度試驗的原理完全相同，除了所使用的坍落度桶的尺寸不同以外。本試驗中使用的迷你坍落度桶與 Okamura 和 Ouchi (H. Okamura and M. Ouchi, Self-compacting concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.1, 2003, 5-15) 所使用的坍落度桶完全相同。該坍落度桶的底部直徑為 100 毫米，頂部直徑為 70 毫米，高度為 60 毫米。試驗步驟與坍落流動度試驗的相同。砂漿坍落的高度定義為坍落度（砂漿變形性的指標），砂漿流動所形成的餅狀物的平均直徑減去坍落度桶的底部直徑定義為擴展度（砂漿流動性的指標）。需要說明的是，如果得到的擴展度為 0 毫米，則說明砂漿完全無流動性，而如果得到的擴展度為 100 毫米，則說明砂漿流動性很好。

同時，另一批新拌砂漿試樣會從攪拌機中取出並進行石棒黏附性試驗。該試驗是由 Li 和 Kwan (L.G. Li and A.K.H. Kwan, Mortar design based on water film thickness, Construction and Building Materials, Vol.25, No.5, 2011, 2381-2390) 提出的。該試驗的設備由一個帶有六根花崗岩石棒的手柄以及一個容器組成。每根石棒的直徑為 10 毫米，長度為 110 毫米。試驗時，六根石棒將浸入砂漿中，浸入深度為 100 毫米，隨後緩慢拔出。粘附在石棒上的砂漿重量即被定義為砂漿的粘附值。

完成了迷你坍落擴展度試驗和石棒黏附性試驗後，砂漿試樣會被倒回攪拌機中再次攪拌。隨後，將澆築 3 個 70.7 毫米邊長砂漿立方體試塊。澆築後，試塊將被妥善封蓋和保存在實驗室。24 小時後，將對試塊進行拆模，並放入鹼飽和水養護箱中養護（養護溫度控制在 $27 \pm 2^\circ\text{C}$ ）。7 天後所測得的 3 個試塊的平均抗壓強度被定義為 7 天立方體抗壓強度。

為了測試抹灰砂漿在混凝土垂直表面的抹灰性能和拉拔強度，另一批的新拌砂漿會從攪拌機中取出，並在一塊規格為 300 毫米長×300 毫米寬×70 毫米厚的預製混凝土塊的壓膜表面進行垂直抹灰。抹灰將分為兩層，每層 10 毫米厚。第一天抹好第一層，接著在第二天抹好第二層。在進行每層抹灰之前，都要提前 15 分鐘對所需抹灰的面層進行灑水濕潤。抹灰時不使用底漆。抹灰完成後，試樣將在實驗室中妥善保存，但不會對其養護，以模擬實際情況。在完成第二層抹灰的七天後，將遵照標準 BS EN 1015-12: 2000 的規定，對砂漿層進行拉拔試驗，所測強度被定義為 7 天拉拔強度。一般來說，不低於 0.5 MPa 的拉拔強度被認為是可接受的；低於 0.5 MPa 的拉拔強度被認為是不可接受。

在對混凝土塊表面進行垂直抹灰作業中，砂漿的抹灰性能將通過感官判斷來確定，並進行如下分級：

- 太乾 - 砂漿顯得非常乾，且無粘性；根本無法粘附到混凝土表面
- 乾 - 砂漿顯得乾，且無粘性；但非常用力壓在混凝土表面的話，可以粘附
- 較乾 - 砂漿顯得有些乾；用力壓在混凝土表面的話，可以粘附
- 最理想 - 砂漿有較好的稠度和黏聚性；無需施壓便可很好地粘附在混凝土表面，且抹上後不會滑落
- 較濕 - 砂漿顯得有些濕；可以很好地粘附在混凝土表面，但抹上後會有滑落的趨勢
- 濕 - 砂漿顯得濕，且無粘性；可以粘附在混凝土表面，但抹上後會滑落
- 太濕 - 砂漿顯得非常濕，且無粘性；由於抹上後會馬上滑落，無法粘附在混凝土表面

對細骨料最大粒徑為 2.36 毫米的砂漿的試驗結果所反映的微細粉含量對砂漿性能的影響總結如下：

- (1) 當漿體體積為 42%時，水灰比 ≤ 0.50 的砂漿會太乾，不適合抹灰作業；而適合抹灰作業的水灰比大約是 0.60。整體來說，漿體體積 42%對於抹灰作業而言稍顯不足。
- (2) 當漿體體積為 42%時，達到 8%的微細粉含量仍對抹灰性能和強度無負面影響。
- (3) 當漿體體積為 48%時，水灰比 ≤ 0.50 的砂漿會太乾，不適合抹灰作業；而適合抹灰作業的水灰比大約是 0.50。整體來說，對於抹灰作業，漿體體積 48%比 42%要好。
- (4) 當漿體體積為 48%時，達到 8%的微細粉含量仍對抹灰性能和強度無負面影響。

對細骨料最大粒徑為 5.0 毫米的砂漿試驗結果所反映的微細粉含量對砂漿性能的影響總結如下：

- (1) 當漿體體積為 48%時，水灰比 ≤ 0.30 的砂漿會太乾，而水灰比 ≥ 0.50 的砂漿又會太濕；適合抹灰作業的水灰比大約是 0.40。整體來說，對細骨料最大粒徑為 5.0 毫米的砂漿，漿體體積 48%適合抹灰作業。但是，即使達到這樣的漿體體積，抹灰表面仍顯得非常粗糙。
- (2) 當漿體體積為 48%時，達到 8%的微細粉含量仍對抹灰性能和強度無負面影響。

整體來說，有如下結論：砂漿的抹灰性能在砂漿既不太乾也不太濕的情況下最好。不過，砂漿的抹灰性能似乎更受砂漿水灰比（或水含量）的影響，而不是微細粉含量。基於不同條件下適合抹灰工程的水灰比總結如下：

- (1) 在最大粒徑 = 2.36 毫米且漿體體積 = 42%時，合適的水灰比 = 0.60
- (2) 在最大粒徑 = 2.36 毫米且漿體體積 = 48%時，合適的水灰比 = 0.50
- (3) 在最大粒徑 = 5.0 毫米且漿體體積 = 48%時，合適的水灰比 = 0.40

適合抹灰工程的水灰比隨著細骨料最大粒徑和漿體體積的變化而變化，且適合抹灰工程的水灰比（或水含量）的允許範圍非常窄，因此，對砂漿的水灰比（或水含量）需要小心控制。不過，在本項目所涵蓋的最大粒徑和漿體體積的範圍內，達到 8%的微細粉含量仍對抹灰性能和強度無負面影響。最後，在適合的水灰比且微細粉含量不大於 8%時，是可以獲得不少於 0.7 MPa 的拉拔強度。這樣的拉拔強度已經足夠高，因為標準要求的拉拔強度僅為 0.5 MPa。

上述試驗結果顯示，對砂漿用細骨料的微細粉含量限值定為 3%是沒有必要的。換句話說，等級 F3 的細骨料（微細粉含量 $\leq 3\%$ ）是沒有必要的。標準中對抹灰和地板砂漿的要求中，可以取消等級 F3，而只用等級 F5（微細粉含量 $\leq 5\%$ ）。

此外，上述試驗結果也顯示，漿體體積 48%的砂漿更適合抹灰工程。而稍微低一點的漿體體積（45%）應該也是可行的。在工地上，灰砂比更常用。所以將漿體體積 48%轉化為灰砂比為 1:2.36；而漿體體積 45%轉化為灰砂比為 1:2.66。由此可見，適合抹灰工程的灰砂比大概為 1:2.5。

在以往的作業中，砂漿的水含量是不會嚴格規定的，工人都是通過自己的判斷給砂漿加水來製備具有最理想抹灰性能的砂漿。這需要工人有較好的培訓和經驗。基於該項目的研究，制訂了一項對坍落度（由迷你坍落擴展度試驗測得）需達到 10 ± 3 毫米的一般規定。為了避免所添加的水過多或過少所造成的工藝問題，應鼓勵工人學習和採用迷你坍落擴展度試驗。此外，使用預包裝乾粉抹灰砂漿也是一個不錯的選擇。使用預包裝材料可以保證所用細骨料的品質和準確控制灰砂比。同時，預包裝乾粉砂漿的供應商也應通過試驗和經驗獲得所需添加的水的準確用量，並將相關要求詳細說明，以避免工人在現場使用中進行反覆試配的麻煩。

6. 關於粉碎廢玻璃和回收細骨料的可行性研究

該試驗研究需要實現目標（4）和（5），具體包括：

目標（4）：研究粉碎並處理後的回收廢玻璃作為砂漿骨料使用的可行性；

目標（5）：研究粉碎並處理後的廢舊混凝土作為混凝土和砂漿骨料使用的可行性。

為達成以上目標，我們已開展了一個綜合的試驗研究。研究方案和試驗結果已附在附錄 B 中。為求簡明，在此為簡短小結。

6.1 關於粉碎廢玻璃的可行性研究

目前來說，僅有 4%至 5%的廢玻璃作為預製混凝土鋪路磚的骨料被循環再用。香港政府非常希望能夠提高回收利用率以減少廢玻璃在堆填區的傾倒量。將廢玻璃粉碎至砂粒的大小以作為河砂替代品使用，或許是解決廢玻璃使用問題的一個不錯方法。

有兩種可能可以提高碎廢玻璃利用率的途徑。第一種是將粉碎廢玻璃骨料在預製混凝土鋪路磚中的比例提高。目前來說，粉碎廢玻璃骨料在環保鋪路磚中的骨料重量替代率僅為 20%至 25%。如果能將替代率提高到 70%（甚至 100%）會更好。第二種途徑是將粉碎廢玻璃作為砂漿用骨料用於抹灰、打底、地坪或砌築工程。由於作為砂漿用骨料使用的河砂的每年消耗量超過了一百萬噸，而香港的河砂一直都短缺，所以將粉碎廢玻璃作為砂漿用骨料使用不僅可以解決廢玻璃的回收利用問題，還能解決河砂短缺的燃眉之急。

兩家材料供應商協助生產了試驗研究所用的粉碎廢玻璃。從樣品中可以發現，粉碎廢玻璃的微細粉含量很低，且玻璃顆粒的黏聚性也很低（這可能是因為玻璃是疏水性的）。此外，玻璃顆粒有鋒利的邊角，形狀也有棱角，這可能與玻璃有較大脆性，使在粉碎過程中容易形成解理面有關。雖然從理論上說，形狀較圓潤的顆粒會比形狀有棱角的顆粒要好。但從供應商處得知，雖然可以對廢玻璃進行研磨以使顆粒更圓潤，但生產成品會很高，因此在實際中未採用。另一方面，從對樣品的初步判斷來看，將廢玻璃粉碎得比普通細骨料更細是有必要的（即等級從 C 提升到 F），這樣可以使摻粉碎廢玻璃的砂漿具有更高的黏聚性和黏附性。

在本研究的初期，建議使用 70%的粉碎廢玻璃 + 30%的碎石粉或 100%的粉碎廢玻璃作為河砂的替代品來生產預製鋪路磚和抹灰、打底、地坪和砌築砂漿的。但是在研究過半時，發現使用過高摻量的粉碎廢玻璃來生產抹灰和打底砂漿，會導致過低的黏附性而使得抹灰難度較大。因此，在 2014 年 4 月 15 日關國雄教授與建造業議會的會議中，協商同意將原來 70%的粉碎廢玻璃摻量降低至 50%，來研究其對抹灰和打底工程的可行性。

試驗中使用的細骨料為本地市場供應的粉碎花崗岩骨料。該細骨料與之前混凝土和砂漿試驗所用的相同。骨料的粒徑為 5.0 毫米。由機械篩分法測得該細骨料的微細粉含量為 5.0%。微細粉沒有從細骨料中篩除，以此模擬有相同微細粉含量的機製砂。細骨料的樣品也被送去現成派安混凝土有限公司和金門建築有限公司進行亞甲藍試驗。從現成派安混凝土有限公司得到的試驗結果為 0.8，從金門建築有限公司得到的試驗結果是 1.0。因此，或許可以認定所使用的細骨料中的微細粉所含的有害物質很少，具有較好品質。

粉碎廢玻璃是由中國大陸的一家材料供應商提供。該粉碎廢玻璃是將市面上白色玻璃瓶粉碎後得到的。玻璃瓶先被清潔乾淨，然後粉碎至砂子粒徑大小。為了控制其粒徑分佈，粉碎廢玻璃會按粒徑大小被篩分成不同部分，然後再按級配等級 C 和 F 將其從新混合。粉碎廢玻璃的比重和吸水率分別為 2.33 和 0%。

所使用的水泥為普通硅酸鹽水泥（其強度等級為 52.5 MPa，符合標準 BS EN 197-1: 2000）。水泥的比重按照標準 BS EN 196-6: 2010 測得為 3.11。

對摻 100%粉碎廢玻璃作為細骨料的砂漿的試驗結果總結如下：

- (1) 不管粉碎廢玻璃是何種級配等級且漿體體積是多少，所製得的抹灰砂漿往往不是太乾就是太濕，且適合抹灰作業的水灰比的範圍太窄。

- (2) 對於粉碎廢玻璃級配等級 = C，在漿體體積 = 45%時，適合抹灰作業的水灰比為 0.45；在漿體體積 = 50%時，適合抹灰作業的水灰比為 0.40；在漿體體積 = 55%時，適合抹灰作業的水灰比為 0.35。
- (3) 對於粉碎廢玻璃級配等級 = F，在漿體體積 = 45%時，適合抹灰作業的水灰比為 0.55；在將體漿體體積 = 50%時，適合抹灰作業的水灰比為 0.45；在漿體體積 = 55%時，適合抹灰作業的水灰比為 0.40。
- (4) 對於抹灰工程，級配等級為 C 和 F 的粉碎廢玻璃的效果差不多。因此，沒有必要將廢玻璃粉碎得比平常更細。
- (5) 在水灰比 = 0.30，7 天立方體抗壓強度至少有 55 MPa。因此，用摻量 100%的粉碎廢玻璃來生產平均強度達到 55 MPa 的預製塊是完全可行的（對於生產強度等級 35 MPa 的預製鋪路磚是綽綽有餘）。

對摻 50%粉碎廢玻璃作為細骨料的砂漿的試驗結果總結如下：

- (1) 不管粉碎廢玻璃是何種級配等級且漿體體積是多少，所製得的抹灰砂漿往往不是太乾就是太濕，且適合抹灰作業的水灰比的範圍太窄。
- (2) 對於粉碎廢玻璃級配等級 = C，在漿體體積 = 45%時，適合抹灰作業的水灰比為 0.50；在漿體體積 = 50%時，適合抹灰作業的水灰比為 0.45；在漿體體積 = 55%時，適合抹灰作業的水灰比為 0.40。
- (3) 對於粉碎廢玻璃級配等級 = F，在漿體體積 = 45%時，適合抹灰作業的水灰比為 0.60；在將體漿體體積 = 50%時，適合抹灰作業的水灰比為 0.55；在漿體體積 = 55%時，適合抹灰作業的水灰比為 0.50。
- (4) 對於抹灰工程，級配等級為 C 和 F 的粉碎廢玻璃的效果差不多。因此，沒有必要將廢玻璃粉碎得比平常更細。
- (5) 在水灰比 = 0.30，7 天立方體抗壓強度至少有 65.0 MPa。因此，用摻量 50%的粉碎廢玻璃來生產平均強度達到 65 MPa 的預製塊是完全可行的（對於生產強度等級 45 MPa 的預製鋪路磚是綽綽有餘）。

整體來說，目前所獲得的試驗結果基本上是正面的。首先，摻 50%粉碎廢玻璃來生產強度等級 45 MPa 的預製鋪路磚和摻 100%粉碎廢玻璃來生產強度等級 35 MPa 的預製鋪路磚是可行的。其次，將摻 50%粉碎廢玻璃的砂漿用於抹灰工程是可行的。但將摻 100%粉碎廢玻璃的砂漿用於抹灰工程則不推薦，因為製得的砂漿的粘性不夠，較難操作。再者，級配等級為 C 和級配等級為 F 的粉碎廢玻璃的效果差不多，所以將廢玻璃粉碎得比平常更細是沒有特別好處，也是沒有必要的。

對於抹灰砂漿的漿體體積，45%至 50%會比較合適。而水灰比則需根據漿體體積、粉碎廢玻璃級配等級和含量而定。在保證抹灰性能的合適水灰比下，砂漿的拉拔試驗強度可以達到至少 0.6 MPa。

不過，仍存在著如何讓工人能夠準確確定加水量來獲得最理想抹灰性能砂漿的問題。這需要工人有較好的培訓和經驗。基於該項目的研究，制訂了一項對坍落度（由迷你坍落擴展度試驗測得）需達到 10 ± 3 毫米的一般規定。除了靠經驗操作之外，應鼓勵工人學習和採用迷你坍落擴展度試驗來確定可獲得最理想抹灰性能砂漿的加水量。此外，將粉碎廢玻璃與機製砂和水泥預先包裝來生產預包裝乾粉抹灰砂漿也是一個不錯的選擇。因為通常來說，預包裝乾粉砂漿材料的質量會比在現場製備的要好。同時，預包裝乾粉砂漿的供應商也應通過試驗和經驗獲得所需添加的水的確準確用量，並將相關要求詳細說明，以避免工人在現場使用中進行反覆試配的麻煩。

6.2 關於回收細骨料的可行性研究

在香港，每年都有百萬噸級的廢舊混凝土作為惰性固體廢棄物產生。香港政府一直在鼓勵將粉碎的廢舊混凝土作為回收骨料重新用於新的建設項目中。不過，回收骨料，尤其是粒徑較細的回收骨料，由於會有舊水泥漿附在顆粒的表面，使得含有這些回收骨料的混凝土或砂漿的質量可能會存在問題。所以，大多數的工程師都對使用回收骨料心懷顧慮。直到目前，回收骨料的使用率（大部分用於生產預製鋪路磚）都很低，而絕大部分的廢舊混凝土都只是作為廢棄物傾倒於堆填區，或被運出香港。

為了提高廢舊混凝土的回收利用率，我們需要更好地利用這些粉碎的廢舊混凝土，而這些廢舊混凝土作為等級 200 回收填石料可從政府填料庫中獲得。

為了提高回收粗骨料在混凝土工程中的應用，而不僅僅用於混凝土預製鋪路磚，有必要提高強度等級 35 MPa 的混凝土的回收粗骨料替代率。不過在此之前，我們需要通過去除骨料顆粒表面的舊水泥漿來提高回收粗骨料的質量。採用機製砂生產中的研磨技術（主要用於改善機製砂的圓度）來對回收粗骨料進行研磨，或許是去除舊水泥漿的一個好方法。但是，由於回收粗骨料並不是河砂替代品，關於如何提高回收粗骨料品質來拓展回收粗骨料利用率的研究不在本研究的範圍。

本研究的重點放在回收細骨料作為河砂替代品的可行性研究上。在研究之初，我們希望能獲得石礦場營運商和機製砂供應商的幫助，生產以下兩款回收細骨料用於試驗：

- CRFA - 粉碎回收細骨料，對該細骨料只進行粉碎以縮小粒徑而不會對其進行研磨。
- GRFA - 研磨回收細骨料，對該細骨料粉碎後，還會對其進行研磨以去除在顆粒表面的舊水泥漿。

不過，沒有一家聯繫過的石礦場營運商和機製砂供應商有興趣生產上述回收骨料用於試驗。事實上，他們對香港的廢舊混凝土回收產業並不看好。不過，關國雄教授最近聯繫到了深圳市綠發鵬程環保科技有限公司。該公司是一家粉碎和回收建築廢料年產量達到一百萬噸的深圳公司。他們已經發了一些 CRFA 型的回收細骨料樣品到香港大學進行試驗。出於對生產成本的考慮，他們並不生產 GRFA 型回收細骨料。不過，他們已成功在他們的一些建材產品中使用 100%的回收細骨料，例如預製鋪路磚和預包裝乾粉砂漿。

理論上來說，回收細骨料的微細粉含量需要通過風選法來控制。但是，送過來香港大學的回收細骨料樣品沒有經過任何對微細粉含量控制的處理程序。在樣品的收據上，生產廠家所測得的微細粉含量是 12%。為了更好地控制回收細骨料樣品的微細粉含量，我們將樣品的微細粉通過機械篩分法篩除後，再按指定的微細粉含量摻回到回收細骨料中。可以預見，通過對微細粉含量嚴格控制，即使是 CRFA 型的回收細骨料，按 100%的替代率來生產抹灰、打底、地坪和砌築砂漿等也是可行的。

為了研究在混凝土和砂漿中使用替代率 100%回收細骨料的可行性，我們開展了相關研究。在這項研究中，水灰比有四種變化（0.30，0.40，0.50 和 0.60），漿體體積有兩種變化（42%和 48%），微細粉含量有兩種變化（5%和 10%），但只使用一種類型的回收細骨料，即 CRFA 型回收細骨料（由於 GRFA 型回收細骨料無從獲得，故無法進行試驗）。試驗方法與之前研究的相同。

所用的回收細骨料的粒徑為 5.0 毫米，並由機械篩分法將其微細粉含量控制在 5%和 10%。微細粉含量分別為 5%和 10%的回收細骨料的粒徑分佈可參考圖 16。微細粉含量分別為 5%和 10%的回收細骨料的比重均為 2.29，而吸水率分別為 9.0%和 12.0%。在計算用水量時，吸水率會被考慮。

所使用的水泥為普通硅酸鹽水泥（其強度等級為 52.5 MPa，符合標準 BS EN 197-1: 2000）。水泥的比重按照標準 BS EN 196-6: 2010 測得為 3.11。

摻 CRFA 型回收細骨料砂漿的試驗結果總結如下：

- （1）微細粉含量對強度有明顯的負面影響。因此，有必要控制回收細骨料的微細粉含量不能超過 10%，最好不超過 5%。
- （2）在微細粉含量 5%時，是可以達到至少 45 MPa 的 7 天抗壓強度；而在在微細粉含量 10%時，可以達到 38 MPa 的 7 天抗壓強度。這樣的 7 天強度對於生產強度等級 30 MPa 的混凝土（適用於人行道預製鋪路磚）和強度等級 20 MPa 的混凝土（適用於地基墊層和非結構混凝土）都是足夠的。

- (3) 不管漿體體積如何變化，適合抹灰工程的水灰比範圍都非常窄。在漿體體積 42%時，適合抹灰工程的水灰比約 0.45；而在漿體體積 48%時，適合抹灰工程的水灰比約 0.40。
- (4) 高達 10%的微細粉含量並不會對抹灰作業造成影響。當微細粉含量不高於 10%時，拉拔強度可以達到 0.5 MPa。

整體而言，目前為止所獲得的試驗結果頗為正面。第一，在混凝土中回收細骨料的替代率達到 100%是可行的。不過，對生產強度等級 30 MPa 的混凝土，有必要把回收細骨料的微細粉含量控制在 5%以內；對生產強度等級 20 MPa 的混凝土，有必要把回收細骨料的微細粉含量控制在 10%以內。第二，在抹灰砂漿中，回收細骨替代率達到 100%也是可行的。雖然適合抹灰作業的水灰比範圍較窄，但拉拔強度達到 0.5 MPa 是可行的。雖然微細粉含量 10%仍可接受，但出於生產穩定性的考慮（微細粉含量過大會使吸水率的變化過大，從而導致往砂漿中加入合適的水量較難），微細粉含量不宜大於 5%。

由於在本研究中只對少量的回收細骨料進行了試驗，因此回收細骨料品質的波動未能完全反映。可以預見，回收細骨料的品質會有較大的波動。為了使回收細骨料的品質更穩定，一個方法是將 50%的回收細骨料與 50%的機製砂（經處理的碎石粉）混合使用。即使只使用 50%的回收細骨料在各類砂漿工程中，對香港而言，所提高的建築廢料的回收利用率也會非常可觀，同時砂漿生產所需的河砂也可以大幅減少。

7. 將機製砂用於抹灰工程的現場試驗

作為項目的一部分，我們也開展了關於機製砂用於抹灰工程的現場試驗。在現場試驗中，邀請了熟手工人對含機製砂的水泥砂漿的抹灰性能進行了使用和評價。

本項試驗共試驗了兩款機製砂。第一款樣品是由文輝泰集團有限公司提供的，該公司是現時香港唯一一家水泥砂漿用機製砂的供應商。另一款樣品是由友盟混凝土有限公司提供的，該公司目前對生產水泥砂漿用機製砂不感興趣，但其生產的機製砂均用於混凝土的生產。從文輝泰和友盟處得知，兩款機製砂均通過對碎石粉進行風選法來控制微細粉含量來生產的。

由文輝泰提供的第一款樣品命名為 MS1，由友盟提供的第二款樣品命名為 MS2。為了方便比較，一款從市場獲得的河砂也用於試驗研究，並將其命名為 RS。

現場試驗的細節和結果都收錄在附錄 C 中。為求簡明，在此為簡短小結。

通過機械篩分，發現對於 MS1，有 2.8%的骨料大於 2.36 毫米，有 0.6%的骨料小於 75 微米；而對於 MS2，有 16.0%的骨料大於 2.36 毫米，有 2.5%的骨料小於 75 微米。經過比較可知，MS1 相較而言較細，且微細粉含量更低（0.6%）；MS2 相較而言較粗，且微細粉含量更高（2.5%）。MS1 或許可被認為是最大粒徑為 2.36 毫米的細骨料，而 MS2 可被認為是最大粒徑為 5.0 毫米的細骨料。

感謝何偉華先生、建造業議會和合源建材有限公司的安排，我們可以開展關於機製砂用於抹灰工程的兩場現場試驗。

第一次抹灰工程試驗：第一場現場試驗是於 2015 年 3 月 24 日在建造業議會的九龍灣培訓中心進行。在現場試驗中，共製備了 5 組砂漿以用於試驗。所有的抹灰作業都在混凝土垂直表面上進行，而作業的混凝土表面會提前 10 分鐘進行灑水濕潤並在抹灰作業前用抹布擦乾。待砂漿硬化後，抹灰的混凝土面板會被送往香港大學的實驗室進行 7 天拉拔試驗。對於每塊混凝土面板，都會進行三次的拉拔試驗。

第二次抹灰工程試驗：第二場現場試驗是於 2015 年 4 月 2 日在九龍灣的合源建材有限公司的培訓中心進行。在現場試驗中，共製備了 5 組砂漿以用於試驗。所有的抹灰作業都在混凝土垂直表面，以及混凝土天花板上（如可行）進行。而作業的混凝土表面會提前 10 分鐘進行灑水濕潤並在抹灰作業前用抹布擦乾。待砂漿硬化後，抹灰的混凝土面板會被送往香港大學的實驗室進行 7 天拉拔試驗。對於每塊混凝土面板，都會進行三次的拉拔試驗。

通過試驗，所得結論總結如下：

- (1) 機製砂 MS1（微細粉含量為 0.6%，最大粒徑為 2.36 毫米）適合作為抹灰砂漿的細骨料使用。當使用機製砂 MS1 時，砂漿的配合比要求灰砂比為 1:2.5，水灰比大約為 0.50。在水灰比 = 0.50（或其他可達到合適稠度的水灰比）時，抹灰作業可在混凝土垂直牆面和混凝土天花板上進行，且平均拉拔強度可超過 0.5 MPa。當水灰比低於或高於 0.50 時，砂漿不是太乾就是太濕，抹灰作業只能在垂直混凝土表面上進行。由此可見，水灰比的合適範圍較窄。因此，需要小心控制用水量，並對稠度有較好的判斷。
- (2) 雖然開始時只作為混凝土用細骨料使用，但後來發現機製砂 MS2（微細粉含量為 2.5%，最大粒徑為 5.0 毫米）同樣適合作為抹灰砂漿的細骨料。當使用機製砂 MS2 時，砂漿的配合比要求灰砂比為 1:2.5，水灰比大約為 0.50。在水灰比 = 0.50（或其他可達到合適稠度的水灰比）時，抹灰作業可在垂直混凝土牆面和混凝土天花板上進行（在該項目第一階段的現場試驗中，就已發現該款機製砂可用於混凝土天花板上的抹灰作業）。雖然砂漿表面仍可抹平，但由於有些骨料的粒徑較粗（粒徑大於 2.36 毫米），抹灰作

業仍有些困難。因此，對機製砂的最大粒徑控制在 2.36 毫米以內較為合適。

- (3) 河砂 RS，作為常用的建築材料，當然也適合作為抹灰砂漿的細骨料使用。當使用河砂 RS 時，砂漿的配合比要求灰砂比為 1:2.5，水灰比大約為 0.50。在合適的水灰比下，抹灰作業可在垂直混凝土牆面和混凝土天花板上進行。不過，需要留意的是，河砂的基本情況（如細度和含水率等）常會有較大波動（受採掘地的影響），所以砂漿準確的用水量需要在攪拌過程中判斷，且需要較好的經驗和技術才能製備出能夠在垂直混凝土牆面和混凝土天花板上進行抹灰作業的稠度合適的砂漿。

8. 訪問持份者

在第一階段的研究中，調查員關國雄教授（AKHK）已經訪問了一些持份者，他們主要是將河砂和碎石細骨料用於混凝土和砂漿生產的用家。在第二階段的研究中，AKHK 訪問了另外三家公司，他們都是對香港的機製砂、粉碎廢玻璃以及回收細骨料市場有興趣的公司。

8.1 對文輝泰集團有限公司的訪問

文輝泰集團有限公司（文輝泰）多年來一直已經為香港供應砂漿用河砂和機製砂。目前，他們是香港機製砂唯一的供應商。

AKHK 已於 2014 年 2 月 18 日、2014 年 4 月 14 日、2014 年 5 月 11 日、2014 年 7 月 28 日、2014 年 9 月 24 日、2014 年 12 月 26 日和 2015 年 3 月 10 日與文輝泰的 Jason To 先生進行了面談或電話訪問。從 Jason To 先生處得知，他們位於蛇口的機製砂生產工廠已於 2013 年搬到了位於新會的石礦場（AKHK 曾在搬遷之前的幾個月訪問過位於蛇口的工廠）。但是，他們在新會遇到土地問題而不能馬上建設新的、更先進的生產廠，所以他們已經停止了超過一年向香港供應機製砂。這就是為什麼他們不能向 AKHK 提供所需機製砂的原因。最終，他們位於新會的生產廠終於在 2015 年 3 月投產。Jason To 先生告訴我們，他們一直在對新的生產廠作調試，並承諾只要機製砂產品符合標準，會盡快供應予香港。他們的機製砂年產量大約是 60 萬噸，如果市場反應理想，他們還可以增設多一條生產線使年產量翻倍。

在 2015 年 3 月 10 日，Jason To 先生向 AKHK 送來了機製砂樣品並進行了現場試驗。

在這幾次的訪問中，Jason To 先生對建造業議會開展本項研究表示感謝，並認為這項研究有助於提高業界對機製砂作為河砂替代品的認識。另外，他也補充，他們公司非常樂意遵照建議規格的要求生產機製砂。

8.2 對嘉華建築材料有限公司的訪問

嘉華建築材料有限公司（嘉華）是一家已經將粉碎廢玻璃用於替代部分骨料生產預製混凝土磚的公司。他們在安達巨石礦場和屯門生態公園各有一間工廠。

AKHK 已經和嘉華的 Alfred Ho 先生，Andy Kwok 先生和 Alex Lam 先生面談過幾次，並於 2013 年 12 月 13 日訪問了嘉華的寫字樓和於 2014 年 5 月 16 日參觀了嘉華位於生態公園的工廠。

在對其工廠進行參觀中討論的結果總結如下：

- (1) 如果有更多的廢玻璃送來，嘉華的工廠有能力生產更多的廢玻璃鋪路磚和隔牆的。這樣香港的廢玻璃回收利用率將得到提高。但是，問題在於廢玻璃鋪路磚和隔牆砌塊的成本比普通產品的高很多。如果沒有特別的激勵政策，用家沒有動力去購買價格更貴的產品。
- (2) 目前，回收廢玻璃骨料佔總骨料的的比例在 20-25%。將回收廢玻璃骨料佔總骨料的的比例提升到 50%是完全可能的，因為 AKHK 已經測試過 100%比例的廢玻璃骨料砂漿，且強度足夠滿足強度等級 45 MPa 的鋪路磚的要求。因此，從理論上上講，將回收廢玻璃骨料佔總骨料的的比例提升到 50%來提高香港廢玻璃的利用率是完全可行的。嘉華認同這個觀點，但也強調還須要做進一步的試產來對配合比進行調整。嘉華同時也強調，提高廢玻璃骨料的的比例會進一步提高生產成本。有需要給予一些激勵政策，來促使用家購買這些產品。亦或者，給予生產商一些補助，來維持價格在合理範圍內。
- (3) 目前，回收廢玻璃骨料不會添加到隔牆砌塊中。在香港，對隔牆砌塊的消耗量比對鋪路磚的消耗量大差不多 10 倍。此外，對隔牆砌塊的強度要求也比鋪路磚低很多。因此，將回收廢玻璃骨料佔總骨料的的比例提升到 50%來生產隔牆砌塊基本上是可行的。當然，生產隔牆砌塊的成本也隨之提高。所以，如果有一些激勵政策來鼓勵用家使用添加了至少 50%廢玻璃骨料的隔牆砌塊，那麼香港廢玻璃的回收利用率將會有極大的提高。
- (4) 將廢玻璃骨料作為河砂替代品用於砂漿抹灰工程也可以提高香港廢玻璃的回收利用率。但是，將廢玻璃粉碎至可用於抹灰工程的細度須花費較大成本。嘉華認為，將粉碎廢玻璃用於鋪路磚和隔牆砌塊或許更經濟。不過，如果有市場，嘉華也可以考慮生產可用於抹灰工程的粉碎廢玻璃以取代河砂。

8.3 對深圳市綠發鵬程環保科技有限公司的訪問

受建造業議會所託，AKHK 與深圳市綠發鵬程環保科技有限公司（LVFAR）的 Steven Wong 先生取得了聯繫，參觀了其在深圳的建築廢料回收工廠，並在深圳和香港與 LVFAR 的高層進行了會面。

AKHK 與 LVFAR 交流的簡報總結如下：

- (1) 在 2014 年 7 月 10 日，AKHK 參觀了 LVFAR 位於深圳龍崗的回收工程。據介紹，該工廠是現時國內此類最大的工廠。該工廠可以年處理約一百萬噸的建築廢料，並生產各類混凝土預製件（如：鋪路磚、隔牆砌塊、透水磚、植草磚等）和含有 100%回收細骨料、粗骨料的預包裝乾粉抹灰砂漿。他們產品的一個特點是，生產混凝土預製件和乾粉砂漿時無需使用任何天然石料或河砂。所以，他們的生產工藝或許是減少石料或河砂使用的可行方法。
- (2) LVFAR 有興趣進入香港市場。實際上，他們在香港已經有了代理。在 2014 年 7 月 18 日 AKHK 參加了他們香港公司的成立儀式。AKHK 告訴他們，香港混凝土預製件和乾粉砂漿的標準要比國內高，所以他們有必要將產品在香港進行檢測，以此證明他們的產品符合香港建築工程的一般規格要求。
- (3) AKHK 也和他們討論了香港是否歡迎這類由非香港產生的建築廢棄物所製成的產品。由於使用非香港產生的建築廢棄物來生產產品對提高香港建築廢棄物回收利用率沒有幫助，所以，唯一的方法就是使用香港產生的建築廢棄物作為原材料來生產產品。基於這個理由，LVFAR 可能需要在香港建立一間回收工廠來回收香港產生的建築廢料。不過，要想在香港設廠，土地是最大的問題。
- (4) 2014 年 12 月 30 日，關國雄教授再次對 LVFAR 進行了訪問，以了解他們在香港設廠的進度。LVFAR 回應稱，他們仍在香港尋找合適的地方設廠。他們也補充，他們位於深圳的工廠已經為香港市場研發了幾款使用了建築廢料的建築產品（如鋪路磚、透水磚、隔牆砌塊、以及 TiO₂ 空氣淨化磚等）。他們也收到了一些來自香港關於建築廢棄物回收方面的諮詢，但由於他們還未能在香港設廠處理建築廢棄物，所以他們無法承接這些項目。

8.4 總結

從以上的訪問中，總結出如下要點：

- (1) 按建議規格來生產機製砂並沒有技術上的難度。此外，從非官方途徑，AKHK 得知機製砂的生產成本並不會比河砂的現有價格高（以撰寫報告時計，河砂的價格大約是每噸 HK\$150）。

- (2) 在生產預製鋪路磚和隔牆砌塊時，提高回收廢玻璃骨料的比例至少到 50%是可行的。最大的問題是提高回收廢玻璃骨料的比例會大幅提高生產成本。有需要給予一些激勵政策，來促使用家購買這些產品。亦或者，給予生產商一些補助，來維持價格在合理範圍。
- (3) 從 LVFAR 在深圳多年經驗可以看到，使用回收細骨料來生產混凝土預製件和砂漿產品是不存在困難的。最大的問題是，由於香港土地資源短缺，他們想在香港找到一塊土地來建設回收工廠並非易事。為了推動香港建築廢棄物的回收利用，同時提高香港現時非常低的惰性固體廢棄物回收利用率，政府應當考慮提供低成本的合適土地來發展固體廢棄物回收利用產業。

9. 討論

9.1 機製砂作為河砂替代品

毫無疑問，經過處理後的碎石粉（通常可稱為機製砂）是可用於混凝土和砂漿最合適的河砂替代品。已被使用了幾十年的河砂，其最大特點在於經過多年的流水沖洗，微細粉含量非常低；同時由於常年的磨蝕，粒形圓潤光滑。與河砂不同的是，未經處理的碎石粉的微細粉含量較高，粒形多棱角、粗糙。不過，現代的採掘技術已經可以對碎石粉進行處理，以降低其微細粉含量和改善粒形。通常，微細粉含量可以通過水洗或風選法來降低，而粒形可以通過對骨料顆粒進行研磨來實現。

事實上，使用機製砂來替代河砂可以解決河砂的三大問題。第一，由於河砂是從上游不同地方沖刷下來的沉積物，其礦物學成分會非常複雜，因此，想保證其不會引起鹼骨料反應較為困難。第二，由於河砂是未作任何質量控制的天然材料，其性質可能會有較大波動（事實上，從不同地方採掘的河砂的性質都會有所不同），而機製砂是經過質量控制並確保符合標準及規格的人工材料。第三，在河口區域採掘的河砂很可能含有鹽分，這會使得所生產的混凝土和砂漿鹵化物含量過高。

對於將碎石粉作為河砂替代品用於混凝土，香港的混凝土生產商一早便調整了混凝土的配合比設計來適應。所以將碎石粉作為細骨料使用來生產普通混凝土是沒有難度的。當然，碎石粉對混凝土的和易性和強度會有些許影響，但這些影響可以通過增加水泥用量和水用量來實現，也可以通過提高減水劑劑量實現。有些混凝土生產商提出，對於生產高強混凝土或泵送混凝土，河砂（由於微細粉含量較低，粒形較好）還是比碎石粉要好。另外，近來一項關於機製砂用於混凝土生產的可行性研究已發表（R.K.K. Chow, S.W.S. Yip and A.K.H. Kwan, Processing crushed rock fine to produce manufactured sand for improving overall performance of concrete, HKIE Transactions, Vol.20, No.4, 2013, 240-249）。該研究表明使用微細粉

含量在 5%以下、粒形改善的機製砂可以提高骨料的堆積密實度，並減少混凝土生產中水泥的用量。

但是，機製砂的生產成本確實比未經處理的碎石粉高，是否使用機製砂取決於對所生產混凝土的性能要求。對於生產高強混凝土和泵送混凝土，機製砂是需要的，因為對它的要求要比標準 CS3: 2013 中的更高。實際上，標準 CS3: 2013 中的規定只是一般使用下的最低要求。雖然本項目的研究結果可以證明，標準中所設的微細粉含量限值是有其合理性的。但是，對於生產高強混凝土、泵送混凝土和低碳環保混凝土，則須要對細骨料有更高的要求。基於這個理由，我們希望混凝土生產商能與骨料生產商提前溝通協商，從而為特別的需求生產出高於標準 CS3: 2013 的機製砂。

對於碎石粉是否可作為河砂替代品用於砂漿工程，在與持份者的訪問和在第一階段的試驗中就已發現，未經處理的碎石粉由於其微細粉含量過高，不適宜作為河砂替代品用於砂漿工程。從第二階段的試驗中，我們發現，微細粉含量達到 8%的機製砂並不會對抹灰性能和強度有負面影響，所以沒有必要將微細粉含量限制在 3%以內。此外，最大粒徑 2.36 毫米的機製砂比最大粒徑 5.0 毫米的機製砂要好。所以，微細粉含量不高於 5%、最大粒徑為 2.36 毫米的機製砂是可用於抹灰和地板砂漿的合適河砂替代品。對於砌築砂漿，由於沒有抹灰性能的要求，微細粉含量可以達到 10%（無對亞甲藍試驗值的要求），甚至 14%（亞甲藍試驗值 \leq 1.4），這與混凝土用細骨料的要求相同。基於這些發現，建立了一部砂漿用骨料的建議規格。我們希望，當有了標準的規格，骨料生產商可以調整他們機製砂的生產工藝，生產出既符合標準也滿足市場需求的機製砂。

於未來，可能推出產品認證計劃，這樣骨料生產商將更有動力去提升產品和控制質量，來使其產品獲得相關認證。更重要的是，承包商和砂漿工人將會有品質保證的河砂替代品可用。不過，須加多少水才能滿足砂漿抹灰性能仍然是一個有待解決的工藝問題。不同工人採用不同的方法來確定砂漿的用水量會對砂漿抹灰和打底工程的質量造成影響，因此需要一個既操作簡便又可用於確定抹灰性能用水量的現場試驗方法。本項目採用的迷你坍塌擴展度試驗已就這方面給予了一些初步的指導意見，但仍需要工人在現場進行評估。為解決這一問題，仍須要進一步的研究。最後，我們也建議給予工人更多培訓，以幫助他們適應在砂漿工程中使用機製砂。

9.2 粉碎廢玻璃的可行性

目前，粉碎廢玻璃骨料在環保鋪路磚中只佔總骨料重量的 20%至 25%。如果可以將廢玻璃骨料在預製鋪路磚中的比例提高到 50%甚至更高，那麼香港廢玻璃的回收利用率將會有大幅提高，而所須傾倒於堆填區的廢

玻璃也將會大幅減少。本項目的研究結果顯示：使用 100%的粉碎廢玻璃細骨料生產強度等級 35 MPa 的預製鋪路磚（用於人行道）是可行的，而使用 50%的粉碎廢玻璃細骨料來生產強度等級 45 MPa 的預製鋪路磚（用於機動車出入口和緊急車輛通道）也是可行的。

在本項研究中，所有用於抗壓強度試驗的砂漿立方塊都是通過濕法成型（在澆築的 24 小時後拆模）製作的。但是，在實際生產中，預製鋪路磚則是通過乾法成型（在澆築後立即拆模以加快生產效率）製作的。一個中國大陸的供應商，根據 AKHK 的要求和指導，嘗試了用乾法成型來生產 100%廢玻璃骨料的預製鋪路磚，而所生產的預製鋪路磚的 28 天平均抗壓強度達到了 50 MPa（已完全符合強度等級 35 MPa 鋪路磚的要求）。而進一步的試驗也發現，70%廢玻璃的預製鋪路磚的 28 天平均抗壓強度達到了 55 MPa（也完全符合強度等級 35 MPa 鋪路磚的要求）。因此，用乾法成型來生產強度等級 30 MPa 的 100%廢玻璃骨料預製鋪路磚應該是可行的，而用乾法成型來生產強度等級 45 MPa 的 50%廢玻璃骨料預製鋪路磚也是可行的，不過仍需要更多的研究。

粉碎廢玻璃的另一種可能用法是將其用於砂漿工程。目前，粉碎廢玻璃還未被用於砂漿工程。從本項項目的試驗結果可知，對於抹灰工程，用 50%的粉碎廢玻璃骨料是可行的，但則不推薦使用 100%的粉碎廢玻璃骨料，因為此時砂漿的黏性會太低而不利於抹灰作業。因為在香港用於砂漿的河砂年消耗量達到一百萬噸，且河砂一直短缺，在砂漿中使用粉碎廢玻璃不僅可以解決廢玻璃的回收利用問題，還能解決河砂短缺問題。不過，這需要對粉碎廢玻璃的粒徑分佈有更嚴格的控制，且對砂漿的配合比也要把握得很好。此外，在現場配料和攪拌也會面臨很多工藝問題。或許，最好的解決方案就是將 50%的粉碎廢玻璃作為預包裝乾粉抹灰和打底砂漿的一部分，而且使用預包裝乾粉砂漿時，用水量也要保證準確。

9.3 回收細骨料的可行性

兩家現時向香港供應骨料的石礦場都有巴馬克研磨機。該機器可將舊水泥漿從石塊表面磨走，從而提高回收混凝土骨料的品質。AKHK 曾多次聯繫這兩家公司，看他們是否有興趣生產研磨回收混凝土骨料，以此提高香港廢舊混凝土的回收利用率。到目前為止，沒有得到他們的正式回覆。AKHK 認為，他們可能並沒有興趣生產研磨回收混凝土骨料。這可能是由於目前這一領域的市場並不明朗，而廢舊混凝土的回收政策也不清晰。因此，在沒有清晰的政策推動回收混凝土骨料下，回收骨料應用的進展或許會非常緩慢。

不過，深圳市綠發鵬程環保科技有限公司（LVFAR）有興趣打入香港市場。這是一家從建築廢料中生產回收細骨料，並用 100%回收細骨料生產建築產品的深圳公司。他們對這回收骨料市場較為樂觀，並將探尋一些

途徑來提高回收細骨料的品質，使回收細骨料可以更廣泛地使用在混凝土和砂漿工程中。

用於本項目中試驗的回收細骨料均由 LVFAR 提供，且試驗結果整體正面。第一，使用 100%回收細骨料來生產強度等級 30 MPa 的預製鋪路磚和強度等級 20 MPa 的非結構混凝土是可行的。但是，在生產強度等級 30 MPa 的混凝土時，回收細骨料的微細粉含量須要控制在 5%以內；而在生產強度等級 20 MPa 的混凝土時，回收細骨料的微細粉含量須要控制在 10%以內。

回收細骨料的微細粉含量可以通過風選法來除去多餘的微細粉。雖然這樣會提高生產的成本，但可以大幅提高用於混凝土（如混凝土預製件和非結構構件）和砂漿（如打底、抹灰、地坪、砌築）的回收細骨料的品質。建議可以將微細粉分為三個等級，F5、F10 和 F14，這和砂漿用天然骨料的規定是一樣的。實際上，正如 CS3: 2013，該標準對混凝土用天然和回收骨料做了規定，砂漿用骨料建議規格也打算對砂漿用天然和回收骨料做統一的規定。

整體來說，碎石粉和機製砂都是比回收混凝土骨料更好的河砂替代品。使用更多的回收混凝土骨料是出於降低傾倒於堆填區的固體廢棄物數量的角度出發的，而不是出於減少河砂消耗量的角度。控制回收混凝土骨料的品質並不容易，所以回收混凝土骨料只能用在一些對質量要求不是太高的建築產品，如隔牆砌塊、鋪路磚和砂漿工程。

10. 建議規格

10.1 建議規格草案初稿

正如“混凝土和水泥砂漿生產用河砂替代品研究（第二階段）”的研究目標簡述中所述，目標（1）是基於現有歐洲、英國和中國規格，草擬一部適用於香港本地的砂漿用骨料標準。

基於第一階段的研究和第二階段中對現有標準的文獻綜述，一部名為“砂漿用骨料建議規格（第一版）”的建議規格初稿被制訂並已包含在本階段研究中。該建議規格初稿的撰寫遵循以下原則：如果標準 BS EN 13139 中規定可以採用，則一律採用；如果標準 BS EN 13139 中規定不適合採用，則考慮本地條件後建立相關規定。此外，為了能與標準 CS3: 2013 配合並使得規定能夠被更好地應用，該建議規格初稿是遵循了標準 CS3: 2013 中的一般規定和採用相同的試驗方法。

標準中，微細粉含量的允許限值應為多少或許是最大的問題。由於不同標準中微細粉含量的最大允許限值各有不同，該問題會較具爭議性。另

一方面，微細粉中存在的有害物質（如粘土和污泥）以及砂漿生產中過高的用水量（由於微細粉的比表面積過大導致）也是須要留意的問題。因此，需要對骨料中的微細粉含量的限值作相應的規定。問題在於，微細粉含量的限值應規定為多少，且相關持份者是否能夠接受。

“砂漿用骨料建議規格（第一版）”的初稿（連同初始報告、進度報告 No. 1）已於 2013 年 9 月提交並發給了相關持份者進行諮詢。在第一輪諮詢之後，該建議規格被修改並命名為“砂漿用骨料建議規格：2015”。修改後的建議規格草稿（連同進度報告 No. 7）已於 2015 年 1 月提交並發給了相關持份者進行第二輪諮詢。在第二輪諮詢中，沒有收到進一步修改的要求。修改後的建議規格草稿附在附錄 D 中。

10.2 對持份者的諮詢

“砂漿用骨料建議規格（第一版）”的初稿（連同初始報告、進度報告 No. 1）已於 2013 年 9 月提交並發給了以下持份者進行諮詢。

- (1) 香港政府混凝土技術常務委員會
- (2) 香港政府工務中央試驗所
- (3) 香港建造商會
- (4) 香港建築業承建商聯會
- (5) 香港混凝土製造商協會
- (6) 礦業學會香港分會
- (7) 進口石材供應商協會
- (8) 香港建造業分包商聯會
- (9) 泥水商協會
- (10) 香港泥水建築業職工會
- (11) 香港工程師學會材料分部
- (12) 香港混凝土學會
- (13) 香港政府屋宇署
- (14) 承建商授權簽署人協會

一份有關諮詢與反饋的詳細報告收錄在附錄 E。所收到的反饋主要集中在以下幾點：（1）免除對非結構應用的耐久性要求；（2）刪除等級 F3 細骨料（即微細粉含量 $\leq 3\%$ ）並允許使用等級 F5 細骨料（即微細粉含量 $\leq 5\%$ ）於抹灰和地板砂漿。

為回應上述反饋，且在砂漿試驗中也發現，規定細骨料的微細粉含量限值為 3% 是沒有必要的，我們對建議規格作了修改。在修改後的新版中，免除了非結構應用的耐久性要求和刪除了等級 F3 細骨料，並將修改後的規格命名為“砂漿用骨料建議規格：2015”。修改後的規格草稿（連同進度報告 No. 7）已於 2015 年 1 月提交。

隨後修改後的規格草稿發給了相關持份者進行第二輪諮詢。一份有關第二輪諮詢與反饋的詳細報告收錄在附錄 E。所收到的反饋整體上都是支持的，且沒有對標準草稿作進一步修改的要求。許多持份者感謝建造業議會草擬這份針對砂漿用骨料的本地標準，並相信這部規格可以確保機製砂成為砂漿工程中河砂的合適替代品，也使得機製砂供應商在生產機製砂時可跟隨有關標準。

11. 結論

11.1 對文獻綜述的結論

標準篩尺寸、粗細骨料劃分和微細粉定義等在各個標準中各有不同。由於英國標準中標準篩尺寸、粗細骨料劃分和微細粉定義等已在香港使用多年，並與中國標準規定的基本相同，而且一些石礦場同時向香港和大陸的市場供應骨料，從市場的角度，沿用英國標準中標準篩尺寸、粗細骨料劃分和微細粉定義等應是一個更好的選擇。

通常，混凝土用骨料和砂漿用骨料所規定的要求是不相同的。這是因為混凝土和砂漿的性能不同，而細骨料的品質對混凝土和砂漿的影響也不同。因此，混凝土用骨料和砂漿用骨料必須有所區分。

對於混凝土用骨料和砂漿用骨料，關鍵問題似乎是：對微細粉含量限值的規定，以及對微細粉有害性的評估。微細粉含量須要進行限制基於以下原因：（1）微細粉中的任何有害物質都會對耐磨性、強度和耐久性造成負面影響；（2）微細粉含量會提高混凝土和砂漿的需水量和減水劑用量；（3）由微細粉含量過高引起的需水量增加會使得工人用更多的水來提高抹灰性能，而這樣做會使硬化的砂漿有更大的乾縮；（4）過量的微細粉也會使砂漿太粘稠而不利於抹灰作業。

另一方面，目前尚無有效的方法來評估骨料微細粉的有害性，也沒有建立可接受的標準來確定微細粉是否無害。標準 BSI PD 6682-3 建議通過如下方法來評估有害的微細粉：給微細粉含量設定限值，或者可以證明其滿足使用要求。這是一個可避免對評估方法和可接受標準的議題上產生爭議，也較為實用的方法。所以，限制微細粉含量的另一個理由是這樣做可以降低骨料中含有有害物質的風險。

最後，在標準 BS 1199: 1976，BS 1200: 1976，BS 882: 1992 和 CS3: 2013 中，細骨料的最大粒徑規定為 5.0 毫米，而在標準 BS EN 13139: 2002 和 BS EN 13139: 2013 中，細骨料的最大粒徑規定為 4.0 毫米或 2.0 毫米。雖然我們並沒有嚴格遵循歐洲標準，但本著謹慎的原則，按不同的應用將細骨料的最大粒徑作不同的規定（如 5.0 毫米和 2.36 毫米）似乎也是可取的。

綜上所述，我們建議為砂漿用骨料建立一個獨立的本地標準。當然，該標準應與標準 CS3: 2013 相配合，使得兩個標準中的術語相同，對混凝土和砂漿用骨料的試驗方法相同，以及某些骨料產品可同時用於混凝土和砂漿。此外，不同於之前的混凝土或砂漿用骨料的標準（在這些標準中細骨料的最大粒徑為 5.0 毫米），在新標準中砂漿用骨料的最大粒徑因應使用的不同，可以是 5.0 毫米或 2.36 毫米。最後，雖然不同標準對微細粉含量限值的規定各有不同，且新的歐洲標準 BS EN 13139: 2013 沒有

對微細粉含量限值作明確規定，也不再對不同類型細骨料（微細粉含量不同）的使用舉例說明，但本著謹慎的原則，在新標準中仍會對微細粉含量限值作出規定，且限值會參考之前的標準 BS 1199: 1976，BS 1200: 1976，BS EN 13139: 2002 以及 BSI PD 6682-3: 2003。

11.2 對混凝土用細骨料的結論

對混凝土的試驗表明，微細粉含量對混凝土的各項性能有如下影響：

- (1) 微細粉對和易性有顯著的不利影響，在坍落度和流動度很低時除外。因為在坍落度和流動度很低時，試驗無法反映微細粉對和易性的影響。
- (2) 微細粉對強度的影響很小，在水灰比 = 0.30 時除外。在水灰比 = 0.30 時，不低於 12% 的微細粉含量會對混凝土強度產生顯著的不利影響，而原因在於過量的微細粉會使得混凝土難以振搗。
- (3) 微細粉含量對提高混凝土的黏聚性和抗離析性具有一定的有利影響。

總體來說，在細骨料中高含量的微細粉會降低混凝土的和易性，但如果微細粉含量不超過 10%，降低的和易性可通過添加減水劑來彌補。因此，或許可說：若微細粉的質量較好且有害物質很少，微細粉含量大於 10% 是可以接受的。

超過 10% 的微細粉含量仍可接受，只要混凝土試配時能保持所需的和易性而不使用過量減水劑。即使是這樣，仍須要考慮給微細粉含量設一個最大限值。在標準 CS3: 2013 中，對於一般使用條件下，微細粉含量的最大限值被定為 14%（附加要求是：微細粉含量大於 10% 時，亞甲藍試驗限值不大於 1.4）；對於重載地面層，微細粉含量的最大限值定為 10%。這些最大限值是合理。而須要給微細粉含量設一個最大限值的另一個原因是，在實際應用中，微細粉會發生明顯的團聚現象。如果團聚過於明顯，會使得混凝土的和易性經常發生變化，這會對混凝土生產商調整減水劑劑量來補償因和易性之變化而所造成的困難。

另外，在試驗中發現，在水灰比 = 0.30 時，不低於 12% 的微細粉含量會對混凝土強度產生顯著的不利影響，而原因在於過量的微細粉會使得混凝土難以振搗。由於高強混凝土的水灰比較低，因此建議在生產高強混凝土時，微細粉含量不應高於 10%。換句話說，微細粉含量限制在 10% 不僅是對重載地面層的要求，也是對高強混凝土的要求。

11.3 對砂漿用細骨料的結論

從砂漿試驗可得到如下結論：砂漿的抹灰性能在砂漿既不太乾也不太濕的情況下最好。不過，砂漿的抹灰性能似乎更受砂漿水灰比（或水含

量)的影響,而不是細骨料的微細粉含量。基於不同條件下適合抹灰工程的水灰比總結如下:

- (1) 在最大粒徑 = 2.36 毫米且漿體體積 = 42%時,合適的水灰比 = 0.60
- (2) 在最大粒徑 = 2.36 毫米且漿體體積 = 48%時,合適的水灰比 = 0.50
- (3) 在最大粒徑 = 5.0 毫米且漿體體積 = 48%時,合適的水灰比 = 0.40

適合抹灰工程的水灰比隨著細骨料最大粒徑和漿體體積的變化而變化,且適合抹灰工程的水灰比(或水含量)的允許範圍非常窄。因此,對砂漿的水灰比(或水含量)須要小心控制。不過,在本項目所涵蓋的最大粒徑和漿體體積的範圍內,達到 8%的微細粉含量仍對抹灰性能和強度無負面影響。最後,在適合的水灰比且微細粉含量不大於 8%時,是可以獲得不少於 0.7 MPa 的拉拔強度。這樣的拉拔強度已經足夠高,因為標準要求的拉拔強度僅為 0.5 MPa。

整體來說,對砂漿用細骨料的微細粉含量限值定為 3%似乎是沒有必要的。換句話說,等級 F3 的細骨料(微細粉含量 \leq 3%)是沒有必要的。標準中對抹灰和地板砂漿的要求中,可以取消等級 F3,而只用等級 F5(微細粉含量 \leq 5%)。

此外,漿體體積 48%的砂漿更適合抹灰工程。而稍微低一點的漿體體積(45%)應該也是可行的。在工地上,灰砂比更常用。所以將漿體體積 48%轉化為灰砂比為 1:2.36;而漿體體積 45%轉化為灰砂比為 1:2.66。由此可見,適合抹灰工程的灰砂比大概為 1:2.5。

在以往的砂漿作業中,砂漿的水含量是不會嚴格規定的,工人都是通過自己的判斷給砂漿加水來製備具有最理想抹灰性能的砂漿。這需要工人有較好的培訓和經驗。基於該項目的研究,制訂了一項對坍落度(由迷你坍落擴展度試驗測得)需達到 10 ± 3 毫米的一般規定。為了避免所添加的水過多或過少所造成的工藝問題,應鼓勵工人學習和採用迷你坍落擴展度試驗。此外,使用預包裝乾粉抹灰砂漿也是一個不錯的選擇。使用預包裝材料可以保證所用細骨料的品質和準確控制灰砂比。同時,預包裝乾粉砂漿的供應商也應通過試驗和經驗獲得所需添加的水的準確用量,並將相關要求詳細說明,以避免工人在現場使用中進行反覆試配的麻煩。

11.4 對粉碎廢玻璃可行性的結論

對粉碎廢玻璃的可行性,目前所獲得的試驗結果基本上是正面的。第一,摻 50%粉碎廢玻璃來生產強度等級 45 MPa 的預製鋪路磚和摻 100%粉碎廢玻璃來生產強度等級 35 MPa 的預製鋪路磚是可行的。第二,將摻 50%粉碎廢玻璃的砂漿用於抹灰工程是可行的。但將摻 100%粉碎廢玻璃的砂漿用於抹灰工程則不推薦,因為製得的砂漿的粘性不夠,較難操作。第三,級配等級為 C 和級配等級為 F 的粉碎廢玻璃的效果差不多,所以將廢玻璃粉碎得比平常更細是沒有特別好處,也是沒有必要的。

對於抹灰砂漿的漿體體積，45%至 50%會比較合適。而水灰比則需根據漿體體積、粉碎廢玻璃級配等級和含量而定。在保證抹灰性能的合適水灰比下，砂漿的拉拔試驗強度可以達到至少 0.6 MPa。

不過，仍存在著如何讓工人能夠確定合適的加水量來獲得最理想抹灰性能砂漿的問題。這須要工人有較好的培訓和經驗。基於該項目的研究，制訂了一項對坍落度（由迷你坍落擴展度試驗測得）須達到 10 ± 5 毫米的一般規定。除了靠經驗操作之外，也應鼓勵工人學習和採用迷你坍落擴展度試驗來確定可獲得最理想抹灰性能砂漿的加水量。此外，將粉碎廢玻璃與機製砂和水泥預先包裝來生產預包裝乾粉抹灰砂漿也是一個不錯的選擇。因為通常來說，預包裝乾粉砂漿材料的質量會比在現場製備的要好。同時，預包裝乾粉砂漿的供應商也應通過試驗和經驗獲得所須添加水的準確用量，並將相關要求詳細說明，以避免工人在現場使用中進行反覆試配的麻煩。

11.5 對回收細骨料可行性的結論

對回收細骨料的可行性，目前所獲得的試驗結果基本上是正面的。第一，在混凝土中使用 100%的回收細骨料是可行的。不過，對生產強度等級 30 MPa 的混凝土，有必要把回收細骨料的微細粉含量控制在 5%以內；對生產強度等級 20 MPa 的混凝土，有必要把回收細骨料的微細粉含量控制在 10%以內。第二，在抹灰砂漿中，使用 100%回收細骨料也是可行的。雖然適合抹灰作業的水灰比範圍較窄，但拉拔強度達到 0.5 MPa 是可行的。雖然微細粉含量 10%仍可接受，但出於生產穩定性的考慮（微細粉含量過大會使吸水率的變化過大，從而導致往砂漿中加入合適的水量較難），微細粉含量不宜大於 5%。

由於在本研究中只對少量的回收細骨料進行了試驗，因此回收細骨料品質的波動未能完全反映。可以預見的是回收細骨料的品質會有較大的波動。為了使回收細骨料的品質更穩定，一個方法是將 50%的回收細骨料與 50%的機製砂（經處理的碎石粉）混合使用。即使只使用 50%的回收細骨料在各類砂漿工程中，對香港而言，所提高的建築廢料的回收利用率也會非常可觀，同時砂漿生產所需的河砂也可以大幅減少。

11.6 對機製砂作為河砂替代品的結論

在本項目中，已為細骨料中微細粉含量對混凝土和砂漿性能的影響作出研究。對於混凝土用細骨料，達到 10%的微細粉含量仍可接受；而高於 10%的微細粉含量也可接受，只要微細粉中沒有有害物質，且試配混凝土的和易性在未使用過量減水劑的前提下得到滿足。另一方面，對於砂漿用細骨料，達到 8%的微細粉含量不會對抹灰性能和強度產生負面影

響。因此，達到 8%的微細粉含量仍可接受。不過，為了避免微細粉的團聚，建議微細粉含量的限值應不高於 5%。

基於骨料原石的礦物學特徵和粉碎的方法不同，未經處理的碎石粉的微細粉含量在 6%至 16%之間（即高於或低於 10%）。因此，作為混凝土用細骨料（須按照標準 CS3: 2013 的要求），碎石粉無須特別處理來控制其微細粉含量。但是，對於砂漿用細骨料（要求其微細粉含量不大於 5%），碎石粉須要處理來降低其微細粉含量。此外，由於 2.36 毫米的骨料最大粒徑更好，因此須要通過機械篩分法篩除碎石粉中大於 2.36 毫米的部分。換句話說，在砂漿中作為細骨料使用的碎石粉應當處理，使之成為機製砂。研究中已對一些機製砂樣品做了現場試驗。試驗結果顯示，機製砂樣品可用於混凝土垂直牆面和混凝土天花板的抹灰工程。

基於本項目，一部砂漿用骨料的建議規格已草擬完成。該建議規格已通過電郵的方式發送到相關持份者，並尋求他們的建議和反饋。所收到的反饋已被認真考慮，並基於這些反饋，對該建議規格做了修改。修改後的建議規格再次發送到相關持份者進行第二輪的諮詢。第二輪諮詢收到的反饋大體正面，也沒有收到須要進一步修改的要求。

- 全文完 -

附錄 A

對發表於 2013 年關於混凝土和砂漿用骨料的最新規格的文獻綜述
(香港 CS3，歐洲 BS EN 12620，歐洲 BS EN 13139 和美國 ASTM C33/33M)

1. 2013 年與骨料相關的最新標準

在完成了河砂替代品第一階段研究之後，在 2013 年又相繼發表了四部關於混凝土和砂漿用骨料的新標準。這些新標準包括：

- (1) 香港建築標準 CS3: 2013 Aggregates for concrete
- (2) 歐洲標準 BS EN 12620: 2013 Aggregates for concrete
- (3) 歐洲標準 BS EN 13139: 2013 Aggregates for mortar
- (4) 美國標準 ASTM C33/C33M-13 Standard specification for concrete aggregates

這些與本項目第二階段研究有密切相關的標準已進行了詳細研究。對於 CS3: 2013，關注的重點在於：針對砂漿用骨料的各項條款的適用性，以及如何兼容混凝土用骨料的要求和砂漿用骨料的要求。對於 BS EN 12620: 2013 和 ASTM C33/C33M-13，關注的重點在於：歐洲和美國對級配、微細粉含量、粉體質量的最新要求。對於 BS EN 13139: 2013，關注的重點在於：對級配、微細粉含量、粉體質量的最新要求，以及這些要求在香港的適用性。

2. 香港建築標準 CS3: 2013 - 混凝土用骨料

該標準是香港目前唯一的一部針對骨料的標準。香港至今尚無針對砂漿用骨料的標準。CS3: 2013 很大程度上是參考了英國標準 BS 882: 1992，並將替代該英國標準。

該標準的標準篩尺寸為：75 微米，150 微米，300 微米，600 微米，1.18 毫米，2.36 毫米，5.0 毫米，10.0 毫米，20.0 毫米，37.5 毫米和 50.0 毫米。粒徑小於 5.0 毫米（可通過 5.0 毫米篩）的顆粒被定義為細骨料，而粒徑小於 75 微米（可通過 75 微米篩）的顆粒被定義為微細粉。該標準中關於標準篩、細骨料和微細粉的定義等與英國標準 BS 882: 1992 中規定的相同，但與歐洲標準 BS EN 12620: 2013 和 BS EN 13139: 2013 中所描述的則完全不同。

即使如此，標準 CS3: 2013 和英國標準 BS 882: 1992 還是有兩處不同。第一，BS 882: 1992 規定：對重載地面層，細骨料中的微細粉含量為 9%；而一般情況下，細骨料中的微細粉含量為 16%。不同的是，CS3: 2013 規定：對等級 I 細骨料（用於重載地面層），微細粉含量為 10%；而等級 II（用於一般情況），微細粉含量為 14%。第二，BS 882: 1992 不要求檢查細骨料的清潔度。但 CS3: 2013 規定，如果微細粉含量 > 10%，亞甲藍試驗限值需 ≤ 1.4。在標準 CS3: 2013 中規定較低的微細粉含量（14%）和對清潔度有新要求，都是為了提升細骨料的整體品質。

細骨料的級配等級限值已列在表 1 中。級配等級限值與標準 BS 882: 1992 中的相同。

表 1 在標準 CS3: 2013 和 BS 882: 1992 中的細骨料級配等級限值

篩尺寸	過篩質量百分比			
	總限值	級配等級限值		
		C	M	F
10.0 毫米	100	-	-	-
5.0 毫米	89 - 100	-	-	-
2.36 毫米	60 - 100	60 - 100	65 - 100	80 - 100
1.18 毫米	30 - 100	30 - 90	45 - 100	70 - 100
600 微米	15 - 100	15 - 54	25 - 80	55 - 100
300 微米	5 - 70	5 - 40	5 - 48	5 - 70
150 微米	0 - 20	-	-	-

為了與標準 CS3: 2013 相配合，相同的標準篩尺寸、相同的微細粉定義將用於該砂漿用骨料新標準中。此外，也會採用相同的試驗方法。

3. 歐洲標準 BS EN 12620: 2013 - 混凝土用骨料

這是混凝土用骨料的最新歐洲標準。該標準是標準 BS EN 12620: 2002 的改版，同時也在英國替代了標準 BS 882: 1992。

在 2002 版中，標準篩的尺寸包括：63 微米，125 微米，250 微米，0.5 毫米，1 毫米，2 毫米，4 毫米，8 毫米，16 毫米，32 毫米和 63 毫米，這與英國標準完全不同。而粗細骨料劃分以粒徑 4 毫米為界（換句話說，粗骨料是指粒徑大於 4 毫米的骨料，而細骨料是指粒徑小於 4 毫米的骨料）。另外，微細粉的定義是指粒徑小於 63 微米的部分（即通過 63 微米篩）。

對於最大粒徑 D 不大於 4 毫米的細骨料，有如下一般要求：100% 通過尺寸為 $2D$ 的篩子，至少 95% 通過尺寸為 $1.4D$ 的篩子，以及 85% 至 95% 通過尺寸為 D 的篩子。因此，允許 15% 的細骨料可大於所規定的最大粒徑。除了上述要求以外，對細骨料的級配等級沒有其他要求了。

在 2002 版中，要求骨料生產商對所生產的細骨料典型級配等級進行聲明，同時採用公差限值來控制細骨料的變化。所採用的公差限值已列在表 2 中。須要指出的是，標準 BS EN 12620: 2013 中的公差限值與標準 BS EN 12620: 2002 中的有很大不同。

表 2 標準 BS EN 12620: 2013 中的細骨料典型級配等級公差限值

篩尺寸	過篩質量公差		
	類別 G_{rc10}	類別 G_{rc20}	類別 G_{rc25}
D^a	± 5	± 5	± 7.5
$D/2$	± 10	± 20	± 25
250 微米	± 20	± 25	± 25
63 微米 ^b	± 3	± 5	± 5

^a 對通過篩尺寸 D 後的進一步公差限值
^b 對最大可允許的微細粉含量的進一步公差限值

為了用符號來描述細骨料的粗度或細度，特別是用來規定某個級配等級限值，用了如下符號來對細骨料進行描述： C （粗）、 M （中）、 F （細）。關於細骨料的所述描述，可使用表 3 或表 4 中的任一個（但不能同時使用兩個）。

表 3 標準 BS EN 12620 中基於過篩百分比的粗度/細度

過 0.5 毫米篩的過篩質量百分數		
CP	MP	FP
5 至 45	30 至 70	55 至 100

表 4 標準 BS EN 12620 中基於細度模數的粗度/細度

細度模數		
CF	MF	FF
4.0 至 2.4	2.8 至 1.5	2.1 至 0.6

將表 3 和表 4 與表 1 進行比較可以發現，標準 BS EN 12620: 2013 和 BS EN 12620: 2002 中對細骨料粗等級（ CP 或 CF ）、中等級（ MP 或 MF ）、細等級（ FP 或 FF ）的規定與標準 CS3: 2013 和 BS 882: 1992 中的粗等級（ C ）、中等級（ M ）、細等級（ F ）類似。

在 2002 版中，沒有對骨料中的微細粉含量作規定。骨料生產商允許按指定類別來聲明其骨料的微細粉含量。但是，在 2013 版中，增加了一個指定類別：類別 f_6 。在 2002 版中，微細粉含量最大值的分類為： f_3 - 微細粉含量 $\leq 3\%$ ； f_{10} - 微細粉含量 $\leq 10\%$ ； f_{16} - 微細粉含量 $\leq 16\%$ ； f_{22} - 微細粉含量 $\leq 22\%$ 。在 2013 版中，微細粉含量最大值的分類為： f_3 - 微細粉含量 $\leq 3\%$ ； f_6 - 微細粉含量 $\leq 6\%$ ； f_{10} - 微細粉含量 $\leq 10\%$ ； f_{16} - 微細粉含量 $\leq 16\%$ ； f_{22} - 微細粉含量 $\leq 22\%$ 。由此可見，在標準 BS EN 12620: 2013 中，微細粉含量的分類更細。

與英國標準不同，在 2002 版中允許骨料生產商對最大微細粉含量進行聲明，且如果微細粉含量可嚴格控制，允許所生產的骨料有較高的微細粉含量。

與 2002 版不同，2013 版對微細粉質量的要求更為明確。根據標準 BS EN 12620: 2013 第 4.5 節的規定，在以下四種條件任一種採用時，微細粉可被認為是無害的：

- (1) 細骨料中的微細粉含量不大於 3%；
- (2) 砂當量值高於某個特定限值；
- (3) 亞甲藍試驗限值低於某個特定限值；
- (4) 有滿足使用要求的在冊證明文件

但標準中沒有給出微細粉含量、砂當量值和亞甲藍試驗限值的具體要求。這些限值應根據骨料使用所在地跟當地的相關標準確來確定。

4. 歐洲標準 BS EN 13139: 2013 - 砂漿用骨料

這是砂漿用骨料的最新歐洲標準。該標準是標準 BS EN 13139: 2002 的改版，同時也在英國替代了標準 BS 1199 和 BS 1200: 1976。

該標準中的標準篩尺寸、細骨料的定義（即粒徑小於 4 毫米的骨料）以及微細粉的定義（即粒徑小於 63 微米的骨料）與 2002 版中的相同，也與標準 BS EN 12620: 2013 中的相同。

對於最大粒徑 D 不大於 4 毫米的細骨料，有如下一般要求：100% 通過尺寸為 $2D$ 的篩子，至少 95% 通過尺寸為 $1.4D$ 的篩子，以及 85% 至 95% 通過尺寸為 D 的篩子。因此，允許 15% 的細骨料可大於所規定的最大粒徑。除了上述要求以外，對細骨料的級配等級沒有其他要求了。這些要求與在標準 BS EN 12620: 2013 中的完全相同。

在 2002 版中，骨料生產商被要求聲明所生產的細骨料的典型級配等級，也採用公差限值來控制細骨料的變化。所採用的公差限值已在表 5 中列出。須要說明的是，在標準 BS EN 13139: 2013 中的公差限值與在標準 BS EN 13139: 2002 中的有很大不同。

將表 5 與表 2 進行對比可發現，標準 BS EN 13139: 2013 中的公差限值與在標準 BS EN 12620: 2013 中的並不相同。因此，對於符合標準 BS EN 12620: 2013 中規定的細骨料，未必符合標準 BS EN 13139: 2013 中的規定。其中一個較大的差別是：在標準 BS EN 13139: 2013 中，類別 G_{rc25} （該類別對級配的控制不嚴）是不允許的。另一個較大的差別是： $D/2$ 的公差限值要求只適用於 0/8 毫米和 0/2 毫米細骨料。對於 0/4 毫米細骨料， $D/2$ (= 2.0 毫米) 公差限值被 1.0 毫米篩公差限值代替（但公差限值的數值相同）。

表 5 標準 BS EN 13139: 2013 中的細骨料典型級配等級公差限值

篩尺寸	過篩質量公差		
	類別 G_{rc10}	類別 G_{rc20}	類別 G_{rc25}
D^a	± 5	± 5	該類別不允許
$D/2^c$	± 10	± 20	
250 微米	± 20	± 25	
63 微米 ^b	± 3	± 5	
^a 對通過篩尺寸 D 後的進一步公差限值 ^b 對最大可允許的微細粉含量的進一步公差限值 ^c 對 0/4 毫米骨料， $D/2$ 篩需由 1.0 毫米篩代替			

為了用符號來描述細骨料的粗度或細度，特別是用來規定某個級配等級限值，用了如下符號來對細骨料進行描述： C （粗）、 M （中）、 F （細）。關於細骨料的所述描述，可使用表 6 或表 7 中的任一個（但不能同時使用兩個）。須要注意的是，表 6 與表 3 完全相同，但表 7 與表 4 稍有不同。因此，在標準 BS EN 13139: 2013 中對粗度或細度的描述與在標準 BS EN 12620: 2013 中的不完全相同。

表 6 標準 BS EN 13139 中基於過篩百分比的粗度/細度

過 0.5 毫米篩的過篩質量百分數		
CP	MP	FP
5 至 45	30 至 70	55 至 100

表 7 標準 BS EN 13139 中基於細度模數的粗度/細度

細度模數		
CF	MF	FF
≥ 2.4	2.8 to 1.5	2.1 to 0.6

在 2002 版中，對細骨料微細粉含量沒有作規定。骨料生產商允許按指定類別來說明其骨料的微細粉含量。但是，在 2013 版中的指定類別與在 2002 版中的有所不同，小結如下：

在 2002 版中，最大微細粉含量的規定類別包括：

- 類別 1 - 微細粉含量 $\leq 3\%$ ；
- 類別 2 - 微細粉含量 $\leq 5\%$ ；
- 類別 3 - 微細粉含量 $\leq 8\%$ ；
- 類別 4 - 微細粉含量 $\leq 30\%$ ；

此外，對不同類別下細骨料的使用作了規定：
類別 1：地坪、噴射、修補砂漿、灌漿（所有骨料均可）
類別 2：打底砂漿，抹灰砂漿（所有骨料均可）
類別 3：砌築砂漿（不含碎石粉骨料）
類別 4：砌築砂漿（碎石粉骨料）

在 2013 版中，最大微細粉含量的規定類別包括：
類別 f_3 - 微細粉含量 $\leq 3\%$ ；
類別 f_5 - 微細粉含量 $\leq 5\%$ ；
類別 f_8 - 微細粉含量 $\leq 8\%$ ；
類別 f_{22} - 微細粉含量 $\leq 22\%$ ；
但對不同類別下細骨料的使用不再做規定。

與 2002 版不同，2013 版對微細粉質量的要求更為明確。根據標準 BS EN 13139: 2013 第 4.5 節的規定，在以下四種條件任一種採用時，微細粉可被認為是無害的：

- (1) 細骨料中的微細粉含量不大於 3%；
- (2) 砂當量值高於某個特定限值；
- (3) 亞甲藍試驗限值低於某個特定限值；
- (4) 有滿足使用要求的在冊證明文件

但標準中沒有給出微細粉含量、砂當量值和亞甲藍試驗限值的具體要求。這些限值應根據骨料使用所在地當地的相關標準確定。這些要求與在標準 BS EN 12620: 2013 中的完全相同。

5. 美國標準 ASTM C33/C33M-13 - 混凝土用骨料標準規格

這是 2013 年發表的混凝土用骨料的最新美國標準。該標準中，標準篩的尺寸為：75 微米，150 微米，300 微米，0.6 毫米，1.18 毫米，2.36 毫米，4.75 毫米和 9.5 毫米，這與英國標準 BS 882: 1992 和香港建築標準 CS3: 2013 較為相似。

粗細骨料劃分以粒徑 4.75 毫米為界（換句話說，粗骨料是指粒徑大於 4.75 毫米的骨料，而細骨料是指粒徑小於 4.75 毫米的骨料）。另外，微細粉的定義是指粒徑小於 75 微米的部分（即通過 75 微米篩）。這與英國標準 BS 882: 1992 和香港建築標準 CS3: 2013 較為相似。

細骨料的級配限值已在表 8 中列明。與英國標準 BS 882: 1992 和香港建築標準 CS3: 2013 不同，該標準只指定了一種級配類型。如無特別說明，微細粉含量的限值為 3.0%。如果對混凝土的耐磨性沒有要求，微細粉含量可以是 5.0%。

表 8 標準 ASTM C33/C33M-13 中的細骨料級配等級

篩尺寸	過篩質量百分比
9.5 毫米	100
4.75 毫米	95 - 100
2.36 毫米	80 - 100
1.18 毫米	50 - 85
600 微米	25 - 60
300 微米	5 - 30
150 微米	0 - 10
75 微米	0 - 3

對於機製砂（即碎石細骨料），如果其微細粉中含有塵土，尤其是黏土或頁岩粉，對有耐磨性要求的混凝土，微細粉含量應為 5.0%，對於沒有耐磨性要求的混凝土，微細粉含量可為 7.0%。這些限值相比中國標準 GB/T 14684: 2001 和 JGJ 52: 2006 而言較低。

對於微細粉含量較高的機製砂，須要對其進行評估，以保證在粉碎過程中微細粉基本上是由母岩粉碎而來，且沒有摻有過量的粘土礦物或有害物質。亞甲藍吸附和比重計分析是可對微細粉進行特徵分析和確定是否適合用於混凝土的可靠試驗。小於 2 微米的顆粒含量低於 4% 和亞甲藍吸附值低於 5 mg/g 的機製細骨料被認為是可用於混凝土的細骨料。不過，超過上述限值的機製細骨料也可使用，只要混凝土的新拌和硬化性能達到要求即可。

6. 對混凝土和砂漿用骨料最新標準的小結

將對以上標準以及英國標準和中國標準就以下幾個方面進行對比。

6.1 標準篩尺寸

在英國標準（也是香港以前用的標準）、本地建築標準（香港正在使用的標準）、中國標準（中國大陸使用的標準，中國大陸也是香港所用骨料最大的來源）和美國標準中，標準篩尺寸較為相近。但歐洲標準中的標準篩尺寸則與前者有很大不同。由於很多石礦場同時向中國大陸和香港供應骨料，沿用中國和香港都使用的標準篩尺寸會更好，而不需要改為歐洲標準。

6.2 粗細骨料劃分

在英國標準、本地建築標準、中國標準和美國標準中，粗細骨料劃分較

為相近。但歐洲標準中的粗細骨料劃分則與前者有很大不同。將英國標準、本地建築標準、中國標準和美國標準中規定的粗細骨料劃分界限 5.0 毫米篩尺寸改為歐洲標準中的 4.0 毫米篩尺寸會造成設備更換的問題並導致以往的經驗不可用。因為，沿用中國和香港都使用的粗細骨料劃分會更好，而不須要改為歐洲標準。

6.3 細骨料級配限值

在英國標準、香港本地建築標準和中國標準中，都規定了三種細骨料級配等級或級配區間（中國標準中改的級配區間 1、2 和 3 等同於英國標準和香港本地建築標準中的 C、M 和 F）。而在美國標準中，規定了一種類型的級配限值。但在歐洲標準中，沒有規定級配限值，取而代之的是，骨料生產商允許對其生產的細骨料的典型級配進行說明，但須要確保骨料的級配在指定的公差限值內。不過，細骨料的粗度/細度或許需要由基於可通過 0.5 毫米篩的百分數或細度模數所劃分的等級 C、M 和 F 來確定（這些等級與英國標準和香港本地建築標準中的類似）。

相對而言，從規格和質量控制的角度，按照英國標準、香港本地建築標準、中國標準和美國標準中的要求直接規定級配等級比讓骨料生產商說明典型級配並通過公差限值來控制級配要好。

6.4 級配等級

在標準 BS 1199: 1976 中，對室外打底和室內抹灰推薦了兩種級配等級：A 類或 B 類。同時，在標準 BS 1200: 1976 中，對砌築砂漿也推薦了另兩個級配等級：S 類和 G 類。在表 9 中，A 類和 B 類與在標準 CS3: 2013 和 BS 882: 1992 中的級配等級做了比較。在表 10 中，S 類和 G 類與在標準 CS3: 2013 和 BS 882: 1992 中的級配等級做了比較。

從表 9 中可以發現，標準 CS3: 2013 和 BS 882: 1992 中的級配等級與標準 BS 1199: 1976 中的 A 類等級非常接近。實際上，除了規定在 5.0 毫米篩上稍高的百分數（即 11%）以外，以及規定過 150 微米篩稍高的百分數（20%），等級 C 和 M 與 A 類等級基本上是相同的。在現實中，對在 5.0 毫米篩上百分數和過 150 微米篩百分數的些許不同所造成的影響很小，等級 C 和 M 或許可以等同於 A 類等級。此外，表中也可發現，標準 CS3: 2013 和 BS 882: 1992 中的等級 F 與標準 BS 1199: 1976 中的 B 類等級非常接近。實際上，除了規定在 5.0 毫米篩上稍高的百分數（即 11%）以外，等級 F 與 B 類等級基本上是相同的。在現實中，對在 5.0 毫米篩上百分數上些許不同的影響很小，等級 F 或許可以等同於 B 類等級。

表 9 標準 BS 1199: 1976 中的級配等級與標準 CS3: 2013 和 BS 882: 1992 中的對比

篩尺寸	標準 BS 1199: 1976 中的級配等級		標準 CS3: 2013 和 BS 882: 1992 中的級配等級		
	A 類	B 類	C	M	F
10.0 毫米	100	100	100	100	100
5.0 毫米	95 - 100	95 - 100	89 - 100	89 - 100	89 - 100
2.36 毫米	60 - 100	80 - 100	60 - 100	65 - 100	80 - 100
1.18 毫米	30 - 100	70 - 100	30 - 90	45 - 100	70 - 100
600 微米	15 - 80	55 - 100	15 - 54	25 - 80	55 - 100
300 微米	5 - 50	5 - 75	5 - 40	5 - 48	5 - 70
150 微米	0 - 15	0 - 20	0 - 20	0 - 20	0 - 20

表 10 標準 BS 1200: 1976 中的級配等級與標準 CS3: 2013 和 BS 882: 1992 中的對比

篩尺寸	標準 BS 1200: 1976 中的級配等級		標準 CS3: 2013 和 BS 882: 1992 中的級配等級		
	S 類	G 類	C	M	F
10.0 毫米	100	100	100	100	100
5.0 毫米	98 - 100	98 - 100	89 - 100	89 - 100	89 - 100
2.36 毫米	90 - 100	90 - 100	60 - 100	65 - 100	80 - 100
1.18 毫米	70 - 100	70 - 100	30 - 90	45 - 100	70 - 100
600 微米	40 - 100	40 - 100	15 - 54	25 - 80	55 - 100
300 微米	5 - 70	20 - 90	5 - 40	5 - 48	5 - 70
150 微米	0 - 15	0 - 25	0 - 20	0 - 20	0 - 20

從表 10 中可以發現，在標準 BS 1200: 1976 中的 S 類和 G 類等級規定在 5.0 毫米篩上的百分數不高於 2%，在 2.36 毫米篩上的百分數不高於 10%。因此，S 類和 G 類骨料更像是最大粒徑為 2.36 毫米的骨料（在歐標標準中由術語 0/2.36 毫米表示），而不是最大粒徑為 5.0 毫米的骨料（在歐標標準中由術語 0/5.0 毫米表示）。因此，在標準 CS3: 2013 和 BS 882: 1992 中沒有與 S 類和 G 類等級對應的級配等級。事實上，在標準 CS3: 2013 和 BS 882: 1992 中規定的細骨料（其最大粒徑都是 5.0 毫米）均為混凝土用細骨料，而不是砂漿用細骨料。為了在實際應用中所獲得的砂漿不太厚，採用最大粒徑 2.36 毫米的骨料（即標準 BS 1200: 1976 中的 S 類和 G 類骨料）會更好。而在歐洲標準 BS EN 13139: 2002 和 BS EN 13139: 2013 中，類似的粒徑為 0/2 毫米或 0/4 毫米。雖然我們無須嚴格遵循歐洲標準，但本著謹慎的原則，針對不同的實際應用選擇不同最大粒徑的細骨料（如 0/5.0 毫米骨料或 0/2.36 毫米骨料）是可取的。

6.5 微細粉的定義

在英國標準、香港本地建築標準、中國標準和美國標準中，微細粉被定義為粒徑小於 75 微米或 80 微米的材料。而在歐洲標準中，微細粉被定義為粒徑小於 63 微米的材料。對於微細粉定義上的微小差異不足為慮。不過，最好能沿用香港、中國和美國標準的定義，而無須改為歐洲標準。

6.6 微細粉含量限值

在不同標準中，對微細粉含量的允許限值有很大的不同。在標準 BS 882: 1992 中，混凝土用碎石砂的微細粉含量限值規定為 16%（一般用途）和 9%（重載地面層）。在標準 CS3: 2013 中，微細粉含量限值規定為 14%（一般用途，且要求微細粉含量 > 10% 時，亞甲藍試驗值需 ≤ 1.4）和 10%（重載地面層）。在標準 BS 1199: 1976 和 BS 1200: 1976，砂漿用碎石砂的微細粉含量限值規定為 5%（打底和抹灰工程）、10%（S 類砌築砂漿用砂）和 12%（G 類砌築砂漿用砂）。在標準 ASTM C33/C33M-13 中，機製砂的微細粉含量限值为 5%（對耐磨性有要求的混凝土）和 7%（對耐磨性無要求的混凝土）。

在標準 BS EN 12620: 2002 和 BS EN 12620: 2013 中，對混凝土用細骨料沒有對微細粉含量作任何規定。在標準 BS EN 13139: 2002 中，將砂漿用細骨料分成四個類別：類別 1（微細粉含量 ≤ 3%）；類別 2（微細粉含量 ≤ 5%）；類別 3（微細粉含量 ≤ 8%）以及類別 4（微細粉含量 ≤ 30%）。對於不同類別，對其使用作了如下推薦：類別 1：地坪、噴射、修補砂漿、灌漿（所有骨料均可）；類別 2：打底砂漿，抹灰砂漿（所有骨料均可）；類別 3：砌築砂漿（不含碎石粉骨料）；類別 4：砌築砂漿（碎石粉骨料）。在標準 BS EN 13139: 2013 中，對最大微細粉含量分類如下：類別 f_1 （微細粉含量 ≤ 3%），類別 f_2 （微細粉含量 ≤ 5%），類別 f_3 （微細粉含量 ≤ 8%）以及類別 f_4 （微細粉含量 ≤ 22%）。不過，不再對其使用做推薦。但不推薦不代表對微細粉含量限值不作規定。

在 BSI PD 6682-3: 2003（一份英國標準學會發表的文件）中，建議的最大微細粉含量為：對自流平砂漿，微細粉含量 ≤ 3%；對打底和抹灰工程，微細粉含量 ≤ 5%；對用 S 類砂的砌築砂漿，微細粉含量 ≤ 5%；對用 G 類砂的砌築砂漿，微細粉含量 ≤ 8%。

在標準 GB/T 14684: 2001 和 JGJ 52: 2006 中，骨料微細粉含量的限值受來源和用途的不同而不同。在標準 GB/T 14684（JGJ 52）中，關於天然砂：對於高強度混凝土，微細粉含量 < 1.0%（≤ 2.0%）；對於中等強度混凝土，微細粉含量 < 3.0%（≤ 3.0%）；對於低強度混凝土，微細粉含量 < 5.0%（≤ 5.0%）。在標準 GB/T 14684（JGJ 52）中，關於機製砂：（1）若通過了亞甲藍試驗，對於高強度混凝土，微細粉含量 < 3.0%

($\leq 5.0\%$)；對於中等強度混凝土，微細粉含量 $< 5.0\%$ ($\leq 7.0\%$)；對於低強度混凝土，微細粉含量 $< 7.0\%$ ($\leq 10.0\%$)；(2) 如果未通過亞甲藍試驗，對於高強度混凝土，微細粉含量 $< 1.0\%$ ($\leq 2.0\%$)；對於中等強度混凝土，微細粉含量 $< 3.0\%$ ($\leq 3.0\%$)；對於低強度混凝土，微細粉含量 $< 5.0\%$ ($\leq 5.0\%$)。

表 11 中，對不同標準中砂漿用細骨料的微細粉含量限值做了對比。

表 11 砂漿用細骨料微細粉含量限值

標準/文件	微細粉含量限值
BS 1199: 1976/ BS 1200: 1976	打底和抹灰工程用碎石砂：5% 砌築砂漿用 S 類砂：10% 砌築砂漿用 G 類砂：12%
BS EN 13139: 2002	類別 1 (地坪、噴射、修補砂漿)： $\leq 3\%$ 類別 2 (打底砂漿，抹灰砂漿)： $\leq 5\%$ 類別 3：砌築砂漿 (不含碎石粉骨料)： $\leq 8\%$ 類別 4：砌築砂漿 (碎石粉骨料)： $\leq 30\%$
BS EN 13139: 2013	類別 f_1 ： $\leq 3\%$ 類別 f_2 ： $\leq 5\%$ 類別 f_3 ： $\leq 8\%$ 類別 f_4 ： $\leq 22\%$
BSI PD 6682-3: 2003	自流平砂漿： $\leq 3\%$ 打底和抹灰工程： $\leq 5\%$ 用 S 類砂的砌築砂漿： $\leq 5\%$ 用 G 類砂的砌築砂漿： $\leq 8\%$
GB/T 14684: 2001	天然砂： $< 5.0\%$
	機製砂： 如果通過亞甲藍試驗： $< 7.0\%$ 如果未通過亞甲藍試驗： $< 5.0\%$
JGJ 52: 2006	無推薦

6.7 微細粉有害性評估

英國標準中沒有對骨料中微細粉的有害性進行評估或試驗的方法。歐洲標準中要求對骨料中微細粉的有害性進行試驗，但沒有給出具體的驗收標準。另一方面，中國標準和美國標準對超過一定限值的微細粉含量要求進行有害性試驗，且對微細粉的無害性給出了明確的驗收標準。不同標準對微細粉有害性評估的要求不同，這就存在了爭議。文件 BSI PD 6682-3 指出，用於檢測骨料微細粉有害性的砂當量和亞甲藍試驗並不足以判斷微細粉的有害性。其建議須通過限制微細粉含量或提供滿足使用

的證明來評估骨料和填充骨料微細粉的有害性。不過，在新的香港建築標準 CS3: 2013 中，規定了採用亞甲藍試驗，且當微細粉含量高於 10% 時，亞甲藍試驗值不得高於 1.4。

6.8 混凝土用骨料和砂漿用骨料的區分

在英國和歐洲標準中，混凝土用骨料和砂漿用骨料有明確的區分，但在中國和美國標準中，混凝土用骨料和砂漿用骨料無明確的區分。顯然，中國和美國標準更關注混凝土用骨料，而不是砂漿用骨料。其實，將混凝土用骨料和砂漿用骨料作明確的區分會更好，因為畢竟兩者的要求不盡相同。當然，砂漿用骨料的標準應與混凝土用骨料的標準相配合，這樣兩部標準中術語的意義會相同，試驗方法會相同，某些骨料產品也可以同時用於混凝土和砂漿。

7. 小結和建議

從上述的文獻綜述可知，標準篩尺寸、粗細骨料劃分和微細粉定義在不同標準中各有不同。由於香港多年來沿用英國標準中的標準篩尺寸、粗細骨料劃分和微細粉定義，且英國標準中的這些規定與中國標準非常接近，又由於一些石礦場同時向香港和中國大陸市場供應骨料，從市場的角度，沿用英國標準中對標準篩尺寸、粗細骨料劃分和微細粉定義的規定會更好。同時，這可以避免由於更改標準造成的不必要麻煩，減少購買新設備的成本，以及可沿用以往在骨料使用中積累的經驗。

通常來說，給混凝土用骨料和砂漿用骨料規定的要求是不同。這是因為，混凝土與砂漿所要求的性能不盡相同，且細骨料的品質對於混凝土和砂漿的影響各有不同。因此，混凝土用骨料和砂漿用骨料應明確地區分。

對於混凝土用骨料和砂漿用骨料，關鍵問題可能在於對微細粉含量限值的規定以及如何評估微細粉的有害性。微細粉含量須要被限制基於以下原因：對於混凝土而言，微細粉中的有害物質（如粘土）會對混凝土的耐磨性、強度、耐久性等產生負面影響。此外，由於微細粉有著很大的比表面積，這會影響需水量和減水劑劑量，進而影響混凝土的和易性。對於砂漿而言，粘土或過量的微細粉都會影響砂漿的耐磨性、強度和和易性。此外，由於微細粉含量過高導致的高需水量會迫使工人添加更多的水來提高砂漿和易性，但這會使得硬化後的砂漿產生更大的乾縮，並提高收縮裂縫的風險。更麻煩的是，過量的微細粉還會提高砂漿的黏聚性和漿體體積，這會使得砂漿過於粘滑而容易粘住泥刀並下滑，這會對抹灰工程造成影響。

另一方面，至今尚未建立很好的方法來評估骨料中微細粉的有害性，也無建立相關驗收標準來認定微細粉的無害性。標準 BSI PD 6682-3 建議，骨料有害微細粉的評估可以通過限制微細粉含量或給出滿足使用的證據來實現。這或許是避免對評估方法和驗收標準爭論的一個務實方法。因此，限制微細粉含量的另一個重要原因是減少骨料中的有害物質。

最後，在標準 BS 1199: 1976，BS 1200: 1976，BS 882: 1992 和 CS3: 2013 中規定的細骨料的最大粒徑是 5.0 毫米，而在 BS EN 13139: 2002 和 BS EN 13139: 2013 中規定的細骨料的最大粒徑是 4.0 毫米或 2.0 毫米。雖然我們沒有嚴格遵循歐洲標準的規定，但基於謹慎原則，將細骨料的最大粒徑按使用情況的不同分為兩種（5.0 毫米和 2.36 毫米）也未嘗不可。

基於以上原因，建議為砂漿用骨料專門制訂一部本地建築標準。當然，該標準應與 CS3: 2013 相配合，使得兩本標準中的術語意思統一，對混凝土用骨料和砂漿用骨料的試驗方法相同，以及使得部分的骨料產品可同時用於混凝土和砂漿。此外，與之前針對混凝土或砂漿用骨料的標準不同（這些標準規定細骨料的最大粒徑為 5.0 毫米），本標準規定的細骨料的最大粒徑可以是 5.0 毫米或 2.36 毫米，以此滿足不同的需要。最後，雖然之前的標準對可允許的微細粉含量的最大限值有著不小的分歧，而新的歐洲標準 BS EN 13139: 2013 既沒有對微細粉含量作明確的規定，也取消了在不同微細粉含量下對使用的說明，但基於謹慎原則，筆者仍堅持應基於 BS 1199: 1976，BS 1200: 1976，BS EN 13139: 2002 和 BSI PD 6682-3: 2003（對這幾部標準和文件中微細粉含量限值的小結可參看表 11），對微細粉含量限值作相應的規定。

- 附錄 A 結束 -

附錄 B

關於細骨料中微細粉含量的影響，
以及粉碎廢玻璃和回收細骨料可行性的試驗報告

1. 介紹

在研究項目“混凝土和水泥砂漿生產用河砂替代品研究（第二階段）”中，須要開展以下研究：

- (1) 細骨料中微細粉含量對混凝土性能的影響
- (2) 細骨料中微細粉含量對砂漿性能的影響
- (3) 粉碎廢玻璃作為砂漿用骨料的可行性
- (4) 回收廢舊混凝土作為混凝土和砂漿用骨料的可行性

針對上述研究，制訂了試驗研究方案，並將研究方案分為四個部分，每個部分的說明如下。

2 細骨料中微細粉含量對混凝土性能的影響

本部分主要研究微細粉含量對混凝土性能的影響，從而確定混凝土用骨料最理想和允許的微細粉含量。

從對“混凝土和水泥砂漿生產用河砂替代品研究（第一階段）”的綜述中，可以發現不同標準中對混凝土用骨料微細粉含量的最大限值各有不同。其中，歐洲標準沒有對微細粉含量作規定，而中國標準和美國標準對微細粉含量的要求又非常嚴格。目前為止，關於細粉含量對混凝土性能的影響沒有廣泛的共識，所以對混凝土用骨料微細粉含量的最大限值仍存在較大爭議。

在完成該項目第一階段研究後，一些骨料標準有了變化。例如，在 2013 年，一部新的香港標準：CS3: 2013 - Aggregates for concrete，一部新的歐洲標準：BS EN 12620: 2013 - Aggregates for concrete，一部新的美國標準：ASTM C33/C33M-13 - Standard specification for concrete aggregates，相繼發表。由於這幾部標準與目前的研究有很大的關係，我們對這幾部標準進行了研究和總結，並專門提交了一份文獻綜述報告。

香港標準 CS3: 2013 在很大程度上是基於英國標準 BS 882: 1992。不過，CS3: 2013 和 BS 882: 1992 中還是有兩處較大的不同。首先，BS 882: 1992 規定：對重載地面層，細骨料中的微細粉含量不應大於 9%；而一般情況下，細骨料中的微細粉含量不應大於 16%。不同的是，CS3: 2013 規定：對重載地面層，細骨料中的微細粉含量不應大於 10%；而一般情況下，細骨料中的微細粉含量不應大於 14%。其次，BS 882: 1992 不要求檢查細骨料的清潔度。但 CS3: 2013 規定，如果微細粉含量大於 10%，須進行亞甲藍試驗，且試驗值需不大於 1.4。

另一方面，歐洲標準 BS EN 12620: 2013 是最新的歐洲混凝土用骨料的標準。在歐洲標準中，標準篩尺寸與在英國標準中的完全不同，而粗細骨

料劃分界限是 4 毫米，微細粉定義為粒徑小於 63 微米的顆粒。正如 2002 版中規定的一樣，BS EN 12620: 2013 中也沒有對微細粉含量的限值作規定。骨料生產商允許按規定類別對最大微細粉含量進行說明。此外，該標準允許骨料生產商在對最大微細粉含量作出說明且進行了嚴格控制之後，生產微細粉含量較高的骨料。與 2002 版不同，2013 版對微細粉質量的要求更為明確。但標準中沒有給出微細粉含量、砂當量值和亞甲藍試驗限值的具體要求。這些限值須根據骨料使用所在地當地的相關標準建立。

美國標準 ASTM C33/C33M-13 是最新的美國混凝土用骨料的標準。在美國標準中，標準篩尺寸、粗細骨料劃分、微細粉定義等與香港標準 CS3: 2013 和英國標準 BS 882: 1992 中的類似。對於機製砂（即碎石細骨料），如果微細粉中含有塵土，尤其是粘土或頁岩粉，則對於易遭受磨損的混凝土而言，微細粉含量的限值為 5%；對於不易遭受磨損的混凝土而言，微細粉含量的限值為 7%。該限值非常低，且與中國標準 GB/T 14684: 2001 和 JGJ 52: 2006 中的接近。粒徑小於 2 微米的顆粒含量低於 4% 和亞甲藍吸附值低於 5 mg/g 的機製細骨料被認為是可用於混凝土的細骨料。不過，超過上述限值的機製細骨料也可使用，只要混凝土的新拌和硬化性能達到要求即可。

從對標準的文獻綜述中可以看到，不同標準對微細粉含量限值的規定各有不同。在標準 BS 882: 1992 中，混凝土用碎石砂的微細粉含量限值規定為 16%（一般用途）和 9%（重載地面層）。在標準 CS3: 2013 中，微細粉含量限值規定為 14%（一般用途，且要求微細粉含量 > 10% 時，亞甲藍試驗值需 ≤ 1.4）和 10%（重載地面層）。但在標準 BS EN 12620: 2002 和 BS EN 12620: 2013 中，沒有對混凝土用細骨料的微細粉含量作規定。在標準 ASTM C33/C33M-13 中，機製砂的微細粉含量限值為 5%（對耐磨性有要求的混凝土）和 7%（對耐磨性無要求的混凝土）。由此可見，即使從最新發表的三部標準中，也仍然沒有形成關於微細粉含量對混凝土性能影響的普遍共識，所以，對混凝土用骨料中微細粉含量的可允許範圍仍具有爭議性。我們只能靠自己，通過試驗研究來確定混凝土用骨料的最理想和允許的微細粉含量。

為了研究細骨料中微細粉含量對混凝土各項性能的影響，我們開展了一項研究（如表 1 所示）。在這個試驗方案中，水灰比有四種變化（0.30，0.40，0.50 和 0.60），漿體體積有三種變化（25%，30% 和 35%），微細粉含量有四種變化（6%，9%，12% 和 15%），高效減水劑（SP）有兩種變化：無 SP 和有 SP（SP 劑量會從水灰比 0.60 時的 1.0 litre/m³ 上升到水灰比 0.30 時的 4.0 litre/m³）。在實驗過程中，有些混凝土會因過乾而無法進行試驗，由此，實際進行試驗的混凝土一共有 80 組。

表 1 微細粉含量對混凝土性能影響的研究方案

水灰比	漿體體積 (%)	微細粉含量 (%)	高效減水劑劑量 (litre/m ³)
0.30	25	6, 9, 12, 15	0, 4
	30	6, 9, 12, 15	0, 4
	35	6, 9, 12, 15	0, 4
0.40	25	6, 9, 12, 15	0, 3
	30	6, 9, 12, 15	0, 3
	35	6, 9, 12, 15	0, 3
0.50	25	6, 9, 12, 15	0, 2
	30	6, 9, 12, 15	0, 2
	35	6, 9, 12, 15	0, 2
0.60	25	6, 9, 12, 15	0, 1
	30	6, 9, 12, 15	0, 1
	35	6, 9, 12, 15	0, 1

試驗中使用的細骨料和粗骨料均為本地市場供應的粉碎花崗岩骨料。這些骨料與香港混凝土生產商使用的並無不同。細骨料（已篩去微細粉）和粗骨料的粒徑分佈可見於圖 1。細骨料和粗骨料的比重分別為 2.54 和 2.61。細骨料、10 毫米粗骨料、20 毫米粗骨料的吸水率分別為 1.81%，1.04%和 0.61%，而骨料的含水率會不時進行測定。吸水率和含水率將會用於混凝土製備中用水量的計算。

細骨料的樣品也被送去現成派安混凝土有限公司和金門建築有限公司進行亞甲藍試驗。從現成派安混凝土有限公司得到的試驗結果為 0.8，從金門建築有限公司得到的試驗結果是 1.0。因此，或許可以認定所使用的細骨料中的微細粉所含的有害物質很少，具有較好品質。

為了獲得微細粉含量為 6%，9%，12%和 15%的細骨料，採取的辦法是：首先，用機械篩分法將細骨料中的微細粉全部篩出；隨後按所規定的微細粉含量把微細粉加回到細骨料中。

使用的水泥為普通硅酸鹽水泥（其強度等級為 52.5 MPa，符合標準 BS EN 197-1: 2000）。水泥的比重按照標準 BS EN 196-6: 2010 測得為 3.11。所使用的減水劑為香港本地較常使用的一款聚羧酸高效減水劑（SP），其固體含量為 20%，比重為 1.03。

通過激光粒度分析儀，水泥和微細粉（細骨料中粒徑小於 75 微米的部分）被測出，並可見於圖 1。

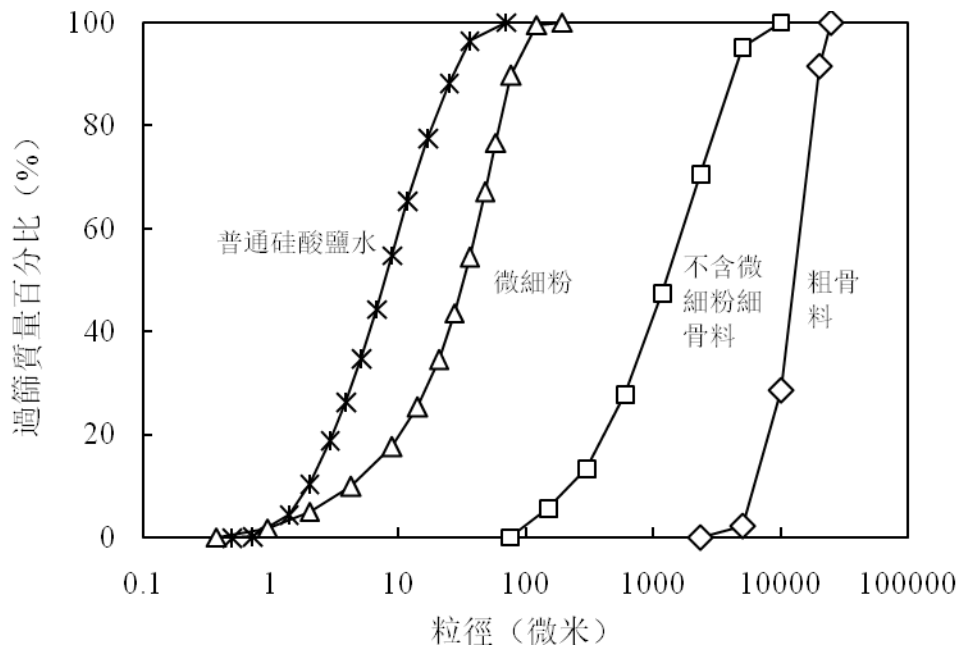


圖 1 所用固體材料粒徑分佈

該試驗選用盤式攪拌機對混凝土進行攪拌，選用電子稱對混凝土各組分的重量進行稱量。在攪拌過程中，所有的固體組分一次加入，並攪拌 1 分鐘。隨後加入水，並攪拌 2 分鐘。如果 SP 也須添加，則會在最後加入，並額外再攪拌 2 分鐘。

攪拌完後，會對新拌混凝土試樣進行坍落擴展度試驗。坍落擴展度試驗所使用的坍落度桶符合標準 BS EN 12350-8: 2010（在歐洲標準中，坍落度的測定與標準 CS1: 2010 中的相同，但對擴展度的測定則非常不同）。試驗中，當新拌混凝土裝滿坍落度桶後，將把坍落度桶豎直提起，混凝土坍落的高度定義為坍落度（混凝土變形性的指標），混凝土流動所形成的餅狀物的平均直徑定義為擴展度（混凝土流動性的指標）。因為坍落度桶底部的直徑為 200 毫米，如果測得的擴展度為 200 毫米，則說明混凝土完全無流動性。

坍落擴展度試驗後，還將觀察所形成的混凝土餅狀物，看是否存在離析現象。如果在餅狀物的外延形成一圈只含淨漿或砂漿的條狀帶，則該條狀帶的寬度將會測量並作為離析寬度記錄下來。如果離析寬度不大於 10 毫米，則認為是可接受的；如果離析寬度大於 10 毫米，則離析被認為是不可接受。

同時，另一批新拌混凝土試樣將從攪拌機中取出並進行篩析穩定性試驗。該試驗採用符合 BS EN 12350-11: 2010（該試驗已成為自密實混凝土的標準試驗）標準的尺寸為 5 毫米的標準篩。從篩孔通過並落入底部接盤的混凝土重量將被記錄下來，且該重量佔往標準篩上倒下的混凝土重量的百分比也將被計算，該百分比被定義為篩析指數。如果篩析指數不大於 10%，則認為可以接受；若篩析指數大於 10%，則離析被認為不可接受。

最後，在完成了坍落擴展度試驗和篩析穩定性試驗後，所有的新拌混凝土試樣將會倒回到攪拌機中重新攪拌。隨後，將澆築 6 個 100 毫米邊長混凝土立方體試塊。澆築後，試塊將被妥善封蓋和保存在實驗室。24 小時後，將對試塊進行拆模，並放入鹼飽和水養護箱中養護（養護溫度控制在 $27 \pm 2^\circ\text{C}$ ）。6 個試塊中的 3 個將進行 7 天抗壓強度試驗，剩餘 3 個將進行 28 天抗壓強度試驗。7 天或 28 天所測得的 3 個試塊的平均抗壓強度被定義為 7 天或 28 天立方體抗壓強度。

詳細的研究結果已列在下列表格中。

表 2 水灰比 = 0.6，減水劑劑量 = 0 litre/m³ 的混凝土試樣試驗結果

編號 (水灰比-漿體體積-微細粉含量%-減水劑劑量)	坍落度 (毫米)	擴展度 (毫米)	離析寬度 (毫米)	篩析指數 (%)	7 天立方體抗壓強度 (MPa)	28 天立方體抗壓強度 (MPa)
0.60-25-6-0	0	200	0	0.0	40.4	51.1
0.60-25-9-0	3	200	0	0.0	44.7	55.4
0.60-25-12-0	3	200	0	0.0	43.8	56.0
0.60-25-15-0	0	200	0	0.0	44.5	56.2
0.60-30-6-0	15	200	0	0.1	37.3	51.6
0.60-30-9-0	30	200	0	0.0	39.3	52.5
0.60-30-12-0	25	203	0	0.0	41.3	53.8
0.60-30-15-0	35	200	0	0.0	41.1	53.3
0.60-35-6-0	160	250	0	0.2	35.4	49.7
0.60-35-9-0	125	220	0	0.0	33.6	49.8
0.60-35-12-0	125	273	0	0.1	31.5	43.5
0.60-35-15-0	105	213	0	0.0	33.9	46.4
試驗結果顯示：						
(1) 在漿體體積 > 30% 時，微細粉含量對和易性有顯著的負面影響，在漿體體積 ≤ 30% 時，和易性由於太低無法顯示微細粉含量對和易性的影響；						
(2) 微細粉含量對強度的影響較小						

表 3 水灰比 = 0.5，減水劑劑量 = 0 litre/m³ 的混凝土試樣試驗結果

編號 (水灰比-漿 體體積-微細 粉含量%-減 水劑劑量)	坍落度 (毫米)	擴展度 (毫米)	離析寬度 (毫米)	篩析指數 (%)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	28 天立方 體抗壓強 度 (MPa)
0.50-25-6-0	0	200	0	0.2	61.6	71.8
0.50-25-9-0	0	200	0	0.1	61.2	69.4
0.50-25-12-0	0	200	0	0.0	61.6	68.3
0.50-25-15-0	0	200	0	0.1	61.0	65.1
0.50-30-6-0	19	200	0	0.1	59.9	71.1
0.50-30-9-0	10	200	0	0.1	55.5	67.0
0.50-30-12-0	15	200	0	0.1	54.9	67.3
0.50-30-15-0	10	200	0	0.1	57.1	68.8
0.50-35-6-0	95	200	0	0.1	48.8	65.2
0.50-35-9-0	55	200	0	0.1	54.9	66.6
0.50-35-12-0	40	200	0	0.0	51.1	68.1
0.50-35-15-0	30	200	0	0.1	51.5	68.7
試驗結果顯示： (1) 在漿體體積> 30%時，微細粉含量對和易性有顯著的負面影響，在漿體體積≤ 30% 時，和易性由於太低無法顯示微細粉含量對和易性的影響； (2) 微細粉含量對強度的影響較小						

表 4 水灰比 = 0.4，減水劑劑量 = 0 litre/m³ 的混凝土試樣試驗結果

編號 (水灰比-漿 體體積-微細 粉含量%-減 水劑劑量)	坍落度 (毫米)	擴展度 (毫米)	離析寬度 (毫米)	篩析指數 (%)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	28 天立方 體抗壓強 度 (MPa)
0.40-25-6-0	太乾以致無法攪拌					
0.40-25-9-0						
0.40-25-12-0						
0.40-25-15-0						
0.40-30-6-0	0	200	0	0.0	68.3	78.9
0.40-30-9-0	0	200	0	0.0	64.9	69.6
0.40-30-12-0	0	200	0	0.0	64.3	74.9
0.40-30-15-0	0	200	0	0.0	64.5	70.6
0.40-35-6-0	17	200	0	0.0	63.0	72.7
0.40-35-9-0	15	200	0	0.0	61.1	72.7
0.40-35-12-0	10	200	0	0.0	60.3	71.8
0.40-35-15-0	5	200	0	0.0	62.5	74.4
試驗結果顯示： (1) 在漿體體積> 30%時，微細粉含量對和易性有顯著的負面影響，在漿體體積≤ 30% 時，和易性由於太低無法顯示微細粉含量對和易性的影響； (2) 微細粉含量對強度的影響較小						

表 5 水灰比 = 0.3，減水劑劑量 = 0 litre/m³ 的混凝土試樣試驗結果

編號 (水灰比-漿 體體積-微細 粉含量%-減 水劑劑量)	坍落度 (毫米)	擴展度 (毫米)	離析寬度 (毫米)	篩析指數 (%)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	28 天立方 體抗壓強 度 (MPa)
0.30-25-6-0 0.30-25-9-0 0.30-25-12-0 0.30-25-15-0	太乾以致無法攪拌					
0.30-30-6-0 0.30-30-9-0 0.30-30-12-0 0.30-30-15-0	太乾以致無法攪拌					
0.30-35-6-0	0	200	0	0.1	71.5	88.1
0.30-35-9-0	0	200	0	0.1	70.1	82.8
0.30-35-12-0	0	200	0	0.1	72.8	79.8
0.30-35-15-0	0	200	0	0.3	64.9	72.2
試驗結果顯示： (1) 和易性由於太低無法顯示微細粉含量對和易性的影響； (2) 達到 9% 的微細粉含量對強度的影響較小；但達到或超過 12% 的微細粉含量，由於會出現振搗困難，對強度有顯著的負面影響						

表 6 水灰比 = 0.6，減水劑劑量 = 1 litre/m³ 的混凝土試樣試驗結果

編號 (水灰比-漿 體體積-微細 粉含量%-減 水劑劑量)	坍落度 (毫米)	擴展度 (毫米)	離析寬度 (毫米)	篩析指數 (%)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	28 天立方 體抗壓強 度 (MPa)
0.60-25-6-1	10	200	0	0.2	45.0	53.6
0.60-25-9-1	5	200	0	0.0	47.0	55.9
0.60-25-12-1	5	200	0	0.0	44.8	53.9
0.60-25-15-1	0	200	0	0.1	46.8	53.6
0.60-30-6-1	140	435	0	0.9	38.3	47.8
0.60-30-9-1	35	200	0	0.3	41.0	50.6
0.60-30-12-1	20	200	0	0.0	44.5	53.3
0.60-30-15-1	35	200	0	0.0	43.0	51.9
0.60-35-6-1	205	408	0	0.5	37.3	49.9
0.60-35-9-1	170	363	0	0.9	38.1	49.0
0.60-35-12-1	155	340	0	1.5	39.5	51.0
0.60-35-15-1	84	305	0	1.1	41.5	50.6
試驗結果顯示： (1) 在漿體體積 > 30% 時，微細粉含量對和易性有顯著的負面影響，在漿體體積 ≤ 30% 時，和易性由於太低無法顯示微細粉含量對和易性的影響； (2) 微細粉含量對強度的影響較小						

表 7 水灰比 = 0.5，減水劑劑量 = 1 litre/m³的混凝土試樣試驗結果

編號 (水灰比-漿 體體積-微細 粉含量%-減 水劑劑量)	坍落度 (毫米)	擴展度 (毫米)	離析寬度 (毫米)	篩析指數 (%)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	28 天立方 體抗壓強 度 (MPa)
0.50-25-6-2	0	200	0	0.0	60.5	71.1
0.50-25-9-2	2	200	0	0.0	59.9	70.4
0.50-25-12-2	2	200	0	0.0	59.5	67.9
0.50-25-15-2	0	200	0	0.0	58.9	67.0
0.50-30-6-2	187	443	0	0.4	54.2	64.4
0.50-30-9-2	65	200	0	0.0	57.2	66.8
0.50-30-12-2	56	200	0	0.0	60.3	68.0
0.50-30-15-2	27	200	0	0.0	56.9	65.3
0.50-35-6-2	200	500	19	2.3	54.9	65.7
0.50-35-9-2	218	543	0	3.2	54.2	64.0
0.50-35-12-2	177	419	0	0.1	55.1	63.2
0.50-35-15-2	146	297	0	0.1	56.2	64.0
試驗結果顯示： (1) 在漿體體積> 30%時，微細粉含量對和易性有顯著的負面影響，在漿體體積≤ 30% 時，和易性由於太低無法顯示微細粉含量對和易性的影響； (2) 微細粉含量對強度的影響較小						

表 8 水灰比 = 0.4，減水劑劑量 = 3 litre/m³的混凝土試樣試驗結果

編號 (水灰比-漿 體體積-微細 粉含量%-減 水劑劑量)	坍落度 (毫米)	擴展度 (毫米)	離析寬度 (毫米)	篩析指數 (%)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	28 天立方 體抗壓強 度 (MPa)
0.40-25-6-3	5	200	0	0.4	78.6	90.5
0.40-25-9-3	1	200	0	0.8	76.4	86.5
0.40-25-12-3	6	200	0	0.3	74.3	87.4
0.40-25-15-3	0	200	0	0.5	68.9	82.7
0.40-30-6-3	18	200	0	0.0	75.2	87.9
0.40-30-9-3	34	200	0	0.0	75.3	84.9
0.40-30-12-3	16	200	0	0.0	73.1	84.3
0.40-30-15-3	11	200	0	0.1	70.6	83.4
0.40-35-6-3	231	559	0	1.6	72.3	87.0
0.40-35-9-3	184	398	0	0.0	72.1	84.1
0.40-35-12-3	110	200	0	0.0	69.0	80.3
0.40-35-15-3	34	200	0	0.0	70.2	81.8
試驗結果顯示： (1) 在漿體體積> 30%時，微細粉含量對和易性有顯著的負面影響，在漿體體積≤ 30% 時，和易性由於太低無法顯示微細粉含量對和易性的影響； (2) 微細粉含量對強度的影響較小						

表 9 水灰比 = 0.3，減水劑劑量 = 4 litre/m³ 的混凝土試樣試驗結果

編號 (水灰比-漿 體體積-微細 粉含量%-減 水劑劑量)	坍落度 (毫米)	擴展度 (毫米)	離析寬度 (毫米)	篩析指數 (%)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	28 天立方 體抗壓強 度 (MPa)
0.30-25-6-4 0.30-25-9-4 0.30-25-12-4 0.30-25-15-4	太乾以致無法攪拌					
0.30-30-6-4	0	200	0	0.2	88.4	100.3
0.30-30-9-4	0	200	0	0.3	85.8	96.0
0.30-30-12-4	0	200	0	0.6	81.2	90.0
0.30-30-15-4	0	200	0	0.5	83.4	96.3
0.30-35-6-4	5	200	0	0.0	87.8	100.6
0.30-35-9-4	0	200	0	0.0	84.8	97.0
0.30-35-12-4	1	200	0	0.2	83.9	94.8
0.30-35-15-4	0	200	0	0.2	83.6	93.9
試驗結果顯示： (1) 和易性由於太低無法顯示微細粉含量對和易性的影響； (2) 達到 9% 的微細粉含量對強度的影響較小；但達到或超過 12% 的微細粉含量，由於會出現振搗困難，對強度有顯著的負面影響						

為了進一步分析，坍落度和拓展度與微細粉含量的關係如圖 2 和圖 3。

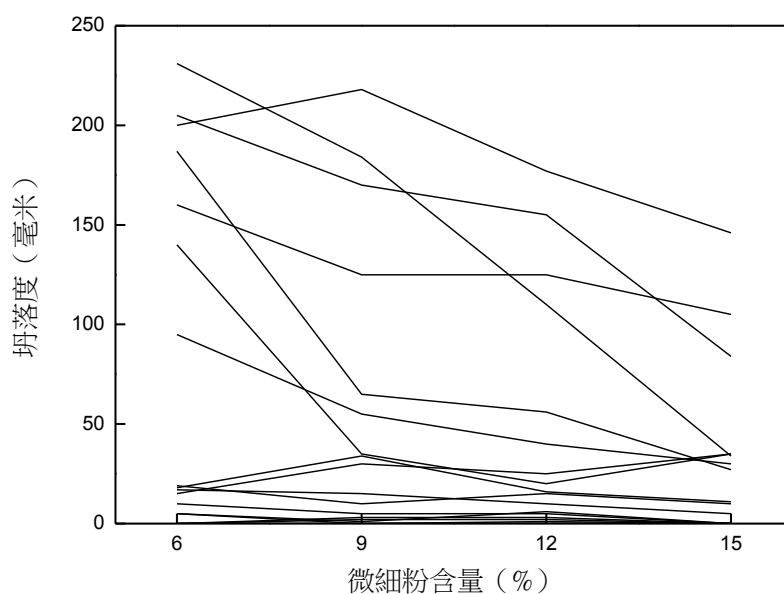


圖 2 坍落度與細骨料微細粉含量關係圖

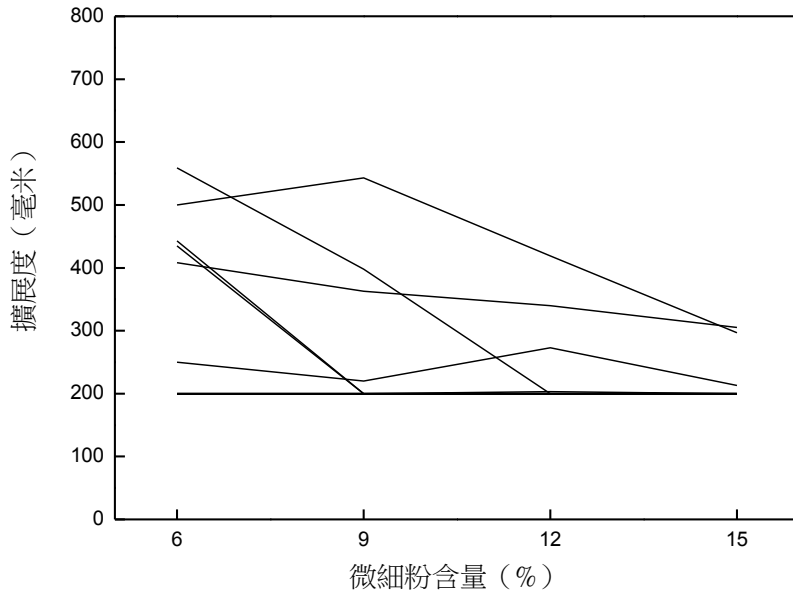


圖 3 擴展度與細骨料微細粉含量關係圖

為了進一步分析，7 天和 28 天強度與微細粉含量的關係如圖 4 和圖 5。

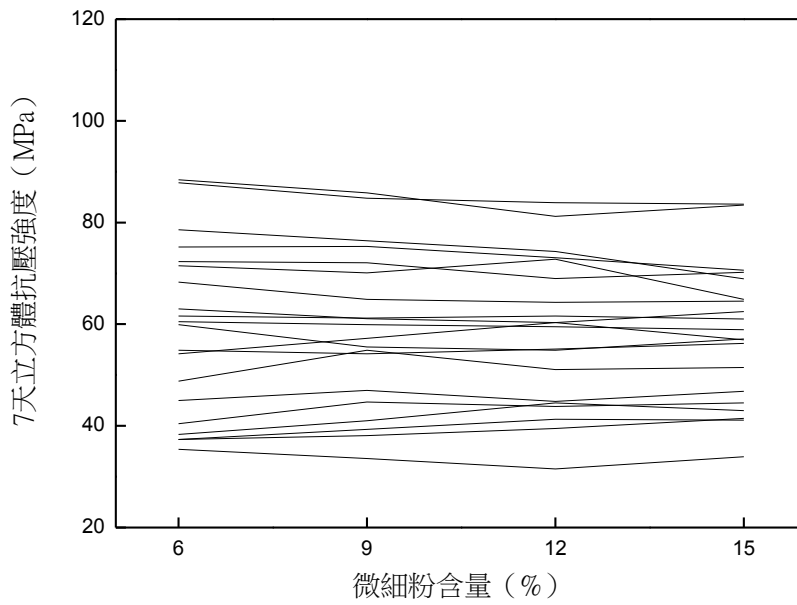


圖 4 7 天立方體抗壓強度與細骨料微細粉含量關係圖

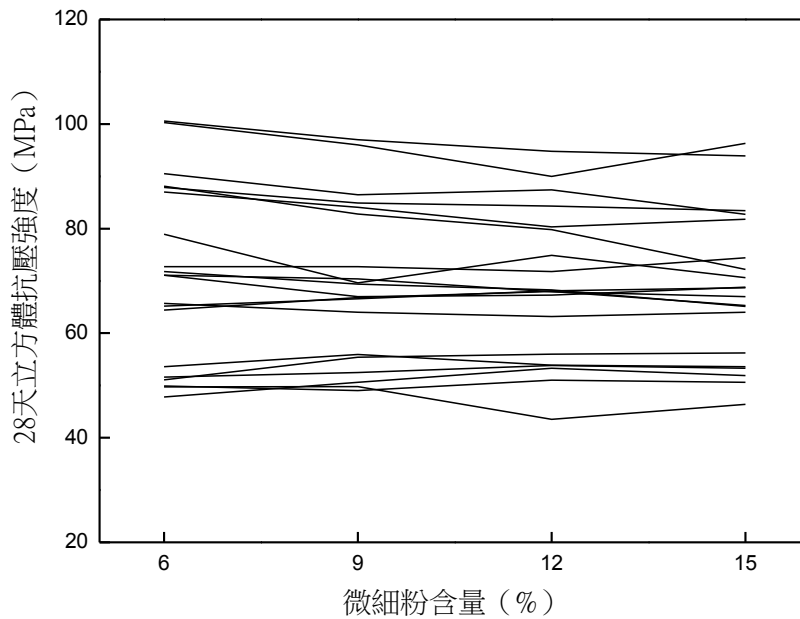


圖 5 28 天立方體抗壓強度與細骨料微細粉含量關係圖

對混凝土（不管是有減水劑還是無減水劑）的試驗表明，微細粉含量對混凝土的各項性能有如下影響：

- (1) 微細粉對和易性有顯著的不利影響，但在坍落度和流動度很低時除外。因為在坍落度和流動度很低時，試驗無法反映微細粉對和易性的影響。
- (2) 微細粉對強度的影響很小，但在水灰比 = 0.30 時除外。在水灰比 = 0.30 時，不低於 12% 的微細粉含量會對混凝土強度產生顯著的不利影響，而原因在於過量的微細粉會使得混凝土難以振搗。
- (3) 雖然離析寬度和篩析指數均表明所測混凝土不發生離析且有較高的黏聚性。但從親身經驗可知，含有更多微細粉的混凝土的粘性更大，或者說有更大的黏聚性或抗離析性。因此，微細粉含量對提高混凝土的黏聚性和抗離析性具有一定的有利影響。

整體來說，在細骨料中高含量的微細粉會降低混凝土的和易性，但如果微細粉含量不超過 10%，降低的和易性可通過添加減水劑來彌補。因此，或許可說：若微細粉的質量較好且有害物很少，微細粉含量大於 10% 是可以接受的。

超過 10% 的微細粉含量仍可接受，只要混凝土試配時仍能保持所需的和易性而不使用過量減水劑。即使是這樣，仍須要考慮給微細粉含量設一個最大限值。在標準 CS3: 2013 中，對於一般使用條件下，微細粉含量的最大限值被定為 14%（附加要求是：微細粉含量大於 10% 時，亞甲藍試

驗限值不大於 1.4)；對於重載地面層，微細粉含量的最大限值定為 10%。這些最大限值非常合理。須要給微細粉含量設一個最大限值的另一個原因是，在實際應用中，微細粉會發生明顯的團聚現象。如果團聚過於明顯，會使得混凝土的和易性經常發生變化，這會對混凝土生產商調整減水劑劑量來補償和易性變化造成困難。基於這個原因，混凝土生產商被建議定期（甚至對每批次的細骨料）檢查細骨料的微細粉含量。

另外，在試驗中發現，在水灰比 = 0.30 時，不低於 12% 的微細粉含量會對混凝土強度產生顯著的不利影響，而原因在於過量的微細粉會使得混凝土難以振搗。由於高強混凝土的水灰比較低，因此建議在生產高強混凝土時，微細粉含量不應高於 10%。換句話說：微細粉含量限制在 10% 不僅是對重載地面層的要求，也是對高強混凝土的要求。

3. 細骨料中微細粉含量對砂漿性能的影響

本部分主要研究微細粉含量對砂漿性能的影響，從而確定砂漿用骨料最理想和允許的微細粉含量。

未經處理的碎石粉並不是可用於砂漿的合適骨料。原因有二：第一，其微細粉含量會對砂漿的需水量有很大影響；第二，雖然更細粒徑的骨料會對提升砂漿的抹灰性能有幫助，但有關微細粉含量和細骨料最大粒徑對砂漿性能影響的研究仍較少。

從對“混凝土和水泥砂漿生產用河砂替代品研究（第一階段）”的綜述中，可以發現不同標準中對砂漿用骨料微細粉含量的最大限值各有不同。在英國標準 BS 1199: 1976 和 BS 1200: 1976 中，對用於打底和抹灰工程的砂漿用碎石粉，微細粉含量限值為 5%；對於砌築砂漿用 S 類砂，微細粉含量限值為 10%；對於砌築砂漿用 G 類砂，微細粉含量限值為 12%。在歐洲標準 BS EN 13139: 2002 中，規定砂漿用細骨料須分為四類：類別 1（微細粉含量 ≤ 3%），類別 2（微細粉含量 ≤ 5%），類別 3（微細粉含量 ≤ 8%），類別 4（微細粉含量 ≤ 30%）。對於不同類別，建議的應用領域是：類別 1：地坪、噴射、修補砂漿、灌漿；類別 2：打底砂漿，抹灰砂漿；類別 3：砌築砂漿；類別 4：砌築砂漿。在中國標準 GB/T 14684 和 JGJ 52 中，沒有特別對混凝土用骨料和砂漿用骨料進行區分，但按骨料的來源，對微細粉含量的限值做了嚴格的規定。直到現在，仍沒有形成關於微細粉含量對砂漿性能影響的普遍共識，所以，對砂漿用細骨料中微細粉含量的可允許範圍仍具有爭議。

在完成該項目第一階段研究後，一些骨料標準有了變化。例如，在 2013 年，一部新的香港標準：CS3: 2013 - Aggregates for concrete，一部新的歐洲標準：BS EN 12620: 2013 - Aggregates for concrete，一部新的美國標準：ASTM C33/C33M-13 - Standard specification for concrete aggregates，相

繼發表。由於這幾部標準與目前的研究有很大的關係，我們對這幾部標準進行了研究和總結，並專門提交了一份文獻綜述報告。

歐洲標準該標準 BS EN 13139: 2013 是最新的砂漿用骨料標準。標準中的標準篩尺寸、細骨料的定義（即粒徑小於 4 毫米的骨料）以及微細粉的定義（即粒徑小於 63 微米的骨料）與 2002 版中的相同。如 2002 版中的一樣，沒有對骨料的微細粉含量的限值做規定。骨料生產商允許按規定類別對最大微細粉含量進行說明。但是，2013 版中的微細粉含量類別與 2002 版中的有所不同，總結如下。

在 2002 版中，最大微細粉含量的規定類別包括：

類別 1 - 微細粉含量 \leq 3%；

類別 2 - 微細粉含量 \leq 5%；

類別 3 - 微細粉含量 \leq 8%；

類別 4 - 微細粉含量 \leq 30%；

此外，對不同類別下細骨料的使用作了規定：

類別 1：地坪、噴射、修補砂漿、灌漿（所有骨料均可）

類別 2：打底砂漿，抹灰砂漿（所有骨料均可）

類別 3：砌築砂漿（不含碎石粉骨料）

類別 4：砌築砂漿（碎石粉骨料）

在 2013 版中，最大微細粉含量的規定類別包括：

類別 f_3 - 微細粉含量 \leq 3%；

類別 f_5 - 微細粉含量 \leq 5%；

類別 f_8 - 微細粉含量 \leq 8%；

類別 f_{22} - 微細粉含量 \leq 22%；

但對不同類別下細骨料的使用不再做規定。

由此可見，即使從最新發表的標準中，也仍然沒有形成關於微細粉含量對砂漿性能影響的普遍共識，所以，對砂漿用骨料中微細粉含量的可允許範圍仍具有爭議。我們只能靠自己，通過試驗研究來確定砂漿用骨料的最理想和允許的微細粉含量。

為研究微細粉含量和細骨料最大粒徑對砂漿各項性能的影響，我們開展了一項研究（如表 10 所示）。在這個試驗方案中，水灰比有四種變化（0.30，0.40，0.50 和 0.60），漿體體積有兩種變化（42%和 48%），骨料最大粒徑有兩種變化（2.36 毫米和 5.0 毫米），微細粉含量有四種變化（2%，5%，8%和 10%）。試驗中不添加減水劑。在實驗過程中，有些砂漿會因過乾而無法進行試驗。此外，試驗也發現漿體體積 42%對於抹灰工程而言有些太少，而最大粒徑 5.0 毫米會使抹灰表面過於粗糙。因此，原計劃中針對漿體體積 42%和最大粒徑 5.0 毫米的砂漿試驗取消。由此，實際進行試驗的砂漿一共有 36 組。

表 10 砂漿微細粉含量對砂漿性能影響的研究方案

水灰比	漿體體積 (%)	骨料最大粒徑 (毫米)	微細粉含量 (%)
0.30	42	2.36, 5.0	2, 5, 8, 10
	48	2.36, 5.0	2, 5, 8, 10
0.40	42	2.36, 5.0	2, 5, 8, 10
	48	2.36, 5.0	2, 5, 8, 10
0.50	42	2.36, 5.0	2, 5, 8, 10
	48	2.36, 5.0	2, 5, 8, 10
0.60	42	2.36, 5.0	2, 5, 8, 10
	48	2.36, 5.0	2, 5, 8, 10

試驗中使用的細骨料是由本地市場供應的粉碎花崗岩細骨料。該細骨料與香港混凝土生產商所使用的細骨料相同。最大粒徑 2.36 毫米細骨料（篩除微細粉）和最大粒徑 5.0 毫米細骨料（篩除微細粉）通過機械篩分得到的粒徑分佈如圖 6 所示。細骨料的比重為 2.54。細骨料的吸水率為 1.81%，而含水率會不時進行測定。吸水率和含水率會被用於計算砂漿所需添加的水量。

細骨料的樣品也被送去現成派安混凝土有限公司和金門建築有限公司進行亞甲藍試驗。從現成派安混凝土有限公司得到的試驗結果為 0.8，從金門建築有限公司得到的試驗結果是 1.0。因此，或許可以認定所使用的細骨料中的微細粉所含的有害物質很少，具有較好品質。

為了獲得微細粉含量為 2%，5%，8%和 10%的細骨料，採取的辦法是：首先，用機械篩分法將細骨料中的微細粉全部篩出；隨後，按所規定的微細粉含量把微細粉加回到細骨料中。這種對微細粉進行控制的細骨料或許可被定義為機製砂（或經處理後的碎石粉）。

所使用的水泥為普通硅酸鹽水泥（其強度等級為 52.5MPa，符合標準 BS EN 197-1: 2000）。水泥的比重按照標準 BS EN 196-6: 2010 測得為 3.11。

通過激光粒度分析儀，水泥和微細粉（細骨料中粒徑小於 75 微米的部分）被測出，並可見於圖 6。

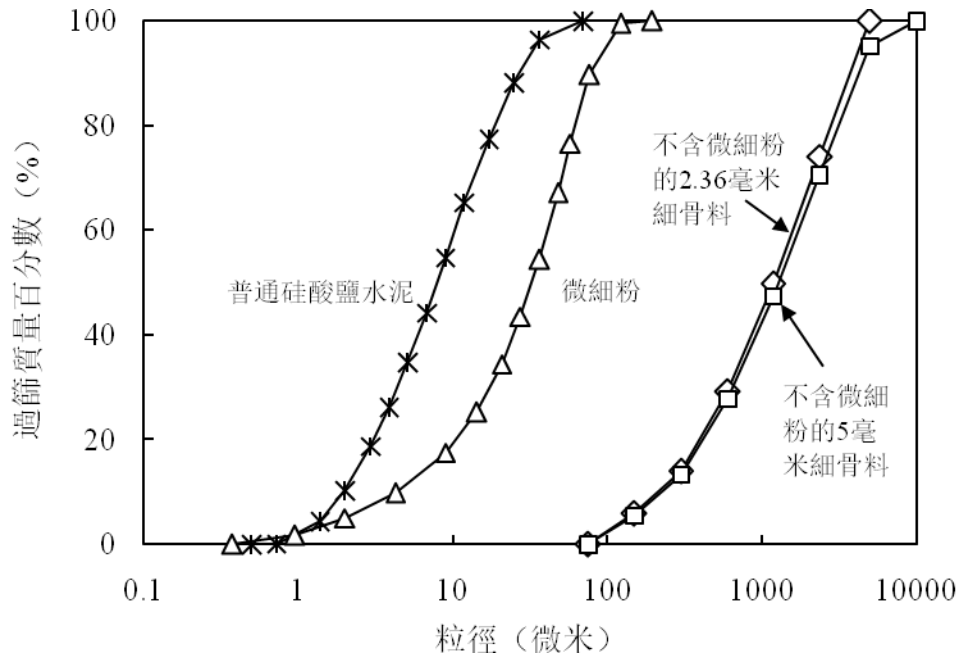


圖 6 所用固體材料粒徑分佈

該試驗選用霍巴特攪拌機對砂漿進行攪拌，選用電子稱對砂漿各組分的重量進行稱量。在攪拌過程中，所有的固體組分一次加入，並攪拌 1 分鐘。隨後加入水，並攪拌 2 分鐘。

在攪拌完成後，將對新拌砂漿試樣進行迷你坍落流動度試驗。砂漿用迷你坍落流動度試驗與混凝土用坍落流動度試驗的原理完全相同，除了所使用的坍落度桶的尺寸不同以外。本試驗中使用的迷你坍落度桶與 Okamura 和 Ouchi (H. Okamura and M. Ouchi, Self-compacting concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.1, 2003, 5-15) 所使用的坍落度桶完全相同。該坍落度桶的底部直徑為 100 毫米，頂部直徑為 70 毫米，高度為 60 毫米。試驗步驟與坍落流動度試驗的相同。砂漿坍落的高度定義為坍落度（砂漿變形性的指標），砂漿流動所形成的餅狀物的平均直徑減去坍落度桶的底部直徑定義為擴展度（砂漿流動性的指標）。須要說明的是，如果得到的擴展度為 0 毫米，則說明砂漿完全無流動性，而如果得到的擴展度為 100 毫米，則說明砂漿流動性很好。

同時，另一批新拌砂漿試樣將從攪拌機中取出並進行石棒黏附性試驗。該試驗是由 Li 和 Kwan (L.G. Li and A.K.H. Kwan, Mortar design based on water film thickness, Construction and Building Materials, Vol.25, No.5, 2011, 2381-2390) 提出的。該試驗的設備由一個帶有六根花崗岩石棒的手柄以及一個容器組成。每根石棒的直徑為 10 毫米，長度為 110 毫米。試驗時，六根石棒將浸入砂漿中，浸入深度為 100 毫米，隨後緩慢拔出。黏附在石棒上的砂漿重量即被定義為砂漿的黏附值。

完成了迷你坍塌擴展度試驗和石棒黏附性試驗後，砂漿試樣將會倒回攪拌機中再次攪拌。隨後，將澆築 3 個 70.7 毫米邊長砂漿立方體試塊。澆築後，試塊將被妥善封蓋和保存在實驗室。24 小時後，將對試塊進行拆模，並放入鹼飽和水養護箱中養護（養護溫度控制在 $27 \pm 2^\circ\text{C}$ ）。7 天後所測得的 3 個試塊的平均抗壓強度被定義為 7 天立方體抗壓強度。

為了測試在混凝土垂直表面的抹灰砂漿的抹灰性能和拉拔強度，另一批的新拌砂漿會從攪拌機中取出，並在一塊規格為 300 毫米長×300 毫米寬×70 毫米厚的預製混凝土塊的壓膜表面進行垂直抹灰。抹灰將分為兩層，每層 10 毫米厚。第一天抹好第一層，接著在第二天抹好第二層。在進行每層抹灰之前，都要提前 15 分鐘對所需抹灰的面層進行灑水濕潤。抹灰時不使用底漆。抹灰完成後，試樣將在實驗室中妥善保存，但不會對其養護，以模擬實際情況。在完成第二層抹灰的七天後，將遵照標準 BS EN 1015-12: 2000 的規定，對砂漿層進行拉拔試驗，所測強度被定義為 7 天拉拔強度。一般來說，不低於 0.5 MPa 的拉拔強度被認為是可接受的；低於 0.5 MPa 的拉拔強度被認為是不可接受。

在對混凝土塊表面進行垂直抹灰作業中，砂漿的抹灰性能將通過感官判斷來確定，並進行如下分級：

- 太乾 - 砂漿顯得非常乾，且無粘性；根本無法粘附到混凝土表面
- 乾 - 砂漿顯得乾，且無粘性；但非常用力壓在混凝土表面的話，可以粘附
- 較乾 - 砂漿顯得有些乾；用力壓在混凝土表面的話，可以粘附
- 最理想 - 砂漿有較好的稠度和黏聚性；無須施壓便可很好地粘附在混凝土表面，且抹上後不會滑落
- 較濕 - 砂漿顯得有些濕；可以很好地粘附在混凝土表面，但抹上後會有滑落的趨勢
- 濕 - 砂漿顯得濕，且無粘性；可以粘附在混凝土表面，但抹上後會滑落
- 太濕 - 砂漿顯得非常濕，且無粘性；由於抹上後會馬上滑落，無法粘附在混凝土表面

表 11 漿體體積 = 42%，骨料最大粒徑 = 2.36 毫米的砂漿試樣試驗結果

編號 (水灰比-漿體 體積-骨料最大 粒徑-微細粉含 量%)	坍落度 (毫米)	擴展度 (毫米)	黏附性 (g)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	抹灰性能	7 天拉拔 強度 (MPa)
0.30-42-2.36-2 0.30-42-2.36-5 0.30-42-2.36-8 0.30-42-2.36-10	太乾以致無法攪拌					
0.40-42-2.36-2	0	0	0.4	56.6	太乾	無法完成
0.40-42-2.36-5	0	0	0.4	53.5	太乾	無法完成
0.40-42-2.36-8	0	0	0.2	47.5	太乾	無法完成
0.40-42-2.36-10	0	0	0.2	53.9	太乾	無法完成
0.50-42-2.36-2	0	0	0.6	39.7	乾	0.12
0.50-42-2.36-5	3	1	0.7	47.3	乾	0.79
0.50-42-2.36-8	3	0	0.6	47.6	乾	0.58
0.50-42-2.36-10	0	0	0.6	39.2	乾	0.43
0.60-42-2.36-2	3	0	0.8	33.3	較乾	0.99
0.60-42-2.36-5	1	0	0.8	37.0	較乾	1.15
0.60-42-2.36-8	3	1	0.6	35.1	較乾	1.21
0.60-42-2.36-10	3	1	1.1	38.8	較乾	1.03
<p>試驗結果顯示：</p> <p>(1) 當漿體體積 = 42%和最大粒徑 = 2.36 毫米時，水灰比\leq0.50 的砂漿會太乾，不適合抹灰作業；</p> <p>(2) 當漿體體積 = 42%和最大粒徑 = 2.36 毫米時，水灰比大約 0.60 的砂漿適合抹灰作業；</p> <p>(3) 當漿體體積 = 42%和最大粒徑 = 2.36 毫米時，達到 8%的微細粉含量對抹灰性能和強度沒有負面影響；</p> <p>(4) 整體來說，42%的漿體體積對於抹灰作業而言太少。</p>						

表 12 漿體體積 = 48%，骨料最大粒徑 = 2.36 毫米的砂漿試樣試驗結果

編號 (水灰比-漿體 體積-骨料最大 粒徑-微細粉含 量%)	坍落度 (毫米)	擴展度 (毫米)	黏附性 (g)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	抹灰性能	7 天拉拔 強度 (MPa)
0.30-48-2.36-2 0.30-48-2.36-5 0.30-48-2.36-8 0.30-48-2.36-10	太乾以致無法攪拌					
0.40-48-2.36-2	2	5	0.7	57.8	乾	0.46
0.40-48-2.36-5	3	2	1.1	60.7	乾	0.50
0.40-48-2.36-8	3	3	1.1	63.8	乾	0.55
0.40-48-2.36-10	2	4	0.6	63.7	乾	0.25
0.50-48-2.36-2	13	7	2.1	43.0	最理想	1.53
0.50-48-2.36-5	13	6	2.2	45.8	最理想	0.96
0.50-48-2.36-8	10	5	0.9	46.5	最理想	0.71
0.50-48-2.36-10	8	5	0.9	45.6	最理想	1.05
0.60-48-2.36-2	19	9	3.1	34.7	濕	無法完成
0.60-48-2.36-5	16	10	2.4	38.5	濕	無法完成
0.60-48-2.36-8	10	9	2.2	36.9	濕	無法完成
0.60-48-2.36-10	12	5	2.3	35.8	濕	無法完成
<p>試驗結果顯示：</p> <p>(1) 當漿體體積 = 48%和最大粒徑 = 2.36 毫米時，水灰比\leq0.40 的砂漿會太乾，不適合抹灰作業；</p> <p>(2) 當漿體體積 = 48%和最大粒徑 = 2.36 毫米時，水灰比大約 0.50 的砂漿適合抹灰作業；</p> <p>(3) 當漿體體積 = 48%和最大粒徑 = 2.36 毫米時，達到 8%的微細粉含量對抹灰性能和強度沒有負面影響；</p> <p>(4) 整體來說，對於抹灰作業，漿體體積 48%比 42%要好</p>						

表 13 漿體體積 = 48%，骨料最大粒徑 = 5.0 毫米的砂漿試樣試驗結果

編號 (水灰比-漿體 體積-骨料最大 粒徑-微細粉含 量%)	坍落度 (毫米)	擴展度 (毫米)	黏附性 (g)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	抹灰性能	7 天拉拔 強度 (MPa)
0.30-48-5.0-2 0.30-48-5.0-5 0.30-48-5.0-8 0.30-48-5.0-10	太乾以致無法攪拌					
0.40-48-5.0-2	12	1	2.2	45.2	最理想	1.82
0.40-48-5.0-5	10	1	2.5	48.2	最理想	1.03
0.40-48-5.0-8	8	2	2.2	48.6	最理想	1.24
0.40-48-5.0-10	9	2	5.2	50.9	最理想	0.91
0.50-48-5.0-2	50	85	16.2	33.3	濕	無法完成
0.50-48-5.0-5	20	18	11.9	41.9	濕	無法完成
0.50-48-5.0-8	15	12	6.9	42.0	濕	無法完成
0.50-48-5.0-10	12	7	6.2	42.3	濕	無法完成
0.60-48-5.0-2	45	83	14.2	30.8	太濕	無法完成
0.60-48-5.0-5	32	28	15.8	29.1	太濕	無法完成
0.60-48-5.0-8	25	24	13.8	30.3	太濕	無法完成
0.60-48-5.0-10	22	17	15.5	30.6	太濕	無法完成
試驗結果顯示： (1) 當漿體體積 = 48%和最大粒徑 = 5.0 毫米時，水灰比 ≤ 0.30 的砂漿會太乾，水灰比 ≥ 0.50 的砂漿太濕，均不適合抹灰作業； (2) 當漿體體積 = 48%和最大粒徑 = 5.0 毫米時，水灰比大約 0.40 的砂漿適合抹灰作業； (3) 當漿體體積 = 48%和最大粒徑 = 5.0 毫米時，達到 8%的微細粉含量對抹灰性能和強度沒有負面影響； (4) 最大粒徑 5.0 毫米會使抹灰表面過於粗糙						

為了進一步分析，抹灰性能結果與坍落度和石棒黏附性的關係如圖 7 和圖 8。

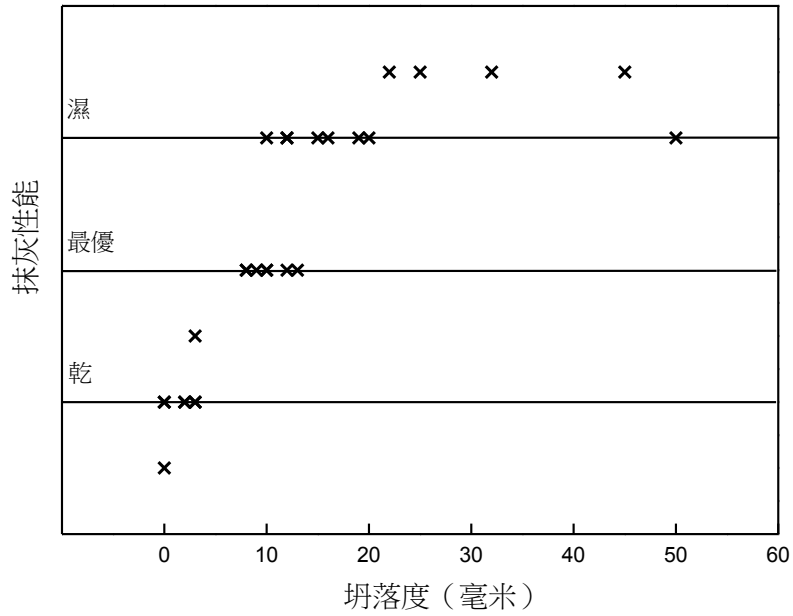


圖 7 抹灰性能與坍落度的關係

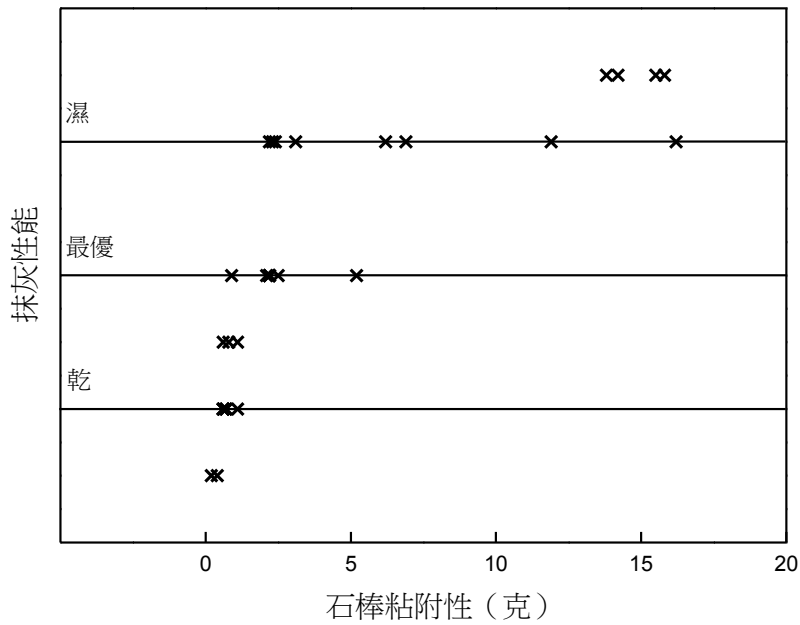


圖 8 抹灰性能與石棒黏附性的關係

為了進一步分析，7 天和 28 天拉拔強度與微細粉含量的關係如圖 9 和圖 10。

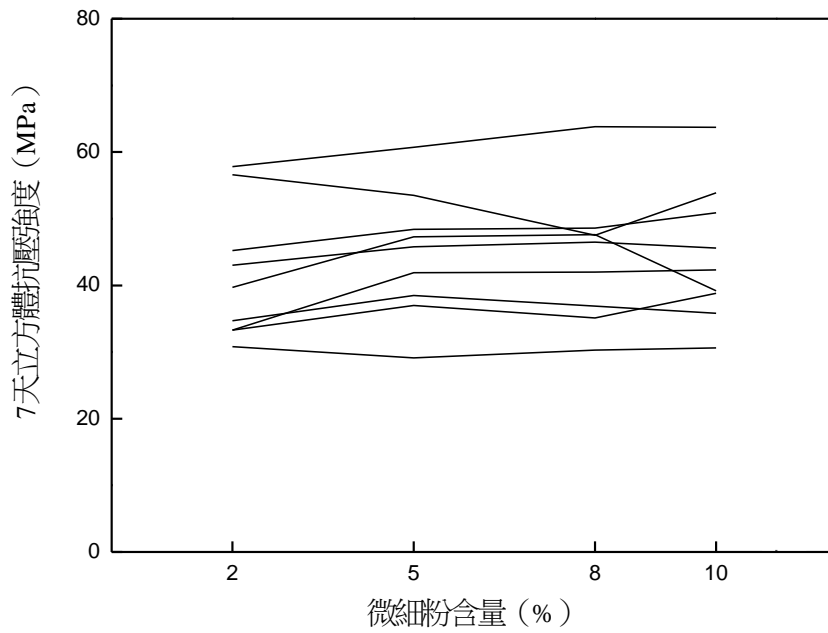


圖 9 7 天立方體抗壓強度與細骨料微細粉含量的關係

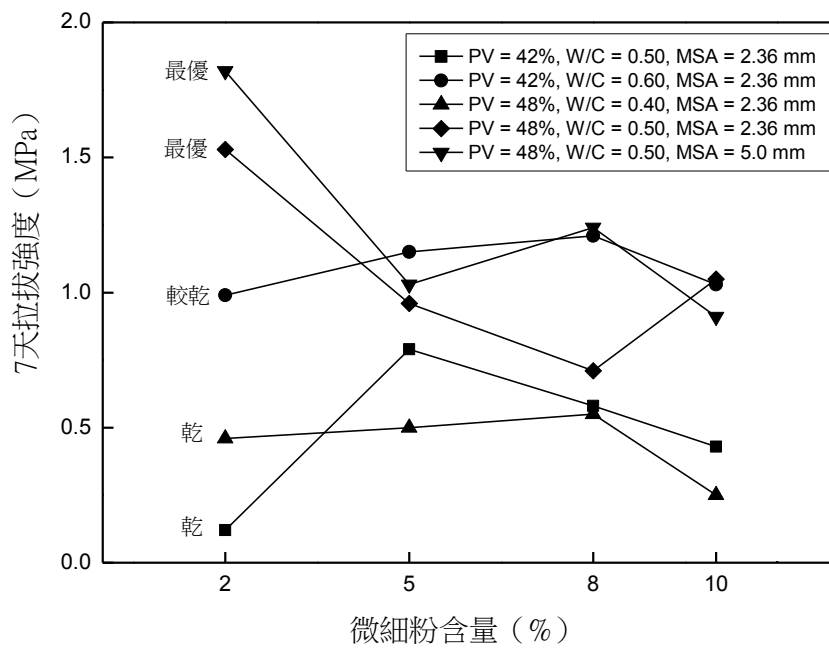


圖 10 7 天拉拔強度與細骨料微細粉含量的關係

從圖 7 可見，抹灰性能與砂漿的坍落度有密切關係。基本上，可獲得最理想抹灰性能的坍落度在 8 至 13 毫米之間（或 10 ± 3 毫米）。太低的坍落度表明砂漿太乾，而太高的坍落度表明砂漿太濕。

從圖 8 可見，抹灰性能與砂漿的黏附性沒有直接的關係。我們原本以為石棒黏附性試驗可以成為評估抹灰性能的一個客觀方法，且所測得的越高黏附性能表示更好的抹灰性能。但不知何故，試驗結果顯示高的黏附性不一定表示有好的抹灰性能。因此，石棒黏附性試驗不適合用來評估砂漿的抹灰性能。除了坍落度試驗之外（該試驗可以指示砂漿的濕潤度是否在可達到最理想抹灰性能的範圍內），我們仍須要依靠現有的主觀判斷來評估砂漿的抹灰性能。

從圖 9 可見，達到 8% 的微細粉含量對 7 天立方體抗壓強度沒有負面影響。事實上，整體來說，微細粉含量對 7 天立方體抗壓強度影響很小。

從圖 10 可見，7 天的拉拔試驗離散得非常厲害，這表明試件表面情況和工藝的不同可能會對拉拔試驗造成一定的隨機變化。此外，也沒有發現 7 天拉拔強度與微細粉含量有明顯的關係。換句話說，微細粉含量對 7 天拉拔強度的影響很小。更重要的是，達到 8% 的微細粉含量對 7 天拉拔強度沒有負面的影響。

不過，從圖 10 可以發現，抹灰性能對 7 天拉拔強度有一定的影響。在圖中，描繪了 5 條曲線。在這 5 條曲線上的砂漿試件的抹灰性能等級各不相同，並小結如下：

漿體體積 = 42%，水灰比 = 0.50，最大粒徑 = 2.36 毫米的曲線：抹灰性能 = “乾”

漿體體積 = 42%，水灰比 = 0.60，最大粒徑 = 2.36 毫米的曲線：抹灰性能 = “較乾”

漿體體積 = 48%，水灰比 = 0.40，最大粒徑 = 2.36 毫米的曲線：抹灰性能 = “較乾”

漿體體積 = 48%，水灰比 = 0.50，最大粒徑 = 2.36 毫米的曲線：抹灰性能 = “最理想”

漿體體積 = 48%，水灰比 = 0.60，最大粒徑 = 5.0 毫米的曲線：抹灰性能 = “最理想”

從圖上可見，抹灰性能為“乾”的砂漿的 7 天拉拔強度相對較低。不過，抹灰性能為“較乾”和“最理想”的砂漿的 7 天拉拔強度至少可達到 0.7 MPa。因此，抹灰性能等級不僅是評估抹灰性能的方法，也是可用來評估拉拔強度是否較高的指標。從目前的結果可見，抹灰性能等級似乎須要達到“較乾”或“最理想”。但是，抹灰性能等級是由水灰比或水含量決定的，而不是由微細粉含量決定的。所以抹灰性能的關鍵點在於水含量控制，而不是微細粉含量控制。

對細骨料最大粒徑為 2.36 毫米的砂漿的試驗結果所反映的微細粉含量對砂漿性能的影響總結如下：

- (1) 當漿體體積為 42%時，水灰比 ≤ 0.50 的砂漿會太乾，不適合抹灰作業；而適合抹灰作業的水灰比大約是 0.60。整體來說，漿體體積 42%對於抹灰作業而言稍顯不足。
- (2) 當漿體體積為 42%時，達到 8%的微細粉含量仍對抹灰性能和強度無負面影響。
- (3) 當漿體體積為 48%時，水灰比 ≤ 0.50 的砂漿會太乾，不適合抹灰作業；而適合抹灰作業的水灰比大約是 0.50。整體來說，對於抹灰作業，漿體體積 48%比 42%要好。
- (4) 當漿體體積為 48%時，達到 8%的微細粉含量仍對抹灰性能和強度無負面影響。

對細骨料最大粒徑為 5.0 毫米的砂漿的試驗結果所反映的微細粉含量對砂漿性能的影響總結如下：

- (1) 當漿體體積為 48%時，水灰比 ≤ 0.30 的砂漿會太乾，而水灰比 ≥ 0.50 的砂漿又會太濕；適合抹灰作業的水灰比大約是 0.40。整體來說，對細骨料最大粒徑為 5.0 毫米的砂漿，漿體體積 48%適合抹灰作業。但是，即使達到這樣的漿體體積，抹灰表面仍顯得非常粗糙。
- (2) 當漿體體積為 48%時，達到 8%的微細粉含量仍對抹灰性能和強度無負面影響。

整體來說，或許有如下結論：砂漿的抹灰性能在砂漿既不太乾也不太濕的情況下最好。不過，砂漿的抹灰性能似乎更受砂漿水灰比（或水含量）的影響，而不是微細粉含量。基於不同條件下適合抹灰工程的水灰比總結如下：

- (1) 在最大粒徑 = 2.36 毫米且漿體體積 = 42%時，合適的水灰比 = 0.60
- (2) 在最大粒徑 = 2.36 毫米且漿體體積 = 48%時，合適的水灰比 = 0.50
- (3) 在最大粒徑 = 5.0 毫米且漿體體積 = 48%時，合適的水灰比 = 0.40

適合抹灰工程的水灰比隨著細骨料最大粒徑和漿體體積的變化而變化，且適合抹灰工程的水灰比（或水含量）的允許範圍非常窄，因此，對砂漿的水灰比（或水含量）須要小心控制。不過，在本項目所涵蓋的最大粒徑和漿體體積的範圍內，達到 8%的微細粉含量仍對抹灰性能和強度無負面影響。最後，在適合的水灰比且微細粉含量不大於 8%時，是可以獲得不少於 0.7 MPa 的拉拔強度。這樣的拉拔強度已經足夠高，因為標準要求的拉拔強度僅為 0.5 MPa。

上述試驗結果顯示，對砂漿用細骨料的微細粉含量限值定為 3% 是沒有必要的。換句話說，登記 F3 的細骨料（微細粉含量 \leq 3%）是沒有必要的。標準中對抹灰和地板砂漿的要求中，可以取消等級 F3，而只用等級 F5（微細粉含量 \leq 5%）。

此外，上述試驗結果也顯示，漿體體積 48% 的砂漿更適合抹灰工程。而稍微低一點的漿體體積（45%）應該也是可行的。在工地上，灰砂比更常用。所以將漿體體積 48% 轉化為灰砂比為 1:2.36；而漿體體積 45% 轉化為灰砂比為 1:2.66。由此可見，適合抹灰工程的灰砂比大概為 1:2.5。

在以往的作業中，砂漿的水灰比或水含量是不會嚴格規定的，工人都是通過自己的判斷給砂漿加水來製備具有最理想抹灰性能的砂漿。這需要工人有較好的培訓和經驗。基於該項目的研究，制訂了一項對坍落度（由迷你坍落擴展度試驗測得）須達到 10 ± 3 毫米的一般規定。為了避免所添加的水過多或過少所造成的工藝問題，應鼓勵工人學習和採用迷你坍落擴展度試驗來確定合適的用水量。

此外，使用預包裝乾粉抹灰砂漿也是一個不錯的選擇。使用預包裝材料可以保證所用細骨料的品質和準確控制灰砂比。同時，預包裝乾粉砂漿的供應商也應通過試驗和經驗獲得所需添加的水的準確用量，並將相關要求詳細說明，以避免工人在現場使用中進行反覆試配的麻煩。這至少可以部分解決抹灰工程中的工藝問題。

4. 粉碎廢玻璃作為砂漿用骨料的可行性

本部分旨在研究粉碎廢玻璃作為砂漿用骨料的可行性。

目前來說，僅有 4% 至 5% 的廢玻璃作為預製混凝土鋪路磚的骨料被循環再用。香港政府非常希望能夠提高回收利用率以減少廢玻璃在堆填區的傾倒量。將廢玻璃粉碎至砂粒的大小以作為河砂替代品使用，或許是解決廢玻璃使用問題的一個不錯方法。

有兩種可能可以提高碎廢玻璃利用率的途徑。第一種是將粉碎廢玻璃骨料在預製混凝土鋪路磚中的比例提高。目前來說，粉碎廢玻璃骨料在環保鋪路磚中的骨料重量替代率僅為 20% 至 25%。如果能將替代率提高到 70%（甚至 100%）會更好。第二種途徑是將粉碎廢玻璃作為砂漿用骨料用於抹灰、打底、地坪或砌築工程。由於作為砂漿用骨料使用的河砂的每年消耗量超過了一百萬噸，而香港的河砂一直都短缺，所以將粉碎廢玻璃作為砂漿用骨料使用不僅可以解決廢玻璃的回收利用問題，還能解決河砂短缺的燃眉之急。

兩家材料供應商協助生產了試驗研究所用的粉碎廢玻璃。從樣品中可以發現，粉碎廢玻璃的微細粉含量很低，且玻璃顆粒的黏聚性也很低（這可能是因為玻璃是疏水性的）。此外，玻璃顆粒有鋒利的邊和角，形狀也有棱角，這可能與玻璃由於較大脆性使在粉碎過程中形成解理面有關。雖然從理論上說，形狀較圓潤的顆粒會比形狀有棱角的顆粒要好。但從供應商處得知，雖然可以對廢玻璃進行研磨以使顆粒更圓潤，但生產成品會很高，因此在實際中未採用。另一方面，從對樣品的初步判斷來看，將廢玻璃粉碎得比普通細骨料更細是有必要的（即等級從 C 提升到 F），這樣可以使摻粉碎廢玻璃的砂漿具有更高的黏聚性和黏附性。

在本研究的初期，是建議使用 70%的粉碎廢玻璃 + 30%的碎石粉或 100%的粉碎廢玻璃作為河砂的替代品來生產預製鋪路磚和抹灰、打底、地坪和砌築砂漿的。為了這個目標，初期的研究方案如表 14 所示。在這個研究方案中，水灰比有四種變化：0.30，0.40，0.50 和 0.60；漿體體積有三種變化：45%，50%和 55%；兩種粉碎廢玻璃等級；以及兩種粉碎廢玻璃含量。

表 14 在砂漿中使用粉碎廢玻璃的初步研究方案

水灰比	漿體體積 (%)	粉碎廢玻璃等級	粉碎廢玻璃含量 (%)
0.30	45	C, F	70, 100
	50	C, F	70, 100
	55	C, F	70, 100
0.40	45	C, F	70, 100
	50	C, F	70, 100
	55	C, F	70, 100
0.50	45	C, F	70, 100
	50	C, F	70, 100
	55	C, F	70, 100
0.60	45	C, F	70, 100
	50	C, F	70, 100
	55	C, F	70, 100

從試驗中，我們可以確定是否有必要將廢玻璃粉碎至比一般情況下更高的細度（即從等級 C 提高到 F），也可以確定粉碎廢玻璃是否可以在預

製鋪路磚、抹灰、打底、地坪和砌築作業等中用到 70%，甚至 100%。如果粉碎廢玻璃可以用到至少 70%，那麼香港的廢玻璃回收利用率將會有顯著的提高。

但是在研究過半時，發現使用過高摻量的粉碎廢玻璃來生產抹灰和打底砂漿，會導致過低的黏附性而使得抹灰難度較大。因此，在 2014 年 4 月 15 日關國雄教授與建造業議會的會議中，協商同意將原來 70%的粉碎廢玻璃摻量降低至 50%，來研究其對抹灰和打底工程的可行性。因此，在後續試驗中，70%的粉碎廢玻璃含量降低到 50%。修改後的研究方案可見於表 15。

表 15 在砂漿中使用粉碎廢玻璃的研究方案（修改版）

水灰比	漿體體積 (%)	粉碎廢玻璃等級	粉碎廢玻璃含量 (%)
0.30	45	C, F	50, 100
	50	C, F	50, 100
	55	C, F	50, 100
0.40	45	C, F	50, 100
	50	C, F	50, 100
	55	C, F	50, 100
0.50	45	C, F	50, 100
	50	C, F	50, 100
	55	C, F	50, 100
0.60	45	C, F	50, 100
	50	C, F	50, 100
	55	C, F	50, 100

試驗中使用的細骨料是由本地市場供應的粉碎花崗岩細骨料。該細骨料與香港混凝土生產商所使用的細骨料相同。細骨料的原有最大粒徑為 5.0 毫米。通過機械篩分測得的微細粉含量為 5.0%。微細粉沒有從細骨料中篩除，以此模擬有相同微細粉含量的機製砂。通過機械篩分法獲得的細骨料粒徑分佈可見於圖 11。和之前研究的一樣，細骨料的比重為 2.54，細骨料的吸水率為 1.81%，而含水率會不時進行測定。吸水率和含水率會被用於計算砂漿所須添加的水量。

細骨料的樣品也被送去現成派安混凝土有限公司和金門建築有限公司進行亞甲藍試驗。從現成派安混凝土有限公司得到的試驗結果為 0.8，從金門建築有限公司得到的試驗結果是 1.0。因此，或許可以認定所使用的細骨料中的微細粉所含的有害物質很少，具有較好品質。

粉碎廢玻璃是由中國大陸的一家材料供應商提供的。該粉碎廢玻璃是將市面上白色玻璃瓶粉碎後得到的。玻璃瓶先被清潔乾淨，然後粉碎至砂子粒徑大小。為了控制其粒徑分佈，粉碎廢玻璃會按粒徑大小被篩分成不同部分，然後再按級配等級 C 和 F 將其從新混合。通過機械篩分法獲得的等級 C 和 F 粉碎廢玻璃粒徑分佈可見於圖 11。粉碎廢玻璃的比重和吸水率分別為 2.33 和 0%。

用的水泥為普通硅酸鹽水泥（其強度等級為 52.5 MPa，符合標準 BS EN 197-1: 2000）。水泥的比重按照標準 BS EN 196-6: 2010 測得，為 3.11。所使用的減水劑為香港本地較常使用的一款聚羧酸高效減水劑，其固體含量為 20%，比重為 1.03。通過雷射粒徑分析儀所獲得的水泥粒徑分佈可見於圖 11。

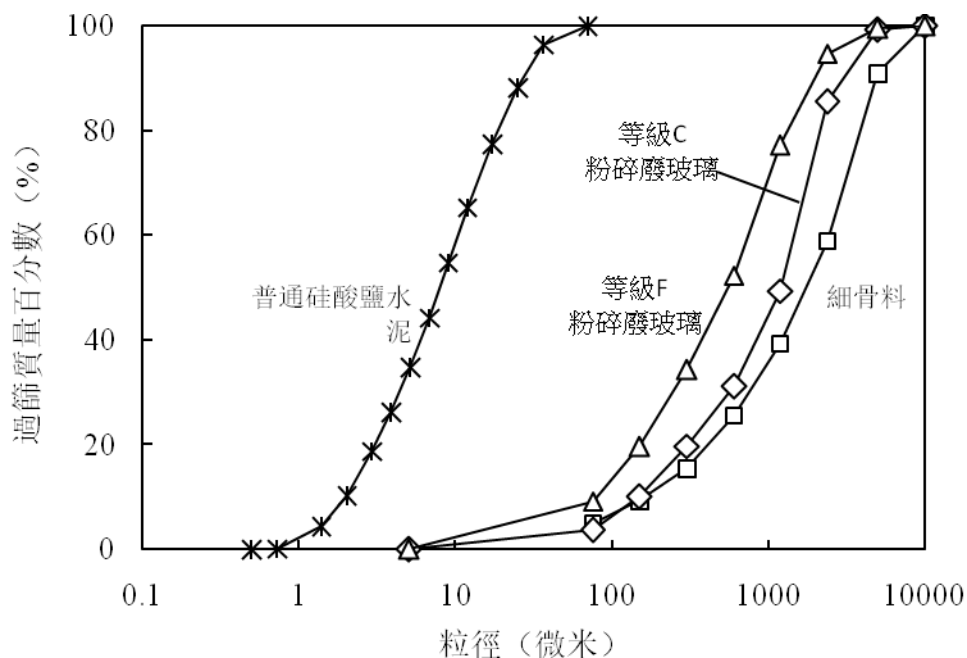


圖 11 所用固體材料粒徑分佈

研究結果列於如下表格中。

表 16 含等級 C 粉碎廢玻璃且粉碎廢玻璃含量 = 100% 砂漿的試驗結果

編號 (水灰比-漿體 體積-等級-粉 碎廢玻璃含量 %)	坍塌度 (毫米)	擴展度 (毫米)	黏附性 (g)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	抹灰性能	7 天拉拔 強度 (MPa)
0.30-45-C-100	太乾以致無法攪拌					
0.40-45-C-100	3	0	1.8	53.4	較乾	1.13
0.50-45-C-100	17	2	3.8	37.6	較濕	1.72
0.60-45-C-100	20	20	4.2	31.5	太濕	無法完成
0.30-50-C-100	1	1	0.8	55.0	太乾	無法完成
0.40-50-C-100	3	2	2.0	52.6	最理想	2.69
0.50-50-C-100	13	7	3.3	37.4	太濕	無法完成
0.60-50-C-100	31	53	5.0	25.7	太濕	無法完成
0.30-55-C-100	2	1	1.2	53.1	較乾	1.11
0.40-55-C-100	11	4	3.3	54.2	較濕	1.57
0.50-55-C-100	29	48	8.7	37.0	太濕	無法完成
0.60-55-C-100	50	99	13.9	25.9	太濕	無法完成
試驗結果顯示： (1) 當漿體體積 = 45%，50% 和 55% 時，適合抹灰的水灰比為 0.45，0.40 和 0.35； (2) 無論漿體體積是多少，砂漿常常不是太乾就是太濕，以致不適合抹灰作業； (3) 在所有漿體體積中，適合抹灰作業的水灰比範圍非常窄； (4) 可以獲得達到 55.0 MPa 的最大 7 天抗壓強度						

表 17 含等級 F 粉碎廢玻璃且粉碎廢玻璃含量 = 100% 砂漿的試驗結果

編號 (水灰比-漿體 體積-等級-粉 碎廢玻璃含量 %)	坍塌度 (毫米)	擴展度 (毫米)	黏附性 (g)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	抹灰性能	7 天拉拔 強度 (MPa)
0.30-45-F-100	太乾以致無法攪拌					
0.40-45-F-100	0	0	0.7	43.1	乾	無法完成
0.50-45-F-100	2	0	2.0	34.9	較乾	1.08
0.60-45-F-100	14	4	2.7	28.8	較濕	1.44
0.30-50-F-100	0	0	0.4	58.1	太乾	無法完成
0.40-50-F-100	2	0	0.8	50.4	較乾	0.67
0.50-50-F-100	13	4	3.7	38.7	較濕	1.29
0.60-50-F-100	31	8	4.4	25.6	太濕	無法完成
0.30-55-F-100	2	1	0.7	54.9	乾	無法完成
0.40-55-F-100	11	3	1.7	55.8	最理想	1.34
0.50-55-F-100	26	5	2.3	37.5	濕	0.17
0.60-55-F-100	40	43	2.8	26.1	太濕	無法完成
試驗結果顯示： (1) 當漿體體積 = 45%，50% 和 55% 時，適合抹灰的水灰比為 0.55，0.45 和 0.40； (2) 無論漿體體積是多少，砂漿常常不是太乾就是太濕，以致不適合抹灰作業； (3) 在所有漿體體積中，適合抹灰作業的水灰比範圍非常窄； (4) 可以獲得達到 58.1 MPa 的最大 7 天抗壓強度						

表 18 含等級 C 粉碎廢玻璃且粉碎廢玻璃含量 = 50% 砂漿的試驗結果

編號 (水灰比-漿體 體積-等級-粉 碎廢玻璃含量 %)	坍塌度 (毫米)	擴展度 (毫米)	黏附性 (g)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	抹灰性能	7 天拉拔 強度 (MPa)
0.30-45-C-50	太乾以致無法攪拌					
0.40-45-C-50	2	0	1.2	56.8	乾	0.24
0.50-45-C-50	5	3	1.6	46.8	較乾	1.62
0.60-45-C-50	8	4	2.6	34.1	較濕	0.61
0.30-50-C-50	0	0	0.5	57.2	太乾	無法完成
0.40-50-C-50	4	1	2.4	55.1	較乾	1.43
0.50-50-C-50	8	2	3.7	40.4	較濕	0.78
0.60-50-C-50	16	12	8.8	28.1	濕	0.48
0.30-55-C-50	0	0	1.2	67.1	太乾	無法完成
0.40-55-C-50	15	5	3.6	57.2	最理想	1.78
0.50-55-C-50	23	23	6.6	50.4	濕	1.23
0.60-55-C-50	34	88	12.0	41.0	太乾	無法完成
試驗結果顯示： (1) 當漿體體積 = 45%，50%和 55%時，適合抹灰的水灰比為 0.50，0.45 和 0.40； (2) 無論漿體體積是多少，砂漿常常不是太乾就是太濕，以致不適合抹灰作業； (3) 在所有漿體體積中，適合抹灰作業的水灰比範圍非常窄； (4) 可以獲得達到 67.1 MPa 的最大 7 天抗壓強度						

表 19 含等級 C 粉碎廢玻璃且粉碎廢玻璃含量 = 50% 砂漿的試驗結果

編號 (水灰比-漿體 體積-等級-粉 碎廢玻璃含量 %)	坍塌度 (毫米)	擴展度 (毫米)	黏附性 (g)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	抹灰性能	7 天拉拔 強度 (MPa)
0.30-45-F-50	太乾以致無法攪拌					
0.40-45-F-50	0	0	0.2	54.0	太乾	無法完成
0.50-45-F-50	2	0	1.1	46.7	乾	0.33
0.60-45-F-50	7	3	2.0	36.8	較乾	0.87
0.30-50-F-50	0	0	0.1	58.6	太乾	無法完成
0.40-50-F-50	3	0	1.3	55.0	乾	0.10
0.50-50-F-50	7	4	1.5	45.3	較乾	0.56
0.60-50-F-50	11	8	3.0	33.1	較濕	1.58
0.30-55-F-50	0	0	0.6	69.7	太乾	無法完成
0.40-55-F-50	5	1	1.1	56.1	較乾	1.27
0.50-55-F-50	10	3	2.9	48.6	較濕	1.35
0.60-55-F-50	38	67	7.8	39.1	太濕	無法完成
試驗結果顯示： (1) 當漿體體積 = 45%，50%和 55%時，適合抹灰的水灰比為 0.60，0.55 和 0.50； (2) 無論漿體體積是多少，砂漿常常不是太乾就是太濕，以致不適合抹灰作業； (3) 在所有漿體體積中，適合抹灰作業的水灰比範圍非常窄； (4) 可以獲得達到 69.7 MPa 的最大 7 天抗壓強度						

為了進一步分析，抹灰性能結果與坍落度和水灰比的關係如圖 12 和圖 13。

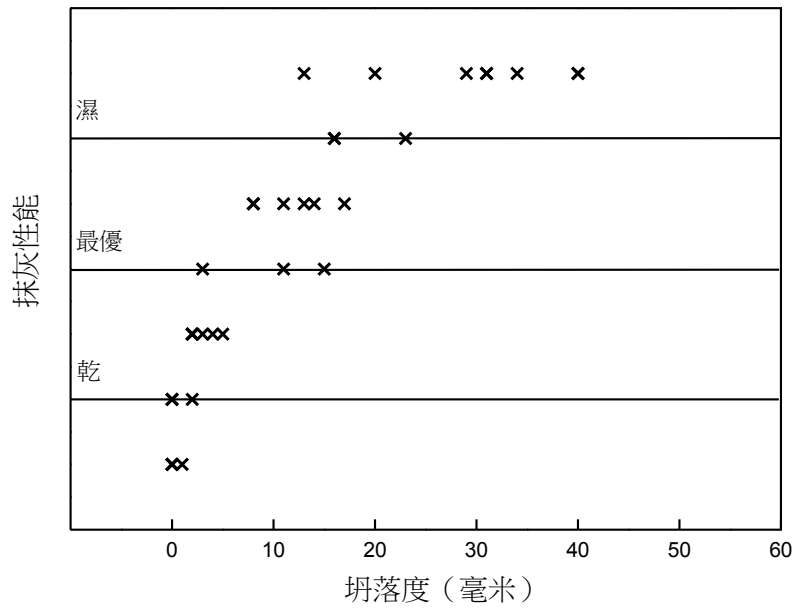


圖 12 抹灰性能與坍落度的關係

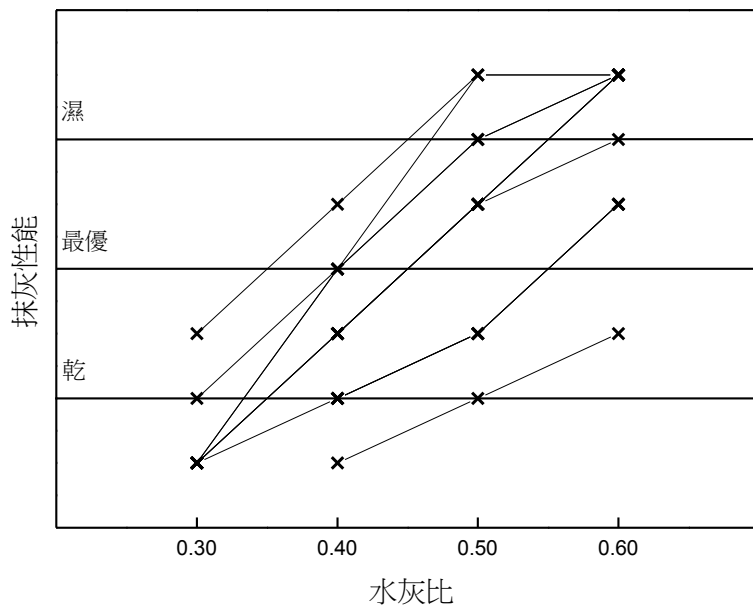


圖 13 抹灰性能與水灰比的關係

為了進一步分析，7天和28天拉拔強度與水灰比的關係如圖14和圖15。

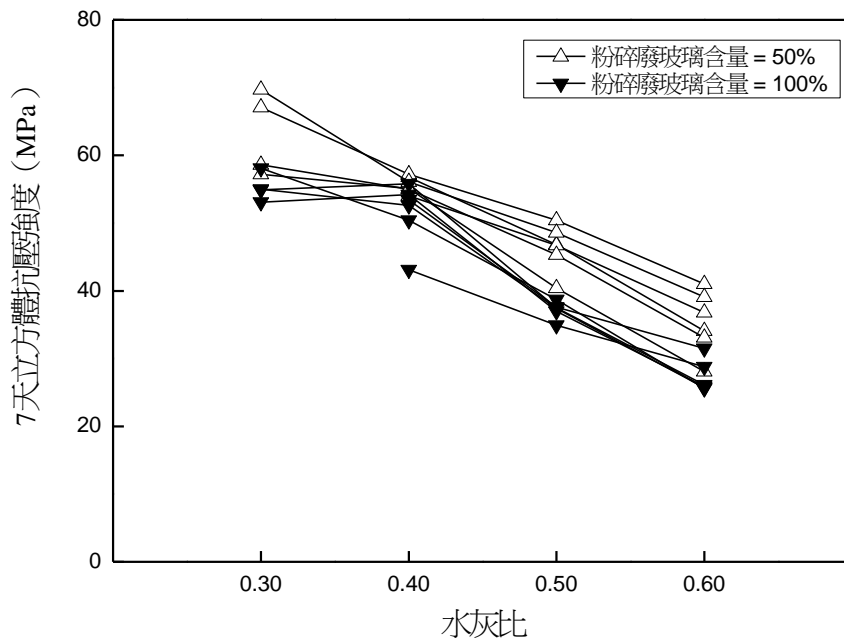


圖 14 7 天立方體抗壓強度與水灰比的關係

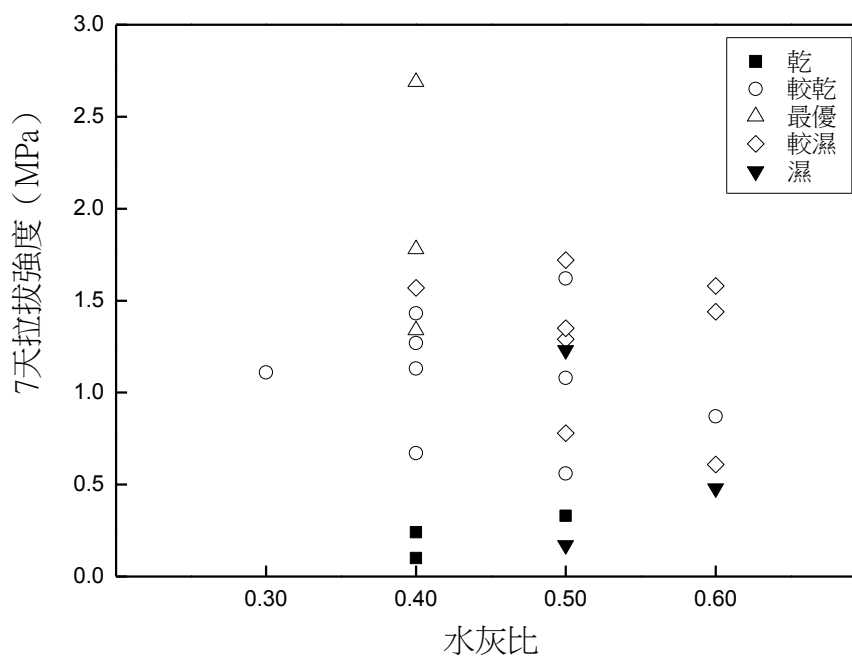


圖 15 7 天拉拔強度與水灰比的關係

從圖 12 可見，如其他抹灰砂漿一樣，含粉碎廢玻璃的砂漿的抹灰性能與坍落度有密切的關係。基本上，最理想抹灰性能的坍落度的範圍在 3 至 15 毫米之間（即 9 ± 6 毫米）。太低的坍落度表明砂漿太乾，而太高的坍落度表明砂漿太濕。

從圖 13 可見，抹灰性能和水灰比的關係受到漿體體積，粉碎廢玻璃等級和含量的影響。更具體地說，可獲得最理想抹灰性能的水灰比會隨著漿體體積，粉碎廢玻璃等級和含量而變化，且當漿體體積提高、粉碎廢玻璃細度提高和粉碎廢玻璃含量提高時，可獲得最理想抹灰性能的水灰比會降低。

從圖 14 可以發現，如預見的一樣，7 天立方體抗壓強度隨著水灰比的降低（從 0.60 至 0.30）而升高。換句話說，在水灰比較低時，7 天立方體抗壓強度較高；在水灰比較高時，7 天立方體抗壓強度較低。當砂漿含有 100% 的粉碎廢玻璃時，最大 7 天抗壓強度可以達到 58.1 MPa，而當砂漿含有 50% 的粉碎廢玻璃時，最大 7 天抗壓強度可以達到 69.1 MPa。因此，使用 100% 的粉碎廢玻璃作為砂漿用細骨料使用會對砂漿強度有一定的負面影響。為了生產強度等級 45 MPa 的預製鋪路磚（等級 45 的預製鋪路磚用於機動車出入口和應急車輛通道），最好使用 50% 粉碎廢玻璃作為細骨料。

從圖 15 可見，7 天的拉拔試驗離散得非常厲害，這表明試件表面情況和工藝的不同可能會對拉拔試驗造成一定的隨機變化。此外，也沒有發現 7 天拉拔強度與水灰比有明顯的關係。因此，7 天拉拔強度與水灰比沒有直接的關係（正如之前解釋的，雖然水灰比會影響抹灰性能，但實際上是由抹灰性能決定拉拔強度）。

但是，從圖 15 中可以看到，抹灰性能對 7 天拉拔強度確有一定影響。從圖上可知，砂漿試樣的抹灰性能等級分為：“乾”、“較乾”、“最理想”、“較濕”和“濕”。對於等級“較乾”、“最理想”和“較濕”，使用空心符號，而對於等級“乾”和“濕”，使用實心符號。如圖所示，對於抹灰性能等級為“乾”和“濕”的砂漿（由實心符號標記），7 天拉拔強度較低；而對於抹灰性能等級為“較乾”、“最理想”和“較濕”的砂漿（由空心符號標記），7 天拉拔強度至少也達到 0.6 MPa。因此，抹灰性能是影響拉拔強度的控制因素。從目前獲得的抹灰性能結果可以看出，抹灰性能等級似乎須要達到“較乾”、“最理想”和“較濕”。而且，抹灰性能等級不僅是由水灰比決定的，還由漿體體積、粉碎廢玻璃等級、粉碎廢玻璃含量所決定。仍需要工人通過自行判斷加水量來獲得最理想的抹灰性能。

對摻 100% 粉碎廢玻璃作為細骨料的砂漿的試驗結果總結如下：

- (1) 不管粉碎廢玻璃是何種級配等級且漿體體積是多少，所製得的抹灰砂漿常常不是太乾就是太濕，且適合抹灰作業的水灰比的範圍太窄。
- (2) 對於粉碎廢玻璃級配等級 = C，在將體漿體體積 = 45% 時，適合抹灰作業的水灰比為 0.45；在漿體體積 = 50% 時，適合抹灰作業的水灰比為 0.40；在漿體體積 = 55% 時，適合抹灰作業的水灰比為 0.35。
- (3) 對於粉碎廢玻璃級配等級 = F，在將體漿體體積 = 45% 時，適合抹灰作業的水灰比為 0.55；在將體漿體體積 = 50% 時，適合抹灰作業的水灰比為 0.45；在漿體體積 = 55% 時，適合抹灰作業的水灰比為 0.40。
- (4) 對於抹灰工程，級配等級為 C 和 F 的粉碎廢玻璃的效果差不多。因此，沒有必要將廢玻璃粉碎得比平常更細。
- (5) 在水灰比 = 0.30，7 天立方體抗壓強度至少有 55.0 MPa。因此，用摻量 100% 的粉碎廢玻璃來生產平均強度達到 55 MPa 的預製塊是完全可行的（對於生產強度等級 35 MPa 的預製鋪路磚是綽綽有餘）。

對摻 50% 粉碎廢玻璃作為細骨料的砂漿的試驗結果總結如下：

- (1) 不管粉碎廢玻璃是何種級配等級且漿體體積是多少，所製得的抹灰砂漿常常不是太乾就是太濕，且適合抹灰作業的水灰比的範圍太窄。
- (2) 對於粉碎廢玻璃級配等級 = C，在將體漿體體積 = 45% 時，適合抹灰作業的水灰比為 0.50；在漿體體積 = 50% 時，適合抹灰作業的水灰比為 0.45；在漿體體積 = 55% 時，適合抹灰作業的水灰比為 0.40。
- (3) 對於粉碎廢玻璃級配等級 = F，在將體漿體體積 = 45% 時，適合抹灰作業的水灰比為 0.60；在將體漿體體積 = 50% 時，適合抹灰作業的水灰比為 0.55；在漿體體積 = 55% 時，適合抹灰作業的水灰比為 0.50。
- (4) 對於抹灰工程，級配等級為 C 和 F 的粉碎廢玻璃的效果差不多。因此，沒有必要將廢玻璃粉碎得比平常更細。
- (5) 在水灰比 = 0.30，7 天立方體抗壓強度至少有 65.0 MPa。因此，用摻量 50% 的粉碎廢玻璃來生產平均強度達到 65 MPa 的預製塊是完全可行的（對於生產強度等級 45 MPa 的預製鋪路磚是綽綽有餘）。

整體來說，目前所獲得的試驗結果基本上是正面的。首先，摻 50% 粉碎廢玻璃來生產強度等級 45 MPa 的預製鋪路磚和摻 100% 粉碎廢玻璃來生產強度等級 35 MPa 的預製鋪路磚是可行的。其次，將摻 50% 粉碎廢玻璃的砂漿用於抹灰工程是可行的。但將摻 100% 粉碎廢玻璃的砂漿用於抹灰工程則不推薦，因為製得的砂漿的粘性不夠，較難操作。再次，級配等

級為 C 和級配等級為 F 的粉碎廢玻璃的效果差不多，所以將廢玻璃粉碎得比平常更細是沒有特別好處，也是沒有必要的。

對於抹灰砂漿的漿體體積，45%至 50%會比較合適。而水灰比則須根據漿體體積、粉碎廢玻璃級配等級和含量而定。在保證抹灰性能的合適水灰比下，砂漿的拉拔強度可以達到至少 0.6 MPa。

不過，仍存在著如何讓工人能夠確定加水量來獲得最理想抹灰性能砂漿的問題。這需要工人有較好的培訓和經驗。基於該項目的研究，制訂了一項對坍落度（由迷你坍落擴展度試驗測得）須達到 10 ± 3 毫米的一般規定。除了靠經驗操作以外，也應鼓勵工人學習和採用迷你坍落擴展度試驗來確定可獲得最理想抹灰性能砂漿的加水量。此外，將粉碎廢玻璃與機製砂和水泥預先包裝來生產預包裝乾粉抹灰砂漿也是一個不錯的選擇。因為通常來說，預包裝乾粉砂漿材料的質量會比在現場製備的要好。同時，預包裝乾粉砂漿的供應商也應通過試驗和經驗獲得所須添加的水的準確用量，並將相關要求詳細說明，以避免工人在現場使用中進行反覆試配的麻煩。

5. 使用回收廢舊混凝土作為混凝土和砂漿用骨料的可行性

本部分重點研究經粉碎和處理後的回收廢舊混凝土作為混凝土和砂漿用骨料的可行性。

在香港，每年都會產生百萬噸級的廢舊混凝土，這些廢舊混凝土會成為惰性固體廢棄物。香港政府一直在鼓勵將粉碎的廢舊混凝土作為回收骨料重新用於新的建設項目中。不過，回收骨料，尤其是粒徑較細的回收骨料，由於會有舊水泥漿附在顆粒的表面，使得含有這些回收骨料的混凝土或砂漿的質量可能會存在問題。所以，大多數的工程師都對使用回收骨料心懷顧慮。直到目前，回收骨料的使用率（大部分用於生產預製鋪路磚）都很低，而絕大部分的廢舊混凝土都只是作為廢棄物傾倒於堆填區，或被運出香港。

為了提高廢舊混凝土的回收利用率，我們需要更好地利用這些粉碎的廢舊混凝土，而這些廢舊混凝土作為等級 200 回收填石料可從政府填料庫中獲得。

為了提高回收粗骨料在混凝土工程中的應用，而不僅僅用於混凝土預製鋪路磚，有必要提高強度等級 35 MPa 混凝土的回收粗骨料替代率。不過在此之前，我們須要通過去除骨料顆粒表面的舊水泥漿來提高回收粗骨料的質量。採用機製砂生產中的研磨技術（主要用於改善機製砂的圓度）來對回收粗骨料進行研磨，或許是去除舊水泥漿的一個好方法。但

是，由於回收粗骨料並不是河砂替代品，關於如何提高回收粗骨料品質來拓展回收粗骨料利用率的研究不在本研究的範圍。

本研究的重點放在回收細骨料作為河砂替代品的可行性研究上。在研究之初，我們希望能獲得石礦場營運商和機製砂供應商的幫助，生產以下兩款回收細骨料用於試驗：

CRFA - 粉碎回收細骨料，對該細骨料只進行粉碎以縮小粒徑而不會對其進行研磨。

GRFA - 研磨回收細骨料，對該細骨料粉碎後，還會對其進行研磨以去除在顆粒表面的舊水泥漿。

不過，沒有一家聯繫過的石礦場營運商和機製砂供應商有興趣生產上述回收骨料用於試驗。事實上，他們對香港的廢舊混凝土回收產業並不看好。不過，關國雄教授最近聯繫到了深圳市綠發鵬程環保科技有限公司。該公司是一家回收和粉碎建築廢料年產量達到一百萬噸的深圳公司。他們已經發了一些 CRFA 型的回收細骨料樣品到香港大學進行試驗。出於對生產成本的考慮，他們並不生產 GRFA 型回收細骨料。不過，他們已成功在他們的一些建材產品中使用 100%的回收細骨料，例如預製鋪路磚和預包裝乾粉砂漿。

理論上來說，回收細骨料的微細粉含量須要通過風選法來控制。但是，送過來香港大學的回收細骨料樣品沒有經過任何對微細粉含量控制的處理程序。在樣品的收據上，生產廠家所測得的微細粉含量是 12%。為了更好地控制回收細骨料樣品的微細粉含量，我們將樣品的微細粉通過機械篩分法篩除後，再按指定的微細粉含量摻回到回收細骨料中。可以預見，通過對微細粉含量嚴格控制，即使是 CRFA 型的回收細骨料，按 100%的替代率來生產抹灰、打底、地坪和砌築砂漿等也是可行的。

為了研究在混凝土和砂漿中使用替代率 100%回收細骨料的可行性，我們開展了相關研究。在這項研究中，水灰比有四種變化（0.30，0.40，0.50 和 0.60），漿體體積有兩種變化（42%和 48%），微細粉含量有兩種變化（5%和 10%），但只使用一種類型的回收細骨料，即 CRFA 型回收細骨料（由於 GRFA 型回收細骨料無從獲得，故無法進行試驗）。試驗方法與之前研究的相同。

表 20 對回收細骨料可能應用的研究方案

水灰比	漿體體積	微細粉含量 (%)	回收細骨料類型
0.30	42	5, 10	CRFA
	48	5, 10	CRFA
0.40	42	5, 10	CRFA
	48	5, 10	CRFA
0.50	42	5, 10	CRFA
	48	5, 10	CRFA
0.60	42	5, 10	CRFA
	48	5, 10	CRFA

所用的回收細骨料的粒徑為 5.0 毫米，並由機械篩分法將其微細粉含量控制在 5% 和 10%。微細粉含量分別為 5% 和 10% 的回收細骨料的粒徑分佈可參考圖 16。微細粉含量分別為 5% 和 10% 的回收細骨料的比重均為 2.29，而吸水率分別為 9.0% 和 12.0%。在計算用水量時，吸水率會被考慮。

所使用的水泥為普通硅酸鹽水泥（其強度等級為 52.5 MPa，符合標準 BS EN 197-1: 2000）。水泥的比重按照標準 BS EN 196-6: 2010 測得，為 3.11。通過雷射粒徑分析儀測得的水泥粒徑分佈如圖 16 所示。

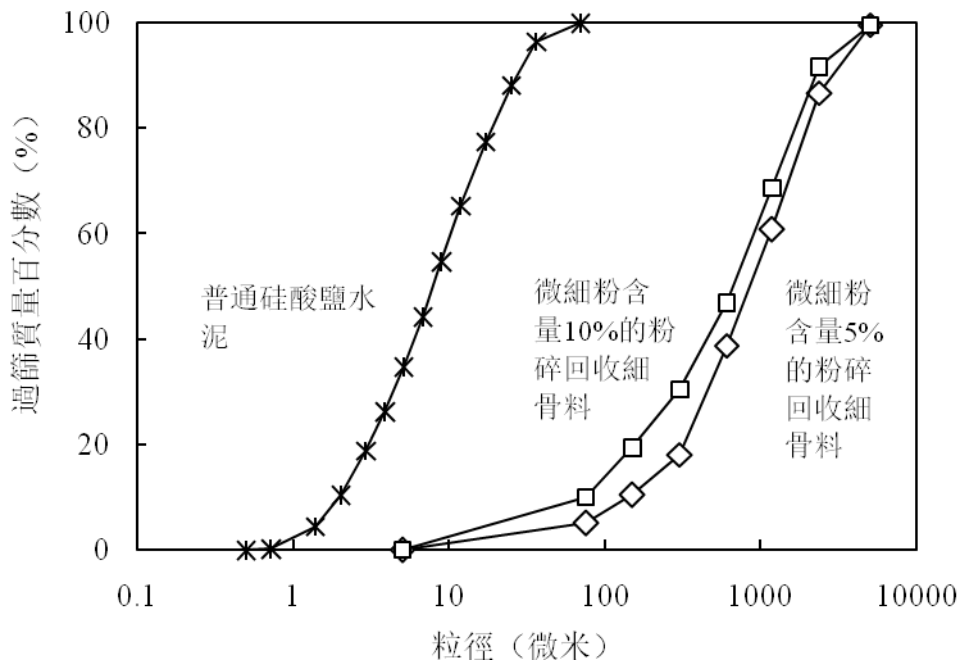


圖 16 所用固體材料粒徑分佈

詳細的試驗結果如下表所示。

表 21 漿體體積 = 42%，用 CRFA 型回收細骨料的砂漿試樣試驗結果

編號 (水灰比-漿體 體積-微細粉含 量%)	坍塌度 (毫米)	擴展度 (毫米)	黏附性 (g)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	抹灰性能	7 天拉拔 強度 (MPa)
0.30-42-5 0.30-42-10	太乾以致無法攪拌					
0.40-42-5 0.40-42-10	5 5	1 1	2.0 1.9	45.8 34.5	較濕 最理想	0.44 1.86
0.50-42-5 0.50-42-10	21 15	25 11	4.4 2.9	29.7 24.8	濕 較濕	無法完成 0.71
0.60-42-5 0.60-42-10	27 32	40 64	6.0 6.2	19.0 17.2	太濕 太濕	無法完成 無法完成
試驗結果顯示： (1) 回收骨料中的微細粉含量對強度有顯著的負面影響； (2) 在微細粉含量 = 5%，可以獲得達到 45.8 MPa 的 7 天強度； (3) 在微細粉含量 = 10%，可以獲得達到 34.5 MPa 的 7 天強度； (4) 適合抹灰作業的水灰比的範圍大約為 0.45； (5) 在微細粉含量不高於 10% 時，可以獲得至少 0.5 MPa 的拉拔強度						

表 22 漿體體積 = 48%，用 CRFA 型回收細骨料的砂漿試樣試驗結果

編號 (水灰比-漿體 體積-微細粉含 量%)	坍塌度 (毫米)	擴展度 (毫米)	黏附性 (g)	7 天立方 體抗壓強 度 (MPa)	抹灰性能	7 天拉拔 強度 (MPa)
0.30-48-5 0.30-48-10	太乾以致無法攪拌					
0.40-48-5 0.40-48-10	12 18	6 4	3.1 4.2	45.6 38.0	較濕 較濕	0.55 0.70
0.50-48-5 0.50-48-10	29 31	60 58	7.5 11.4	30.5 26.4	太濕 太濕	無法完成 無法完成
0.60-48-5 0.60-48-10	39 45	70 109	12.3 13.9	21.1 18.2	太濕 太濕	無法完成 無法完成
試驗結果顯示： (1) 回收骨料中的微細粉含量對強度有顯著的負面影響； (2) 在微細粉含量 = 5%，可以獲得達到 45.6 MPa 的 7 天強度； (3) 在微細粉含量 = 10%，可以獲得達到 38.0 MPa 的 7 天強度； (4) 適合抹灰作業的水灰比的範圍大約為 0.40； (5) 在微細粉含量不高於 10% 時，可以獲得至少 0.5 MPa 的拉拔強度						

為進一步分析，抹灰性能與坍落度的關係如圖 17 所示，7 天抗壓強度與微細粉含量的關係如圖 18 所示。

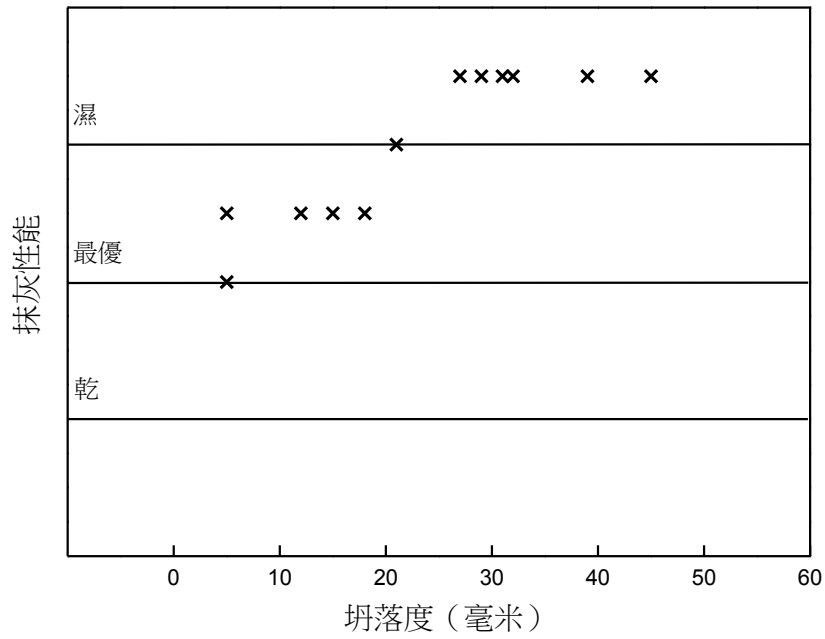


圖 17 抹灰性能與坍落度的關係

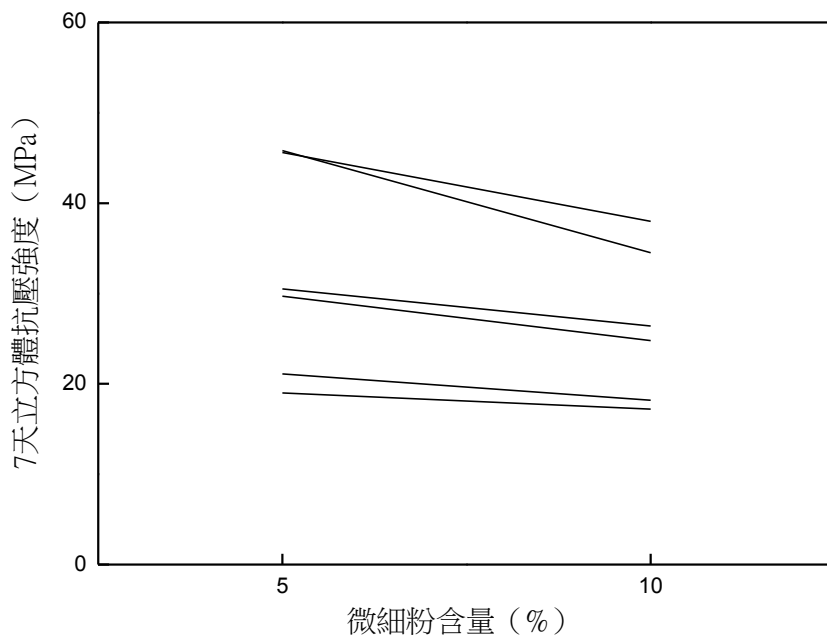


圖 18 7 天立方體抗壓強度與 CRFA 型回收細骨料中微細粉含量的關係

從圖 17 可見， 10 ± 5 毫米的坍落度通常對應著抹灰性能等級“較濕”，而不是“最理想”。在這種特殊情況下，我們面臨的問題在於，雖然所測得的坍落度在 10 ± 5 毫米的最理想範圍內，但砂漿仍會有滑落的趨勢（這就是為什麼抹灰性能等級標記為“較濕”）。一個可能的原因是，CRFA 型回收細骨料的吸水率太高（含 5% 微細粉的 CRFA 型回收細骨料和含 10% 微細粉的 CRFA 型回收細骨料的吸水率分別為 9.0% 和 12.0%），為了補償骨料吸水所額外添加的水有可能會使得砂漿相對較濕。或許，對於含有 CRFA 型回收細骨料的砂漿，需要對其骨料的吸水率格外留心，以避免添加了過多的水而導致砂漿比預期的濕。

從圖 18 可見，微細粉含量對 7 天立方體抗壓強度有顯著的負面影響。這是因為，在回收細骨料中的微細粉大部分是廢舊混凝土的硬化水泥漿，其強度通常較低。

摻 CRFA 型回收細骨料砂漿的試驗結果總結如下：

- (1) 微細粉含量對強度有明顯的負面影響。因此，有必要控制回收細骨料的微細粉含量不能超過 10%，最好不超過 5%。
- (2) 在微細粉含量 5% 時，是可以達到至少 45 MPa 的 7 天抗壓強度的；而在微細粉含量 10% 時，可以達到 38 MPa 的 7 天抗壓強度。這樣的 7 天強度對於生產強度等級 30 MPa 的混凝土（適用於人行道預製鋪路磚）和強度等級 20 MPa 的混凝土（適用於地基墊層和非結構混凝土）都是足夠的。
- (3) 不管漿體體積如何變化，適合抹灰工程的水灰比範圍都非常窄。在漿體體積 42% 時，適合抹灰工程的水灰比約 0.45；而在漿體體積 48% 時，適合抹灰工程的水灰比約 0.40。
- (4) 高達 10% 的微細粉含量並不會對抹灰作業造成影響。當微細粉含量不高於 10% 時，拉拔強度可以達到 0.5 MPa。

整體而言，目前為止所獲得的試驗結果頗為正面。第一，在混凝土中使用 100% 的回收細骨料是可行的。不過，對生產強度等級 30 MPa 的混凝土，有必要把回收細骨料的微細粉含量控制在 5% 以內；對生產強度等級 20 MPa 的混凝土，有必要把回收細骨料的微細粉含量控制在 10% 以內。第二，在抹灰砂漿中使用 100% 的回收細骨替也是可行的。雖然適合抹灰作業的水灰比範圍較窄，但拉拔強度達到 0.5 MPa 是可行的。雖然微細粉含量 10% 仍可接受，但出於生產穩定性的考慮（微細粉含量過大會使吸水率的變化過大，從而導致往砂漿中加入合適的水量較難），微細粉含量不宜大於 5%。

由於在本研究中只對少量的回收細骨料進行了試驗，因此回收細骨料品質的波動未能完全反映。可以預見的，回收細骨料的品質會有較大的波動。為了使回收細骨料的品質更穩定，一個方法是將 50% 的回收細骨料與 50% 的機製砂（經處理的碎石粉）混合使用。即使只使用 50% 的回收

細骨料在各類砂漿工程中，對香港而言，所提高的建築廢料的回收利用率也會非常可觀，同時砂漿生產所需的河砂也可以大幅減少。

- 附錄 B 結束 -

附錄 C

機製砂和河砂用於抹灰工程的現場試驗報告

1. 簡介

作為研究項目的一部分，我們也開展了關於機製砂用於抹灰工程的現場試驗。在現場試驗中，邀請了熟手工人對含機製砂的水泥砂漿的抹灰性能進行了使用和評價。

本項試驗共試用兩款機製砂。第一款樣品是由文輝泰集團有限公司提供的，該公司是現時香港唯一一家砂漿用機製砂的供應商。另一款樣品是由友盟混凝土有限公司提供的，該公司目前對生產砂漿用機製砂不感興趣，但其生產的機製砂均用於混凝土的生產。從文輝泰和友盟處得知，兩款機製砂均通過對碎石粉進行風選法來控制微細粉含量製成的。

由文輝泰提供的第一款樣品命名為 MS1，由友盟提供的第二款樣品命名為 MS2。為了便於比較，一款從市場獲得的河砂也用於試驗研究，並將其命名為 RS。

2. 機製砂樣品的屬性

兩種機製砂（MS1 和 MS2）、河砂（RS）的粒徑分佈如表 1 所示。

表 1 MS1、MS2 和 RS 的粒徑分佈

篩尺寸	過篩累計百分數 (%)		
	MS1	MS2	RS
5.0 毫米	100.0	100.0	99.5
2.36 毫米	97.2	84.0	94.2
1.18 毫米	74.9	58.9	79.5
600 微米	46.2	37.5	52.4
300 微米	18.9	20.0	19.1
150 微米	5.2	8.2	2.8
75 微米	0.6	2.5	0.5
0	0.0	0.0	0.0

從上表可知，MS1 有 2.8%的骨料大於 2.36 毫米，0.6%小於 75 微米；MS2 有 16.0%的骨料大於 2.36 毫米，2.5%小於 75 微米。相較而言，MS1 較細，且微細粉含量更低（0.6%）；MS2 較粗，且微細粉含量更高（2.5%）。MS1 或許可被認為是最大粒徑為 2.36 毫米的細骨料，而 MS2 可被認為是最大粒徑為 5.0 毫米的細骨料。

3. 將機製砂用於抹灰作業的現場試驗

感謝何偉華先生、建造業議會和合源建材有限公司的安排，我們可以開展關於機製砂用於抹灰工程的兩場現場試驗。

第一次抹灰工程試驗：

第一場現場試驗是於 2015 年 3 月 24 日在建造業議會的九龍灣培訓中心進行。在現場試驗中，共製備了 5 組砂漿用於試驗。5 組砂漿（MM1，MM2，MM3，MM4 和 MM5）的情況，可見於表 2。

表 2 第一次抹灰工程試驗的砂漿情況

砂漿編號	細骨料	水：水泥：砂 (重量比)
MM1	MS1	0.40: 1.0: 2.5
MM2	MS1	0.45: 1.0: 2.5
MM3	MS1	0.50: 1.0: 2.5
MM4	MS2	0.50: 1.0: 2.5
MM5	MS2	0.55: 1.0: 2.5

所有的抹灰作業都在垂直混凝土表面上進行，而作業的混凝土表面會提前 10 分鐘進行灑水濕潤並在抹灰作業前用抹布擦乾。

MM1 砂漿有點太乾，完全沒有黏聚性，非常難使用。操作中大力將 10 毫米厚的該砂漿抹在混凝土表面，但所形成的砂漿層非常不穩定，在抹灰後會有滑落的趨勢。不過，砂漿表面可以做到比較光滑。操作該試驗的工人說，該砂漿的水含量比他們通常所加的低很多。整體來說，結果不理想。

MM2 砂漿對於抹灰作業而言，稠度剛剛好（即不太乾也不太濕），黏聚性也很好。操作中大力將 10 毫米厚的該砂漿抹在混凝土表面。操作該試驗的工人說，將該砂漿抹到混凝土表面的力氣比平時他們所用的力氣大，這是由於該砂漿的水含量還是比平時他們所加的要低。整體來說，結果理想。

MM3 砂漿對於抹灰作業而言，稠度剛剛好（即不太乾也不太濕），黏聚性也很好。操作中無需大力，便可將 15 毫米厚的該砂漿抹在混凝土表面，且砂漿表面可以容易地抹平。操作該試驗的工人說，將該砂漿比 MM2 容易使用，且這是由於該砂漿的水含量與他們平時所加的差不多。整體來說，結果理想。

MM4 砂漿稍微有點乾，但有足夠的黏聚性。操作中大力將 10 毫米厚的該砂漿抹在混凝土表面。即使含有 16% 的粒徑大於 2.36 毫米的骨料，砂漿表面仍可抹平，只是會有些困難。操作該試驗的工人說，該砂漿的水含量比平時他們所加稍低。整體來說，結果理想。

MM5 砂漿對於抹灰作業而言，稠度剛剛好（即不太乾也不太濕），黏聚性也很好。操作中無需大力，便可將 15 毫米厚的該砂漿抹在混凝土表面，且砂漿表面可以容易地抹平。不過，砂漿在抹灰後有些許滑落的趨勢。操作該試驗的工人說，將該砂漿比 MM4 容易使用，且這是由於該砂漿的水含量與他們平時所加的差不多。整體來說，結果理想。

待砂漿硬化後，抹灰的混凝土面板會被送往香港大學的實驗室進行 7 天拉拔試驗。對於每塊混凝土面板，都會進行三次的拉拔試驗。對於每塊抹灰的混凝土面板，會進行三次的拉拔試驗。拉拔試驗結果如表 3 所示。

表 3 第一次抹灰工程試驗的拉拔試驗結果

砂漿編號	抹灰厚度 (毫米)	7 天拉拔強度 (MPa)			
		試驗 1	試驗 2	試驗 3	平均
MM3	7	2.04	1.78	0.13	1.32
MM3	15	0.59	0.83	0.17	0.53
MM4	7	0.16	0.13	0.10	0.13
MM5	15	0.39	0.39	1.53	0.77

從上表可知，拉拔強度的離散很大，這或許說明拉拔強度對工藝非常敏感（例如，是否在抹灰時施加了合適的力道）。不過，對於砂漿試樣 MM3，平均拉拔強度高於 0.5 MPa。對於砂漿試樣 MM4，平均拉拔強度低於 0.5 MPa。但這並不能說明機製砂 MS2 不好，造成這一原因很可能是在對 MM4 砂漿抹灰時的工藝不好。對於砂漿試樣 MM5，平均拉拔強度高於 0.5 MPa。但須要指出的是，在抹灰層上發現了一條收縮裂縫。整體來說，從以上的拉拔試驗結果來看，對於機製砂 MS1 和 MS2，最合適的水灰比是大約 0.50。

第二次抹灰工程試驗：

第二場現場試驗是於 2015 年 4 月 2 日在九龍灣的合源建材有限公司的培訓中心進行。在現場試驗中，共製備了 5 組砂漿用於試驗。5 組砂漿（MM6，MM7，MM8，MM9 和 MM10）的情況，可見於表 4。

表 4 第二次抹灰工程試驗的砂漿情況

砂漿編號	細骨料	水：水泥：砂 (重量比)
MM6	MS1	0.40: 1.0: 2.5
MM7	MS1	0.45: 1.0: 2.5
MM8	MS1	0.50: 1.0: 2.5
MM9	MS1	0.55: 1.0: 2.5
MM10	RS	0.50: 1.0: 2.5

所有的抹灰作業都在垂直混凝土表面，以及混凝土天花板上（如可行）進行。而作業的混凝土表面會提前 10 分鐘進行灑水濕潤並在抹灰作業前用抹布擦乾。

MM6 砂漿有點太乾，完全沒有黏聚性，非常難使用。操作中大力將 10 毫米厚的該砂漿抹在混凝土表面，但所形成的砂漿層非常不穩定，在抹灰後會滑落。該砂漿不能抹在混凝土天花板上。不過，砂漿表面可以做到比較光滑。操作該試驗的工人說，該砂漿的水含量比他們通常所加的低很多。整體來說，結果不理想。

MM7 砂漿對於抹灰作業而言，稠度剛剛好（即不太乾也不太濕），黏聚性也很好。操作中大力將 10 毫米厚的該砂漿抹在混凝土表面，但不能抹在混凝土天花板上。不過，砂漿表面可以做到比較光滑。操作該試驗的工人說，將該砂漿抹到混凝土表面的力氣比平時他們所用的力氣大，這是由於該砂漿的水含量還是比平時他們所加的要低。整體來說，結果理想。

MM8 砂漿對於抹灰作業而言，稠度剛剛好（即不太乾也不太濕），黏聚性也很好。操作中，無需大力便可將 15 毫米厚的該砂漿抹在混凝土表面，也可大力將 7 毫米的該砂漿抹在混凝土天花板上。此外，砂漿表面可以容易地抹平。操作該試驗的工人說，將該砂漿比 MM7 容易使用，且這是由於該砂漿的水含量與他們平時所加的差不多。整體來說，結果理想。

MM9 砂漿有點太濕，但黏聚性尚可。其相對容易操作和抹平。操作中，無需大力便可將 15 毫米厚的該砂漿抹在混凝土表面，但抹上的砂漿由滑落的趨勢。稍微用力可以將 5 毫米厚的該砂漿抹在混凝土表面，但在抹灰後會有滑落的趨勢。操作該試驗的工人說，該砂漿的水含量比他們通常所加的稍多。整體來說，結果尚可。

MM10 砂漿對於抹灰作業而言，稠度剛剛好（即不太乾也不太濕），黏聚性也很好。操作中，無需大力便可將 15 毫米厚的該砂漿抹在混凝土表面，也可大力將 10 毫米的該砂漿抹在混凝土天花板上。此外，砂漿表面

可以容易地抹平。操作該試驗的工人說，將該砂漿的抹灰性能與 MM8 的差不多。整體來說，結果理想。

待砂漿硬化後，抹灰的混凝土面板會被送往香港大學的實驗室進行 7 天拉拔試驗。對於每塊混凝土面板，都會進行三次的拉拔試驗。試驗結果如表 5 所示。

表 5 第二次抹灰工程試驗的拉拔試驗結果

砂漿編號	抹灰厚度 (毫米)	7 天拉拔強度 (MPa)			
		試驗 1	試驗 2	試驗 3	平均
MM7	13	0.61	0.32	0.31	0.41
MM8	13	0.14	1.88	1.00	1.01
MM9	15	0.62	0.70	0.83	0.71
MM10	15	0.77	0.13	0.03	0.31

從上表可知，拉拔強度的離散很大，這或許說明拉拔強度對工藝非常敏感（例如，是否在抹灰時施加了合適的力道）。不過，對於砂漿試樣 MM7，平均拉拔強度低於 0.5 MPa。這可能是由於工藝的問題，也可能是基於拉拔強度本身的特點。對於砂漿試樣 MM8 和 MM9，平均拉拔強度高於 0.5 MPa。最後，對於砂漿試樣 MM10，平均拉拔強度低於 0.5 MPa，這可能是由於工藝的問題，也可能是基於拉拔強度本身的特點。在所有砂漿試樣的抹灰層上均無收縮裂縫。整體來說，從以上的拉拔試驗結果來看，對於機製砂 MS1，最合適的水灰比是大約 0.50，且在這一水灰比下，含機製砂的 MS1 的砂漿的抹灰性能和拉拔強度與含河砂 RS 的砂漿的一樣好。

4. 結論

總結後，有如下結論：

- (1) 機製砂 MS1（微細粉含量為 0.6%，最大粒徑為 2.36 毫米）適合作為抹灰砂漿的細骨料使用。當使用機製砂 MS1 時，砂漿的配合比要求灰砂比為 1:2.5，水灰比大約為 0.50。在水灰比 = 0.50（或其他可達到合適稠度的水灰比）時，抹灰作業可在混凝土垂直牆面和混凝土天花板上進行，且平均拉拔強度可超過 0.5 MPa。當水灰比低於或高於 0.50 時，砂漿不是太乾就是太濕，抹灰作業只能垂直混凝土表面上進行。由此可見，水灰比的合適範圍較窄。因此，需要對用水量進行小心控制，並對稠度有較好的判斷。
- (2) 雖然開始時只作為混凝土用細骨料使用，機製砂 MS2（微細粉含量為 2.5%，最大粒徑為 5.0 毫米）同樣適合作為抹灰砂漿的細骨料。當使用機製砂 MS2 時，砂漿的配合比要求灰砂比為 1:2.5，水

灰比大約為 0.50。在水灰比 = 0.50（或其他可達到合適稠度的水灰比）時，抹灰作業可在混凝土垂直牆面和混凝土天花板上進行（在該項目第一階段的現場試驗中，就已發現該款機製砂可用於混凝土天花板上的抹灰作業）。雖然砂漿表面仍可抹平，但由於有些骨料的粒徑較粗（粒徑大於 2.36 毫米），抹灰作業仍有些困難。因此，對機製砂的最大粒徑控制在 2.36 毫米以內較為合適。

- (3) 河砂 RS，作為常用的建築材料，當然也適合作為抹灰砂漿的細骨料使用。當使用河砂 RS 時，砂漿的配合比要求灰砂比為 1:2.5，水灰比大約為 0.50。在合適的水灰比下，抹灰作業可在混凝土垂直牆面和混凝土天花板上進行。不過，須要留意的是，河砂的基本情況（如細度和含水率等）常會有較大波動（受採掘地的影響），所以砂漿準確的用水量須要在攪拌過程中判斷，且需要較好的經驗和技術才能製備出能夠在混凝土垂直牆面和混凝土天花板上進行抹灰作業的稠度合適的砂漿。

- 附錄 C 結束

附錄 D

砂漿用骨料建議規格

1. 背景

這份建議規格是建造業議會研究項目“混凝土和水泥砂漿生產用河砂替代品研究（第二階段）”成果的一部分。這份規格為香港砂漿用骨料制訂了一般要求。

制訂規格是為了幫助解決以下問題：歐洲標準 BS EN 13139: Aggregates for Mortar 不適用於香港，且不能與香港本地建築標準 CS3: 2013 Aggregates for Concrete 相配合，而目前又沒有本地的砂漿用骨料標準。同時，河砂通常作為砂漿用骨料使用，但香港面臨嚴重的河砂短缺問題，而未經處理的碎石粉不是理想的砂漿用骨料。在研究項目中，發現未經處理的碎石粉（常作為混凝土用骨料）之所以不是理想的砂漿用骨料，原因在於其相對較高的微細粉含量和較大的骨料粒徑。

為了使碎石粉能夠成為砂漿用骨料，需對其進行處理以控制其微細粉含量、骨料最大粒徑及其他特性。但是，如果沒有明確的標準來對砂漿用骨料作出規定，骨料生產商和供應商仍會無所適從。實際上，關於如何對骨料（不管是河砂、碎石粉，還是來源於回收的惰性固體廢棄物）進行處理以優化其特性，進而生產出性能最理想的砂漿的研究很少。基於本研究項目的試驗結果，以及從建造行業持份者得到的諮詢反饋，已為砂漿用骨料制訂了一般規定，並將其寫入該建議規格中作為臨時措施，直至香港政府制訂正式的砂漿用骨料標準。我們希望幾年之後，該建議規格能夠成為制訂正式標準很好的基礎。

最後，對以下為該建議規格的草擬作出貢獻的機構給予由衷感謝：

- 香港政府混凝土技術常務委員會
- 香港政府工務中央試驗所
- 香港政府屋宇署
- 香港建造商會
- 香港建築業承建商聯會
- 香港混凝土製造商協會
- 礦業學會香港分會
- 進口石材供應商協會
- 香港建造業分包商聯會
- 泥水商協會
- 香港泥水建築業職工會
- 香港工程師學會材料分部
- 香港混凝土學會
- 承建商授權簽署人協會

2. 適用範圍，標準和術語

2.1 適用範圍

這份建議規格，對以下砂漿用骨料的特性作了規定：由處理的天然材料所得的天然骨料、由處理的回收材料所得的回收骨料，以及兩者的混合物。該規格也對骨料質量控制作了要求，對骨料試驗方法作了規定。這些要求對天然骨料和回收骨料均適用，除非另作說明。

這份建議規格只針對天然骨料和回收骨料。且該規程涉及的骨料的烘乾顆粒密度不低於 $2,000 \text{ kg/m}^3$ ，不涉及輕骨料和重骨料。

所生產的砂漿只涉及地坪砂漿、噴射砂漿、修補砂漿、灌漿、打底砂漿、抹灰砂漿和砌築砂漿。

2.2 相關標準

在 2013 年 5 月，香港特區政府曾出版了一部本地建築標準 CS3: 2013 Aggregates for Concrete。該標準與對應的歐洲標準 BS EN 12620: Aggregates for Concrete 有很大不同，而該歐洲標準也正是因為不符合本地的情況而不被採用。為了避免出現其他標準過時或不適合香港的情況發生，所制訂的建築標準 CS3: 2013 是一部完全獨立的標準。且在這部標準中，所有的要求都有明確的規定，也定出所有的試驗方法。

另一方面，雖然歐洲標準 BS EN 13139: Aggregates for Mortar 不適合香港使用，但目前香港本地也無一部砂漿用骨料的標準。該建議規格有助於解決這一問題。為了使這部規格與建築標準 CS3: 2013 相配合，並能充分利用 CS3: 2013 的條款，該建議規格沿用了標準 CS3: 2013 中的一般要求，也採用了與標準 CS3: 2013 中相同的試驗方法。基於這個原因，該建議規格可以說是參照大量有關 CS3: 2013 的標準。

為了盡可能吸收歐洲標準 BS EN 13139: Aggregates for Mortar，該建議規格按如下原則編寫：如果標準 BS EN 13139 中規定可以採用，則一律採用；如果標準 BS EN 13139 中規定不適合採用，則在考慮本地條件後制訂相關規定。

2.3 術語和定義

對於本部建議規格，採用了如下術語和定義。

2.3.1 骨料

建築中使用的顆粒狀材料；它可以是天然的，也可以是回收再生的。

2.3.2 天然骨料

從礦產資源中只通過機械處理所得到的骨料。

2.3.3 回收骨料

將廢舊混凝土或其他惰性固體廢棄物經過處理所得到的骨料

2.3.4 粗骨料

大部分留在 5 毫米試驗篩上且不含細顆粒的骨料。

2.3.5 細骨料

大部分通過 5 毫米試驗篩且不含粗顆粒的骨料。

2.3.6 微細粉

骨料中通過 75 微米試驗篩的部分。

2.3.7 級配

粒徑分佈用通過指定標準篩的質量百分數表示。

2.3.8 試驗篩

金屬篩網型的試驗篩須符合 ISO 3310-1:2000 的要求，金屬方孔板型的試驗篩須符合 ISO 3310-2:1999 的要求。

2.3.9 恆定乾質量

被檢部分或檢測試樣在經過 $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘乾至少 24 小時後，需有恆定的乾質量；或者在經過 $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘乾最少 16 小時後，每隔 1 小時測得的質量變化小於 0.1%。

3. 尺寸要求

3.1 一般要求

骨料尺寸特性的確定須考慮使用條件和骨料來源，並按照標準 CS3: 2013 中的試驗方法來執行。

3.2 骨料尺寸

所有的骨料都應按照如下符號描述其尺寸： d/D ，其中 d 表示骨料下方篩尺寸， D 表示上方篩尺寸。出現少量的較大尺寸顆粒留在上方篩，以及少量的較小尺寸顆粒通過下方篩仍可接受。換句話說，尺寸為 d/D 的骨料表示的是其大部分顆粒既通過 D 試驗篩同時留在 d 試驗篩的骨料。

在本部建議規格中，砂漿用骨料的尺寸限制在 $D \leq 5.0$ 毫米。換句話說，砂漿用骨料是上方篩不大於 5.0 毫米的細骨料。基於所用砂漿厚度和對砂漿表面的要求，骨料的上方篩可以選擇 5.0 毫米或 2.36 毫米。

3.3 級配

根據標準 CS3: 2013 第 10 章的規定，細骨料級配等級分為：C、M 和 F。骨料生產商和供應商需對骨料的級配等級進行聲明和備案。骨料級配既要符合總限值的規定，也要符合表 2.1 和 2.2 中所給出的關於 0/5.0 毫米和 0/2.36 毫米細骨料的限值要求。此外，骨料還要求在十次連續抽樣中不超過一次的抽樣結果超出聲明的級配等級。

表 2.1 - 0/5.0 毫米細骨料的級配等級

篩尺寸	過篩質量百分數 (%)			
	總限值	聲明級配限值		
		C	M	F
10 毫米	100	-	-	-
5 毫米	89-100	-	-	-
2.36 毫米	60-100	60-100	65-100	80-100
1.18 毫米	30-100	30-90	45-100	70-100
600 微米	15-100	15-54	25-80	55-100
300 微米	5-70	5-40	5-48	5-70
150 微米	0-20	-	-	-

表 2.2 - 0/2.36 毫米細骨料的級配等級

篩尺寸	過篩質量百分數 (%)			
	總限值	聲明級配限值		
		C	M	F
5 毫米	100	-	-	-
2.36 毫米	89-100	-	-	-
1.18 毫米	60-100	60-100	65-100	80-100
600 微米	30-100	30-90	45-100	70-100
300 微米	15-100	15-54	25-80	55-100
150 微米	5-70	5-40	5-48	5-70
75 微米	0-14	-	-	-

3.4 微細粉含量

根據標準 CS3: 2013 第 10 章的要求，通過 75 微米試驗篩的材料的質量不能超過表 2.3 中的規定。骨料生產商和供應商需對砂漿用骨料的微細粉含量等級作出聲明。

表 2.3 - 微細粉含量限值

微細粉含量等級	過 75 微米試驗篩篩 最大質量百分數 (%)
F5	5
F10	10
F14	> 10 和 ≤ 14
說明： 1. 對地坪砂漿、噴射砂漿、修補砂漿、灌漿、打底砂漿和抹灰砂漿，應使用 F5 細骨料。 2. 對砌築砂漿，應使用 F10 或 F14 細骨料。 3. 對於 F14 細骨料，根據標準 CS3: 2013 第 13 章的規定，亞甲藍試驗值需 ≤ 1.4。	

3.5 外來物含量

通過人工分揀確定的外來物最大含量不能超過表 2.4 中的規定。

表 2.4 - 細骨料中外來物限值

外來物種類	最大質量百分數 (%)
木材和其他密度比水低的材料	0.5
其他外來物（如：貝殼、金屬、塑料、泥塊、瀝青、焦油等）	1.0

4. 物理要求

4.1 一般要求

骨料物理特性的確定須考慮使用條件和骨料來源，並按照本標準中的試驗方法執行。

4.2 顆粒密度

根據標準 CS3: 2013 第 17 章的規定，骨料的烘乾顆粒密度不應低於 2,000 kg/m³。

4.3 耐久性

4.3.1 乾縮

根據標準 CS3: 2013 第 20 章的規定，骨料的乾縮不應超過 0.075%。

4.3.2 鹼硅反應

根據建築標準 CS1:2010（簡稱 CS1）第 22 章的規定，浸入高溫 NaOH 溶液的砂漿棒的線性膨脹須根據 CS1 中公式 22-1 來評估。而骨料的潛在鹼硅反應可通過標準 CS1 中表 10 獲得。

或者，根據建築標準 CS1 第 23 章的規定，進行混凝土棱柱試驗。而骨料的潛在鹼硅反應可根據標準 CS1 中表 13 獲得。

5. 化學要求

5.1 一般要求

骨料化學特性的確定須考慮使用條件和骨料來源，並按照標準 CS3: 2013 中的試驗方法執行。

5.2 氯化物

5.2.1 水溶性氯離子含量

天然骨料的水溶性氯離子含量須按照標準 CS3: 2013 中第 21 章 Cl. 21.3 來確定。

5.2.2 酸溶性氯離子含量

回收骨料的酸溶性氯離子含量須按照標準 CS3: 2013 中第 21 章 Cl. 21.4 來確定。

5.2.3 氯離子含量

天然骨料、回收骨料和混合骨料（天然骨料和回收骨料的混合物）的氯離子含量不能超過表 4.1 中的限值。

表 4.1 - 氯離子含量限值

砂漿用途和類別	由所佔骨料的質量百分比表示的 氯離子含量 (%)
嵌入金屬的砂漿	0.05
素砂漿（無嵌入金屬的砂漿）	0.15

所規定的氯離子限值是為了將嵌入金屬的腐蝕風險降至最低，同時避免砂漿暴露表面的風化。

如果砂漿是結構砂漿（即砂漿將作為混凝土結構的一部分），則砂漿中所有組成成分的總氯離子含量須要根據混凝土規格（如歐洲標準 EN 206-1 或本地規格 Practice for Structural Use of Concrete，以適用的為準）進行檢測並符合限值要求。

5.3 含硫物

5.3.1 酸溶性硫酸鹽含量

根據標準 CS3: 2013 中第 21 章 Cl. 21.5 的要求，天然骨料的酸溶性硫酸鹽含量不應超過 0.8%（質量百分數）。

根據標準 CS3: 2013 中第 21 章 Cl. 21.5 的要求，回收骨料的酸溶性硫酸鹽含量不應超過 1.0%（質量百分數）。

5.3.2 總含硫量

天然骨料、回收骨料和混合骨料（天然骨料和回收骨料的混合物）的總含硫量，根據標準 CS3: 2013 中第 21 章 Cl. 21.6 的規定，不能超過 1.0%（質量百分數）。

5.4 其他化學成分

骨料不應含有有機物。骨料生產商或供應商須證明所提供的骨料不含有機物，或證明所含有機物不會影響砂漿的固化和硬化。

如果所含有機物以腐殖質的形式存在，須根據標準 CS3: 2013 中第 21 章 Cl. 21.7 來評估。如果按照 Cl. 21.7 所測結果是陰性的，則可認為骨料不含有機物。否則，還須根據 CS3: 2013 中第 22 章的規定，評估有機物對砂漿固化時間和抗壓強度的影響。所含有機物的影響須滿足以下要求：

- (a) 砂漿試件的固化時間不能增加超過 120 分鐘；
- (b) 砂漿試件的 28 天抗壓強度不能降低超過 20%。

-附錄 D 結束 -

附錄 E

持份者對砂漿用骨料的建議規格的反饋

1. 背景

作為研究項目的一部分（目標 1），已經編寫完成一部名為“砂漿用骨料建議規格（第一版）”的香港建築標準初稿，並連同進度報告 No. 1，於 2013 年 9 月提交。

該本地標準初稿是基於歐洲、英國和中國現有標準編寫完成的。為了與香港建築標準 CS3: 2013 Aggregates for Concrete 相配合，該標準中採用了與標準 CS3: 2013 中相同標準篩尺寸。此外，只要可行，該標準都會遵循標準 CS3: 2013 中的分類、術語和試驗方法等。這樣，該標準和標準 CS3: 2013 中術語的定義會相同，而同樣的試驗方法也會採用於這兩部標準。

標準中，微細粉含量的允許限值應為多少或許是最大的問題。由於不同標準中微細粉含量的最大允許限值各有不同，該問題會較有爭議性。另一方面，微細粉中存在的有害物質（如粘土和污泥）以及砂漿生產中過高的用水量（由於微細粉的比表面積過大導致）也是須要留意的問題。因此，需要對骨料中的微細粉含量的限值作相應的規定。問題在於，微細粉含量的限值應規定為多少，且相關持份者是否能夠接受。

在 2013 年 9 月開完進度會議 No.1 後，建議規格的初稿已發往持份者（1）至（12）進行諮詢。隨後按建造業議會的要求，該初稿也發送到香港政府屋宇署（即持份者（13））、承建商授權簽署人協會（即持份者（14））進行諮詢。所有諮詢的持份者名單如下：

- （1）香港政府混凝土技術常務委員會
- （2）香港政府工務中央試驗所
- （3）香港建造商會
- （4）香港建築業承建商聯會
- （5）香港混凝土製造商協會
- （6）礦業學會香港分會
- （7）進口石材供應商協會
- （8）香港建造業分包商聯會
- （9）泥水商協會
- （10）香港泥水建築業職工會
- （11）香港工程師學會材料分部
- （12）香港混凝土學會
- （13）香港政府屋宇署
- （14）承建商授權簽署人協會

關國雄教授（AKHK）也安排了與持份者的會議來解釋草擬該建議規格背後的理念和原理，並聽取他們的反饋意見。所收到的反饋可見於以下章節。

基於收到的反饋，我們對建議規格的初稿進行了修訂，並命名為“砂漿用骨料建議規格：2015”。修改後的草稿再發給相關持份者進行第二輪的諮詢。對第二輪諮詢所收到的反饋也可見於以下章節。

2. 收到的反饋

2.1 香港政府混凝土技術常務委員會

建議規格的初稿於 2013 年 11 月 26 日發送到混凝土技術常務委員會以尋求反饋意見。在 2014 年 1 月 2 日，混凝土技術常務委員會主席 K.C. Lam 先生向 AKHK 回覆如下：

非常感謝您於 2013 年 11 月 26 日發來的“砂漿用骨料建議規格”草稿並尋求我們的反饋意見。我們已於 2013 年 12 月 19 日在混凝土技術常務委員會（SCCT）會議上對該規程進行了討論。SCCT 成員認為砂漿主要用於建築工程中的打底和抹灰工程，而不是土木工程，因此不在 SCCT 的授權範圍內。因此，SCCT 對該規程就混凝土技術方面沒有特別的反饋意見。如您還有其他問題，歡迎與 SCCT 的秘書 H.D. Wong 先生電話聯繫（2305 1289）。

修改後的建議規格草稿於 2015 年 3 月 22 日再次發送到混凝土技術常務委員會以尋求反饋意見。目前為止，我們還沒有收到他們的回覆。但可推測，他們對修改後的建議規格不會有特別的反饋意見和修改要求。

2.2 香港政府工務中央試驗所

由於工務中央試驗所的 Peter Leung 先生（高級工程師）和 H.D. Wong 先生（工程師）均為混凝土技術常務委員會的成員。他們曾口頭回覆，他們會在 SCCT 討論，並通過 SCCT 傳達他們的觀點和反饋。換句話說，除了 SCCT 的反饋意見之外，他們沒有其他意見了。

修改後的建議規格草稿於 2015 年 3 月 22 日再次發給 Greg Leung 先生（高級工程師）和 H.D. Wong 先生以尋求反饋意見。H.D. Wong 先生於 2015 年 4 月 21 日回覆稱，對於工務中央試驗所來說，對修改後的建議規格沒有更多的反饋意見了。

2.3 香港建造商會

於 2013 年 11 月 27 日，一封附有該建議規格草稿的郵件發送到香港建造商會（HKCA）秘書長，並希望能安排一個見面溝通的會議。2014 年 4 月 17 日，AKHK 和 HKCA（David Leong 先生和 Derek Zen 先生出席）召開了會議。AKHK 於會上向 HKCA 介紹了河砂短缺問題的背景以及建造業議會（CIC）所開展的關於河砂替代品的研究。

HKCA 首先說，他們也意識到了河砂的短缺問題。但他們也強調該建議規格應當具有可操作性，同時不能太複雜。此外，河砂替代品不能改變最終產品（如：砂漿和膠凝材料粘合劑）的物理和化學特性。HKCA 同時建議 AKHK 與其他行業協會（例如分包商協會）聯繫並尋求他們的反饋。AKHK 回應稱，在提出任何規定前都會進行砂漿試配，同時提出的任何規定都會確保滿足作為河砂替代品的細骨料的要求。HKCA 建議，對於非結構應用，在建議規格 3.3 節關於耐久性的要求可否取消。他們同時提出兩個問題供 AKHK 考慮。第一，使用機製砂取代河砂的成本問題；第二，工人使用機製砂的適應問題。AKHK 回答稱，雖然河砂的價格存在波動，但趨勢是向上的，並且指出，或許用機製砂取代河砂是我們唯一的出路。關於工人的適應問題，可以給工人提供多種培訓予以解決。HKCA 還指出，抹灰性能會受到混凝土表面質量和特點的影響而發生變化，例如，砂漿在鋼模板混凝土表面和在木模板混凝土表面的抹灰性能就會有不同。AKHK 回應稱，模板的影響的確是一個須要進一步研究的問題，但同時，河砂替代品的問題更需要首先解決。HKCA 希望 AKHK 在完成試配後，能向他們的成員提供一份簡報。

修改後的建議規格草稿於 2015 年 3 月 22 日再次發給 HKCA 的秘書長 Thomas Tse 先生以尋求反饋意見。目前為止，我們還沒有收到他們的回覆。但可推測，他們對修改後的建議規格不會有特別的反饋意見和修改要求。

2.4 香港建築業承建商聯會

於 2013 年 11 月 27 日，一封附有該建議規格草稿的郵件發送到香港建築業承建商聯會的 David Tse 先生和 K.K. Pun 先生，並希望能安排一個見面溝通的會議。但目前為止，尚未收到他們的回覆。隨後於 2014 年 5 月 11 日，另一封附有該建議規格草稿的郵件再次發送到香港建築業承建商聯會，並希望他們能否給予建議和反饋。但目前為止，尚未收到他們的回覆。經推測，他們對該初稿不會有特別的反饋意見和修改要求。

修改後的建議規格草稿於 2015 年 3 月 22 日再次發給他們以尋求反饋意見。目前為止，尚未收到他們的回覆。但可推測，他們對修改後的建議規格不會有特別的反饋意見和修改要求。

2.5 香港混凝土製造商協會

於 2013 年 11 月 27 日，一封附有該建議規格草稿的郵件發送到香港混凝土製造商協會（HKCPA）的主席 Frank Lo 先生，並希望能安排一個正式會議。之後，AKHK 在不同場合見過 HKCPA 的幾位成員。但目前為止，沒有收到 HKCPA 正式會議的安排，也沒有收到 HKCPA 對該建議規格草稿的反饋意見。不過，從 HKCPA 某些成員的非正式回覆中獲知，

香港所有的混凝土供應商都已經採用碎石粉作為河砂替代品來生產混凝土，因此在獲得合適的河砂替代品方面不存在什麼困難。

修改後的建議規格草稿於 2015 年 3 月 22 日再次發給他們以尋求反饋意見。目前為止，尚未收到他們的回覆。但可推測，他們對修改後的建議規格不會有特別的反饋意見和修改要求。

2.6 礦業學會香港分會

於 2013 年 11 月 27 日，一封附有該建議規格草稿的郵件發送到礦業學會香港分會 (IOQ-HK)。隨後在 2014 年 3 月 11 日，AKHK 與 IOQ-HK 召開了會議。IOQ-HK 於會上首先表達了對微細粉含量的關注。他們指出，0/2.36 毫米細骨料的微細粉含量可能會比 0/5.0 毫米細骨料的要高，因為在計算微細粉含量（即微細粉佔骨料百分數）時，0/2.36 毫米細骨料的分子要小於 0/5.0 毫米細骨料的分子。由此，對 0/2.36 毫米細骨料微細粉含量的控制要比 0/5.0 毫米細骨料的要難。AKHK 解釋稱，對於規程，給 0/2.36 毫米細骨料和 0/5.0 毫米細骨料規定不同的微細粉含量限值較為困難。IOQ-HK 還指出，其實 F3 細骨料（微細粉含量 $\leq 3\%$ ）和 F5 細骨料（微細粉含量 $\leq 5\%$ ）的區別並不明顯，工人在使用時甚至不會感到兩者的不同。基於這個原因，他們建議可以把 F3 細骨料取消，而只允許 F5 細骨料用於抹灰和地板砂漿。AKHK 回應稱，在砂漿抹灰試驗完成後，他會考慮這一建議。如果工人在使用時真的感覺不到兩者的不同，會考慮取消等級 F3。

AKHK 也解釋稱，對於砂漿工程，由於更推薦使用 0/2.36 毫米細骨料，尤其是抹灰和地板砂漿，因此骨料製造商有須要考慮生產兩種細骨料：一種是用於砂漿工程的 0/2.36 毫米細骨料，一種是用於混凝土生產的 0/5.0 毫米細骨料。IOQ-HK 稱，這取決於市場需求，不過有些骨料製造商更傾向於只生產一種細骨料，因為這樣可以減少存儲和處置另一種細骨料的麻煩。

修改後的建議規格草稿於 2015 年 3 月 22 日再次發給他們以尋求反饋意見。目前為止，尚未收到他們的回覆。但可推測，他們對修改後的建議規格不會有特別的反饋意見和修改要求。

2.7 進口石材供應商協會

於 2013 年 11 月 27 日，一封附有該建議規格草稿的郵件發送到進口石材供應商協會 (IASA)。隨後在 2013 年 12 月 5 日，AKHK 與 IASA 召開了會議。AKHK 於會上向 HKCA 介紹了河砂短缺問題的背景以及建造業議會 (CIC) 所開展的關於河砂替代品的研究。IASA 稱，他們也注意到了這些問題，並高興見到 CIC 採取了行動並開展了相關研究，這對建造行業會有很大益處。AKHK 也向 IASA 簡述了該建議規格草稿的內容。

IASA 指出，大部分的砂漿用河砂都處於建議規格表 2.1 的等級 F 中，即骨料最大粒徑為 5.0 毫米，但有 80% 通過 2.36 毫米篩。因此，可能沒有必要再分出一個最大粒徑為 2.36 毫米的細骨料類型來。取而代之的是，只規定一種最大粒徑為 5.0 毫米的細骨料，並用等級 F 來取代所有最大粒徑為 2.36 毫米的細骨料。一部舊版屋宇署規程也交到 AKHK 手中。在這部屋宇署規程中，規定了兩類細骨料，一類是最大粒徑 5.0 毫米的細骨料，一類是最大粒徑 2.36 毫米的細骨料。由此可見，我們已有了將細骨料分成最大粒徑 5.0 毫米細骨料和最大粒徑 2.36 毫米細骨料以滿足不同需要的先例和實踐。AKHK 回應稱，他能理解骨料供應商不希望規定太多類型的細骨料，因為這需要額外的存儲空間。IASA 還指出，在現實中，由於通用型細骨料可以適當降低價格，所以有最多用家選擇購買，而非通用型細骨料只會在收到特別訂單時才會生產和供應。

關於微細粉含量，須要指出的是在舊版屋宇署規格中，砂（砂漿工程細骨料）中允許的微細粉含量為 10%（重量百分數）。因此，微細粉含量為 10% 的細骨料曾在香港使用過。IASA 的一位成員表達了他對微細粉含量控制的關切：在大規模生產中，要控制砂漿用細骨料微細粉含量並不容易，希望在該建議規格中對微細粉含量限值的規定不要過於嚴格。

IASA 也指出，大部分的砂漿都是非結構應用。因此他們建議，既然是非結構應用，可否將標準 3.3.2 節中對鹼硅反應的要求取消。AKHK 回應稱，鹼硅反應的要求對混凝土和砂漿是同樣適用的，這個要求是否能被取消取決於混凝土或砂漿是用於結構的還是非用於結構的。AKHK 接著說，他會就這個問題與其他持份者作進一步的諮詢，並會考慮是否在該建議規格的最終版中作出調整。

修改後的建議規格草稿於 2015 年 3 月 22 日再次發給他們以尋求反饋意見。在 2015 年 4 月 17 日收到他們的回覆。他們在回覆中說，他們對修改後的建議規格沒有更多的反饋意見，並感謝 AKHK 所做的工作。

2.8 香港建造業分包商聯會、泥水商協會、香港泥水建築業職工會

於 2013 年 11 月 27 日，一封附有該建議規格草稿的郵件發送到香港建造業分包商聯會、泥水商協會、香港泥水建築業職工會的 Eric Tse 先生、P. Wong 先生和 P.T. Yeung 先生，並希望能安排一次會面。隨後在 2014 年 5 月 11 日，AKHK 再發了一封附有該建議規格草稿的郵件發送到上述組織。之後，在 2015 年 3 月 22 日，修改後的建議規格草稿也發給他們以尋求反饋意見。

最終，一個由 AKHK，香港建造業分包商聯會、泥水商協會、香港泥水建築業職工會的 Eric Tse 先生，P. Wong 先生和 P.T. Yeung 先生，以及港九油漆業總工會的 P.S. Chan 先生出席於 2015 年 4 月 15 日在香港建造業

總工會召開的會議。AKHK 於會上介紹了建造業議會和 AKHK 本人正在開展的混凝土和水泥砂漿生產用河砂替代品研究（第二階段）。AKHK 也向他們介紹了修改後的建議規格，並向他們展示了機製砂和河砂樣品。此外，AKHK 也告知他們，已完成了兩次由熟手工人操作的現場試驗，並展示了拉拔試驗結果。

作為回應，他們首先告知 AKHK，目前的河砂價格已不再是每噸 HK\$150，而是已經提高至每噸 HK\$180。他們非常感謝建造業議會對抹灰和砌磚行業所做的工作。在查看過機製砂樣品後，他們覺得機製砂顆粒更有棱角，但這並不存在太大問題，因為有棱角的顆粒形狀實際上可以提高骨料間的咬合作用。此外，在聽取了實驗室試驗和現場試驗結果後，他們認為將機製砂作為河砂替代品是可以接受的。他們也指出，在實際操作中，他們通常會先在混凝土牆面上抹底層稀漿。但在現場試驗中，並沒有抹底層稀漿，這是抹灰試樣的拉拔強度離散較大的原因。如果抹上底層稀漿，拉拔強度應該會更好。

最後，他們很高興看到市面上很快便會有符合公認標準的機製砂可用。不過，他們也補充，一些回收廢舊材料也是可以作為河砂替代品使用的。雖然一些公司表達了有意用回收廢舊材料生產機製砂的興趣，但找不到合適的場地是最大的問題。他們中的一位建議政府是否能夠提供一些廉價的土地來支持廢物回收利用行業的發展。

2.9 香港工程師學會材料分部

於 2013 年 11 月 27 日，一封附有該建議規格草稿的郵件發送到香港工程師學會（HKIE）材料分部。隨後 AKHK 被邀請參加 HKIE 材料分部於 2013 年 12 月 10 日召開的一個委員會會議。AKHK 於會上向 HKIE 材料分部講解了河砂短缺問題的背景，以及建造業議會正在開展關於河砂替代品的研究。AKHK 也向 HKIE 材料分部介紹了該建議規格草稿的內容。討論過後，HKIE 材料分部委員會成員認為他們需要一些時間來消化這部建議規格草稿，如果他們對其有任何反饋意見會告知 AKHK。

修改後的建議規格草稿於 2015 年 3 月 24 日再次發給他們以尋求反饋意見。AKHK 隨後被邀請參加 HKIE 材料分部於 2014 年 4 月 14 日召開的一個委員會會議。AKHK 於會上向 HKIE 材料分部介紹了混凝土和水泥砂漿生產用河砂替代品研究（第二階段）的進度。在簡介完實驗室試驗和現場試驗結果後，AKHK 對修改後的建議規格草稿做了說明，解釋了規格中要求背後的基本原理，以及向他們展示了機製砂和河砂的樣品。與會的委員會成員對建造業議會在為解決河砂短缺問題和建立本地砂漿用骨料標準方面所做的工作表達了由衷感謝。關於該建議規格，他們沒有特別的反饋意見。他們希望建造業議會能與機製砂供應商和用家繼續保持密切的溝通，並定期對建議規格作檢討，以確保規格的更新。

2.10 香港混凝土學會

於 2013 年 11 月 27 日，一封附有該建議規格草稿的郵件發送到香港混凝土學會（HKCI），並希望能安排一次會面。目前為止，只收到一封關於建議規格中英文寫作修改意見的郵件。在諮詢期間，AKHK 是 HKCI 的主席。他曾向 HKCI 董事會成員諮詢，但大部分成員稱他們對該建議規格草稿沒有特別意見。

修改後的建議規格草稿於 2015 年 3 月 24 日再次發給他們以尋求反饋意見。目前為止，沒有收到他們的反饋意見。在第二輪諮詢期間，AKHK 是 HKCI 董事會成員。他曾向 HKCI 其他董事會成員諮詢，但大部分成員稱他們對該建議規格草稿沒有特別的意見。

2.11 香港政府屋宇署

於 2013 年 11 月 26 日，一封附有該建議規格草稿的郵件發送到屋宇署，並尋求他們的反饋意見。在 2014 年 2 月 6 日，屋宇署助理署長（企業服務）S.M. Leung 先生對 AKHK 回覆如下：

感謝您給予我們的規格初稿。正如草稿前言中所述，該建議規格能夠成為制訂本地砂漿用骨料正式標準很好的基礎。我們也同樣理解，該初稿是仍須進一步修改的初始版本。因此，如果您能允許屋宇署為該規格的順利完成給予建議和反饋的話，我將非常高興。就該項事宜，您可以與我們的 YL Chong 先生聯繫（高級結構工程師/技術服務 - 電話：31623021），他的電郵地址：ylchong@bd.gov.hk。歡迎您今後直接與他聯繫。

修改後的建議規格草稿於 2015 年 3 月 24 日再次發送到屋宇署以尋求反饋意見。他們於 2015 年 4 月 23 日回覆，並有如下反饋意見：

我已將您的郵件就標題所述事宜抄送給我們的屋宇署助理署長（企業服務），並且獲知您已根據行業持份者的兩個主要反饋意見修改了砂漿用骨料建議規格草稿（簡稱：規格草稿）：（1）取消了對非結構應用的耐久性要求；（2）取消了等級 F3 細骨料，並規定只允許在抹灰和地板砂漿中使用等級 F5 細骨料。

我們對修改（2）沒有意見。但對修改（1），我們有如下反饋意見：

在規格草稿 3.3 節關於耐久性的要求中，只對結構應用（即：在應用中，砂漿成為混凝土結構的一部分來承載荷載）的骨料有耐久性的要求。這樣的陳述非常含糊，有須要明確“結構應用”的定義。此外，您可能須要闡明為什麼對結構應用的骨料須要遵守耐久性的要求，而非結構應用的骨料則不需要。耐久性一直都是決定一種材料是否適合建築工程的重要因素，不管材料是用於結構性的，還是非結構性的。取消耐久性要求意味著骨料無須遵守乾縮和鹼硅反應的要求。而鹼硅反應（ASR）所產生的膠體會吸水並發生膨脹，從而導致混凝土的開裂和破壞。ASR 對混凝土的影響可能會是毀滅性的。因此，PNAP APP-74 限制

混凝土中的活性鹼，以每立方米混凝土所含的當量氧化鈉計算，不得超過 3.0 kg。

為了回應屋宇署的反饋意見，我們對修改後的建議規格草稿再做了一次修改，並對耐久性要求規定如下：

對於任何砂漿，只要其失效可能危及建築物安全（如：砂漿作為結構的一部分）或公眾安全（如：砂漿的失效可能導致打底層或瓷磚的脫落），砂漿所用的骨料必須遵守耐久性要求。

2.12 承建商授權簽署人協會

於 2014 年 5 月 11 日，一封附有該建議規格草稿的郵件發送到承建商授權簽署人協會的 K.Y. Lee 先生，並希望能安排一次會面。但目前為止，他們沒有回應。

修改後的建議規格草稿於 2015 年 3 月 24 日再次發給他們以尋求反饋意見。目前為止，尚未收到他們的回覆。但可推測，他們對修改後的建議規格不會有特別的反饋意見和修改要求。

3. 反饋意見小結

整體來說，所諮詢的持份者對該建議規格沒有強烈的反對意見。事實上，他們對建造業議會為解決河砂短缺問題而開展的對河砂替代品的探索和努力表示感謝。

對所收到的反饋意見小結如下：

- (1) 建議規格應具有可操作性，且不能太複雜（從 HKCA 的反饋意見）。
- (2) 對於非結構應用，在建議規格 3.3 節關於耐久性的要求可能並不適合（從 HKCA 的反饋意見）。
- (3) 使用機製砂取代河砂的成本問題：機製砂的成本是否高於河砂？（從 HKCA 的反饋意見）。
- (4) 工人使用機製砂的適應問題：需給予工人適當的培訓（從 HKCA 的反饋意見）。
- (5) 0/2.36 毫米細骨料的微細粉含量可能會比 0/5.0 毫米細骨料的要高，因此對 0/2.36 毫米細骨料微細粉含量的控制要比 0/5.0 毫米細骨料的要難（從 IOQ-HK 的反饋意見）。
- (6) F3 細骨料（微細粉含量≤ 3%）和 F5 細骨料（微細粉含量≤ 5%）的區別並不明顯，基於這個原因，建議可以把 F3 細骨料取消，而只允許 F5 細骨料用於抹灰和地板砂漿（從 IOQ-HK 的反饋意見）。
- (7) 只規定一種最大粒徑為 5.0 毫米的細骨料，並用等級 F（至少 80%

的骨料通過 2.36 毫米篩) 來取代所有最大粒徑為 2.36 毫米的細骨料 (從 IOQ-HK 的反饋意見)。

- (8) 在舊版屋宇署規格中，砂 (砂漿工程細骨料) 中允許的微細粉含量為 10% (重量百分數)。因此，微細粉含量為 10% 的細骨料曾在香港使用過 (從 IASA 的反饋意見)。
- (9) 在大規模生產中，要控制砂漿用細骨料微細粉含量並不容易，希望在該建議規格中對微細粉含量限值的規定不要過於嚴格 (從 IASA 的反饋意見)。
- (10) 對於非結構應用，可否將標準 3.3.2 節中對鹼硅反應的要求取消 (從 IASA 的反饋意見)。
- (11) 耐久性的要求不應只針對結構應用的砂漿，還應包括那些會因其失效會對安全構成威脅的砂漿 (從屋宇署的反饋意見)。

在對建議規格進行修改時，上述反饋意見將被認真考慮。

- 附錄 E 結束 -