



輕質骨材對混凝土壓力影響之研究

計畫編號：NSC 88-2211-E-019-007

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：楊仲家

國立台灣海洋大學材料工程研究所

一、摘要

中文摘要

本研究利用理論與試驗方法預測輕質骨材強度。試驗中製作各種不同骨材含量比例（粗骨材體積含量/整體骨材體積含量）之圓柱試體進行試驗。應用微觀力學之方法，配合實驗所得之混凝土抗壓強度、各組成物之材料性質、及各種不同骨材體積含量可以求得骨材強度。

關鍵詞：抗壓強度、輕質骨材、輕質混凝土、微觀力學、體積含量

Abstract

This study presents a method for estimating the strength of lightweight aggregate. Cylindrical specimens with various aggregate volume ratios (volume of coarse aggregate/total aggregate volume) were cast and tested. Micromechanics method was applied by considering a perfect bond between mortar and aggregate. The approximate aggregate strengths determined from the concrete strength, component properties, and the volume ratio of aggregate are between 15 and 30 MPa. Both matrix strength are much higher than lightweight aggregate strength.

Keywords: Compressive strength, Lightweight aggregate, Lightweight concrete, Micromechanics, Volume ratio

二、緣由與目的

對於一般強度混凝土，骨材強度並不是影響混凝土強度的主要因素，原因在於骨材本身強度遠大於水泥漿體和骨材與漿體之間的界面強度^[1]。

然而輕質骨材的強度卻通常低於另外兩者。因此輕質骨材混凝土的破壞往往是由骨材來控制。

天然骨材的強度可以經由岩盤的試驗獲得；然而人造的輕質骨材卻不易由實驗的方式獲得。只能藉由間接的方式評估，如 ASTM C131 的洛杉磯磨損試驗、BS 812 的骨材破裂試驗 (ACV)、或微硬度試驗。Nilsen^[2] 等人建議利用反覆載重下特有的能量分佈可以評估輕質骨材之品質。Chang 和 Su^[3] 亦以粒子力學方式來計算骨材的單顆粒強度。

各種研究均指出骨材特性是影響輕質骨材混凝土和高強度混凝土的主要因素，由組成物中最弱的部分主控混凝土強度^[4-7]。

無窮域中置入適當固有應變 (eigenstrain) 的置入物 (inclusion)，可以利用其固有應力來模擬非均質材料對應力場之干擾。Mori 與 Tanaka^[9] 等將置入物的平均概念及等效置入物理論 (Equivalent Inclusion Method) 模擬複合材料之力學行為。並以 Eshelby^[10] 的理論考量置入物形狀因素。Yang 和 Huang^[**] 提出一理論模式，預測水泥質複合材料之抗壓強度。

本研究使用三種輕質骨材拌製混凝土。經由試驗得混凝土的抗壓強度。利用微觀力學理論與混凝土強度值求輕質骨材強度。由於在輕質骨材混凝土中，最弱的部分為輕質骨材部分，且為控制混凝土強度的主要部分。因此當輕質骨材混凝土達到極限強度，骨材內的平均應力即為骨材之抗壓強度。

三、試驗計畫

本試驗以不同水泥與飛灰比例經冷結所製成之人造骨材與不同水泥砂漿製成輕質骨材混凝土。

粗骨材 (置入物)

本研究使用之人造骨材分成 A、B、C 三種。骨材由水泥與飛灰經冷結製成球狀，粒徑在 0.5 至 1.0 公分之間。製程中以水拌合，讓水泥與飛灰在濕潤狀態下冷結成球型。A、B、C 三種骨材其水泥與飛灰兩者之間之成分比例為 0.1、0.15 及 0.2 (重量比)。其物理特性如表 1 所示。

表 1 輕質骨材之物理特性

骨材種類	單位重 (SSD: g/cm ³)	單位重 (OD: g/cm ³)	吸水率 (30 min: %)
Type A	1.62	1.22	33.39
Type B	1.66	1.28	29.97
Type C	1.73	1.43	21.05

水泥砂漿 (母體)

使用波特蘭一型水泥及天然砂製作水泥砂漿試體 (50×50×50mm)。其配比如表 2 所示。所有配比之水灰比 (w/c) 均為 0.3。強塑劑之添加在於控制各配比之流度相同。為研究不同細骨材體積含量對水泥砂漿彈性模數之影響，製作六種不同細骨材含量 V_s (細骨材體積/砂漿體積, a/t=0.0、0.1、0.2、0.3、0.4、及 0.5) 之水泥砂漿。為量測水泥砂漿之彈性模數，於試體相對應兩側貼上應變計 (strain gage)，而其量測標稱距離 (gage length) 為 10mm，以量測試體受壓力時之應變。並依據 ASTM C87 進行抗壓試驗。連續紀錄並繪製應力/應變關係曲線，計算其彈性模數。

表 2 水泥砂漿配比

配比編號	水 kg/m ³	水泥 kg/m ³	砂 kg/m ³	強塑劑 kg/m ³	細骨材體積 含量比例 %
M0	449	1604	0	32	0
M1	404	1441	262	29	10
M2	358	1278	524	26	20
M3	312	1115	785	22	30
M4	267	953	1047	19	40
M5	221	790	1309	16	50

混凝土 (複合材料)

輕質骨材混凝土試體以一型水

泥、強塑劑、水、天然砂、及輕質粗骨材所製成，其水灰比為 0.3。而輕質粗骨材以四種體積含量 (粗骨材體積/混凝土整體體積, $C_g/T_a=0.3、0.4、0.5、及 0.6$) 拌製混凝土。由於輕質骨材的吸水量會隨著時間的變化而有所不同，為避免對水灰比會產生影響，所以拌合前須將輕質骨材浸置於水中 30 分鐘，並將骨材以毛巾處理成面乾內飽和狀態。其配比如表 3 所示。配比編號中第一個英文字母代表的是骨材的形式 (A、B、及 C)，第二個數字代表的則是粗骨材的體積含量比例。每個砂漿與混凝土試體 ($\phi 100 \times 200mm$) 於實驗室拌製與養護 28 天後，依據 ASTM C469-81 及 ASTM C39-81 進行彈性模數與抗壓強度試驗。

表 3 輕質骨材混凝土配比

配比編號	水 kg/m ³	水泥 kg/m ³	細骨材 kg/m ³	強塑劑 kg/m ³	粗骨材 kg/m ³	粗骨材 體積比
A3	178	626	1096	9	292	0.18
B3					299	
C3					311	
A4	178	626	939	9	389	0.24
B4					399	
C4					415	
A5	178	626	783	9	486	0.30
B5					498	
C5					519	
A6	178	626	626	9	583	0.36
B6					598	
C6					623	

理論基礎

本研究應用微觀力學計算外應力 σ^0 和複合材料各組成物應力的關係。因為輕質骨材通常是輕質骨材混凝土中強度最弱的部分。骨材的破壞操控著整個混凝土破壞之機制。本研究中假設輕質骨材混凝土為骨材與水泥漿體完整接合之複合材料。骨材之平均應力 $\sigma^0 + \langle \sigma \rangle_{\Omega}$ ，水泥漿體 $\sigma^0 + \langle \sigma \rangle_M$ 。

由於輕質骨材混凝土複合材料之強度主要控制在輕質骨材，當其平均應力達骨材強度，便造成混凝土的破壞。

在一勁度張量 (stiffness tensor) 為 C 的母材中，隨意放置 N 個相同形

狀且相同方向置入物($\Omega = \sum_{i=1}^N \Omega_i$), 其彈性模數張量為 \underline{C}^* , 置入體積百分比(Volume Fraction)為 V_f 。 $\underline{\sigma}^0$ 為外應力。而為了模擬非均質材料對應力場之干擾, 而引入 $\underline{\varepsilon}^*$, 即為固有應變(如圖 1 所示)。利用等效置入物理論及 Mori-Tanaka 定理^[9], 可以將非均質材料以下面各式表示:

$$\underline{\sigma}^0 + \langle \underline{\sigma} \rangle_{\Omega} = \underline{C} \left\{ \underline{C}^{-1} \left(\underline{\sigma}^0 + \langle \underline{\sigma} \rangle_M \right) + \langle \underline{\Delta}_Y \rangle - \langle \underline{\varepsilon}^* \rangle \right\} \quad (1)$$

$$\underline{\sigma}^0 + \langle \underline{\sigma} \rangle_{\Omega} = \underline{C} \left\{ \underline{C}^{-1} \left(\underline{\sigma}^0 + \langle \underline{\sigma} \rangle_M \right) + \langle \underline{\Delta}_Y \rangle \right\} \quad (2)$$

式中 $\langle \underline{\Delta}_Y \rangle$ 為固有應變 $\underline{\varepsilon}^*$ 在單一置入物非均質材料中所造成的平均分佈應變。

由於平均干擾應力為零^[8], 故可由式 1, 得知置入物固有應變的平均值 $\underline{\varepsilon}^*$, 如下式所述:

$$\langle \underline{\varepsilon}^* \rangle = \alpha^{-1} (\underline{C} - \underline{C}^*) \underline{C}^{-1} \underline{\sigma}^0 \quad (3)$$

$\alpha = (1 - V_f) (\underline{C}^* - \underline{C}) \underline{S} - V_f (\underline{C}^* - \underline{C}) + \underline{C}$, 因此整體非均質材料之平均應力可改寫成下式:

$$\underline{\sigma}^0 + \langle \underline{\sigma} \rangle_{\Omega} = \left[(1 - V_f) \underline{C} (\underline{S} - \underline{I}) \alpha^{-1} (\underline{C}^* - \underline{C}) \underline{C}^{-1} + \underline{I} \right] \underline{\sigma}^0 \quad (4)$$

式中 \underline{S} 為 Eshelby 張量, 代表 $\underline{\varepsilon}^*$ 與 $\langle \underline{\Delta}_Y \rangle$ 間的關係。其為一與置入物及母體波生比有關之函式, 如附錄所示。

在輕質骨材混凝土中, 混凝土的強度主要受粗骨材所控制。故當外應力 σ^0 達到輕質骨材混凝土強度 f_c 時,

輕質骨材本身之強度可由下式計算得知:

$$f_a = \left[(1 - V_f) \underline{C} (\underline{S} - \underline{I}) \alpha^{-1} (\underline{C}^* - \underline{C}) \underline{C}^{-1} + \underline{I} \right] f_c \quad (5)$$

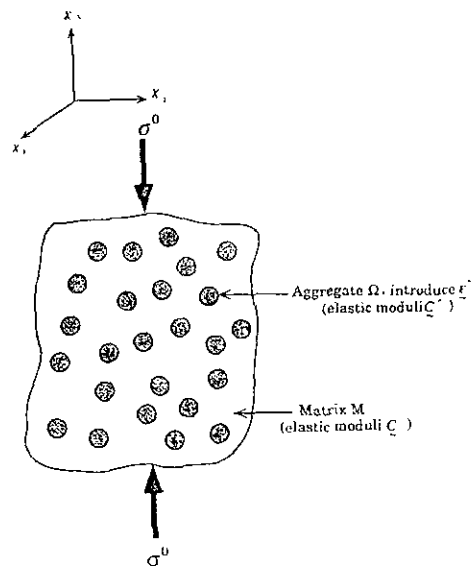


圖 1 單置入物複合材料承受單軸應力

四、結果與討論

本研究中, 混凝土被視為骨材加入水泥砂漿母體中的一種複合材料。由圖 2 可以發現輕質混凝土的破壞面穿過輕質骨材, 由此可知輕質骨材為輕質骨材混凝土中最弱的部分, 故輕質骨材混凝土的極限強度便主要操控在骨材強度上。而骨材強度可以藉由試驗不同骨材含量混凝土之彈性模數與抗壓強度所得資料, 利用式(5)求得。

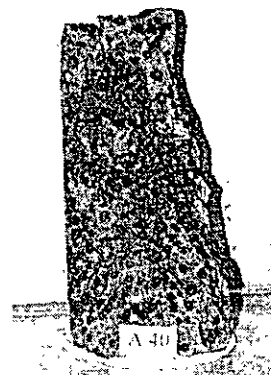


圖 2 輕質骨材混凝土破壞情形
水泥砂漿母體之彈性模數

本研究就六種不同砂體積含量(細骨材體積/水泥砂漿整體體積=0.0、0.1、0.2、0.3、0.4、及 0.5)之水泥砂漿試體進行彈性模數試驗。並將各組水泥砂漿配比與細骨材體積含量之關係繪製成關係曲線，如圖 3 所示。由圖中可以得知水泥砂漿之彈性模數隨著骨材含量增加而增加，其關係曲線之迴歸方程式如下式所述：

$$E_m = -19.7V_s^3 + 35.9V_s^2 + 11V_s + 20.4 \quad (6)$$

式中 E_m 的單位為 GPa，而不同細骨材含量水泥砂漿之彈性模數試驗值與計算值如表 4 所示。

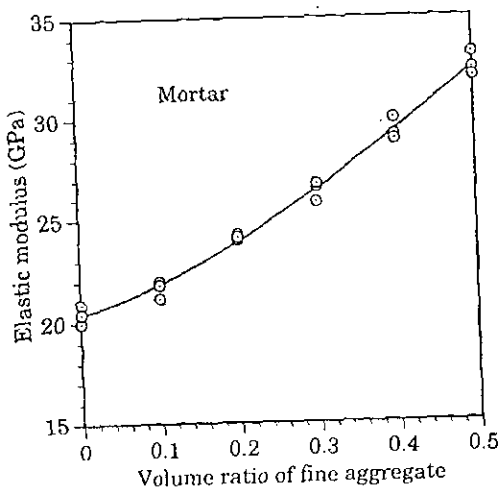


圖 3 不同細骨材體積含量與輕質骨材彈性模數之關係

置入物彈性模數

由 Mori-Tanka 置入物理論，粗骨材彈性模數可以藉由水泥砂漿母體彈性模數試驗值下式計算。

$$c = \left\{ c' + v_r \left[(1 - v_r)(c' - c) s - v_r (c - c') \right] + c' \right\} / (c - c') c' \quad (7)$$

式中 C 為混凝土組成物的彈性模

數張量。水泥砂漿母體和組成物之波生比均假設為 0.2。而經式(7)計算後，三種型式輕質骨材的彈性模數如表 4 所述在 6.0 至 10.5MPa 之間。而不同骨材體積含量的水泥砂漿及混凝土其彈性模數均為輕質骨材彈性模數的 2-5 倍。

置入物的強度

利用公式 5，可以計算出不同的 E_m/E_a 值 ($E_m/E_a > 2$)，並繪製在不同 E_m/E_a 值下 f_a/f_c' (輕質骨材強度/混凝土強度) 與骨材置入量之間的關係圖，如圖 4 所示。由其關係曲線中可以發顯在相同骨材強度和 E_m/E_a 值之下，混凝土強度隨著骨材置入量體積的減少而增加。若骨材置入體積量均相同時， f_a/f_c' 值會隨著 E_m/E_a 值的減少而增加。由此可以得知在相同的母體下，骨材體積量與其彈性模數為影響混凝土強度的主要因素。另一方面，在相同骨材強度下， E_m/E_a 值的增加，混凝土強度會隨著增加。且當混凝土強度得知時，便可以利用式(5)求得骨材之強度。本研究中混凝土的強度與彈性模數試驗值如表四所示。而不同細骨材置入量與砂漿強度之關係如圖 5 所示。由圖可以得知本研究所拌製砂漿之強度在 88 到 115MPa 之間。

將波生比值假設為 0.2，可以利用各組成物本身的彈性模數與混凝土的抗壓強度計算出各種粗骨材的抗壓強度。而繪製骨材於不同強度時，粗骨材體積含量與混凝土抗壓強度之關係圖，如圖 6 至圖 8 所示。並將本研究所所有試驗值標示於圖上。如 A 型骨材，假設其骨材強度為 15 至 17MPa，

利用式(5)計算混凝土強度，並將其關係曲線繪製如圖 6 所示，與圖上所標示的試驗值比較，試驗值在 15 至 17MPa 的曲線內。B 型與 C 型的骨材分別可以落在 20 至 22MPa 及 28 至 30MPa 之曲線內。由圖顯示輕質骨材混凝土隨著骨材體積含量的增加而減少。亦可了解混凝土強度小於母體本身的強度，但是大於骨材的強度。因此骨材強度的增加與粗骨材體積含量的減少均可改善混凝土強度。

表 4 混凝土、水泥砂漿、及骨材試驗結果

配比編號	彈性模數 (GPa)			混凝土抗壓強度 試驗值*** (MPa)
	水泥砂漿 試驗值	混凝土 試驗值*	骨材計算值**	
A3	29.33	23.02	5.80	41.37
A4	28.13	20.60	6.11	37.31
A5	26.44	18.21	6.32	34.62
A6	24.87	15.80	5.85	31.51
			Average=6.01	
B3	29.33	23.79	7.82	44.17
B4	28.13	21.53	8.08	41.40
B5	26.44	19.01	7.79	38.25
B6	24.87	17.22	8.19	35.73
			Average=7.97	
C3	29.33	24.66	10.30	49.89
C4	28.13	22.58	10.52	47.05
C5	26.44	20.32	10.37	45.16
C6	24.87	18.65	10.73	41.67
			Average=10.48	

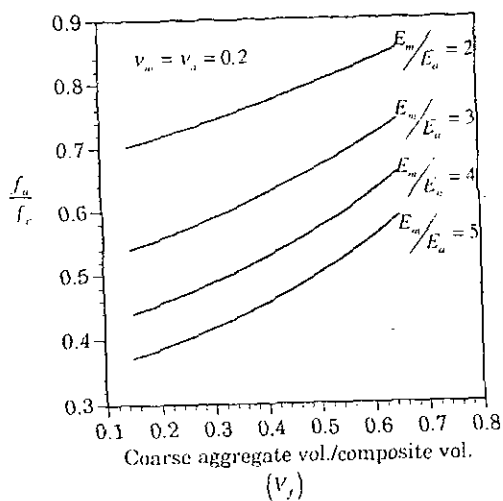


圖 4 不同 E_m/E_a 值下 f_a/f_c (輕質骨

材強度/混凝土強度) 與骨材置入量之間的關係圖

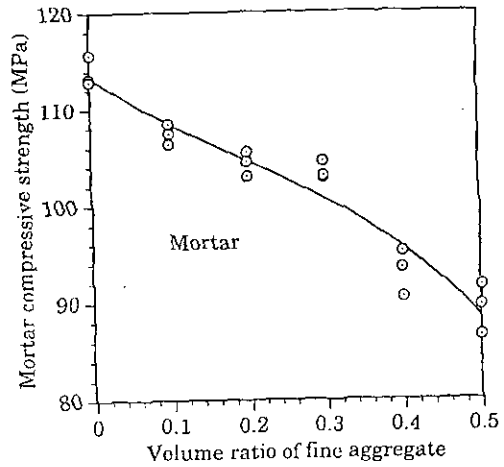


圖 5 不同細骨材置入量與砂漿強度之關係

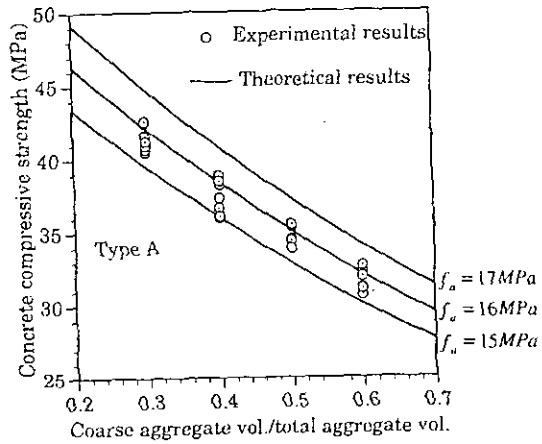


圖 6 不同粗骨材強度時粗骨材體積含量與混凝土抗壓強度之關係圖 (A 型骨材)

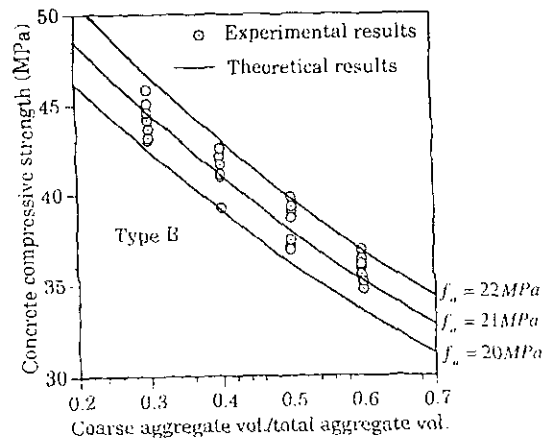


圖 7 不同粗骨材強度時粗骨材體積含量與混凝土抗壓強度之關係圖 (B 型骨材)

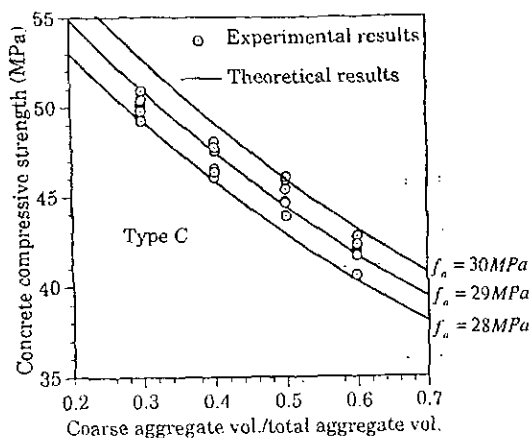


圖 8 不同粗骨材強度時粗骨材體積含量與混凝土抗壓強度之關係圖 (C 型骨材)

結論

本計畫利用微觀力學與試驗方法加以配合計算輕質骨材抗壓強度，並預測混凝土在不同骨材體積含量下強度的變化。由理論值與試驗結果比對，可以得到 A 型輕質骨材的強度約在 15 至 17MPa 之間；B 型輕質骨材的強度約在 20 至 22MPa；C 型輕質骨材的強度約在 28 至 30MPa 間。而由計畫的進行可以得知輕質骨材對混凝土強度的影響主要在於 E_m/E_a 比值、骨材置入體積量、及骨材強度。

附錄

Eshelby 張量：

$$S_{1111} = S_{2222} = S_{3333} = \frac{7-5\nu}{15(1-\nu)}$$

$$S_{1122} = S_{2233} = S_{3311} = S_{1133} = S_{2211} = S_{3322} = \frac{5\nu-1}{15(1-\nu)}$$

$$S_{1212} = S_{2323} = S_{3131} = \frac{4-5\nu}{15(1-\nu)}$$

參考文獻

1. Mehta P. K.; Monterio P. J. M. *Concrete: Structure, Properties, and Materials*; Prentice Hall: New Jersey, 1993.
2. Nilsen A. U.; Monteiro P. J. M.; GjØrv O. E. *Cem. Conr. Res.* 1994, 24, 1423-1427.

3. Chang T. P.; Su N. K. *J. Mater. ACI* 1996, 93, 3-9.
4. Swamy R. N.; Lambert G. H. *J. Int. Cem. Com. Light Concr.* 1983, 5, 263-275.
5. Mayfeild B.; Louati M. *Mag. Conr. Res.* 1990, 42, 29-36.
6. Aitcin P. C.; Mehta P. K. *J. Mater. ACI* 1990, 87, 103-107.
7. Zhou F. P.; Lydon F. D.; Barr B. I. G. *Cem. Conr. Res.* 1995, 25, 177-186.
8. Mura T. *Micromechanics of Defects in Soilds*; Martinus Nijhoff Publishers: Boston, 1987.
9. Mori T.; Tanaka K. *Acta Metall.* 1973, 21, 571-584.
10. Eshelby J. D. *Proc. Roy. Soc.* 1957, A241, 376-396.
11. Yang C. C.; Huang R. *Cem. Conr. Res.* 1996, 26, 1567-1577.