

脆性工程材料受 單軸向壓力破壞後之力性研究

許 松 山*

摘 要

本研究係利用特別設計之剛性負荷試驗儀器，配合 150 噸萬能壓縮機。在單軸向壓力下作鑄鐵，大理石及混凝土等脆性工程材料之剛性試驗；研究其因受壓力材料破壞後之力性特性。以供機械、土木、隧道及橋樑等工程設計之依據。

鑄鐵、大理石及混凝土之乾濕樣品等五類試樣之剛性實驗結果得出各類試樣之抗壓強度、彈性係數、破壞點之應變值及試樣受力破壞前後之全應力——應變曲線圖，並比較其特性。大理石試樣在往復受力下之剛性試驗結果，得出各次視彈性係數值，成依次遞減關係；其垂直層面受力試樣之力性強度及彈性係數值較平行層面受力者為高。

壹、前 言

由於近代工業之進步、使金屬材料、燃料、建築石材與水泥等工程材料之需求量激增。工程材料大體可分為金屬材料與非金屬材料兩大類。依據材料受外力作用之性質，工程材料可區分為彈性材料 (Elastic Material) 脆性材料 (Brittle Material) 與塑性材料 (Plastic Material)。其中以脆性工程材料之需求量為最大。脆性工程材料以鑄鐵、混凝土及石材三種為主，其中鑄鐵為金屬材料、混凝土及石材均屬於非金屬材料。鑄鐵為現代機械工業最重要之鑄造材料；混凝土現在已成爲土木、建築及水利等工程不可或缺之主要材料。天然石材爲工程上不改變材料原來本質即可直接使用之重要材料，除混凝土之主要原料砂石外，大理石、蛇紋石、板岩等天然石材，可供作建材使用。

從事工程建設之每位工程人員，在工程開始設計時或工程進行施工時，必須對於材料各項性質有明確及深入之認識，方能得到選用適當。然後在有關強度、經濟、耐久及美觀四方面方能求得滿意。脆性工程材料之特性爲：當其受荷重作用時無較大之變形即突然破壞，其破壞時產生極危險之崩裂 (Rupture Fracture) 現象。例如：建築物之倒塌，鑄件之破壞及山崩等災變等。此等情形係由於脆性材料所承受之壓力接近其強度呈現不穩定狀態且無

*工業教育學系講師

較大之變形顯示出時，即將其受力所吸收之應變能量突然釋出所致。脆性工程材料受力破壞後之力性特性決定材料受力時之穩定程度⁽¹⁾⁽²⁾。

脆性工程材料受力破壞後之力性實驗，目前國內極少有人加以研究，本研究係利用國立成功大學日籍客座教授小林良二博士所協助設計之剛性試驗儀，配合土木工程學系工程材料試驗室之 150 噸萬能壓縮機，在單軸向壓力下，作白鑄鐵、灰鑄鐵、大理石及不同成分比例之混凝土等脆性材料之剛性試驗。

本研究選擇取用之試樣，計有白鑄鐵、灰鑄鐵、大理石及各類不同成分之混凝土四類。其中除鑄鐵試樣外，其餘各類試樣除作乾試樣之剛性試驗外，並作浸水十五天後之剛性試驗。藉以了解試樣浸水後對其力性之影響。大理石因具顯明之層面，故依垂直層面與平行層面兩方向選取試樣作方向性實驗，研究其力性特性。

各類試樣之剛性實驗結果均按統計學原理⁽³⁾⁽⁴⁾，求其平均值。藉以代表各試類試樣受力破壞後之特性。各類試樣力性特性及其全應力——應變曲線關係均以圖表示出。其詳細之實驗數據則列於文後附錄篇內。

貳、研究目的

脆性工程材料受荷重作用，如其所承受之荷重超過材料之強度時，材料無顯著之變形即產生極危險之崩裂現象，並發生巨大之破裂聲響，此等現象為脆性材料之破壞特性。鑄鐵、石材及混凝土三類為用途最大之脆性工程材料。因此，本研究特對鑄鐵、大理石及混凝土三種脆性材料，作破壞後之力性試驗，研究材料之破壞特性。以供機械、土木、隧道及橋樑等工程設計之參考。

脆性工程材料之一般物理性質，國內外學者⁽⁵⁾⁽⁶⁾已有詳實之研究報告，本研究之目的則著重於研究鑄鐵、大理石及混凝土等脆性工程材料受力破壞後之力性變化。並藉此引進新方法，期以研究其他各類脆性材料受力破壞後之力性特性。俾擴大應用於工程設計，減少因工程進行中壓力超過負荷所引起之災變。

參、剛性實驗儀設計原理

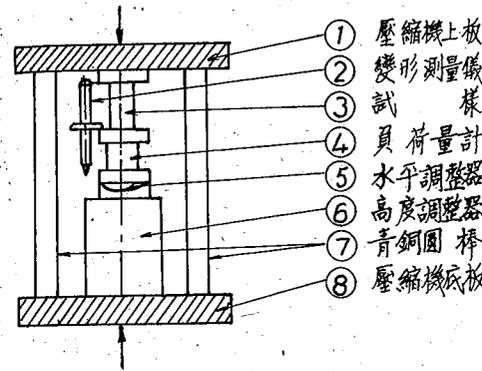
一、測定試樣應變值設計原理

本研究使用剛性實驗儀之構造如圖一 1 所示，位於壓縮機中之三根支撐圓棒，係選用彈性係數值 $E = 1,100,000 \text{ Kg/cm}^2$ 之磷青銅 (Phosphor Bronze) 作材料。青銅圓棒之直徑及長度分別為 $d = 3.5 \text{ cm}$; $l = 30 \text{ cm}$ 則其橫截面積為 $A = 9.62 \text{ cm}^2$ 。試樣之直徑 $d = 2.52 \text{ cm}$ 左右，其橫截面積 $A = 4.99 \text{ cm}^2$ ，青銅圓棒與試樣之橫截面積比約為 2 : 1，今假若壓縮機所加之負荷為 100 噸，則其負荷之分佈情形如圖一 2 所示。其中每根青銅圓棒所承受之負荷為 $P = 30$ 噸；其應力為 $\sigma = P/A = 30,000 \text{ Kg}/9.62 \text{ cm}^2 = 3,120 \text{ Kg/cm}^2$ ；應變為 $\epsilon = \sigma/E = 3,120/1,100,000 = 0.00284$ ，則青銅圓棒之

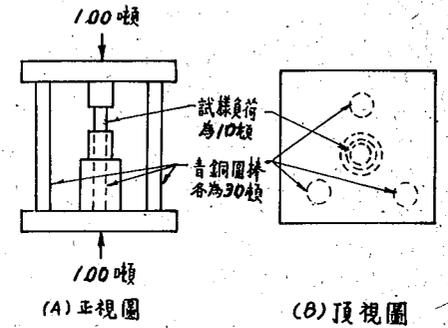
伸縮長度 $\Delta l = l \times \epsilon = 0.00283 \times 30 = 0.085 \text{ cm} = 0.85 \text{ mm}$ 試樣之長度 $l = 60 \text{ mm}$ ，故在壓縮機加壓為 100 噸時剛性實驗儀所能測定試樣之最大應變值 $\epsilon = \Delta l/l = 0.85 \text{ mm}/60 \text{ mm} = 0.0142 \text{ mm/mm}$ ，試驗中各試樣之變形量係由應變測量儀 (Contilever Gage) 與應變指示計 (Strain Indicator) 共同測得。

二、試樣受壓力破壞前後應力測定設計原理

試樣未破壞前所承受之應力大小，係由位於試樣下方之負荷量計 (Load Cell) 直接讀取試樣所承受之負荷值 P ，再將負荷值除以試樣之橫截面積 A ，即得應力值 $\sigma (\sigma = P/A)$ 。試樣破壞時其原所負荷之最大應力，一部分即會迅速轉移至三根青銅圓棒上，由青銅圓棒負擔之，試樣破壞後之殘留應力 (Residual Stress) 仍由負荷測量儀測定之。



圖一 1 剛性實驗儀構造圖



圖一 2 青銅圓棒及試樣負荷分佈圖

肆、實驗方法與步驟

一、取樣地點及處理

本研究使用材料，其中鑄鐵係取自省立彰化高級工業職業學校鑄造工廠所澆注之圓柱形高碳灰鑄鐵 (Gray Cast Iron) 與高碳白鑄鐵 (White Cast Iron)。大理石取自花蓮新城亞洲水泥公司太魯閣石礦場 (該石礦場由於觀光局欲維護太魯閣地區天然美景免遭破壞，現已停止開採)。混凝土係採用台灣水泥公司所生產建築用之普通水泥即卜特蘭水泥 (Portland Cement) 與通過 No. 16 號標準篩 (尺寸為 ASTM 1.19cm) 在實驗室依 1 : 1 ; 1 : 2 ; 1 : 3 ; 1 : 4 及 1 : 5 之比例調製成五種不同成分，大小為 9 平方公分，厚度為二公分之均勻混凝土塊。並在實驗室潤養陰乾 28 天⁽⁷⁾⁽⁸⁾後才取出鑽取試樣。

鑄鐵與混凝土塊不具異方性 (Anisotropy) 可依任意方向選取試樣。鑄鐵試樣係利用車床車成直徑為 2.25 cm 之圓柱體。混凝土試樣係以 2.86 cm (1 1/8") 尺寸鑽頭 (Drilling Bits) 從潤養陰乾固結後之混凝土塊鑽取所需要之試樣數目。大理石具顯明

之層面(具異方性)，試樣係依垂直層面與平行層面兩個方向以 2.86 cm (1 1/8 ") 尺寸鑽頭，分別鑽取所需之試樣數目。

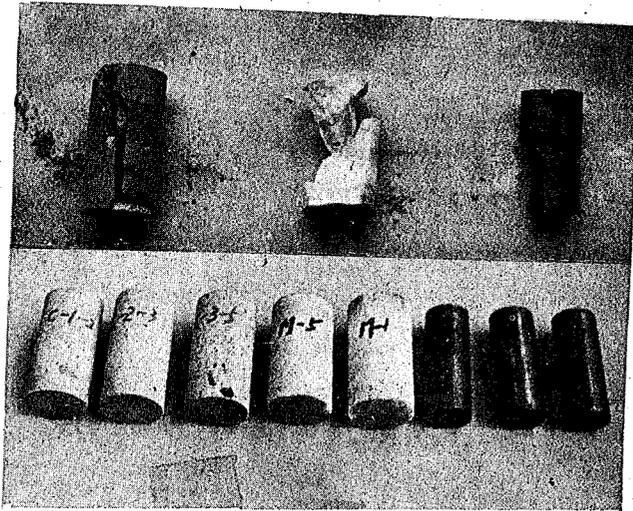
二、試樣之選定與準備

實驗所使用之試樣必須選擇完整無缺均質且具代表性者，即依取樣要領⁽⁹⁾選取所需之試樣，其步驟如下：

(一)使用奇異墨水筆在選用之試樣上標註記號以 G C I 代表灰鑄鐵 W C I 代表白鑄鐵，M 代表大理石，其中 M-1 代表受力方向平行層面者；M-2 代表受力方向垂直層面者，C 代表混凝土而以 C-1；C-2；C-3；C-4；C-5 分別代表水泥與細砂成分比為 1：1；1：2；1：3；1：4；1：5 之混凝土試樣。

(二)試樣之長度須使其盡量接近 60 mm。因剛性實驗儀係由多種器材組合而成，如其長度相差太大，實驗時須每次調整儀器，費時費力，故準備試樣時使其長度在 60 ± 0.5 mm 範圍之內。如圖一 3。

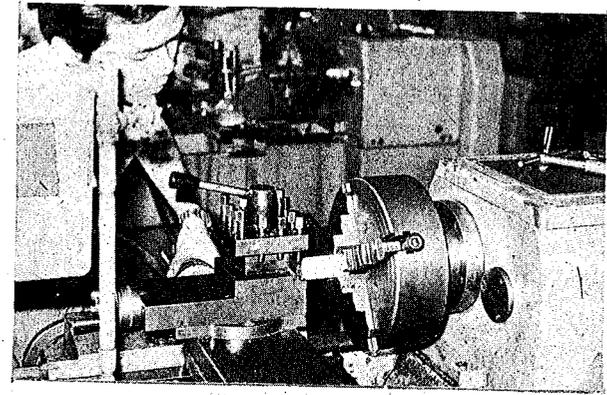
(三)試樣切斷後，鑄鐵試樣置進車床，以最慢速度並加冷却劑(即切削劑)將其表面車光兩端車平如圖一 4。大理石及混凝土試樣置進研磨機將其表面及兩端研磨光滑，如圖一 5。試樣兩端須磨平至 ± 0.002 cm 範圍之內。車磨試樣時以慢速度及加冷却劑係避免試樣車磨時產生高溫而改變材料之物理性質。



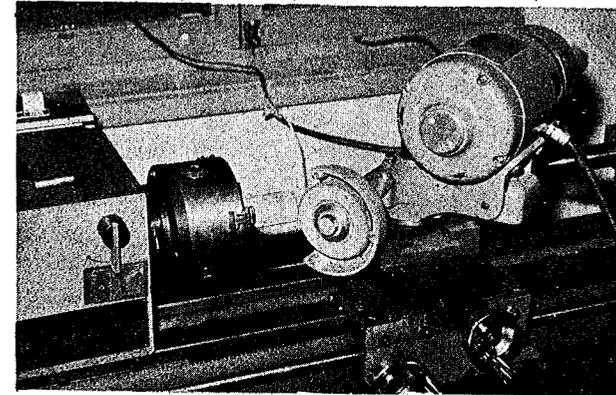
圖一 3 上：試樣破壞之情形
下：準備完好之試樣

(四)浸水十五天之濕樣品在各類試樣標記之大寫字母右下方加以小寫 w 以便與未浸水之試樣區別。

(五)準備好之試樣將表面洗淨陰乾後置入乾燥瓶內備用，而濕試樣係由車磨好之樣品洗淨後浸入水中十五天。實驗前取出，在室溫下陰乾後使用。



圖一 4 金屬試樣車光機(車床)

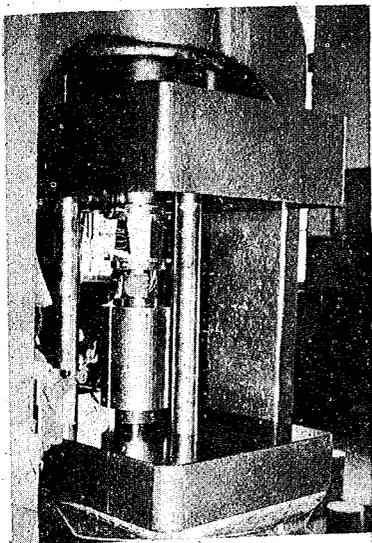


圖一 5 試樣研磨機

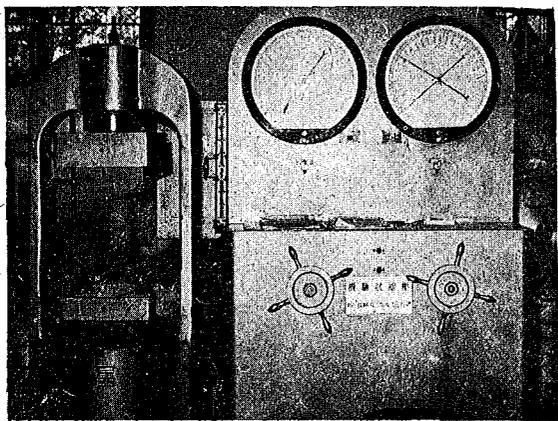
三、實驗使用之器材

本研究所使用之剛性實驗儀，係由下列六種器材組合而成，如圖一 6。其組合剖面如圖一 1 所示。

- (1) 150 噸萬能壓縮機 (Universal Compressive Machine) 一台。圖一 7
- (2) 30 公分長青銅圓棒 (Copper Allogy) 三支。
- (3) 應變測量儀 (Contilever Gage) 一台。圖一 8
- (4) 負荷量計 (Load Cell) 一個。
- (5) 日製共和牌應變指示計 (Kywa Strain Indicator) 二台。
- (6) 高度水平調整器 (Height and Horizontal Controller) 一台。



圖一6 剛性試驗儀



圖一7 150 噸萬能壓縮機

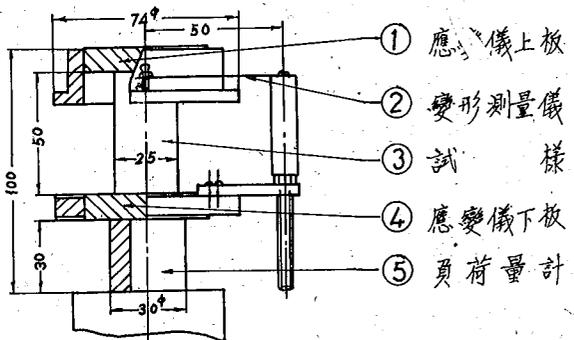
四、實驗步驟

- (一)將三根青銅圓棒按等邊三角形均勻直立於萬能壓縮機底板 (Lower Platen) 上，三角形之中心位置放高度及水平調整器，其上部置負荷量計，再其上為變形測量儀之底板，底板上部為試樣 (Specimen) 試樣上端為變形測量儀之上板，如圖一1。
- (二)使高低調整器，負荷量計，應變測量儀與試樣之中心線保持一致。
- (三)提升壓縮機之底板，使壓縮機上板剛好接觸到青銅圓棒為止然後調整高低及水平調整器，使試樣完全與壓縮機接觸。
- (四)分別接通應變指示計與變形量計間及另一指示計與負荷量計間之線路。
- (五)萬能壓縮機以 3,000 Kg 之間隔增加壓力，施壓之增加率保持在每秒 100 Kg 左右，以避免動態破壞現象 (Dynamical Fracture)

(六)由兩應變指示計分別讀取試樣在每階段加壓時之負荷與變形量。

(七)將讀得之每一試樣之數據，換算成應力與應變值，再由所得之應力與應變值數據，繪製出試樣受力破壞前後之全應力——應變圖。

(八)破壞點往復受力的剛性試驗與



圖一8 應變測量儀構造圖

前述一般剛性試驗步驟大致相同，唯當試樣所承受負荷到達試樣之破壞點時；即刻降低壓縮機之壓力，試樣承受之應力隨即減低，應變亦跟隨回復，然後再升高壓力至一定值再降低壓力。如此重復三次或四次始停止。依據(六)(七)兩項步驟，即可得出試樣在破壞點往復受力的應力——應變曲線 (Hysteresis Loop)。

伍、實驗結果

(一)各類試樣之實驗數據，均依統計學原理⁽³⁾⁽⁴⁾經電子計算機處理後，得出各類試樣之抗壓強度；彈性係數及破壞點之應變值，如表一1所示。

表一1 各類試樣剛性實驗所得力性總表

試樣種類	試樣類別	試樣數目	抗壓強度 (Kg/cm ²)	彈性係數(切線法) (10 ³ Kg/cm ²)	破壞點之應變值 (cm/cm)
鑄鐵 鐵樣	WC I	5	5230	129	0.00446
	GC I	5	4330	1120	0.00451
大理 石 試 樣	M-1	5	760	297	0.00364
	Mw-1	5	680	152	0.00550
	M-2	5	1100	370	0.00356
	Mw-2	5	960	242	0.00521
混 凝 土 試 驗	C-1	5	590	136	0.00467
	Cw-1	5	450	69	0.00751
	C-2	5	510	85	0.00651
	Cw-2	5	330	55	0.00667
	C-3	5	380	69	0.00580
	Cw-3	5	260	45	0.00652
	C-4	5	310	63	0.00536
	Cw-4	5	210	40	0.00623
	C-5	5	280	53	0.00531
	Cw-5	5	190	36	0.00613

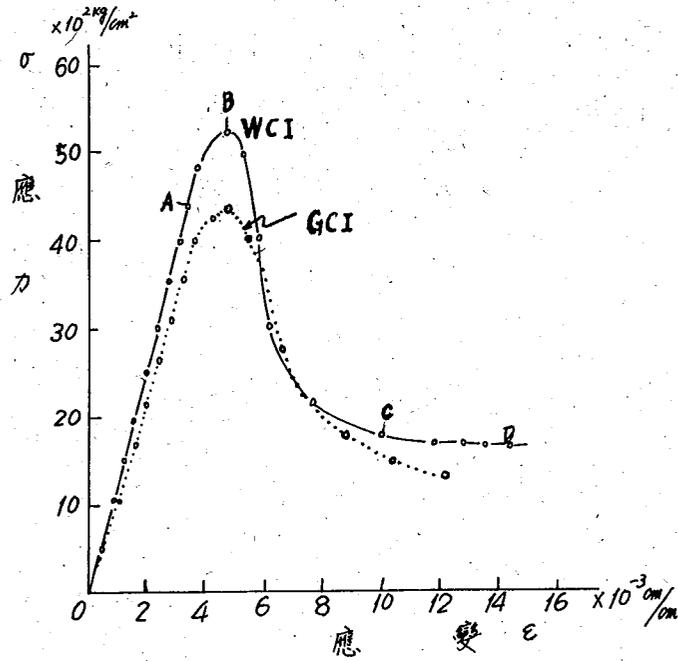
由表一1中可得知白鑄鐵之抗壓強度與彈性係數值為最高，Cw-1，混凝土試樣之破壞點應變值為最大。

(二)鑄鐵試樣之全應力—應變曲線圖繪製於圖一9；由圖中得知白鑄鐵之抗壓強度、彈性係數值及破壞點之應變值均較灰鑄鐵為高。

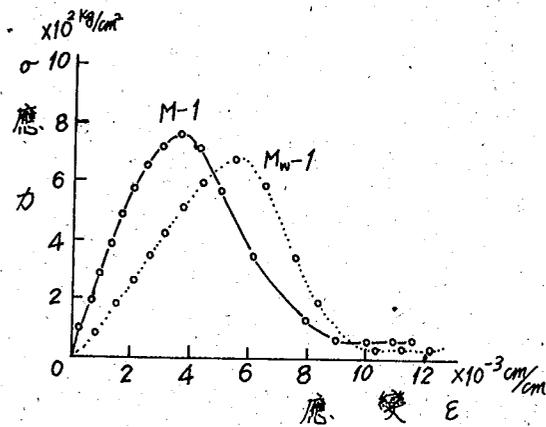
(三)大理石之乾濕試樣，在受力方向與層面平行及垂直所得之全應力—應變曲線圖分別繪

製於圖一 10 及圖一 11；由圖中顯示出乾試樣之抗壓強度；彈性係數值均較濕試樣為高。其平行層面及垂直層面乾試樣之往復受力所得之全應力—應變曲線圖，如圖一 16 及圖一 17 所示。兩圖均顯示出材料視彈性係數隨受力之次數增加而依次降低。

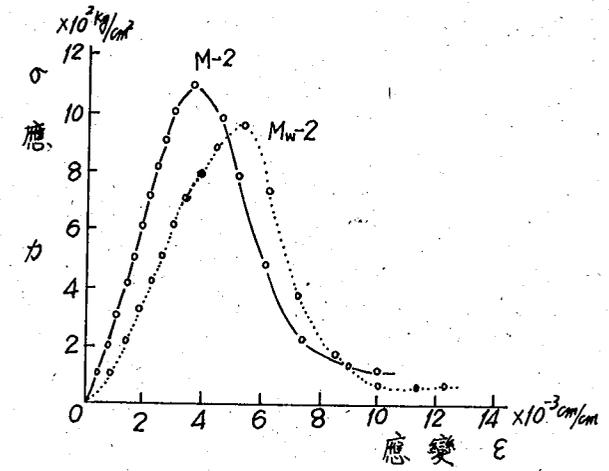
四各種不同成分比例之混凝土試樣，其乾濕試樣之全應力—應變曲線圖，則分別如圖一 12 及圖一 14 所示；圖中顯示混凝土試樣之抗壓強度及彈性係數值隨水泥成分含量之增高而增大，乾試樣破壞點之應變值以 C—1 為最小，C—2 為最大；而濕試樣破壞點之應變值則隨水泥成分含量增高而稍為減低。圖一 14 為混凝土乾濕試樣之比較圖。圖中顯示濕試樣之強度及彈性係數值均降低，而破壞點之應變值增加很大。



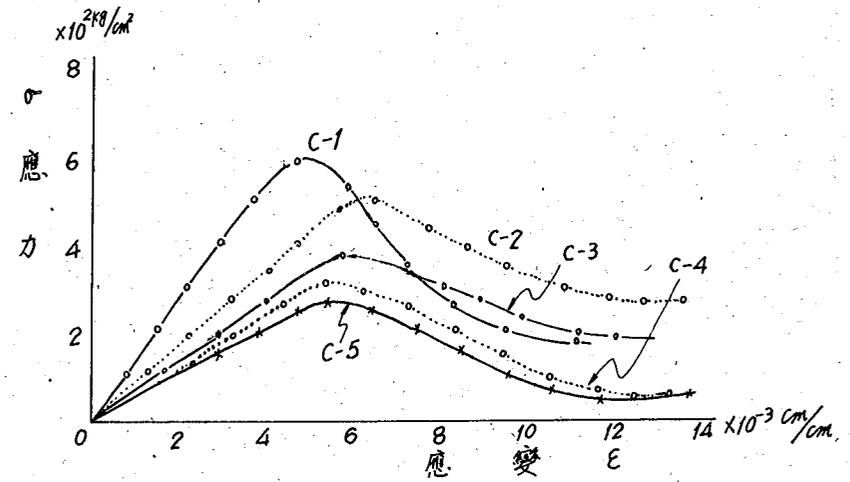
圖一 9 灰鑄鐵與白鑄鐵試樣之全應力—應變曲線比較圖



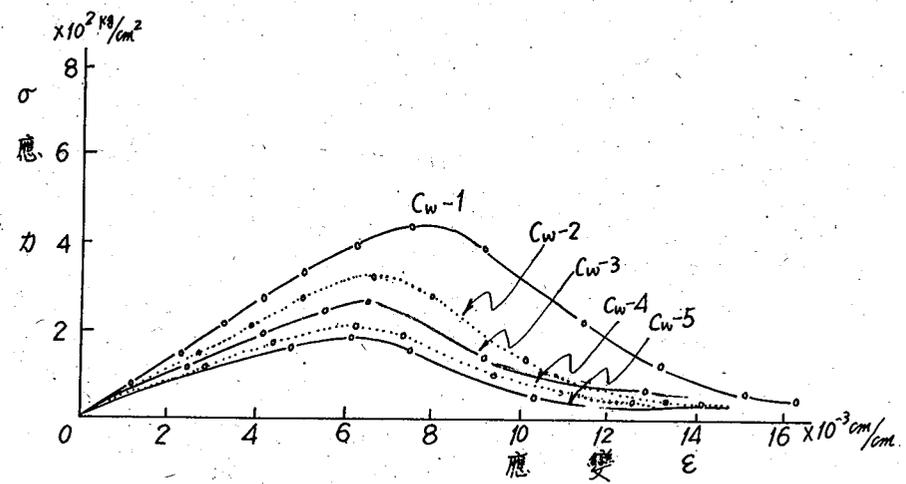
圖一 10 大理石（受力方向平行層面）乾濕試樣之全應力—應變曲線比較圖



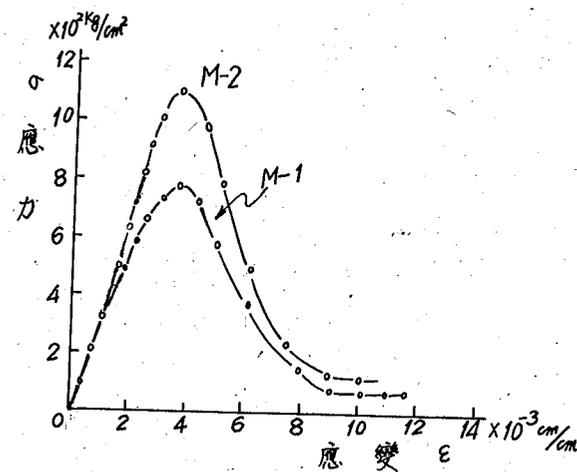
圖一 11 大理石（受力方向垂直層面）乾濕試樣之全應力—應變曲線比較圖



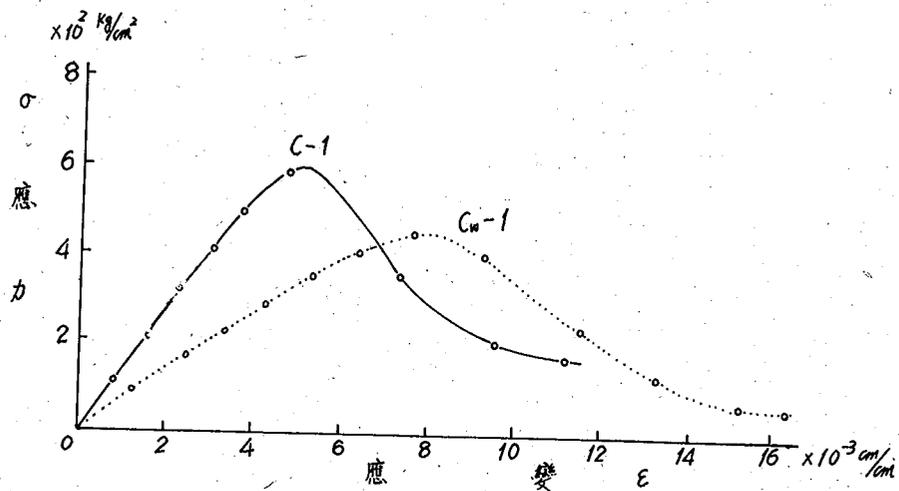
圖一 12 各類混凝土乾試樣之全應力—應變曲線比較圖



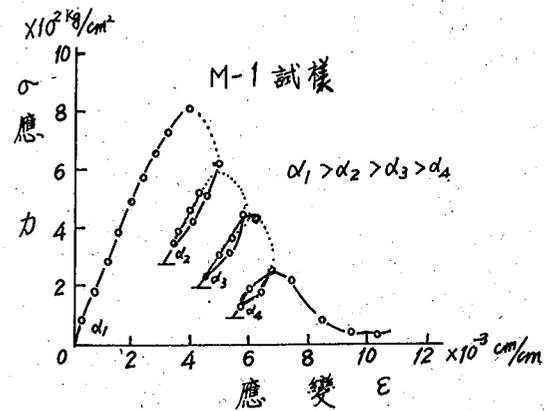
圖一 13 各類混凝土濕試樣之全應力—應變曲線比較圖



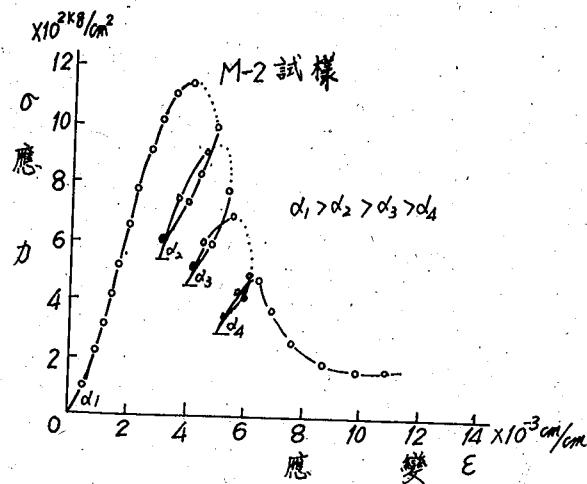
圖一 15 大理石平行與垂直層面方向受力之全應力—應變曲線比較圖



圖一 14 混凝土乾濕試樣之全應力—應變曲線比較圖



圖一 16 大理石平行層面方向，往復受力之應力—應變曲線圖



圖一 17 大理石垂直層面方向，往復受之力應力—應變曲線圖

陸、討 論

(一)全應力—應變曲線代表之意義

各類試樣之全應力—應變曲線均分別繪製於圖一 9 至圖一 13，各圖中均可分成四大區域，如圖一 9 中所示；OA，AB，BC，及 CD。各區域所代表之意義為：

OA 曲線：此區域屬直線部分，係符合虎克定律應力與應變成正比之部分，於此區域內試樣為一彈性體。試樣之彈性係數值為此直線之斜率，其值為一定。故此區域稱為彈性區⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ (Elastic-Region)。

AB 曲線：此區域內之應力—應變曲線之斜率漸次降低，至 B 點時其斜率為零，B 點為試樣之破壞點表試樣之抗壓強度。超過此點則試樣之力性強度失敗 (Strength Failure)⁽¹⁰⁾。此區亦稱為塑性變形區 (Plastic Region)。

BC 曲線：此區域始自試樣之破壞點 (B 點) 至圖一 9 所示之 C 位置。區域內應力—應變曲線之斜率由零而變為負，而漸漸增加。材料產生大量破損之永久變形，此區域屬於脆性區 (Brittle Region)。

CD 曲線：代表試樣破壞後所剩餘之強度，亦即試樣未達到完全破壞 (Rupture) 所殘留之強度，此區內應力—應變之斜率接近零。

OB 曲線與橫坐標圍成之面積：如圖一 9 中斜線區域，代表材料在破壞前具吸收能量能力之大小，亦即材料之韌性⁽⁸⁾ (Toughness)。其單位可由應力—應變曲線之橫軸與縱軸之單位相乘而得為 Kg-cm/cm^2 ， Kg-cm 為能量之單位，因此；曲線下之面積代表

材料在破壞前每立方公分所吸收的能量。亦即材料破壞所需之應變能。

(二)灰鑄鐵與白鑄鐵力性比較之研討

由鑄鐵試樣之剛性試驗所得白鑄鐵之抗壓強度及彈性係數均較灰鑄鐵為高。破壞點之應變值灰鑄鐵稍大。

實驗所選用之鑄鐵試樣係高碳鑄鐵，其中高碳白鑄鐵之成分因含多量之雪明碳鐵 (Cementite) 其硬度及強度較大，晶粒組織亦大。而灰鑄鐵含較多量之石墨成分，波來鐵 (Pearlite) 成分較少，基地內含肥粒鐵 (Ferrite)。其強度比一般之普通灰鑄鐵強度為低。由灰鑄鐵與白鑄鐵之全應力—應變曲線得知其曲線非常陡直，無降伏點 (Yield Point) 存在。其破壞時發生巨大之響聲，具脆性特性之金屬材料。根據金屬材料學理論⁽¹²⁾ 高碳白鑄鐵經退火後， Fe_3C 起分解而得用途極廣之展性鑄鐵 (Malleable Cast Iron)。由應力—應變曲線圖可知灰鑄鐵較白鑄鐵具延性，可直接用做鑄造機件，若欲得到高強度鑄鐵時務用較低之碳當量 (Carbon Equivalent)⁽¹²⁾ 製造即可得，故鑄鐵之剛性試驗可以得知鑄造過程及成品特性之資料。

(三)各類試樣破壞點前之應力—應變曲線之形狀

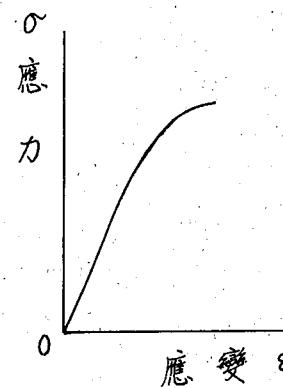
鑄鐵、大理石及混凝土等脆性材料之比例限度 (即上述之彈性區) 低，均如圖一 18 之形狀，超過了比例限度，變形之增加較載重之增加為快，且無降伏點 (Yield Point) 存在，此為脆性材料之特性⁽¹³⁾。此等材料作為工程材料使用時，均以最後強度為計算工作應力之依據。圖一 18 之曲線 Bach 氏⁽¹³⁾ 主張以方程式 $\epsilon = \frac{\sigma^n}{E}$ 表示，式中 n 值隨材料之性質而變。

(四)試樣浸水十五天後對材料力性之影響

金屬材料係由原子構成，組織細密金屬晶體結合鍵強⁽¹⁴⁾，浸水對金屬材料力性之影響極大，故本研究未對脆性鑄鐵材料施加浸水十五天之力性實驗。大理石及混凝土浸水十五天後之剛性試驗結果顯示，各試樣之抗壓強度及彈性係值均減低，破壞點之應變值增大。如圖 10 至圖一 13 所示，其中影響拉壓強度以 C-2 類混凝土為最大，由 510 Kg/cm^2 降至 330 Kg/cm^2 。破壞點之應變值以 C-1 類混凝土影響最大由 0.00467 增大至 0.00651 大理石及混凝土試樣水而影響其力性係因為水中含有有機物之酸鹼成分與混凝土及大理石引起化學作用而影響試樣內部之分子結構所致。

(五)剛性試驗試樣之破損情形

本研究中試樣係直接與剛性試驗儀之上下平板接觸，其間未加一層臘質 (Parraffin) 或潤滑劑 (Lubricated)。實驗結果試樣破損情形，如圖一 3 所示，各類試樣破裂角度均



圖一 18 脆性材料之應力—應變曲線形狀

接近 45° (與受力方向所成之角度) 成斜面 (Oblique) 或圓錐形 (Cone) 破裂。此結果與一般之壓力實驗結果相同。

(六) 往復受力剛性試驗之研討

往復受力剛性試驗僅對大理石試樣作研究，其全應力—應變關係曲線如圖—16 及圖—17 所示。圖中虛線部分係實驗時該處應力與應變變化極快，指示計無法迅速讀取其正確值。因此，該處之應力與應變之關係無法確定。以虛線表示之，如果儀器能配合高精度之記錄器 (X-Y Recorder) 一起使用，則可消除此缺點。

往復受力剛性實驗結果，各次顯視彈性係數 (Apparent Modulus of Elastic) 值與應力—應變曲線之斜率依次成遞減關係。各次最高應力亦逐漸降低。此等現象全係處於脆性特性區域所致。日本東北大學小林良二教授研究之結果亦有此現象 (15)。

(七) 材料之力性與受力方向之關係

大理石具顯明之層面，因此，試樣之選取依垂直層面與平行層面兩個方向取樣，作方向性之剛性實驗。結果顯示，垂直層面方向受力者之抗壓強度與彈性係數值較平行層面者為高，如圖—15。抗壓強度由 760 Kg/cm² 增至 1100 Kg/cm²，彈性係數由 297 × 10³ Kg/cm² 增至 370 × 10³ Kg/cm² (見表—1)。

大理石試樣之力性隨受力方向改變這種性質依方向而異的現象，結晶學上稱為異方性 (Anisotropy)。大部份金屬含有大量方位各異之小晶體，因此一般金屬不具異方性 (14) (Isotropic)。混凝土亦不具方性。大理石試樣之方向性研究，其力性相差極大，故其做為工程建材之設計時，應加考慮其方向性不同而引起之力性不同。

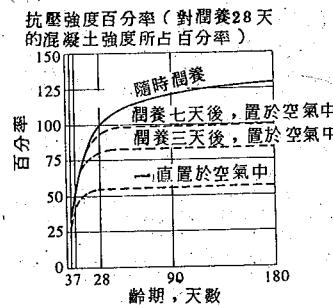
(八) 混凝土試樣潤養陰乾廿八天後再取出使用之原因。

混凝土之硬化試驗結果 (7)(8) 指出；混凝土之硬化需要很長之時間。(水泥與水之化合作用進行極慢)，其初凝時間從 45 分—8 小時，終凝時間為 5 小時—20 小時，在終凝完成後，其硬度及強度始逐漸隨時間增加而增強。至 28 天後方可達至所預定需要之強度。其強度與硬化時間之關係如圖—19 所示。

因此，本研究所使用之混凝土試樣係在實驗室潤養 (Moist-Cured) 陰乾廿八天後，方取出使用。

(九) 混凝土剛性實驗結果之研討。

由混凝土之剛性實驗所得之力性結果及其全應力—應變之關係曲線圖 (見圖—12 及圖—13)，可知混凝土之抗壓強度較天然大理石為低，其抗壓強度在 280—590 Kg/cm² 之間。各類混凝土之全應力—應變曲線形狀不完全相同，應力—應變成直線部分即為彈性區 O A 部份，其斜率即為混凝土之彈性係數。較高強度之 C—1 類混凝土，其應變量到達 0.00467 時即破壞強度較



圖—19 混凝土之潤養時間與強度關係圖

低之 C—2 類混凝土其應變量則達到 0.00651 始行破壞。C—3 類混凝土強度及應變值均較 C—2 類降低。

依據材料之韌性理論 (14) 各類混凝土中以 C—2 類之韌性較佳。各類混凝土破壞後之應力—應變曲線除 C—1 稍為陡直外，其餘均成平滑之曲線，近人呂氏 (16) 在「預力混凝土坑道支架在台灣的發展及今後的問題，研究中亦曾指出預力混凝土構材具有柔韌性，復原性及彈性等特點。通常做支架使用」。因此，各類混凝土之剛性試驗結果，對改進混凝土支柱之設計可提供最佳之資料。

(十) 試樣破壞後之應力—應變曲線之陡直與穩定度之關係

實驗過程中，由觀察得知，鑄鐵及大理石試樣當破壞時呈崩裂現象並發出響亮之破壞聲，同時應力迅速降低。而混凝土試樣之破壞時呈較平穩且慢慢裂開現象 (圖—3 試樣之破壞情形亦可看出此種現象)。由其破壞後之應力—應變曲線圖得知鑄鐵最陡直，斜率最大；大理石次之，而混凝土則較平滑斜率亦較小。究其原因係較堅硬之鑄鐵及大理石，承受壓力時所吸收之應變能 (17) (Strain Energy) 較大，破壞時此大量之應變能突然釋出而發出較大之破裂響聲，同時試樣所承受之應力亦突然降低，得到較陡直之應力—應變曲線。故試樣破壞後之應力—應變曲線之陡直程度高者，材料破壞後呈崩裂 (Rupture) 現象，而陡直程度較小者呈較平穩之破壞現象。

柒、結 論

本研究對脆性工程材料鑄鐵，大理石及混凝土所做之剛性實驗與研討，得下列諸結論：

- (一) 各類試樣所得之全應力—應變圖，一般可分為 O A；A B；B C 及 C D。四個區域，四區分別代表試樣在受力時所呈現出之不同特性。其中 O A 為彈性區；A B 為塑性變形區；B C 為脆性區；C D 為殘留強度值，其中 O B 所圍成面積代表材料之韌性大小。
- (二) 鑄鐵試樣之剛性試驗結果，可得知白鑄鐵之強度及彈性係數均較灰鑄鐵為高，兩者破壞點之應變值極為接近。
- (三) 混凝土及大理石浸水後之剛性試驗結果，使試樣之抗壓強度及彈性係數值降低，破壞點之應變值增大，其中混凝土受浸水影響較大。(見表—1)
- (四) 大理石試樣之力性依垂直層面方向受力與平行層面方向受力而異，試樣之剛性試驗結果，得知，垂直層面方向受力其抗壓強度與彈性係數值均較平行層面方向受力為大。而其破壞點之應變值，極為接近。(見圖—15)
- (五) 大理石試樣破壞後之往復受力剛性試驗，得出各次視彈性係數值 (Apparent Elastic Modulus) 大小關係為 E₁ > E₂ > E₃ > E₄。亦即試樣在受往復受力時，其視彈性係數值及其應力—應變曲線斜率依次減少。
- (六) 各類混凝土 (乾試樣) 之抗壓強度與彈性係數值，均依砂質之成分增加而降低。其破壞後之應力—應變曲線斜率除 C—1 類混凝土較破壞前之應力—應變曲線之斜率 (Positive

Slope) 爲陡外，餘均較小。由混凝土試樣剛性實驗結果之研討，可得知各類混凝土其韌性，強度亦高（如圖—12）。

(七)由各類試樣剛性實驗所得之全應力—應變曲線關係圖，可得知除混凝土試樣外，鑄鐵及大理石試樣破壞後之應力—應變曲線之斜率均較破壞前之斜率爲陡直。故其破壞時突然釋出所吸收之巨大應變能，而發出巨大之響聲，而呈崩裂現象。

(八)由各類試樣之力性比較（表—1）可得：

- (1)抗壓強度：以金屬鑄鐵爲最大約爲大理石試樣之 5~7 倍，比混凝土高出 10 倍。
- (2)彈性係數值：亦以鑄鐵最高，大理石次之而混凝土爲最小。
- (3)破壞點之應變值：以大理石最小，鑄鐵次之，而混凝土試樣最大。各類試樣中白鑄鐵與灰鑄鐵極爲接近，M—1 類與 M—2 類大理石亦極爲接近。

誌 謝

本研究進行期間，曾使用成功大學礦冶材料學系之器材及土木工程學系工程材料實驗室之萬能實驗機等設備，作者謹此誌謝。

又承蒙日本東北大學小林良二教授提供資料，成功大學石作珉教授諄言指導，本系羅慶璋老師及亞洲水泥公司高工程師銘佑協助選取實驗試樣，各項實驗方能順利完成，作者特此一併申謝。

參考文獻

主要參考文獻

1. Turner, P.R. and Barnard, P.R.: Stiff Constant Strain Rate Testing Machine, Engineer, Vol. 214, PP. 146-148, 1962.
2. Jaeger, J.C. and Cook N.G. W.: Fundamentals of Rock Mechanics, PP.86 and PP. 167, Methuen and Co. 1969.
3. 田克明：統計學，PP. 61-105 三民書局，1969.
4. John Wiley and Sons: Probability and Experimental Errors in Science PP. 202-235, New York, 1961.
5. Tso-min Shih and Shih-yur Pan: The Elastic Properties of Dacite from Chin-Qua-Shih, Taiwan. Mining and Metallurgy. Vol. 15, No. 3, PP. 73-83, 1971.
6. ASM: Metals Handbook, 8th edition, Vol. 9, PP. 27-35, 1974.
7. 王正雄：材料試驗 PP. 42-45; PP. 176-178 大中國圖書公司，1976.
8. Carl. A. Keyer: Materials Science in Engineering 2th. PP. 298-300; PP. 19-25; PP. 287-290, 1974.

9. Robert S. Lewis, E.M.: Elements of Mining (Sampling) 3th. PP. 327-350, 1967.
10. Bieniawski, Z.T.: Propagation of Brittle Fracture in Rock, Basic and Applied Rock Mechanics, AIME, PP. 409-430, 1972.
11. Bieniawski, Z.T. Denkhaus, H.G. and Vogler, U.W.: Failure of fractured Rock, Report No. 662 Rep. of South Africa Council for Scientific and International Research, April, 1968.
12. 陸志鴻：金屬材料 PP. 11(78-85) 中國工程師學會。
13. 許松山：材料力學 PP. 289-290 正言出版社。
14. 金重勳：工程材料學 PP. 4-6; P. 26 大行出版社。
15. Ryoji Kobayashi: Rock Mechanics Note, PP. 85-90, 1973.
16. 呂海星：預力混凝土抗道支架在台灣發展及今後之問題，礦冶五卷一期，24—27 頁 1961.
17. Hardy H.R.: Standardized Procedures for the Determination of the Physical Properties of Mine Rock under short-period Uniaxial Compression, Mines Branch Ottawa, 1959.

其他參考文獻

1. A.G. Guy: Introduction to Materials Science, 1970.
2. Kenneth M. Ralls Thomas H. Courtney John Wulff: Introduction to Materials Science and Engineering Copyright 1976.
3. 任金聲：工程材料學，聯合圖書公司，1974 三版。
4. 賀 俊：材料科學與工程，東華書局，1976.
5. 劉祥鈞：工程材料試驗，大聖書局，1972.
6. 日、長谷川稔著，呂士賢譯：機械材料學，五洲出版社，1975.
7. 王念光：鑄造工程手冊，徐氏基金會出版 1974.

STIFF LOADING TEST DATA

Name: WCI Length: 50.01mm Diameter: 2.256cm

Load Cell Read	Stress (Kg/cm ²)	Change in Length(cm)	Strain (cm/cm)	Remark
2,000	500	0.0250	0.00050	
4,160	1,040	0.0475	0.00095	
5,900	1,475	0.0600	0.00120	
7,500	1,875	0.0760	0.00152	
10,040	2,510	0.1010	0.00202	
12,000	3,000	0.1170	0.00234	
14,080	3,520	0.1350	0.00270	
15,840	3,960	0.1565	0.00313	
17,600	4,400	0.1660	0.00332	
19,320	4,830	0.1825	0.00365	
20,920	5,230	0.2230	0.00446	fracture
20,040	5,010	0.2600	0.00520	
12,160	3,040	0.3050	0.00610	
8,680	2,170	0.3750	0.00750	
7,320	1,830	0.4775	0.00955	
6,860	1,715	0.5850	0.01170	
6,860	1,715	0.6350	0.01270	
6,860	1,715	0.6725	0.01345	

STIFF LOADING TEST DATA

Name: GCI Length: 50.05mm Diameter: 2.257cm

Load Cell Read	Stress (Kg/cm ²)	Change in Length(mm)	Strain (cm/cm)	Remark
2,000	500	0.0250	0.00050	
3,060	765	0.0360	0.00072	
4,700	1,175	0.0530	0.00106	
6,660	1,665	0.0750	0.00150	
8,540	2,135	0.0975	0.00195	
10,520	2,630	0.1175	0.00235	
12,400	3,100	0.1390	0.00278	
14,260	3,565	0.1590	0.00318	
16,020	4,005	0.1755	0.00351	
17,040	4,260	0.2050	0.00410	
17,320	4,330	0.2255	0.00451	fracture
16,140	4,035	0.2625	0.00525	
11,200	2,800	0.3255	0.00651	
7,180	1,795	0.4375	0.00875	
5,480	1,370	0.5175	0.01035	
4,100	1,025	0.6250	0.01250	

STIFF LOADING TEST DATA

Name: M-1 Length: 60.05mm Diameter: 2.520cm

Load Cell Read	Stress (Kg/cm ²)	Change in Length(mm)	Strain (cm/cm)	Remark
475	95	0.0252	0.00042	
975	195	0.0420	0.00070	
1,400	280	0.0618	0.00103	
1,950	390	0.0852	0.00142	
2,425	485	0.1026	0.00171	
2,850	570	0.1260	0.00210	
3,275	655	0.1530	0.00255	
3,600	720	0.1818	0.00303	
3,800	760	0.2184	0.00364	fracture
3,625	725	0.2526	0.00421	
2,850	570	0.3000	0.00500	
1,750	350	0.3672	0.00612	
675	135	0.4764	0.00794	
350	70	0.5340	0.00890	
350	70	0.6300	0.01050	
350	70	0.6990	0.01165	

STIFF LOADING TEST DATA

Name: Mw-1 Length: 59.90mm Diameter: 2.520cm

Load Cell Read	Stress (Kg/cm ²)	Change in Length(mm)	Strain (cm/cm)	Remark
450	90	0.0552	0.00092	
925	185	0.0900	0.00150	
1,375	275	0.1290	0.00215	
1,750	350	0.1530	0.00255	
2,125	425	0.1860	0.00310	
2,575	515	0.2250	0.00375	
3,000	600	0.2640	0.00440	
3,400	680	0.3300	0.00550	fracture
2,950	590	0.3900	0.00650	
1,750	350	0.4530	0.00755	
975	195	0.5424	0.00904	
225	45	0.6180	0.01030	
225	45	0.6660	0.01110	
225	45	0.7320	0.01220	

STIFF LOADING TEST DATA

Name: M-2

Length: 59.89mm

Diameter: 2.525cm

Load Cell Read	Stress (Kg/cm ²)	Change in Length(mm)	Strain (cm/cm)	Remark
550	110	0.0306	0.00051	
1,025	205	0.0480	0.00080	
1,550	310	0.0660	0.00110	
2,050	410	0.0852	0.00142	
3,000	500	0.0990	0.00165	
3,025	605	0.1176	0.00196	
3,550	710	0.1338	0.00223	
4,050	810	0.1512	0.00252	
4,550	910	0.1620	0.00270	
5,025	1,005	0.1812	0.00302	
5,500	1,100	0.2136	0.00356	fracture
4,875	975	0.2712	0.00452	
3,900	780	0.3060	0.00510	
2,400	480	0.3660	0.00610	
1,150	230	0.4500	0.00750	
675	135	0.5352	0.00892	
600	120	0.6030	0.01005	

STIFF LOADING TEST DATA

Name: Mw-2

Length: 60.08mm

Diameter: 2.526cm

Load Cell Read	Stress (Kg/cm ²)	Change in Length(mm)	Strain (cm/cm)	Remark
550	110	0.0486	0.00081	
1,075	215	0.0780	0.00130	
1,600	320	0.1086	0.00181	
2,100	420	0.1320	0.00220	
2,575	515	0.1542	0.00257	
3,050	610	0.1758	0.00293	
3,525	705	0.1980	0.00330	
3,950	790	0.2310	0.00385	
4,375	875	0.2616	0.00436	
4,800	960	0.3126	0.00521	fracture
3,650	730	0.3738	0.00623	
1,850	370	0.4356	0.00726	
900	180	0.5100	0.00850	
375	75	0.6000	0.01000	
375	75	0.6780	0.01130	
375	75	0.7380	0.01230	

STIFF LOADING TEST DATA

Name: C-1

Length: 60.07mm

Diameter: 2.523cm

Load Cell Read	Stress (Kg/cm ²)	Change in Length(mm)	Strain (cm/cm)	Remark
575	115	0.0492	0.00082	
1,050	210	0.0870	0.00145	
1,575	315	0.1326	0.00221	
2,050	410	0.1740	0.00290	
2,525	505	0.2196	0.00366	
2,950	590	0.2802	0.00467	fracture
2,625	525	0.3480	0.00580	
2,200	440	0.3978	0.00663	
1,750	350	0.4416	0.00736	
1,350	270	0.4950	0.00825	
1,025	205	0.5682	0.00947	
975	195	0.6618	0.01103	

STIFF LOADING TEST DATA

Name: C-2

Length: 59.95mm

Diameter: 2.522cm

Load Cell Read	Stress (Kg/cm ²)	Change in Length(mm)	Strain (cm/cm)	Remark
550	110	0.0780	0.00130	
1,000	200	0.1410	0.00235	
1,400	280	0.1872	0.00312	
1,725	345	0.2436	0.00406	
2,000	400	0.2826	0.00471	
2,400	480	0.3396	0.00566	
2,550	510	0.3906	0.00651	fracture
2,225	445	0.4590	0.00765	
1,975	395	0.5196	0.00866	
1,775	355	0.5736	0.00956	
1,525	305	0.6426	0.01071	
1,400	280	0.7146	0.01191	
1,050	210	0.7716	0.01286	
950	190	0.8190	0.01365	

STIFF LOADING TEST DATA

Name: C-3 Length: 59.97mm Diameter: 2.523cm

Load Cell Read	Stress (Kg/cm ²)	Change in Length(mm)	Strain (cm/cm)	Remark
550	110	0.0966	0.00161	
1,000	200	0.1746	0.00291	
1,375	275	0.2418	0.00403	
1,700	340	0.3024	0.00504	
1,900	380	0.3480	0.00580	fracture
1,725	345	0.4080	0.00680	
1,525	305	0.4878	0.00813	
1,425	285	0.5448	0.00908	
1,225	245	0.5952	0.00992	
1,000	200	0.6600	0.01100	
900	180	0.7260	0.01210	

STIFF LOADING TEST DATA

Name: C-4 Length: 60.04mm Diameter: 2.521cm

Load Cell Read	Stress (Kg/cm ²)	Change in Length(mm)	Strain (cm/cm)	Remark
500	100	0.1032	0.00172	
700	140	0.1410	0.00235	
1,000	200	0.1986	0.00331	
1,425	285	0.2652	0.00442	
1,550	310	0.3216	0.00536	fracture
1,450	290	0.3720	0.00620	
1,375	275	0.4368	0.00728	
1,050	210	0.4998	0.00833	
725	145	0.5676	0.00946	
525	105	0.6330	0.01055	
400	80	0.6960	0.01160	
300	60	0.7452	0.01242	
300	60	0.7950	0.01325	

STIFF LOADING TEST DATA

Name: C-5 Length: 60.06mm Diameter: 2.523cm

Load Cell Read	Stress (Kg/cm ²)	Change in Length(mm)	Strain (cm/cm)	Remark
425	85	0.0966	0.00161	
725	145	0.1710	0.00285	
800	200	0.2292	0.00382	
1,275	255	0.2856	0.00476	
1,400	280	0.3186	0.00531	fracture
1,300	260	0.3816	0.00636	
1,050	210	0.4458	0.00743	
800	160	0.5010	0.00835	
525	105	0.5730	0.00955	
425	85	0.6360	0.01060	
250	50	0.7032	0.01172	
250	50	0.7920	0.01320	

STIFF LOADING TEST DATA

Name: M-1 (Repeat load) Length: 60.04mm Diameter: 2.520cm

Load Cell Read	Stress (Kg/cm ²)	Change in Length(mm)	Strain (cm/cm)	Remark
450	90	0.0210	0.00035	
900	180	0.0456	0.00076	
1,375	275	0.0672	0.00112	
1,875	375	0.0900	0.00150	
2,425	485	0.1188	0.00198	
2,850	570	0.1410	0.00235	
3,250	650	0.1626	0.00271	
3,650	730	0.1860	0.00310	
4,025	805	0.2370	0.00395	
3,150	630	0.2976	0.00496	
2,550	510	0.2700	0.00450	
2,100	420	0.2472	0.00412	
1,700	340	0.2046	0.00341	
2,000	400	0.2136	0.00356	
2,725	465	0.2352	0.00392	
2,625	525	0.2568	0.00428	
2,900	580	0.2832	0.00472	
2,225	445	0.3420	0.00570	
1,600	320	0.3150	0.00525	
1,200	240	0.2652	0.00442	
1,550	310	0.2934	0.00489	
2,175	435	0.3672	0.00612	
975	195	0.3810	0.00635	
675	135	0.3390	0.00565	
1,025	205	0.3570	0.00595	
1,125	225	0.4392	0.00732	
975	195	0.5080	0.00848	
275	55	0.5610	0.00935	
275	55	0.6216	0.01036	

A STUDY OF BRITTLE ENGINEERING MATERIAL IN LABORATORY UNDER UNIAXIAL STIFFNESS-TESTING CONDITION

Sun-Shan Shew

Abstract

This paper presented herein, describe the special design of stiffness testing equipment on a uniaxial loading condition for investigating the strength properties and the complete stress-strain diagrams of brittle engineering materials of cast iron, marble and various concretes.

The compressive strength, elastic modulus, maximum strain at failure and the complete stress-strain curves for dried specimens of cast iron, and dried and wet specimens of marble and various concretes were obtained and plotted individually and in comparison. A study on marbles showed that the apparent elastic modulus in decreased relatively in a series of loading and unloading cycles. The compressive strength, as well as the elastic modulus are greater when stressed in a direction perpendicular to the bedding plane than parallel to the bedding plane of the marble formation.