

## 以數值方法探討卵礫石層的力學行為

張光宗 陳宥序 鄭敏杰\*

**摘要** 卵礫石層是混合堅硬卵礫石與基質土壤之綜合體，了解卵礫石層整體力學性質，對工程建設與災害防治有極大幫助。本研究以台灣中部卵礫石層為對象，運用分離元素法為基礎之軟體 PFC<sup>2D</sup> 探討卵礫石材料力學行為。首先進行雙軸試驗之模擬，校正 PFC<sup>2D</sup> 微觀參數，接著利用複迴歸分析 (multiple regression model) 建立宏觀參數與微觀參數間之關係。另外，以得到的合理微觀參數，改變卵礫石粒徑大小與含量，探討粒徑大小和含量對力學性質的影響。結果顯示當卵礫石粒徑越大與含量越多，其剪力強度、彈性模數、柏松比、摩擦角也會越大，但凝聚力略為下降。表示卵礫石粒徑大、含量高之材料，其抗剪強度大，變形性小，此結果與前人研究結果相符。

**關鍵詞：** 卵礫石層、PFC、力學行為、微觀參數。

## Study on The Mechanical Behavior of Gravel Formations Using Numerical Methods

Kuang-Tsung Chang You-Hsu Chen Min-Chieh Cheng\*

**ABSTRACT** Gravel formation involves the mixture of hard gravel and a soil matrix. Knowing the integrated mechanical characteristics of gravel formation is beneficial for engineering constructions and disaster prevention. This study adopts the software PFC<sup>2D</sup>, which is based on the discrete element method, to investigate the mechanical behavior of gravel formations. First, simulation is carried out through a biaxial test to adjust the micro parameters in PFC<sup>2D</sup>, and then multiple regression analysis is performed to establish the relationship between macro and micro parameters. Furthermore, with the reasonable micro parameters obtained, the particle size and content of gravel can be changed to investigate how they influence mechanical behavior. The results show that the bigger particle size and the greater the content of gravel, the higher the values of shear strength, elastic modulus, Poisson's ratio and friction angle, but the lower the value of cohesion. In other words, this kind of material has higher shear strength and stronger deformation resistance. These findings correspond with previous research results.

**Key Words :** Gravel formation, PFC, mechanical behavior, micro parameters.

### 一、前言

根據統一土壤分類法 (USCS)，巨石、卵石與礫石其粒徑大小在 4.75 mm 以上，因此一般定義粒徑大於 4.75 mm 以上者為卵礫石。卵礫石層屬於複合地質材料，包含堅硬的卵石、礫石與軟弱的砂、土等填充物，因此卵礫石層整體性質應介於岩石與土壤中間。探討卵礫石材料力學性質，理論上只有進行現地試驗與全尺寸室內試驗，方能確定其力學性質。但全尺寸室內試驗有擾動試體之疑慮，而現地試驗需耗費大量人力、物力，所以卵礫石層現地研究仍然缺乏，還有許多研究空間。

有關卵礫石材料與力學性質研究，褚炳麟等 (1996) 將卵礫石層之現地級配尺寸縮小至室內試驗之範圍，並進行室內三軸 CID 試驗，推導卵礫石在三軸應力狀態下之破壞包絡線，

結果顯示試體之最大粒徑越大時，其抗剪強度破壞包絡線之斜率越陡，尖峰內摩擦角越大。鄭文隆 (1986) 認為卵礫石層中細料含量增加，則凝聚力增加，而摩擦角減少。蔡明新等 (1995) 於台灣各區卵礫石層進行試驗，其結果為卵礫石含量較大時內摩擦角也較大；反之，若卵礫石含量較少則內摩擦角較小，但凝聚力變大。Coli, et al. (2011)，藉由現地剪力試驗得出，當塊體含量 (volumetric block content, VBC) 增加時內摩擦角會增加，但凝聚力會降低，特別是在含量 20 %~25 % 之間，凝聚力有劇減的現象。Xu, et al. (2011) 研究岩土混合材料塊石含量與抗剪強度之關係，利用影像分析粒徑結合大型現地剪力試驗，其結果為岩塊含量在 25 %~70 % 時，摩擦角會增加；凝聚力隨著岩塊含量增加而大幅下降，當塊石含量高於 30 % 下降幅度趨於平緩。在卵礫石層變形性方面，黃崇仁與

司徒銳文 (1995) 依大肚台地頭崙山層所進行之平鉸載重試驗結果，推估卵礫石含量較高時 (>75%)，彈性模數值大約可達 9000 kg/cm<sup>2</sup>，當卵礫石含量低時 (< 60%)，彈性模數急劇下降。依據張吉佐等人 (1996) 對台灣西部麓山帶台地卵礫石之研究顯示，卵礫石層材料中卵礫石含量介於 65% 至 91%，除了少部份地區在 60% 以下，大部份都超過 75%。彈性模數在 4350~85000 t/m<sup>2</sup>。李明勳 (2000) 以單一蒐尋法反算漢寶草屯段八卦山隧道卵礫石層若覆土厚 90~156 m 之彈性模數約為 200~1500 MPa 之間。鄭敏杰 (2011) 利用影像分析程式 (Image J) 分析現地粒徑，再以 UCODE 最佳化、PB 設計結合 PFC<sup>2D</sup> (Itasca Consulting Group Inc. (2004)) 建立宏觀參數與微觀參數之複迴歸式。Hsu, et al. (2012) 利用 PFC<sup>2D</sup> 進行數值直接剪力試驗分析，探討相關參數與微觀參數間之影響。

由前人研究可以得知兩項重點，第一，卵礫石粒徑大小與卵礫石含量是影響材料特性的重要因子；第二，可以利用數值分析方法進行卵礫石層力學行為之模擬。因此，本研究透過數值方法，探討卵礫石材料的力學行為。採用雙軸試驗之模擬，校正 PFC<sup>2D</sup> 微觀參數，接著利用複迴歸分析 (multiple regression model) 建立宏觀參數與微觀參數間之關係，宏觀參數有強度 A、彈性模數 E、柏松比 ν；微觀參數為正向勁度 kn、切向勁度與正向勁度比 ks/kn、摩擦係數 f。另外，改變卵礫石粒徑大小與含量，探討粒徑大小和含量對力學性質的影響，以得到的合理的微觀參數。

### 一、材料與方法

本研究以台灣中部之卵礫石層為研究對象，方法採用分離元素法二維分析軟體 PFC<sup>2D</sup> 進行數值雙軸試驗分析。以先前野外調查研究結果 (Chang and Cheng, 2014) 為基礎，利用數值模擬分析符合現地調查 (強度與變形性) 之結果，來求取數值模型之合理微觀參數。研究流程如圖 1 所示。

#### 1. 研究區域概述

本研究區域包含大肚台地、八卦台地、大坑、三義、新社與陳有蘭溪河階地 (圖 2)。卵礫石層是一個廣義的稱呼，從形成時間、形成方法到不同之材料性質，可以略分為紅土台地堆積層、頭崙山層與沖積扇階地，其主要組成由堅硬之卵、礫石

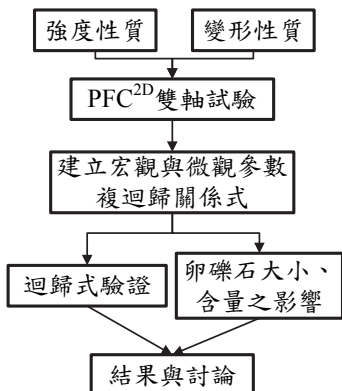


圖 1 研究流程

Fig.1 The flow chart of the study

及軟弱之泥、砂等填充細料共同組合而成之複合地層。卵礫石層中多含有褐鐵礦，當風化時間長，卵礫石層頂部表層通常會有紅土化出現。台灣卵礫石堆積層分佈廣泛，從丘陵地、台地、沖積平原到河谷，都有卵礫石層分佈蹤跡，而且卵礫石層其覆蓋深度也極為渾厚，最深之處可達數百公尺。卵礫石層在乾燥時，强度高，有直立性，工程性質良好。但膠結材料細顆粒遇水容易流失，使得區域邊坡狀態不穩定，容易因暴雨誘發崩塌或土石災害，為崩塌頻繁之區域。

#### 2. 現地強度推估

通常卵礫石層現地強度推估有現地試驗、大型室內試驗、數值分析模擬等方法，本研究透過 GIS 地理資訊系統蒐集整理區域內之地形特徵，記錄各研究區剖面之坡度坡高，應用 Baker (2004) 提出之非線性破壞準則  $\tau = P_a A (\frac{\sigma}{P_a})^n$ ，可對各地之強度進行推估，參數 A 主要控制剪力強度之大小，而 n 控制破壞包絡線之曲率。讀者可參考 Chang and Cheng (2014) 以了解強度 A 值之計算方式，最後推估之強度 A 值如表 1，強度 A 值介於 0.75 ~ 1.57 之間，A 值越大表抗剪強度越強。

由於之後將進行數值模擬雙軸試驗，試驗並不能直接得出強度 A 值，因此必須先將 A 值轉換，藉由 Baker (2004) 提出之 (1)、(2) 式求出相對應之平均正向應力 p(mean normal stress) 與平均軸差應力 q(mean deviator stress)，接著透過 p、q 再分別求出最大主應力  $\sigma_1$  及最小主應力  $\sigma_3$ ，最大主應力  $\sigma_1$ 、最小主應力  $\sigma_3$  的計算是為了與 PFC<sup>2D</sup> 數值分析結果相符合，來推求卵礫石材料微觀參數，讓模擬出來之微觀參數有合理意義。

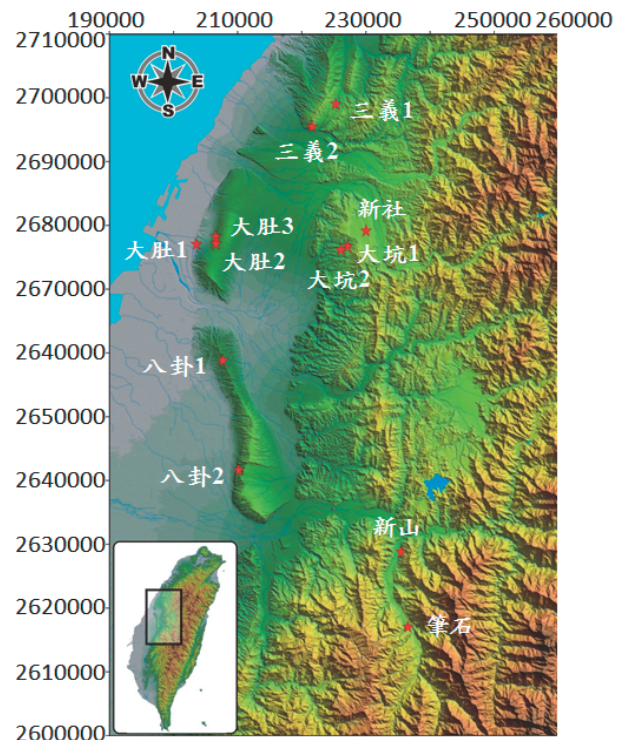


圖 2 研究區域

Fig.2 The research area

$$\begin{aligned}
 q &\equiv \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau \sec(\phi) = \tau \sqrt{1 + \tan^2(\phi)} \\
 &= Pa A \left(\frac{\sigma}{Pa} + T\right)^n \sqrt{1 + (An)^2 \left(\frac{\sigma}{Pa} + T\right)^{2(n-1)}} \\
 &\equiv q(\sigma | A, n, T)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 p &\equiv \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \sigma + \tau \tan(\phi) \\
 &= \sigma + Pa n A^2 \left(\frac{\sigma}{Pa} + T\right)^{(2n-1)} \\
 &\equiv p(\sigma | A, n, T)
 \end{aligned} \tag{2}$$

### 3. 現地變形性推估

現地卵礫石層取樣不易而且容易擾動試體，加上所費甚高，故多數人透過室內重模試體，來推求變形參數。室內試驗有共振柱試驗、動三軸試驗或反覆單剪試驗，但重模後的試體與現地情形不完全相符，所以另一種方式「現地震測試驗」也可以用來量測變形性參數。現地震測可以分為折射法 (refraction method)、反射法 (reflection method) 與表面波頻法 (SASW), Chang, et al. (2014) 為推估野外卵礫石層變形參數，使用震測折射法，根據 P 波波速 (Vp) 與表面波波速 (Vr) 之關係，推估現地卵礫石層動態彈性模數 E、柏松比 v，並建立變形性參數與野外調查因子間之關係式，提供一種僅由野外調查即可推估現地卵礫石層變形參數之方法。表 2 為各地推估之彈性模數與柏松比。

表 1 各地點之強度 A 值 (Chang and Cheng, 2014)

Table 1 In situ Strength A (Chang and Cheng, 2014)

八卦1	八卦2	三義1	三義2	大坑1	大坑2
0.89	0.97	0.75	1.57	1.45	1.02
大肚1	大肚2	大肚3	筆石	新山	新社
1.18	1.26	0.82	1.48	1.03	0.88

表 2 各地之彈性模數與柏松比 (Chang, et al., 2014)

Table 2 In situ elastic modulus and poisson ratio

地點	表面波波速 Vr (m/s)	P波波速Vp (m/s)	彈性模數E (MPa)	柏松比 v
八卦1	188.41	433.53	295.01	0.30
八卦2	298.12	636.81	594.25	0.31
三義1	180.47	370.93	204.46	0.34
三義2	381.46	838.95	1001.19	0.33
大坑1	392.94	804.86	1036.7	0.29
大坑2	352.95	760.26	847.64	0.32
大肚1	352.79	680.39	816.08	0.24
大肚2	375.36	796.73	935.41	0.33
大肚3	338.17	642.39	775.4	0.26
筆石	317.7	843.75	703.68	0.40
新山	288.95	610.05	558.05	0.28
新社	166.29	327.85	185.74	0.28

### 4. 分離元素法之數值分析軟體 (PFC<sup>2D</sup>)

PFC<sup>2D</sup> 是美國 Itasca 公司以分離元素法為基礎所開發之二維顆粒流動程式，以圓形顆粒模擬顆粒間的運動及其相互作用。分離元素法最早被用於模擬顆粒材料之力學行為。近年來被廣泛應用於各式力學行為之試驗及地層、邊坡狀況之研究。PFC<sup>2D</sup> 之運算主要是運動定律 (law of motion)、力與位移定律 (force-displacement law) 如圖 3 所示，運動定律應用於顆粒，而力與位移定律應用於接觸點。接觸點存在於球與球、球與牆之間，在計算期間接觸點可能發生破壞。當接觸點產生相對位移時，必定會產生相對應之作用力 (constitutive law)，新的作用力會使顆粒產生新的位移與轉動，又使接觸點產生新的相對位移。由此反覆地計算下去直到系統達到平衡。

PFC<sup>2D</sup> 內建有接觸勁度模式 (contact stiffness model)、滑移模式 (slip model) 與鍵結模式 (bonding model) 三種。本研究探討之卵礫石地區膠結性皆不佳、鍵結強度低，因此於模擬卵礫石材料時不採用鍵結模式。雙軸試驗屬於靜態試驗，阻尼的部分只使用了局部阻尼 (local damping)，因為黏滯阻尼 (viscous damping) 只適用於模擬動態行為。本研究局部阻尼採用預設值 0.7，黏滯阻尼設定為 0。

## 二、微觀參數的決定

本研究對卵石、礫石、土壤 (基質) 之定義係根據統一土壤分類法 (USCS)。由於卵礫石顆粒較大，如果要在現地採樣耗時且費力。因此有些學者透過影像分析方法來推估現地之粒徑，本研究各地現地粒徑修改於鄭敏杰 (2011) 之影像分析結果，繪製粒徑分佈曲線 (圖 4)。由影像分析之卵礫石含量範圍介於 72.3% ~ 88.42% 與張吉佐 (1996) 對台灣中部地區卵礫石層所調查之含量範圍相近。本研究對含量之定義如下：

$$\text{卵礫石含量} = \frac{\text{卵礫石面積}}{\text{卵礫石面積} + \text{基質顆粒面積}}$$

利用數值模擬軟體 PFC<sup>2D</sup> 進行雙軸試驗來求得強度及變形性參數，模型之粒徑依照各地現地粒徑大小、比例，由於總顆粒數過多，因此本研究採用之粒徑範圍最小至 8 號篩 2.38 mm，將卵礫石材料中之基質 (小於 4.75 mm) 以 2.38 ~ 4.75 mm 的代表。因為各地點的顆粒大小、數量不同，且原先由影

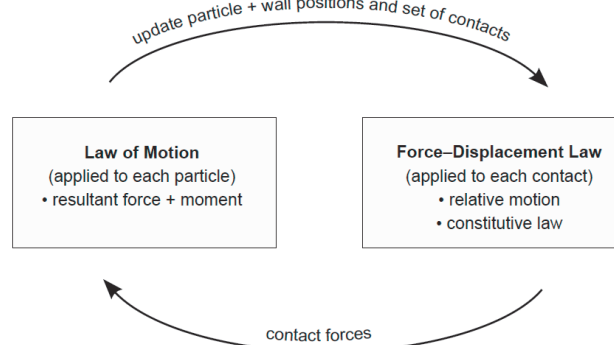


圖 3 PFC<sup>2D</sup> 之運算模式 (PFC<sup>2D</sup> Manual, 2004)

Fig.3 PFC<sup>2D</sup> calculation mode

像辨識所得之現地粒徑乃個別顆粒之粒徑，如一一指定顆粒大小輸入極為費時，因此採用等面積比例調整將顆粒依粒徑範圍分組輸入，並且使試體接近 1 m x 1 m。圖 5 為雙軸試驗模型，模擬卵礫石層試驗情況，但其中並未考慮真實的卵礫石形狀，而以圓形顆粒取代現地橢圓形卵礫石，簡化形狀並加以模擬。雙軸試驗圍壓設定為 100 kPa。進行加壓時會記錄試體之軸向應變、體積應變、軸差應力，繪製軸向應力軸差應變曲線、軸向應力體積應變曲線如圖 6、7 所示，可以得到卵礫石材料之強度 A(由 1、2 式求出)、彈性模數 E 與柏松比  $\nu$ ，彈性模數取 1/2 最大軸差應力時軸差應力與軸向應變之斜率，柏松比取 1/2 最大軸差應力時軸向應變與體積應變之斜率來計算。參考野外調查所推估之強度 (表 1) 與變形性 (表 2) 參數為目標值，反推 PFC<sup>2D</sup> 之微觀參數。本研究於 PFC<sup>2D</sup> 中使用的微觀參數有正向勁度 kn、切向勁度與正向勁度比 ks/kn、摩擦係數 f。

以震測試驗求得之彈性模數為動態彈性模數，雙軸實驗所得為靜態彈性模數，動態彈性模數會大於靜態彈性模數。但彈性模數和應力程度 (stress level) 有關，應力程度越大彈性模數也越大，以邊坡表面低圍壓環境之材料施作震測試驗所得之動態彈性模數會低於其內部圍壓較高之動態彈性模數。因此研究即以邊坡表面震測所得之動態彈性模數來表示 100 kPa 圍壓環境下之靜態彈性模數。以現地震測所得之彈性模數介於前人推估之靜態彈性模數範圍內，所以此假設方式尚且合理。

PFC<sup>2D</sup> 為二維數值軟體，在計算彈性模數、柏松比時須將二維結果轉換為三維，根據 Potyondy and Cundall (2004) 提到轉換方法如 (3)、(4) 式。

$$E = E'(1 - \nu^2) \tag{3}$$

$$\nu = \frac{\nu'}{1 + \nu'} \tag{4}$$

- E：三維之楊氏模數
- E'：二維之楊氏模數
- $\nu$ ：三維之柏松比
- $\nu'$ ：二維之柏松比

表 3 各地點反推之微觀參數

Table 3 Micro parameters by inverse analysis

地點	野外推估			數值模擬			微觀參數		
	A/ $\sigma_1$ (kPa)	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_1$	E (MPa)	$\nu$	kn (Pa)	ks/kn	f
八卦2	0.95/505	594	0.31	529.8	557	0.29	1.4E+9	0.01	0.35
三義1	0.75/381	204	0.34	376.7	174	0.337	5.6E+8	0.08	0.25
三義2	1.57/1038	1001	0.33	1067.6	1036	0.33	2.5E+9	0.2	1
大坑1	1.45/916.7	1036.7	0.29	892.5	1052	0.287	2.3E+9	3	0.9
大坑2	1.02/553.6	847.6	0.32	551.5	803	0.329	1.7E+9	1.6	0.45
大肚1	1.18/675.7	816	0.24	696.6	813.8	0.244	1.8E+9	0.5	0.55
大肚2	1.26/742	935.4	0.33	731	919.6	0.335	3.0E+9	0.1	0.52
大肚3	0.82/422	775.4	0.26	429	772	0.256	1.5E+9	0.04	0.16
筆石	1.48/946.3	703.7	0.4	974	700	0.418	3.0E+9	0.045	1.15
新社	0.88/459	185.7	0.28	463	198.8	0.289	5.6E+8	0.08	0.25

本研究調查地點共 12 處，為了做後續的驗證，先取 10 處做反推參數，另外 2 處 (八卦 1、新山) 進行驗證。反推微觀參數如表 3，kn 介於 5.6E+8 ~ 3.0E+9 Pa、ks/kn 在 0.01~3 之間而 f 則在 0.25 到 1.15 的範圍內，將 kn、ks/kn、f 分別對野外推估強度 A、彈性模數 E 與柏松比  $\nu$  做複迴歸分析可以得到 (5)、(6)、(7) 式，式中 E、kn 的單位為 MPa，由於現地粒徑最大只達到 275.4 mm，故此複迴歸式適用範圍需在最大粒

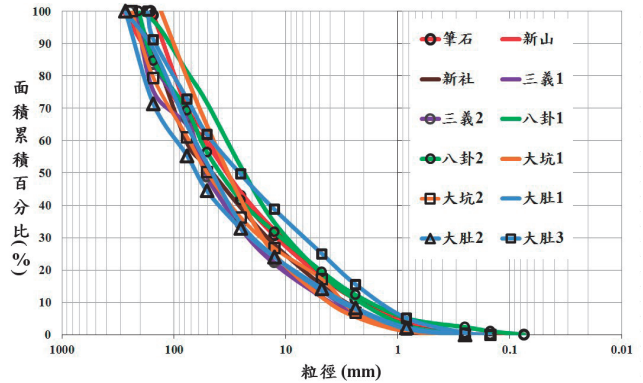


圖 4 各地區粒徑分佈曲線圖

Fig.4 In situ particle size distribution

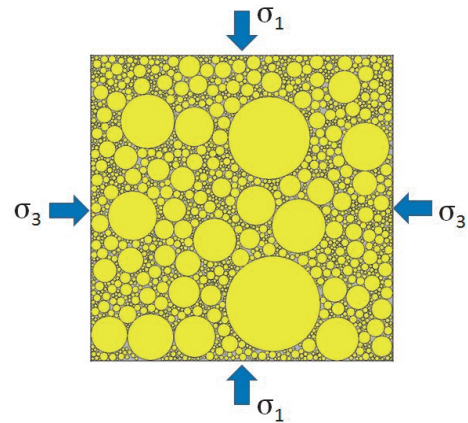


圖 5 雙軸試驗模型示意圖

Fig.5 Illustration of the biaxial test model

徑小於 275.4 mm 的情況。再將作為驗證地點之強度 A、彈性模數 E 與柏松比  $\nu$  代入 (5)、(6)、(7) 等 3 個式子解聯立, 可得出對應之微觀參數, 接著再進行數值雙軸試驗, 求出對應的宏觀參數如表 4, 在迴歸式驗證中八卦 1 強度 A 值誤差為 1.12%、彈性模數 E 之誤差為 20.9%、柏松比  $\nu$  的誤差在 11%; 新山地區強度 A 值誤差為 3.88%、彈性模數 E 之誤差為 15.95%、柏松比  $\nu$  的誤差在 28.57%; 可以發現所有驗證中最大誤差在 28.57%, 最小為 1.12%, 結果令人滿意, 其中以強度 A 值誤差最小, 有最精準且最精確的分析結果。其分析結果可用來決定數值模擬中之微觀參數另一種方法, 讓數值模擬中輸入之微觀參數有一個明確且有意義的依據。

$$A = 0.000127 \cdot kn + 0.02357 \cdot \frac{ks}{kn} + 0.575163 \cdot f + 0.558158 \quad (5)$$

$$E = 0.323642 \cdot kn + 119.2194 \cdot \frac{ks}{kn} - 242.67 \cdot f + 185.4523 \quad (6)$$

$$\nu = 4.29E - 6 \cdot kn - 0.01765 \cdot \frac{ks}{kn} + 0.08927 \cdot f + 0.262748 \quad (7)$$

### 三、卵礫石粒徑大小、含量之影響

本節探討卵礫石粒徑大小、含量對卵礫石層整體強度、變形性之影響, 其模擬方法流程步驟為, 先固定 PFC<sup>2D</sup> 模擬試體之微觀參數, 接著改變卵礫石粒徑大小、含量, 分析粒徑大小與含量對卵礫石層力學性質之影響。

PFC 模擬試體微觀參數之決定參考表 3 反推參數的上下限取其中間值, 使用參數如表 5, 正向勁度  $kn$  為  $8.0E+8$  Pa、切向勁度與正向勁度  $ks/kn$  是 0.3、摩擦係數  $f$  為 0.675, 而局

表 4 迴歸式驗證

Table 4 Error of multiple regression equations

	八卦1			新山		
	kn	ks/kn	f	kn	ks/kn	f
微觀參數	575E+6	0.25	0.44	818.8E+6	2.03	0.556
宏觀參數	$A_0$	$E_0$	$\nu_0$	$A_0$	$E_0$	$\nu_0$
	0.89	295	0.3	1.03	558	0.28
數值模擬	A	E	$\nu$	A	E	$\nu$
	0.88	233.3	0.267	1.07	469	0.2
誤差	$(A - A_0)/A_0$	$(E - E_0)/E_0$	$(\nu - \nu_0)/\nu_0$	$(A - A_0)/A_0$	$(E - E_0)/E_0$	$(\nu - \nu_0)/\nu_0$
	1.12%	20.9%	11%	3.88%	15.95%	28.57%

表 5 PFC<sup>2D</sup> 使用參數

Table 5 Parameters of PFC<sup>2D</sup>

kn(Pa)	ks/kn	f
8.0E+8	0.3	0.675

註: Local damping 為預設值 0.7, Viscous damping 為 0

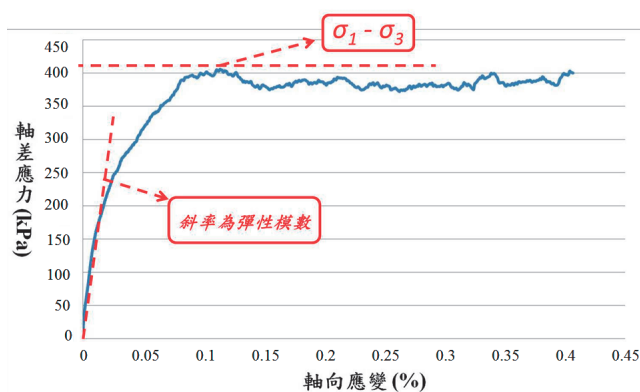


圖 6 軸向應力-軸差應變曲線示意圖

Fig.6 Illustration of deviator strain - stress curve

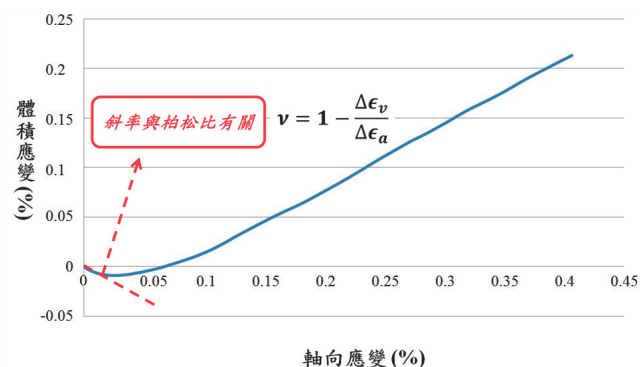


圖 7 體積應變-軸差應變曲線示意圖

Fig.7 Illustration of deviator strain - volumetric strain curve

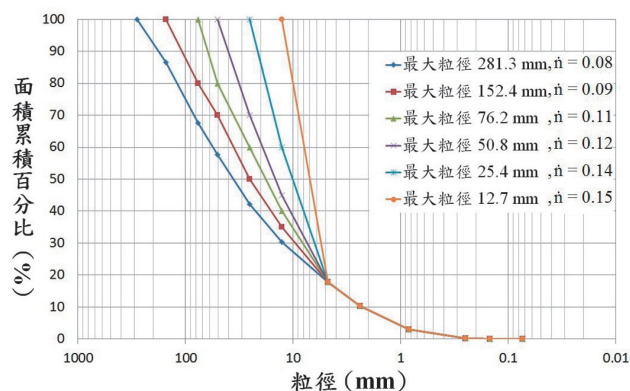


圖 8 卵礫石粒徑大小變異

Fig.8 The variation of maximum gravel size

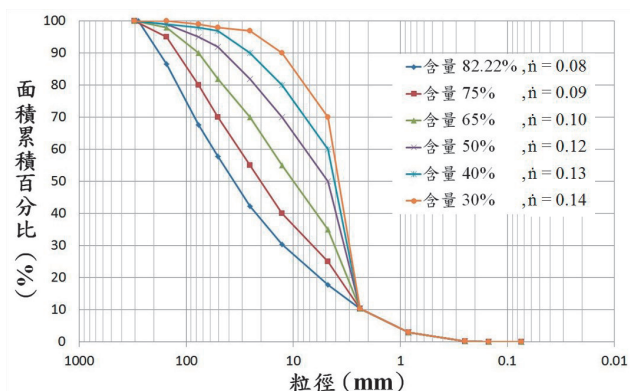


圖 9 卵礫石含量變異

Fig.9 Variation of gravel contents

部阻尼採用預設值 0.7，黏滯阻尼設定為 0。卵礫石粒徑大小、含量調整如圖 8、9。圖 8 之粒徑分布曲線在粒徑 4.75 mm 下都有相同粒徑，最大粒徑分布範圍在 12.7 mm 到 281.3 mm 之間，而孔隙率 ( $n$ ) 介於 0.08 ~ 0.15 之間；圖 9 的粒徑分布曲線粒徑在 2.38 mm 以下有相同之曲線，其礫石含量介於 30 %~82.22 %，孔隙率 ( $n$ ) 在 0.08 到 0.14 範圍內。PFC<sup>2D</sup> 在模擬試體時，改變卵礫石粒徑分布與卵礫石含量會有不同的孔隙率產生，因此在模擬時盡可能使試體之孔隙率 ( $n$ ) 接近，避免孔隙率造成重大結果之誤差影響。模擬結果顯示如圖 10，當卵礫石最大粒徑越大、卵礫石含量越多，強度 A 值、彈性模數 E 與柏松比  $\nu$  也跟著越大，皆成正相關，表示卵礫石顆粒越大、含量越高之卵礫石材料其強度越大，變形性越小。

再來探討卵礫石大小、含量對於莫爾庫倫破壞準則中的摩擦角  $\phi$ 、凝聚力  $c$  的影響，要取得  $\phi$ 、 $c$  參數必須要兩組圍壓下的最小主應力  $\sigma_3$  與最大主應力  $\sigma_1$ ，進行圍壓 100 kPa 與 200 kPa 之模擬即可求得  $\phi$ 、 $c$  參數，凝聚力  $c$ 、摩擦角  $\phi$  的求法主要透過公式  $\sigma_1 = 2c \cdot \tan(45 + \frac{\phi}{2}) + \sigma_3 \cdot \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$  計算。模擬結果如圖 11，當卵礫石粒徑大小較大、含量較多的情況摩擦角  $\phi$  較大；而凝聚力  $c$  略為下降，表示卵礫石粒徑大小越大與含量越多之情況下，對於卵礫石層強度來說，摩擦角  $\phi$  相

對於凝聚力  $c$  有較大之影響力，最後呈現  $\phi$  大  $c$  小之情況，此結果與前人研究相似。

### 四、結 論

本研究利用分離元素法軟體 PFC<sup>2D</sup> 二維數值模式，以台灣中部卵礫石層為對象，模擬分析卵礫石層力學性質，並探討卵礫石粒徑大小和含量對力學性質的影響。由野外調查推估出對照值 (強度 A 值、彈性模數 E 與柏松比  $\nu$ )，經 PFC<sup>2D</sup> 雙軸試驗反推合理之微觀參數 (正向勁度  $kn$ 、切向勁度與正向勁度比  $ks/kn$  與摩擦係數  $f$ )，並利用複迴歸分析建立關係式，迴歸式經驗證後結果合理。

前人研究指出了卵礫石粒徑大小、卵礫石含量是影響卵礫石材料力學性質重要因子。本研究試著改變卵礫石粒徑分布與卵礫石含量，進行 PFC<sup>2D</sup> 數值模擬分析，經模擬試驗結果得知，卵礫石之粒徑大小、含量與其材料強度 A、彈性模數 E、柏松比  $\nu$ 、內摩擦角  $\phi$  有正相關現象；而凝聚力則是相反，有負相關的趨勢。即當我們在野外觀測卵礫石層，如果發現卵礫石粒徑大小越大、含量越多，則可以初步推估此卵礫石層有較大的剪力強度與較小的變形性，其中剪力強度屬於凝聚力小、摩擦角大之組合。

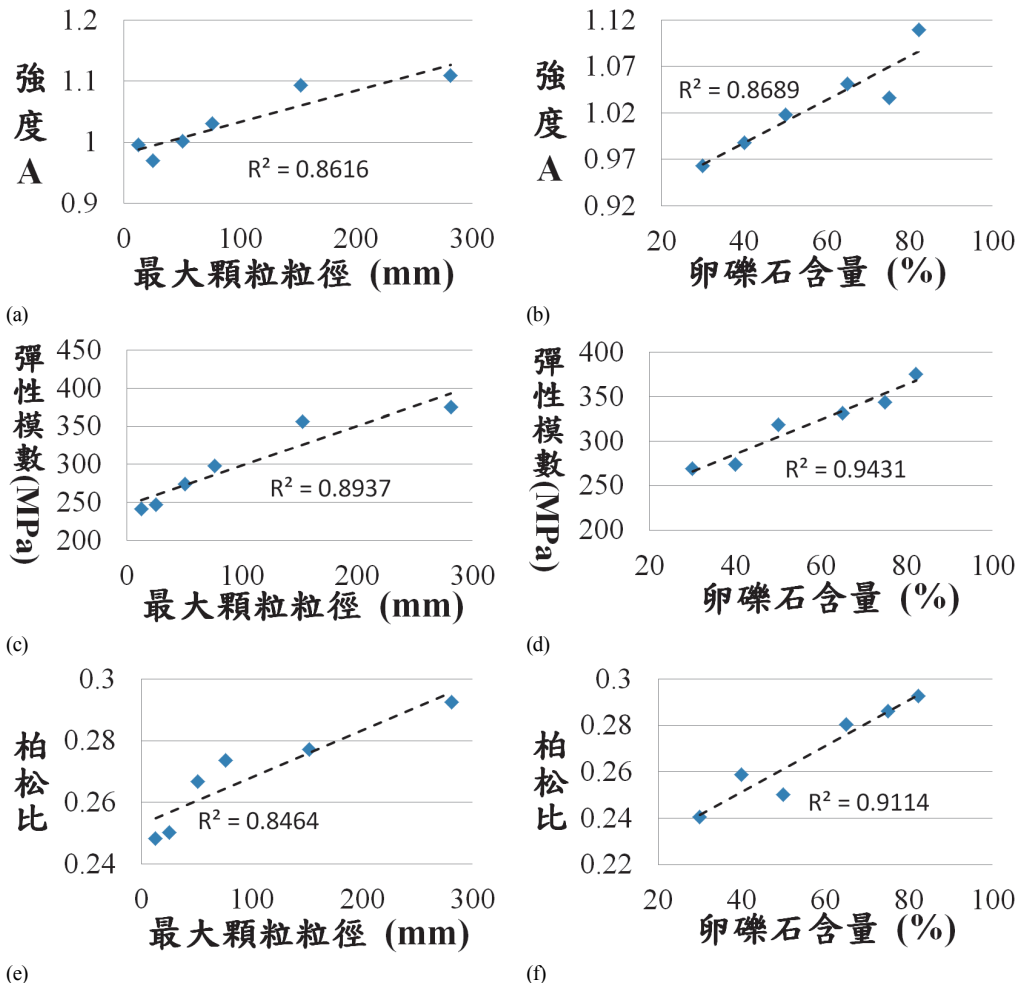


圖 10 卵礫石粒徑大小、含量對強度及變形性之影響

Fig.10 The influence of maximum gravel size and gravel contents on strength and deformation

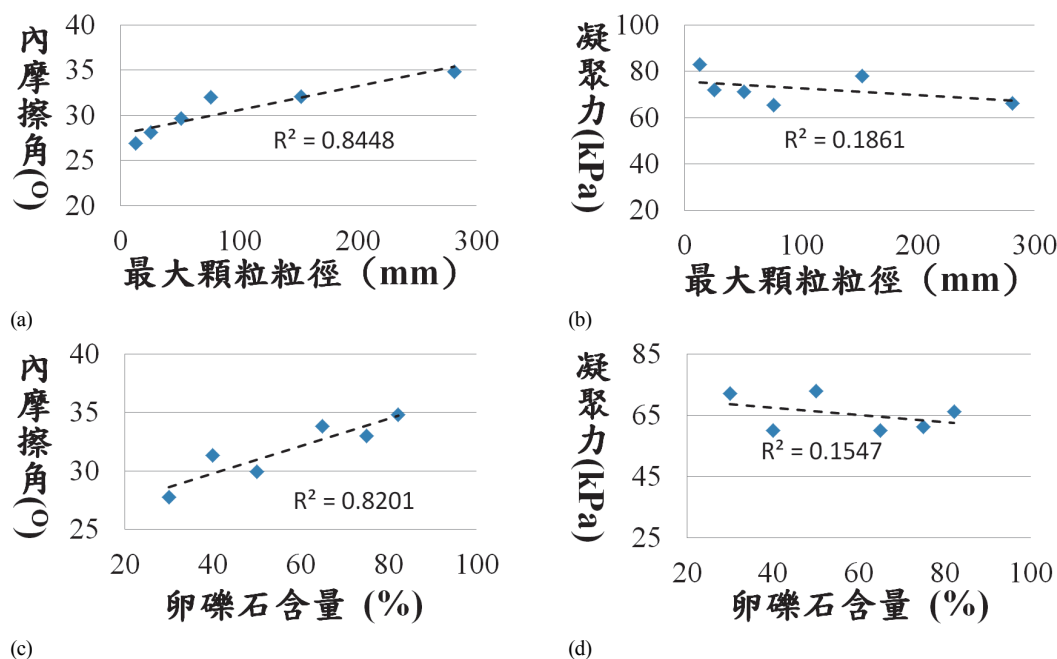


圖 11 卵礫石粒徑大小、含量對  $\phi$  及  $c$  之影響

Fig.11 The influence of maximum gravel size and gravel contents on internal friction angle and cohesion

## 參考文獻

- [1] 李明勳 (2000), 「卵礫石隧道開挖變形行為最佳化數值分析」, 碩士論文, 國立台灣科技大學營建工程系。(Lee, M.S. (2000). "A Study of the Deformation Behavior of Gravel Tunnel based on Back Analysis by Optimization Method." Master thesis, National Taiwan University of Science and Technology. (in Chinese))
- [2] 張吉佐、陳逸駿、嚴世傑、蔡宜璋 (1996), 「台灣地區中北部卵礫石層工程性質及施工探討」, 土工技術, 第 55 期, 第 35-46 頁。(Chang, C.T., Chen, Y.C., Yen, S.C., and Tsai, Y.C. (1996). "Study of engineering properties and construction method for gravel formations in central and northern Taiwan." *Sino-Geotechnics*, 55, 35-46. (in Chinese))
- [3] 黃崇仁、司徒銳文 (1995), 「台中大肚山台地卵礫石層承載特性調查實例」, 國際卵礫石層地下工程研討會, 第 41-50 頁。(Huang, C.J., and Szu Tu, J.W. (1995). "Investigation of bearing capacity for the gravel formation at Taichung Dadu tableland." International Symposium of In Underground Gravel Formations Engineering, 41-50. (in Chinese))
- [4] 褚炳麟、潘進明、張國雄 (1996), 「台灣西部卵礫石層現地之大地工程性質」, 土工技術, 第 55 期, 第 47-58 頁。(Chu, P.L., Pan, C.M., and Chang, K.H. (1996). "Field geotechnical engineering properties of gravel formations in western Taiwan." *Sino-Geotechnics*, 55, 47-58. (in Chinese))
- [5] 鄭文隆 (1986), 「室內試驗方法對夯實紅土礫石材料力學性質之研究」, 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。(Cheng, W.L. (1986). "Characteristics of compacted gravelly laterite through laboratory studies." National science council. (in Chinese))
- [6] 鄭敏杰 (2011), 「以野外調查與分離元素法評估卵礫石層強度性質」, 碩士論文, 國立中興大學水土保持學系。(Cheng, M.C. (2011). "Evaluation of strength properties of gravel formations based on field investigation and the discrete element method." Master thesis, National Chung Hsing University. (in Chinese))
- [7] 蔡明欣、陳錦清、王銘德 (1995), 「台灣西部地區卵礫石層現地抗剪強度研究」, 國際卵礫石層地下工程研討會, 第 21-30 頁。(Tsai, M.H., Chern, J.C., and Wang, M.T. (1995). "Study on the in situ shear strength of the gravel formations in western Taiwan." International Symposium of In Underground Gravel Formations Engineering, 21-30. (in Chinese))
- [8] Baker, R. (2004). "Non-linear strength envelopes based on triaxial data." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, 498-506.
- [9] Coli, N., Berry, P., and Boldini, D. (2011). "In situ non-conventional shear tests for the mechanical characterization of a bimrock." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(1), 95-102.
- [10] Chang, K.T., and Cheng, M.C. (2014). "Estimation of the shear strength of gravel deposits based on field investigated geological factors." *Engineering Geology*. doi: 10.1016/j.enggeo.2013.12.014.
- [11] Chang, K.T., Kang, Y.M., and Cheng, M. C. (2014). "Mechanical properties of gravel deposits estimated with non-conventional methods." *Engineering Geology*. (under review).

- [12] Hsu, S.C., Lin, S.C., and Hsu, W. (2012). "Shear strength modeling of gravel formation using distinct element method." in *Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4*, 1663-1668.
- [13] Itasca Consulting Group Inc. (2004). *Particle Flow Code in 2 Dimensions*, Version 3.1, Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, MN, USA.
- [14] Potyrdy, D., and Cundall, P. (2004). "A bonded-particle model for rock." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 1329-1364.
- [15] Xu, W.J., Xu, Q., and Hu, R.L. (2011). "Study on the shear strength of soil-rock mixture by large scale direct shear test." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 48, 1235-1247.

---

2014年01月20日 收稿

2014年02月18日 修正

2014年03月10日 接受

(本文開放討論至2014年12月31日)