蜂巢格網加勁土壤力學特性之研究

沈哲緯^{1,2} 陳榮河³

摘要

蜂巢格網(geocell)係以聚合材料片版,經超音波熔接而成之蜂巢狀立體結構,應用範圍廣泛, 具有抗化學性、耐酸鹼、輕便易攜帶、施工快速及成本低廉等優點,且以往加勁材(geosynthetics) 力學特性之研究,多集中地工織物(geotextiles)或地工格網(geogrids)範疇,針對蜂巢格網(geocells) 進行試驗與分析仍少,因此目前仍缺乏相關設計參數提供設計之用。本研究針對高密度聚乙烯製 造而成之蜂巢格網,以內填氣乾砂土與現地礫石土之大型三軸試驗,針對不同土壤種類、不同相 對密度砂土與不同粒徑礫石為試驗變因,探討蜂巢格網加勁土壤之力學特性,其試驗結果有助瞭 解加勁土壤效益與力學機制,其成果亦能提供工程設計參考。

關鍵字:蜂巢格網、三軸試驗、加勁土壤

Mechanical Characteristics of GeocellReinforced Soils

Che-Wei Shen^{1,2} Rong-Her Chen³

¹Associate Researcher, Disaster Prevention Technology Research Center, Sinotech Engineering Consultants, INC., Taiwan

² Ph.D Student, Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taiwan

³ Professor, Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taiwan

ABSTRACT

Geocell is a three-dimensional hexagonal structure made ofpolymeric sheets with ultrasonic welding. The advantages of using geocells are resistant to chemical and acid corrosion, easy to transport, rapid for construction, and economic in cost. Over the past years, the research on geosynthetics has focused mainlyon geotextiles and geogrids, while analysis or test on geocells remains relatively few ; thus the design using geocells is lack of parameters. The focus of this study was through triaxial tests on geocells made of high density polyethylene (HDPE) and filled with air-dried sands and gravelsof different sizes andrelative densities to evaluate the mechanism of thereinforced soils. The results of this study will help to understand and clarify the mechanical characteristics of geocelland will also provide reference of parameters for engineering design.

Key Words: Geocells, Triaxial test, Reinforced soil.

¹ 財團法人中興工程顧問社 防災科技研究中心副研究員

² 國立臺灣大學 土木工程學系博士生

³ 國立臺灣大學 土木工程學系教授

一、前言

在生態意識抬頭的現今,過度使用水泥材料可能會 爲人所詬病,尤其政府現正大力推廣生態工法,各界希 望選擇之工法在兼顧安全性的同時,亦能營造符合永續 發展之生態環境。目前生態工法大都採用砌石或石籠等 石材爲主之工法,故造成石材嚴重缺乏,因此,尋求其 他符合生態工法基本要求的材料,更顯得刻不容緩。1977 年由美國陸軍工兵署水道實驗室 Webster 提出以蜂巢格 網加勁路基觀念後,良好之加勁效果才受到世人矚目, 於1990年中東波斯灣戰爭,美軍亦採用蜂巢格網鋪設於 沙灘,使得重型武器、車輛能順利搶灘成功,此應用也 讓蜂巢格網正式展現於世人眼前(Webster, 1981)。

蜂巢格網係以聚合材料片版,經超音波熔接而成之 蜂巢狀網狀結構,應用範圍廣泛,具有抗化學性、耐酸 鹼、輕便易攜帶、施工快速及成本低廉等優點,且以往 加勁材力學特性之研究,多集中於地工織物(geotextiles) 或地工格網(geogrids)範疇,針對蜂巢格網(geocells)進行 試驗與分析仍少,且蜂巢格網加勁土壤發展時間甚短 (Presto Products Company, 2002),因此,土壤-蜂巢格網複 合材料之力學行為,實有需要進一步探討,期使蜂巢格 網加勁土壤之力學與破壞機制得以釐清,故本研究採用 高密度聚乙烯之蜂巢格網,藉由大型三軸試驗儀,與自 行設計之夯實輔助撐模,針對不同相對密度砂土、不同 內塡土壤(砂土與礫石土兩種)與不同粒徑大小之礫石土 等試驗變因,進行探討加勁土壤力學特性與加勁效益, 其力學參數可供工程設計時參考。

二、文獻回顧

根據中央標準局 CNS-14277 對蜂巢格網定義為:蜂 巢格網係由多層塑膠板,沿垂直平面方向以等距離熔接 方式成型之多層結構產品,展開後呈規則性連續開孔之 格室單元所組成之平面結構,示意如圖 1 所示,相關工 程應用案例如圖2所示。

蜂巢格網具有以下之優點(沈哲緯,2005):

- 1.施工簡單快速,節省工時。所需的人工、機具較少,工 程技術要求不高。施工便利性佳,能順應地形進行鋪 設。
- 2. 內塡材料可就地取材, 减少由外地運送填方材料之工程 成本,且整體工程造價較低廉。
- 3.蜂巢格網收縮時體積小,便於搬運,增加運輸效率。
- 4.蜂巢格網為在工廠以固定的生產流程製造而成,品質較 穩定,材料可靠度高。
- 5.蜂巢格網屬於柔性結構,可容許較大的變形量及沉陷量, 亦能調節應力之分佈。
- 6.蜂巢格網具有綠美化環境景觀,增加工程生態性之特 點。

蜂巢格網加勁土壤研究範圍多爲軟弱地盤加勁承載 力之參數與加勁邊坡剪力強度參數兩部分,其中以地盤 加勁試驗為大宗,針對蜂巢格網加勁邊坡剪力強度參數 研究甚少。Dash 等人(2001)模擬條形基腳設置於砂土層 上方,以蜂巢格網加勁砂土,探討其加勁成效。Mhaiskar 與 Mandal(1992)將蜂巢格網鋪設於軟弱黏土層上,進行 承載力試驗研究,以改變加勁層寬度與高度,藉此探討 承載比與加勁成效。Bathurst 與 Karpurapu(1993)曾針對由 聚乙烯製造而成之蜂巢格網,以大型直剪儀進行其界面 剪力強度試驗(加勁砂土與加勁砂土界面),研究結果發現 加勁前後界面強度不變。Rajagopal 等人(1999)採用地工 織物製成之蜂巢格網進行加勁砂土飽和不排水三軸試驗, 探討不同地工織物種類對剪力強度之影響,結果顯示, 剪力強度大小依序為白色織布(抗張強度 65kN/m)最大、 黑色織布(抗張強度 54.5kN/m)次之、不織布(抗張強度 9kN/m)最小;此外,另於三軸室內置入不同格室數目(高 徑比隨之改變),進行探討外視凝聚力大小與擺放格數之 關係,由不同格數之試驗結果顯示,置入三軸室中格數 越多則外視凝聚力越大,當置入格數達三格後,其外視 凝聚力增幅已有漸緩趨勢。







(a)邊坡穩定



(c)河岸保護防止沖刷 (輔彬公司提供)



(b)護坡植生綠化



(d)增加軟弱地盤承載力 (摘自 Diemand 等人,1996) 圖 2 蜂巢格網相關工程應用案例

三、基本物理性質試驗

內填土壤以粗顆粒土壤為主。試驗用砂為越南金蘭灣砂 砂,砂土粒徑均小於 0.84mm(<#20 篩),細粒料含量(<#200 篩)為 0.21%,平均粒徑 D₅₀為 0.32mm,根據統一土壤分 類為級配不良之砂土(SP)。試驗用礫石土粒徑小於 25.4mm,細粒料含量(<#200 篩)為 1.1%,平均粒徑 D₅₀ 為 15.0mm,根據統一土壤分類法為級配不良之礫石(GP), 試驗結果如表 1 所示。另進行不同粒徑範圍加勁礫石土 之剪力強度探討,主要以粒徑範圍為 12.7mm~25.4mm 及 4.7mm~12.7mm 作為與現地礫石土之比對,各礫石土粒徑 分布曲線如圖 3 所示。

試驗用蜂巢格網係以高密度聚乙烯製造而成,且考 慮加勁土壤重覆與一致性,故蜂巢格網材料展開直徑約 為15cm,接縫寬度為7mm,材料平均厚度為1.25mm, 直立高度為30cm大小的材料為主,其物理性質試驗結果 如表2所示。

國內尚未針對蜂巢格網訂定試驗規範。但由前人研究可知,如Bathurst與Karpurapu(1993)及Rajagopal等人(1999),曾進行蜂巢格網抗張強度試驗,皆採用寬幅抗張強度試驗法(ASTM D4595-86)進行,故本研究也根據其建議試驗方式,採用拉伸速率10mm/min,進行抗張強度試驗。抗張強度-應變曲線結果顯示,所得之最大抗張強度為17.0kN/m,斷裂延伸率為44.5%,初始切線抗張模數為492.0kN/m,試驗結果如圖4所示。

Parameter	Sand	Gravel
Moisture content, ω (%)	0.05	3.75
Specific gravity, ρ	2.67	2.59
Max. unit weight, γ_{dmax} (kN/m ³)	16.1	14.7
Min. unit weight, y _{dmin} (kN/m ³)	14.4	13.9
Coefficient of uniformity, C _u	2.02	2.93
Coefficient of curvature, C _c	0.97	1.17

表1 試驗用土壤物理性質試驗結果

Material	HDPE
Specific gravity	0.95
Thickness (mm)	1.3
Mass per unit area (g/m ²)	894.3
Height (cm)	30
Point welded spacing (cm)	24.5





Cancelli 等人(1993)建議,蜂巢格網須考量三種接縫 強度試驗,分別是接縫剪力強度(junction shear strength)、 接縫剝脫強度(junction peel strength)與接縫拔裂強度 (junction split strength),本研究採用試體總長度為 20cm, 試體寬度為 20cm,接縫寬度為 7mm,及拉伸速率 10mm/min 進行接縫強度試驗,試體尺寸與接縫型式如圖 5 所示。試驗結果顯示,最大接縫剪力強度為 13.5kN/m, 所對應之位移量為 21mm;最大接縫剝脫強度為 9.5kN/m, 所對應之位移量為 23mm;最大接縫拔裂強度為 12.85kN/m,所對應之位移量為 17.5mm。由試驗結果可 知,接縫強度中以接縫剪力強度最大,接縫拔裂強度次 之,最小者為接縫剝脫強度,試驗結果如圖 6 所示。



(a) junction peel strength



(b) junction shear strength (c) junction split strength



(a)接縫剝脫強度



(b)接縫剪力強度

202					2
12+	++	+-+-+	-+-+	1 1	·du
10)	L	1-1-1			sch
					Pie !!
1		+ + +	+++	11	- ma

(c)接縫拔裂強度 圖 5 接縫強度試驗型式示意圖



四、加勁土壤試驗結果

根據文獻回顧結果,本研究設計三軸試驗尺寸與試 體製作方法。

Bathurst與Karpurapu(1993)針對高徑比為1之三軸試 體,進行加勁砂土飽和不排水三軸試驗,由應力-應變曲 線得知,高徑比為1之軸差應力會比高徑比為2之三軸 試體大,原因皆為端座效應之影響。Bishop與Green(1965) 建議土壤三軸試體高徑比應大於等於2,如此可避免端座 效應影響,故本研究採用高徑比為2的試體進行三軸試 驗。此外,本研究採用均勻砂土及現地礫石土為土壤試 樣,主要目的係以均勻砂土歸納加勁砂土特性外,另參 考許世宗(2003)進行砂土三軸試驗結果指出,當試體直徑 大於5cm時,可克服砂土三軸試驗尺寸效應。此外,以 實際用於回填的礫石土樣進行試驗,期探討礫石土加勁 土壤特性。選用的礫石土參考Bathurst與Karpurapu(1993) 建議,控制在直徑1英吋以內,以免過大的粒徑導致強 度參數高估現象發生。

加勁土壤試驗以三軸試驗進行(儀器配置如圖 7),採 用直徑 15cm(夯實完成的加勁試體外徑)、高 30cm 及平均 厚度為 1.25mm 之高密度聚乙烯蜂巢格網,內塡氣乾砂土 及礫石土形成複合材料;密度控制以自行設計之夯實輔 助撐模配合乾搗法及振動法進行以達預期之密度。研究 內容主要就不同相對密度砂土、不同土壤種類及不同粒 徑大小之礫石土等,進行加勁土壤力學特性之探討,以 瞭解蜂巢格網加勁土壤受力與變形機制。三軸試驗結果 彙整如表 3 所示。

蜂巢格網內填土之密度控制為一難題,常無法精確 掌握內填土密度。本研究初期曾以較多分層方式進行, 將內填土分10層夯實,但試驗結果之最大軸差應力明顯 不合理,故自行設計夯實輔助撐模,並以內徑規量測每 層平均內徑,秤不同砂量填入其中,藉由夯實輔助撐模 搭配乾搗法及振動法相互使用,即可達到預期之密度。 夯實輔助撐模為中空鍍鋅鐵管製成,且配合三軸試體尺 寸,撐模尺寸高為31cm(比試體高1cm,目的是便於抬升 過程中,具有撐住下一層內徑功用),外徑為14.9cm,內 徑為13.9cm,撐模壁厚為5mm,且撐模內外皆有尺度, 以提供夯實過程中控制夯實土壤高度用。



1.不同圍壓下之應力-應變行為

加勁土最大軸差應力會隨土壤相對密度與圍壓增加 而增加,有明顯陡升現象,即是具有較高之軸向勁度。 高圍壓時,軸差應力到達尖峰值後即進入殘餘階段,為 明顯應變軟化現象;低圍壓時,應變軟化現象不明顯, 且軸差應力持續上升。內填不同緊密程度砂土之應變軟 化行為,會隨相對密度增加而愈顯著,以相對密度在70% 時試驗結果為例,如圖 8 所示。體積變化方面,加勁砂 土與砂土試體之體積變形有相同趨勢,即是壓縮後隨即 出現剪脹現象,但砂土之體積變化最後會趨於定值,而 加勁砂土因體積會持續膨脹,直至蜂巢格網接縫破裂為 止。體積應變隨圍壓增加而減小,隨相對密度增加而增 加,如圖9所示。三種不同粒徑之加勁礫石土(利用夯實 輔助撐模控制乾密度皆為 14.5kN/m³)由應力-應變曲線得 知,軸差應力隨圍壓增加而增加,且加勁礫石土相較於 未加勁者具有較高之軸向勁度,應力-應變曲線如圖 10 所示。

2.變形模數

圖 11 為加勁砂土於不同相對密度下彈性模數與圍壓 之關係,結果顯示加勁土壤彈性模數會隨著相對密度與 圍壓之增加而增加,與純砂土之三軸試驗結果相同,且 加勁砂土之彈性模數平均約為未加勁前之 1.34 倍。圖 12 為礫石土相對密度 70%時,加勁前後彈性模數與圍壓之 關係。由圖顯示,彈性模數會隨圍壓增加而增加,且隨 圍壓增加而增幅愈大。礫石土彈性模數加勁後提升為未 加勁前之 1.17 倍。三軸試驗所得加勁土之割線體積模數 B,依據彈性理論觀念,可以式(1)表示:

$$B = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_v}{3\Delta\varepsilon_v} \tag{1}$$

 $\Delta \varepsilon_{v}$:體積應變(%)。 $\Delta (\sigma_{1}-\sigma_{3})_{v}$:軸差應力(kPa)。

Δε_v不包含初始圍壓造成之體積變化量,僅考慮加 軸差應力時之體積改變量,如此所計算之割線體積模數 即可反應出施加圍壓後之試體體積變化行為,以加勁砂 土為例,如圖13所示。

試驗結果顯示,割線體積模數隨圍壓與相對密度增 加而增加。由彈性模數與體積模數,可求得砂土平均包 松比為 0.33;而加勁砂土之平均包松比約為 0.17,此顯 示加勁後蜂巢格網具有約束側向變形之優越能力。

3.剪力強度參數

蜂巢格網加勁後會使無凝聚性砂土產生外視凝聚力, 尖峰摩擦角則無明顯變化,故加勁土壤剪力強度來源主 要為外視凝聚力之貢獻。本研究於試驗圍壓範圍內,蜂 巢格網加勁後之尖峰摩擦角與外視凝聚力隨圍壓增加而 增加,試驗結果如圖 14 與 15 所示。另外,蜂巢格網內 填不同礫石土之破壞包絡線,抗剪強度以粒徑 12.7mm~25.4mm 之加勁礫石土最大,而粒徑 4.7mm~12.7mm之加勁礫石土次之,最後為相對密度 70% 之加勁現地礫石土,如圖 16 所示。

加勁砂土於不同相對密度下所得之尖峰摩擦角 ,會 隨相對密度增加而增加,可以下式表示:

$$\phi_{\rm p} = 15.5 \rm D_r + 34.44 \tag{2}$$

加勁砂土於不同相對密度下所得之外視凝聚力 c_r,會 隨相對密度增加而急遽提升,可表示如下:

$$c_r = 72.48D_r + 48.09$$
 (3)

4.加勁成效

本研究定義破壞時之軸差應力比(DS)_f,以作為加勁 效果之評估因子。軸差應力比即是加勁後之尖峰軸差應 力 $(\sigma_{d,geocell})_{max}$ 與未加勁土壤之尖峰軸差應力 $(\sigma_{d,soil})_{max}比值,可以下式表示:$

$$(DS)_{f} = \frac{(\sigma_{d, geocell})_{max}}{(\sigma_{d, soil})_{max}},$$
(4)

圖 17 為加勁砂土在不同相對密度下軸差應力比與圍 壓關係,圖中顯示,軸差應力比會隨圍壓增加而降低, 顯示覆土壓力愈大加勁成效愈低;且軸差應力比會隨相 對密度增加而降低,顯示蜂巢格網對疏鬆砂土之加勁成 效會比加勁緊密砂土為佳。在圍壓範圍 49~196.2kPa內, 軸差應力比約為 1.7~2.8。另由前述加勁砂土體積應變曲 線觀察得知(圖 13),不同相對密度下(D_r=40%、55%、70%),

其中,

圍壓在147.1kPa時,體積應變皆有程度不同的增加趨勢, 研判在圍壓147.1kPa時有明顯剪脹現象(dilatancy)發生, 且相對密度愈高其有效內摩擦角愈大,其剪脹現象愈明 顯。

圖 18 為相對密度 70%時,礫石土加勁前後軸差應力 比與圍壓關係,圖中顯示,軸差應力比會隨圍壓增加而 降低。在圍壓 24.5kPa~147.1kPa 範圍內,軸差應力比範 圍約由 1.4~2.2。

表3 蜂巢格網加勁土壤三軸試驗結果總表

Soil type	Symbol	Dr (%)	γ _d (kN/m ³)	Average υ	Average (DS) _f	c (kPa)	<i>ф</i> р (°)
Sand	s	40	15.0	0.33		0	38.5
		55	15.3		-	0	39.8
		70	15.6		-	0	40.8
Reinforced sand	RS	40	15.0	0.17	2.06	76.1	40.8
		55	15.3		1.99	89.9	42.5
		70	15.6		1.81	97.8	45.5
Gravel	G	70	14.5	-	1.78	17.8	45.5
Reinforced gravel	RG	70	14.5	-	-	64.8	51
	G25.4	-	14.5	-	-	155.1	50
	G12.7	-	14.5	-		161.4	45

註:(DS)_f為加勁後三軸試驗最大軸差應力與土壤三軸試驗最大 軸差應力比值,本研究定義為軸差應力比(deviatoric stress ratio,簡稱(DS)_f)。另外,灰色框內數值為經過蜂巢格網加 勁後產生之外視凝聚力。



圖 8 加勁砂土應力-應變曲線(Dr=70%)





台灣公共工程學刊 第 卷 第 期(二〇 年) Journal of the Taiwan Society of Public Works, Vol., No., pp. ~, 20



圖 14 加勁砂土之外視凝聚力與相對密度之關係



圖 15 加勁砂土之尖峰摩擦角與相對密度之關係



圖 16 礫石土加勁前後之破壞包絡線





5.破壞型態

高圍壓時,由於軸差應力較低圍壓時高,常使接縫 應力集中達破壞應力,導致接縫產生破裂現象;低圍壓 時,接縫受力未達破壞所需之應力,故僅於接縫產生彎 曲之應力集中現象,如圖19所示。

三軸試驗剪動完成後,蜂巢格網材料上會產生明顯 且密集之皺摺,以加勁礫石土較爲顯著,如圖 20 所示。 且於蜂巢格網頂部會產生嚴重壓縮變形,主要是加勁土 壤勁度降低所致。



(a)高圍壓時產生接縫破壞 (b)低圍壓時產生應力集中現象圖 19 不同圍壓下之破壞型態比較



(a)加勁砂土-皺摺較少 (b)加勁礫石土-皺摺明顯且 密集 圖 20 不同加勁土壤之破壞型態比較

五、研究結論

- (1)不同相對密度的加勁砂土試驗結果顯示,高圍壓時之 應變軟化現象相較於小圍壓時明顯;體積應變前期皆 呈現些許壓縮後隨即產生剪脹,且體積應變(剪賬量) 隨圍壓增加而減少,隨相對密度增加而增加。
- (2)加勁砂土之彈性模數隨相對密度及圍壓增加而增加, 體積模數亦具相同趨勢,在圍壓 49kPa~196.2kPa 範圍 內,彈性模數加勁後提升為未加勁砂土之 1.34 倍;加 勁礫石土在圍壓 24.5kPa~147.1kPa 範圍內,彈性模數 提升為未加勁前之 1.17 倍。
- (3)加勁土壤軸差應力比會隨圍壓增加而降低,顯示覆土 壓力愈大則加勁成效愈低;且軸差應力比隨相對密度 增加而降低,顯示蜂巢格網對疏鬆砂土之加勁效果比 緊密砂土為佳。不同加勁礫石土試驗結果顯示,由於 礫石互鎖效應發揮,故相較於砂土具較高之抗剪強度, 且應變軟化現象不明顯。
- (4)蜂巢格網加勁後,摩擦角變化不大,皆是以增加外視凝聚力為主,且以無凝聚土壤之加勁效果較佳。尖峰 摩擦角隨內填砂土相對密度增加而增加,但變化較不 顯著;外視凝聚力隨相對密度增加而急遽增加。

誌 謝

感謝輔彬實業有限公司提供蜂巢格網材料,特此申 謝。

參考文獻

- Bathurst, R. J. and Karpurapu, R., "Large Scale Triaxial Compression Testing of Geocell-Reinforced Granular Soils", *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 16, No. 3, pp. 296-303, 1993.
- Bishop, A. W. and G. E. Green., "The influence of endrestraints on the compressive strength of cohesionless soil", *Geotechnique*, Vol. 15, No. 3, pp. 243-266, 1965.
- Cancelli, A., Rimoldi, P., and Montanelli, F., "Index and Performance Tests for Geocells in Different Applications", Geosynthetic Soil Reinforcement Testing Procedures, ASTM STP 1190, pp. 64-75, 1993.
- Dash, S. K., Krishnaswamy, N. R. and Rajagopal, K., "Bearing Capacity of Strip Footings Supported on Geocell -Reinforced Sand", *Geotextiles and Geomembranes Journal*, Vol. 19, pp. 235-256, 2001.
- Diemand, D., Alger, R., and Klokov, V., "Snow Road Enhancement", *Road Management & Engineering Journal*, 1996.
- 6. Mhaiskar, S. Y., and Mandal, J. N., "Soft Clay Subgrade Stabilization Using Geocells", Geotechnical Special

Publication, Vol. 2, No. 30, pp. 1092-1103, 1992.

- Presto Products Company, "The Geoweb Earth Retention System Technical Overview", USA, 2000.
- Presto Products Company, "The Geoweb Earth Retention System Installation Guideline", USA, 2002.
- Rajagopal, K., Krishnaswamy, N. R. and Madhavi Latha, G., "Behaviour of Sand Confined with Single and Multiple Geocells", *Geotextiles and Geomembranes Journal*, Vol. 17, pp. 171-184, 1999.
- Webster, S. L., "Investigation of Beach Sand Trafficability Enhancement Using Sand-Grid Confinement and Membrane Reinforcement Concepts", Report GL-79-20(2), Geotechnical Laboratory, U.S. Army Engieer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, February, 1981.
- 沈哲緯,「蜂巢格網加勁土壤之力學特性」,臺灣大學 土木工程學研究所碩士論文,台北,2005。
- 許世宗,「宜蘭砂土之應力-應變影響因素之探討」,朝 陽學報,第8期,第79~109頁,2003。