摘要

造成地表積水的因素有許多可能，主要可歸納為積水量與排水量兩個部分。本研究在積水量部分主要研究地形起伏與集水區的關係；而在排水量的部分，主要研究了土壤吸水速率，以及排水系統之排水速率。比較積水量與排水量的差異，可得知研究範圍(本校操場)中最大可承受之積水量，而藉由 GIS 系統的疊圖分析，可以了解研究範圍的地形空間分布，再將前述實驗數據加入，了解學校排水系統日常降雨情況中可以負荷之降雨量，以及可改善校園內積水問題之方向。

壹、 研究動機

在我們學校中，操場會因大雨而產生明顯積水的問題(圖一)，尤其在颱風季節和梅雨季節時，情況更為嚴重，雖然發生頻率不高，但卻依然造成諸多不便與困擾。在學校的地理課程中，學習到 GIS 中的地理疊圖方法，可用於分析潛在的集水區域，與評估周圍排水系統的排水速率；而地球科學課程中的土質分析方法，也可幫助分析問題以及進一步了解原因。因此，本研究想要藉由實際勘查和軟體分析來幫助了解操場積水情況與可能造成此現象相關因素，並為之後排水工程的改進提供一些可參考之資料。

操場湖淹水之情況(圖一)攝於二零一九年九月四日上午 9:48 分,二棟二樓

貳、 研究目的

一、量測操場地區的高低起伏並運用 Matlab 繪製出易淹水地區

二、量測土質的飽和含水量

三、量測學校排水系統可承受之降雨強度

四、藉由 GIS 了解不同地形區所佔之範圍以及交互關係

五、對上述三點進行綜合討論並且估算出淹水所需之降雨強度

參、 研究設備及器材

一、資訊設備

(一) 筆記型電腦：查詢資料、文書處理（Microsoft Office 2016）、數學運算建模（Matlab）、QGIS

手機：相機功能

二、野外勘查設備

(一) 地型高程測量

木架、水平儀、鐵尺（15cm）、鐵捲尺（5.5m、7m 各一）、粉筆、塑膠線(圖三)

(二) 土壤採樣

PVC 水管、鏟子、槌子、保鮮膜

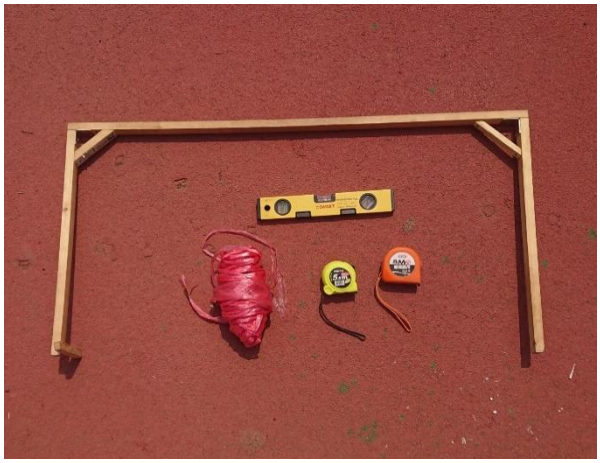
(三) 土壤飽和含水量測量

精密烘箱(圖四)、100 ml 量筒、1000 ml 量筒、滴管、電子磅秤（精度 0.01g）(圖二)

(四) 排水涵道流量測量

鐵捲尺（5.5m、7m 各一）、保麗龍箱、美工刀

實驗器材(圖二)

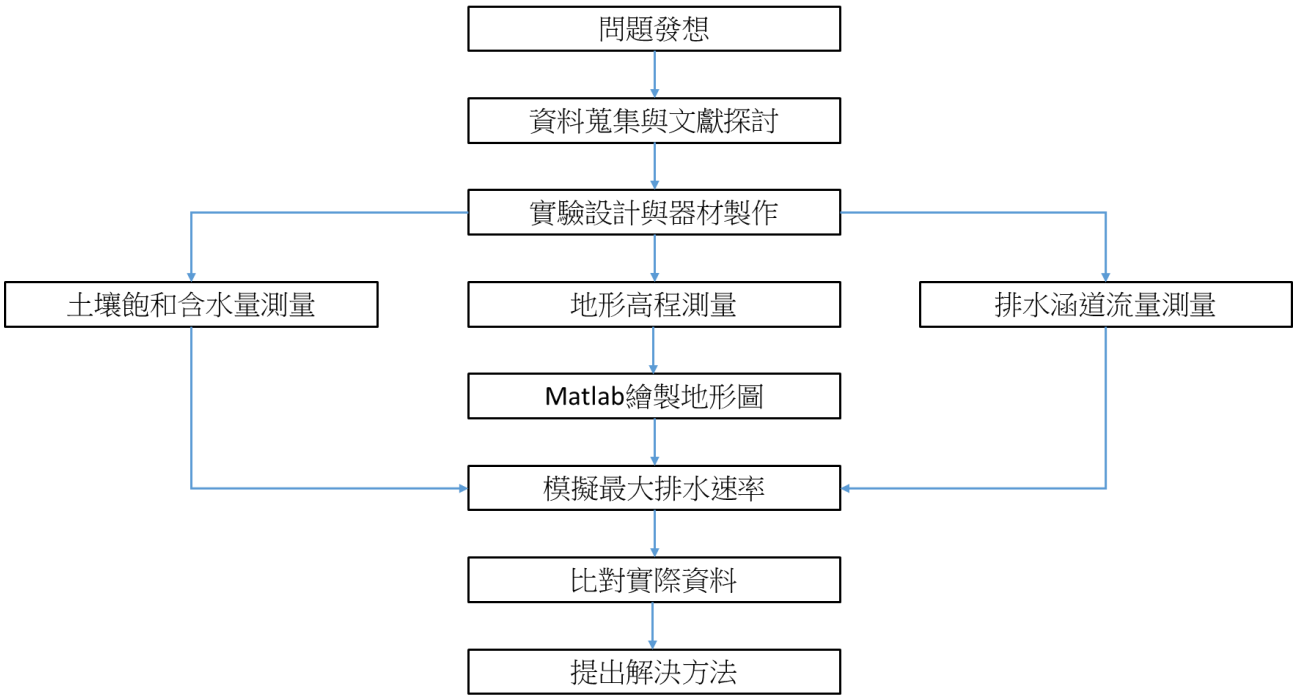


實驗器材(圖三)

精密烘箱(圖四)

肆、 研究過程與方法

一、實驗架構

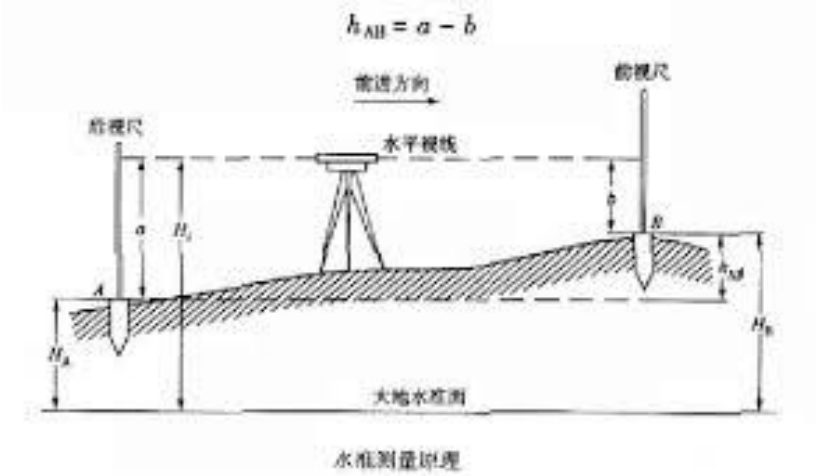


二、實驗流程與方法

(一) 地形高程測量與建模

1. 蒐集數據

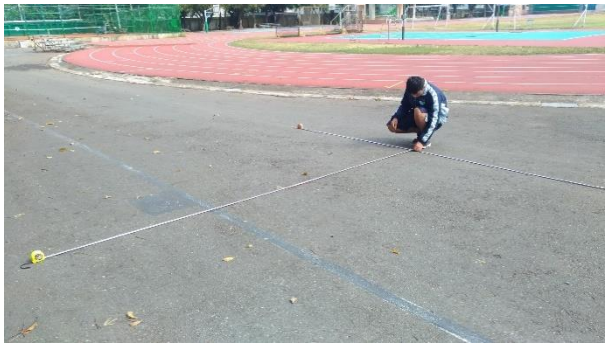
藉由地形測量之高程概念，由點與點之間的高度差累積成為等高線的方式來求得高度資訊，繪製地形圖，以得出其集水區，蓄水量以及水流流向等地理資訊。(地形測量概論)



高程概念示意圖(圖五)

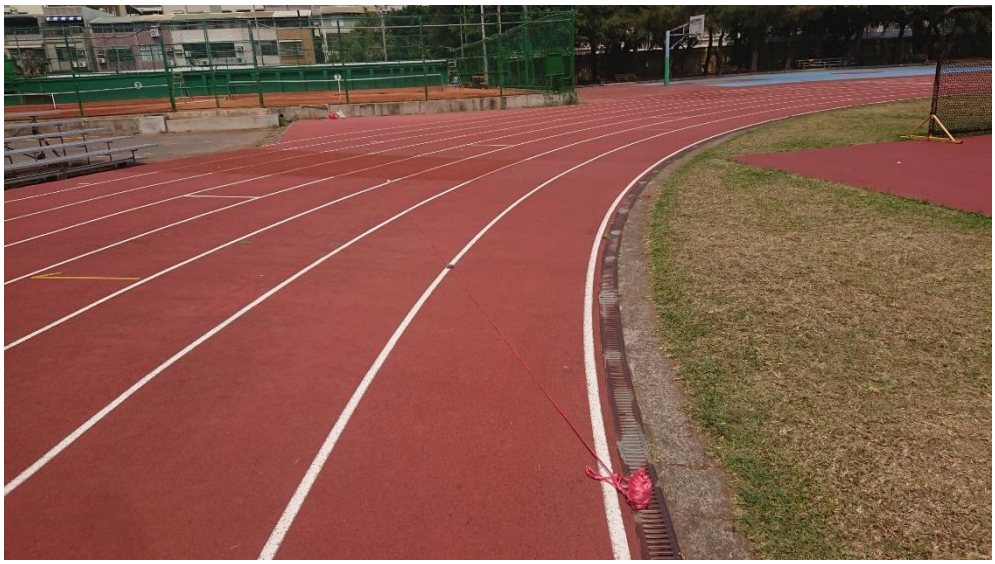
(1) 建立網格座標

在取得高度資訊之前，我們需要先建立起適當的座標系統以利於後續地形圖製作。~~我們~~利用兩把直尺來建立坐標系，並且在沿途的座標點用粉筆畫記，在地塊的分界和基準線等重要位置上~~則~~黏貼標籤以方便日後勘查(圖七)。而在無法標記處(操場草皮區)，則採用拉線方式以確立座標點。(圖八)網格座標密度為操場長軸方向定義為橫向，操場短軸方向定義為縱向。並以兩公尺為間距繪製橫向及縱向網格座標。(圖六)



繪製座標(圖六)

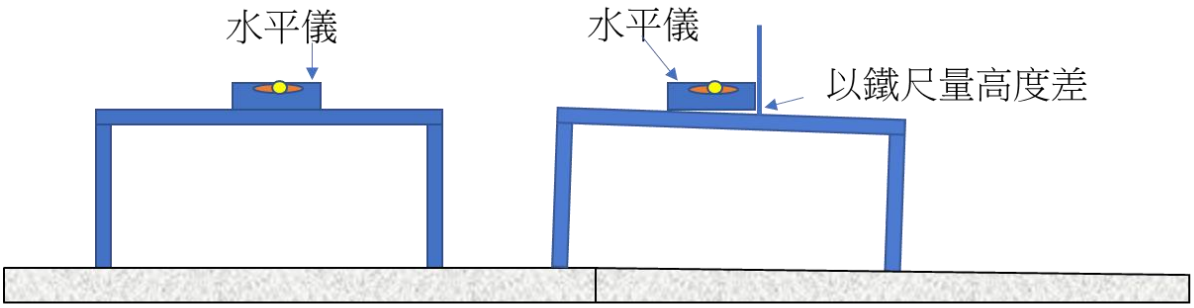
黏貼標記點(圖七)



拉線測量示意圖(圖八)

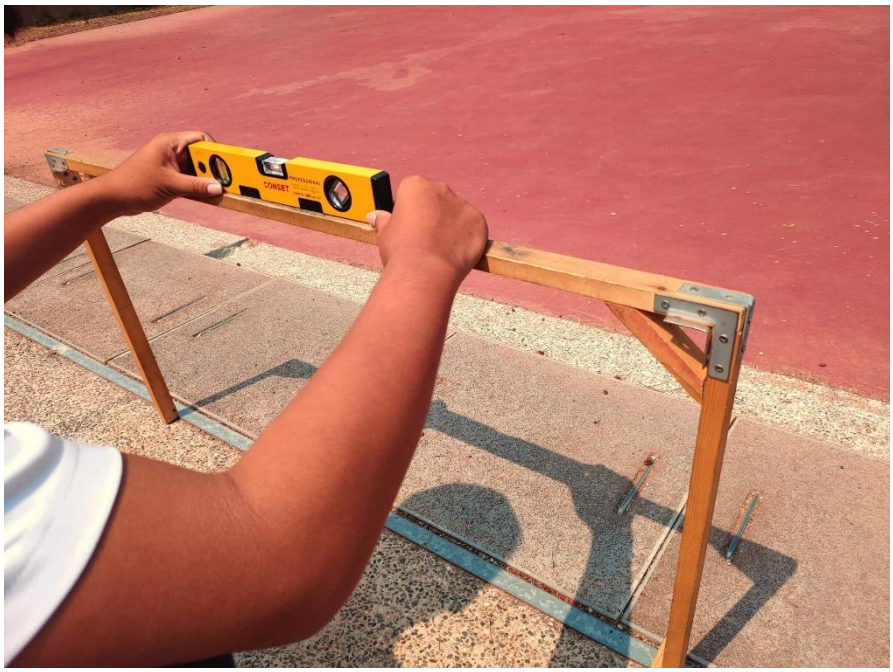
(2)網格座標點間高度差量測

在建構起座標系後，即進行各座標點高度資料的量測。量測中，我們將木架對準相鄰兩個標記點，將水平儀放置其上，並調整至水平位置，紀錄鐵尺刻度。(圖十)相鄰兩點會將木架以相反方向擺放，以抵銷木架本身可能帶有的誤差。量測以沿著縱向量測的方式得出其每條線的高程，最後再沿著橫向取一條橫坐標量測得出相差兩條線之間的高度差。而裝置運作原理是運用相似三角形之等比例放大已得到兩邊實際的高度差。(圖九)而在落差大時，該方法有較大誤差，但由於操場坡度極小，因此採用此簡易方法。



(左)兩標記點間無高度差時。　(右)兩標記點間有高度差時，調整水平儀至水平狀態，並以鐵尺量取高度差。

量測方法示意圖(圖九)



實際測量(圖十)

2. 地形建模

(1) 數據調整

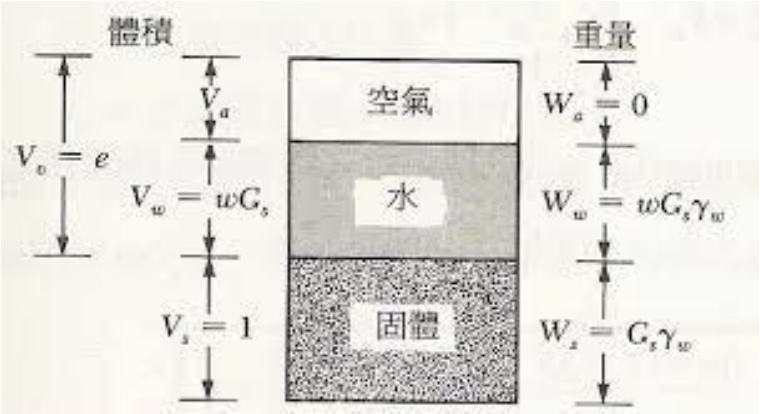
在蒐集完數據之後，蒐集到的數據皆為相鄰兩點之差，我們須將其累加以得到相對高度差的高程。量測時，使用的單位為 0.1 mm，將其單位換算成 cm，以方便日後計算，且水平儀的長度為 30 cm，須將其放大回 1 m 之長度，將數據乘以$\frac{10}{3}$已得到其真正的值。

(2) 地形建模

將整理過後的數據以點資料輸入 Matlab 當中運用 Interpolation 功能進行內插，以得出其地形圖與等高線圖，並且運用 Matlab 內建程式計算蓄水處體積，得到可蓄水量以及地形等地理資訊。

(二) 土壤飽和含水量測量

土壤所含之成分有水、土壤、以及空氣三大部分。(土壤力學,劉浩吾)(圖十一)



土壤三相圖(圖十一)

為瞭解在操場的土樣之中，三相態各占多少比例，以及土壤中還有多少空間可儲存水分，而對土壤進行分析。本實驗先將定容之塑膠水管(100 ml)以敲打方式敲入土壤當中(圖十二)，將其挖起後(圖十三)，以保鮮膜封裝。

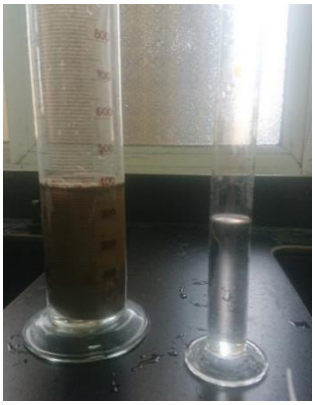
敲入水管(圖十二)

取出水管(圖十三)

取回之土壤，將經由下列的程序與處理。

1. 將取回之土樣拆封後，先秤初重。(圖十四)
2. 再將採得之土樣放入烘箱烘 24 小時(110 ℃ ± 1 ℃)(土壤力學手冊,倪勝火)，以去除其土壤中的水分。(圖十六)
3. 乾燥後再度測量重量，相減以得到其水分之含量。
4. 將烘乾之土樣放入大量筒中，加入定量的水後充分攪拌，以得出固體部分之體積，得出其三相之比例與最多可容納之水量。(圖十五)

採得之土樣(圖十四)



浸水測量體積(圖十五)

精密烘箱設定(圖十六)

在得出能夠吸收多少水後，就需要了解水份在土壤中滲流的速度有多快。而土壤之滲流速率在黏土以及粉土中極慢(土壤力學,劉浩吾)，不易進行實驗，因此本實驗採取實際測量的方式，挖開土壤，由肉眼觀察到土壤有形成一條明顯的乾濕土壤界線，在再用直尺貼合土壤之斷面測量該線之深度，由於滲透率為水分在土壤中向下滲流之速率，我們藉由實際測量來水分實際向下的深度推論降雨一小時後土壤滲透之速率。

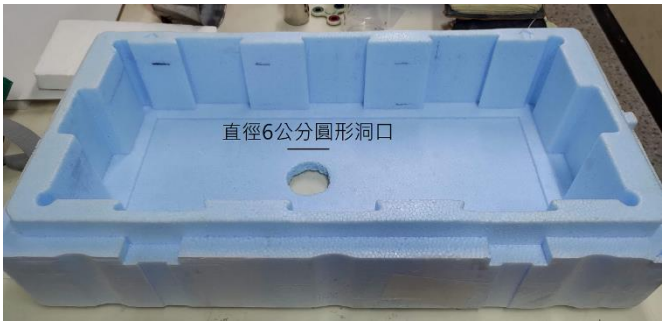
浸濕土壤深度調查(圖十七)

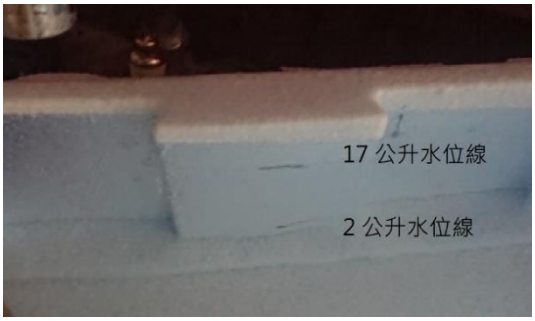
(三) 排水涵道流量測量

1. 垂直排水孔流量測量

在總排水量估算當中，排水系統的排水量在本實驗中佔了相對較多的部分，但由於實驗進行時間時逢枯水期，因此我們~~試圖~~運用模擬的方式，求得~~各~~單一排水口排水的速率。

而實驗的方法為：將保麗龍箱盛水，並於箱體下方開直徑 6 cm 的圓形洞口，大小於學校實際排水孔洞相同，並在箱體內側標註相差刻度為 15 L 的水位線(實驗中採取 2 L 以及 15 L 深處高度差 7.5 cm，)(在有紀錄緩衝時間下的最大容納量)，再用錄影方式得出水位經過兩線之時間差。





排水裝置之保麗龍箱(圖十八、圖十九)

2. 水平明渠流量測量

本研究場域-操場內圈跑道與操場內草皮間，有混泥土式明渠排水溝設計。由於明渠的製造與斜率控制較為不易，所以利用地表明渠計算之公式：曼寧定律(內政部營建署,1970)，來計算出明渠所能排出的排水量。

曼寧公式：

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

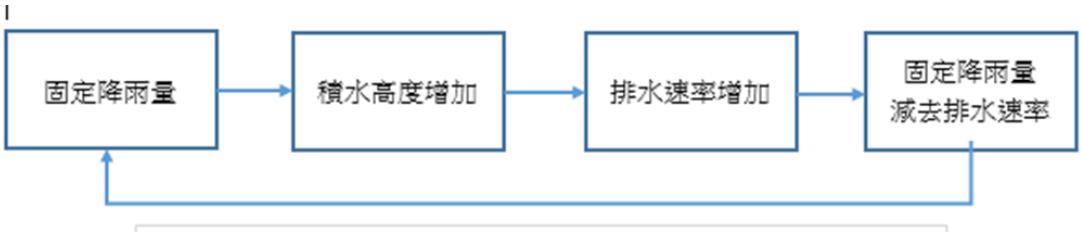
$$R = \frac{A}{P}$$

(公式一)

V=平均流速(ms^{-1})　n=曼寧粗糙係數(混凝土地表約等於 0.025)　R=水力半徑(m)

A=通水斷面積(m^2)　P=潤周長(m)　S=水力波降(緩降坡中可視為斜率)

由於明渠之排水量平受降雨強度影響，而降雨強度則影響了累積雨量(和通水斷面積成正比)，但同時排水量的上升也會影響累積雨量的下降，而導致排水量下降，行成一平衡，邏輯如下。



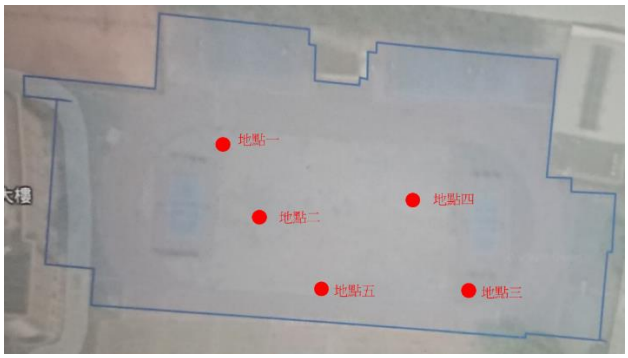
函數邏輯圖(圖二十)

而我們使用了 Excel 的方程式，以遞迴運算的模式來模擬以及預測在不同降雨時間之下水溝的排水速率以及總共累計的水量。

伍、 研究結果

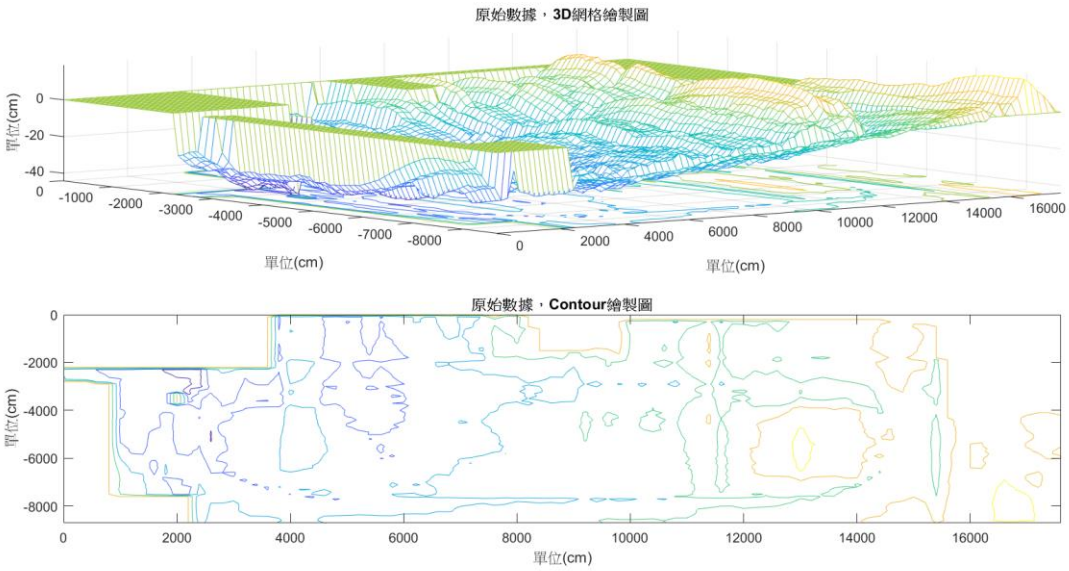
一、地形圖建模

下圖為本次實驗中所量測之範圍(藍色框線處) 紅點為不同區域的土壤地區性質(建築物遮蔽處-地點一、低窪易積水沙地-地點二、高地草皮-地點三、中央平坦地區-地點四)



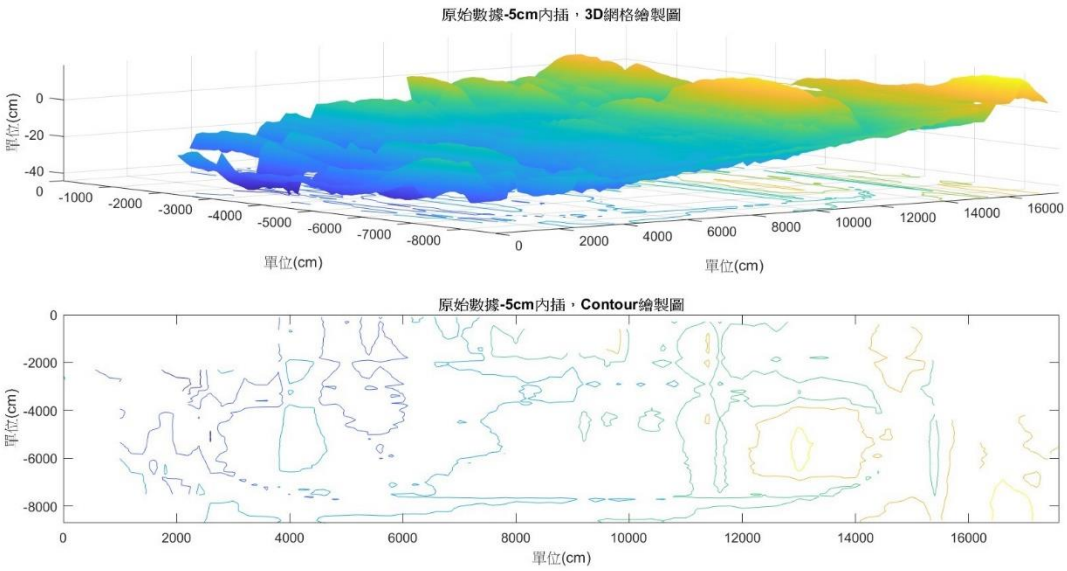
實驗範圍與採樣地點(圖二十一)

下列我們先將各點數據經過整理之後，把未經任何調整的原始數據，繪製出下列的地形圖。



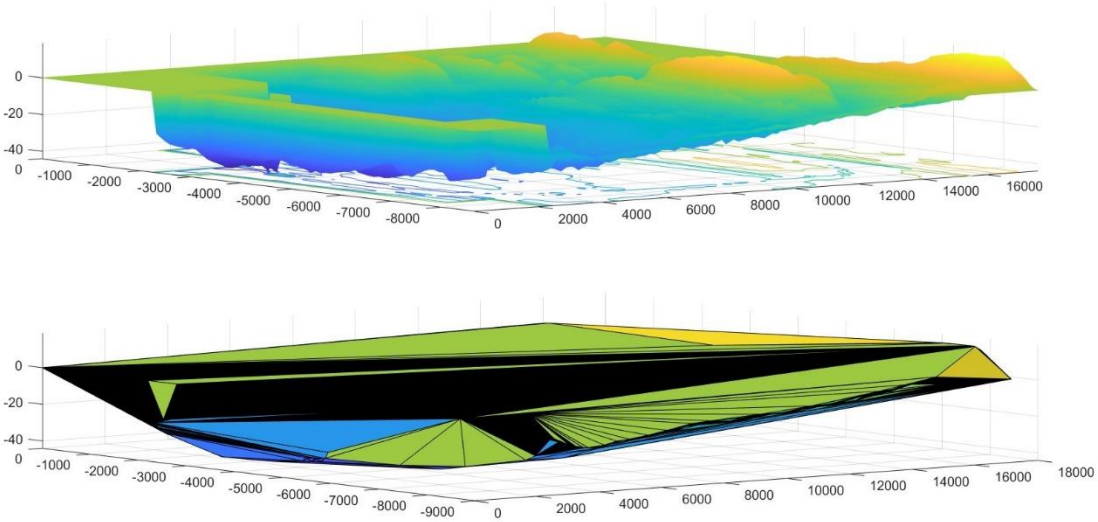
原始作圖數據之地形圖與等高線圖(圖二十二)

為求出更精確之模擬，我們將上圖進行更加細微的內插(內插之單位為 5 cm) ，以得到更為滑順，貼近實際狀況的下圖。



五公分內插之地形圖與等高線圖(圖二十三)

在求出精確之地形圖後，我們使用了 Matlab 中求取體積的功能得出其凹槽處之體積，未量測點則以 0 公分作為基準高度以求得盛水體積(操場中央地勢為負，而為量測地點多為建築物因此不積水，所以補以最高單位 0 公分)。



梯形求積之作圖(圖二十四)

上圖之體積經求值為$4.8640 \times 10^9 cm^3$，換算約為 $4864m^3$

二、土壤飽和含水量測量

(一) 土壤重量測量

本實驗的目的是為求取土壤原重以進行後續運算。實驗中選取了操場四處環境不同的土樣(建築物遮蔽處-土樣一、低窪易積水沙地-土樣二、高地草皮-土樣三、中央平坦地區-土樣四)(圖二十一)以取得操場不同土樣之平均。接著在降雨前後，同一個地點取樣五次，取出二十管 100ml 之土樣並且秤重。

(表一) 取樣土壤重量

	重量(g)
1 號土樣	120.60
2 號土樣	123.45
3 號土樣	138.30
4 號土樣	111.99

(二) 土壤含水量測量

本實驗的目的為求取土壤中所含之水分之克數重，而後換算為體積。我們將土壤烘乾後，秤取重量，取差值以得到所蒸發之水量即含水量。

(表二) 土壤水分含量

	初重(g)	無水土壤重量(g)	差值(g)
1 號土樣	120.60	117.92	2.68
2 號土樣	123.45	117.78	5.67
3 號土樣	138.30	135.08	3.32
4 號土樣	111.99	107.92	4.07
平均	123.585	119.675	3.935

(三) 土壤固態相體積

本實驗要求取土壤固態相的體積。我們將土壤浸入量筒的水中，讀取其刻度差，得到固態相之體積。

(表三) 土壤固態體積

	體積(ml)
1 號土樣	61
2 號土樣	61
3 號土樣	62
4 號土樣	58
平均	60.5

(四) 土壤可含水量

由上列實驗可得知，在 100ml 的土壤中有 60.5ml 的固體和 3.935ml 的液體，可得知其含有 35.565 ml 之空氣量，即為最多可含之水量。

(五) 土壤之透水速率

在操場採樣五個地區(採取土壤樣本之四個地點以及排水溝渠旁-地點五)(圖二十一)，在降雨一小時後挖開土壤，量測乾土與濕土交界線之深度以求得被浸濕之深度。

(表四) 土壤透水速率

	深度(cm)
1 號地點	1.6
2 號地點	1.3
3 號地點	1.3
4 號地點	1.2
5 號地點	1.3

(六) 土壤表面所占面積

經測量過後與對照座標點可得知操場土壤所佔之面積為 4760.64 m^2。

三、排水涵道流量測量

(一) 垂直排水口流量測量

1.實地測量

我們在操場進行勘測，了解當地排水系統之情形，發現操場有 43 個排水小洞，個別面積為直徑 6 cm 的圓形。而在其中，共有 34 個未被阻塞之排水孔，而被阻塞之排水孔則有 9 個。

2.實驗測量

固定 15L 水量的水在直徑 6 cm 的排水孔中排完水所花時間。

本實驗尚未完全考慮到水深造成的水壓對排水速率造成之影響，而本實驗的標記線位於水深 1 cm 與 8.5 cm 處。

(表五) 垂直排水口十五公升水量排水時間

實驗次數	時間(秒)
1	7.48
2	7.63
3	7.38
4	7.42
平均	7.4775

由上表實驗結果換算可得其排水效率為 0.0682 m^3s^{-1} ，以操場面積換算可得知時雨量為 16.798 $\mathrm{mm}h^{-1}$。

(二) 水平明渠流量測量

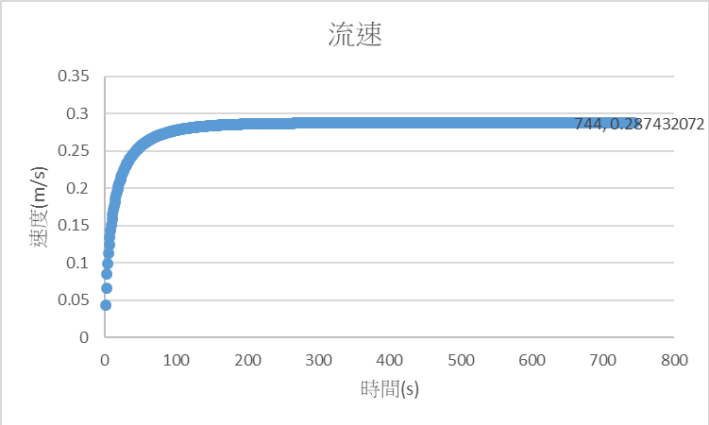
1.實地測量

在實地測量中，我們在操場內圈發現的明渠排水道長度為 300 m，深為 22 cm，寬為 15 cm，對外共有 16 個排水出口。

2.函數模擬

藉由 excel 函數以遞迴方式求得最大每秒排水量。函數邏輯如圖二十。

而下圖則為函數模擬後所跑出來的結果。(降雨量取值為 0.1518 m^3s^{-1})(為最大排水量承受值)



(圖二十四)

藉由公式$v=\frac{1}{n}R^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}}$，當水位填滿時 $v=\frac{1}{0.025}0.056^{\frac{2}{3}}(\frac{42}{17000})^{\frac{1}{2}}$，可得 v 為 0.2874 ms^{-1}，換算成為小時雨量再乘以橫切面積 0.033m^2以及排水口總數 16 個，除以操場總面積 14616m^2，可得排水量之最大值為 0.1518 m^3s^{-1}，換算成時雨量以操場面積計算則為 37 mmh^{-1}，而該系統約在 200 s 到達飽和。

四、總排水量之分析

垂直排水口排水量	16.798 mmh^{-1}
水平明渠排水量	37 mmh^{-1}
土壤滲水量	1.55 mmh^{-1}
總排水量	55.348mmh^{-1}

陸、討論

一、疊圖分析

藉由 QGIS 的疊圖分析，可以結合高度資訊以及實際地理資訊，去計算出每個地形區所佔的地形面積，再將上述的數據帶入之後，即可初步推估整個操場所能承受的排水量，並且了解一些地形之間的相互關係。

在上圖，紅色半透明區域為低窪沙地地區，黃色為中央平原草地，而藍色部分則是高地草地，橙色為受建築物遮蔽區域以及不滲水，鋪有 UV 材質的排球場區域。

的實驗中，我們有測量個別不同土質的排水量，計算方法為吸水效率為土壤面積成以單位小時濕土深度以空氣含量百分比，將上述的數據帶入疊圖後所得知的面積，再將所得之排水量除以面積 14616m^2後可得其吸水速率為 1.55 mmh^{-1}。

而我們也可以藉由此圖觀察到，操場地形結構為一盆型結構，因此可以得知降雨之水量會向中間集中，而較難向周圍地形排出。而排水道(黑色處)則是在於較為外圈的部分，因此在初降雨時，會無法順利地排出中間的積水，導致排水效益會受到一定程度的影響，但同時也可以看見在鄰近水溝的地區，會有地勢較為傾下的設計以利於水流排出。

有覆蓋額外 UV 層的地區，地勢也會相比周圍來的更高，使成為較不易淹水的地區。再加上操場呈現右高左低的趨勢，積水會較易從左側蔓延，和平常所見情形相符合。

二、排水能力分析

降雨中，造成積水之條件為進水量大於排水量而造成水量之累積。造成進水量之最大原因為地形因素造成之水量流入與降雨強度，而貢獻排水量的最大因素有進行實驗者有土壤吸水程度以及排水系統所能承載之最大排水量。

在地形因素之中，未量測之範圍外不計，操場地形結構為一盆型結構(圖二十四) ，因此可以得知降雨之水量會向中間集中，而不會有所排出。而量測範圍外的地區則不在本次的實驗範疇之中。

下列用列點的方式來做各項結論之討論：

(一) 地形

在地形測量結果中，中央盆型區域能容納之水量為 4864 m^3。以操場所占總面積換算總累計雨量要高達 333 mm 才可填滿此區域。

(二) 土壤滲水率

在土壤吸水速率部分，上述實驗求得之操場面積的時降雨量為 1.55 mmh^{-1}，可知其對於總排水量的影響極小。

(三) 排水系統排水量

在排水系統排水量的部分，藉由前面的實驗可得知垂直排水口排水效率為 16.798 mmh^{-1}，而水平明渠排水量為 37 mmh^{-1}，佔排水量之大宗。兩者之總和之每小時排水速率為 55 mmh^{-1} 。

將上述的排水量總合進行加總，可得知學校排水系統可應付之最大時雨量為 55 mmh^{-1}，根據中央氣象局發布之大雨標準為 40 mmh^{-1}，學校排水系統之容納量已足夠應付一般日常情況之大雨。

另在調查的過程中，也有發現排水系統因遭阻塞而排水能力下降的情形，需加強清潔以及清淤才可使其排水校能達到其原先規劃之理論值。

柒、 結論

一、操場為盆型，積水不易排出，最大可裝載容量為 333 mm。詳細地形如圖二十三

二、經測量後操場土壤滲水速率慢，對於排水速率並無太大影響。

三、排水系統在良好運作情況下，可達到最大 54mmh^{-1}的排水速率

四、未來展望

(一) 可拓展地形調查的範圍，以減少旁側流入之水量影響。

(二) 本實驗調查以及實驗方法受限於經費與時間關係而使用較粗糙不精確的器材，希望未來可以有較優良的器材增加速率與速度。

(三) 希望能夠調查學校更完善的地下排水系統資料，找到施工相關資料等等以讓模擬更準確。

(四) 和歷史雨量做比較，探究實際情況與計算之誤差。

(五) 對於排水實驗中水高對於水壓與排水速度的影響以及土壤吸水率和孔隙率的差異這兩點做更進一步的分析。

捌、參考資料及其他

1.雨水下水道設計指南(內政部營建署,一九七零年一月一日)。檢自

https://www.cpami.gov.tw/kids/filesys/file/chinese/dept/sew/990715-1.pdf

2.水土保持技術規範(行政院公報,一零三年九月十一日)

3.土壤採樣方法(行政院環境保護署檢字 1040009426 號,一零四年二月二日)

4.孫語瑞、張慧娟、林劍輝、祥蔡(2012)。一種測量土壤空隙率的方法。(編號

CN101344474A)

5.劉浩吳(民國九十一年)。土壤力學。新北市。新文京開發出版有限公司

6. 倪勝火。土壤力學實驗手冊(成功大學土木工程學系,一零四年三月)

7.地形測量概論。檢自 https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://imod-

fms.csu.edu.tw/sysdata/doc/f/ffddddf144393000/pdf.pdf&ved=2ahUKEwjwpu3ItpzoAhUBy4sBHd86BVI

QFjAAegQIAxAB&usg=AOvVaw3w-iscR4vuLlCrJfN_Uq_m&cshid=1584273507108