

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 工程學科(二)科

第三名

052411

大珠小珠落玉盤~大型場館安全避難研究

學校名稱：國立中興大學附屬高級中學

作者： 高二 劉彥甫 高二 李昱鎰 高二 蘇胤瑋	指導老師： 林士超 張啟中
---	-----------------------------

關鍵詞：串珠模組法、垂直分流、大巨蛋

摘要

本研究採用串珠模塊法，並將不同類型的人群濃縮為基本單元（模塊），並根據人流、門流，透過估算人潮流量通過節點所需時間，撰寫估算程式。旨在推估大型展場之疏散時間。

結果是：若以 21600 人、三層看台、四區一梯、長短邊有五及三門的巨蛋展場，並採垂直分流設計，將可執行安全疏散。

在本研究的巨蛋球場格式下，只要各分區人潮不重疊，人在看臺上移動速度會是影響安全疏散的關鍵。本研究推論：能安全疏散的大型展場設計標準是垂直動向獨立、每 400 人一個梯、大門出口前的緩衝面積必需足夠。

若要擴大展場的總容納人數，只需要微調距離參數以及模塊的參數，即可繼續推估不同規模的展場疏散情況。

壹、研究動機

我看到一段影片，它是利用現代的雷射科技重建羅馬競技場與北京鳥巢的 3D 模型，並分別在滿座的情況下計算各自的逃生時間。結果顯示羅馬競技場在觀眾全部逃出時間為 12 分 44 秒，而鳥巢則為 12 分 57 秒，顯現了古羅馬建築師的智慧不輸給現代的科技。

於 2015 年 4 月爆發一連串關於台北大巨蛋的安檢問題，使得巨蛋建案是否要繼續進行起了很大的爭議。因此，鑑於許多人對大巨蛋的安全疏散規範有所疑慮，本研究將估算出目前的普遍規範是否真的有安全功能。本研究會以位於法國里昂的 Grand Stade 巨蛋為範本，設計出一個大型場館的巨蛋，研究人流速度與時間的關係。也企盼能找出一個萬人等級展場應有的設計規範。

貳、研究目的

- 一、以足球場的座位分配為模型範本，建立推估疏散時間的方法。
- 二、尋找大型展場評估疏散時的關鍵參數。
- 三、找出大型展場的疏散敏感參數，作為建構展場的安全標準。

參、研究設備及器材

電腦、MS-Visual Basic、碼錶、直尺、計算機、學生數名

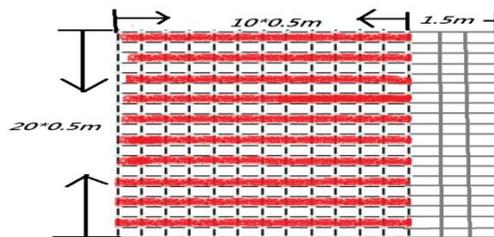
肆、研究過程或方法

- 一、本研究以位於法國里昂的 Grand Stade 巨蛋足球場的座位分配為範本，設計了一個三層看台，可容納一個標準足球場（120x90 公尺）的大型巨蛋，容納量為 21600 人。



圖一：截圖來源_Grand Stade by SketchupViewer，
（看台外長 230x200 公尺，看台內長 130x100 公尺。）

- (一)看台：每層由數量不等的 100 人坐看台組成，本研究中將之稱為區。其中，座位面積為 0.5m×0.5m 之正方形，而每列之間又隔著 0.5m 的走道，每個看台右邊有一寬為 1.5 公尺的逃生走道（示意圖二，如下）。



圖二：座位區示意圖(10x10 人)。

- (二)區塊：

依樓層由下往上分別為 A、B、C 三層，每層依照長短邊劃分。

A 層(樓高 6.5 公尺，BF)：

短邊有 12 區座位看台、長邊有 20 區；

B 層(樓高 10 公尺，1F)：

有短邊 14 區、長邊 22 區；

C 層(樓高 18 公尺，2F)：

短邊 16 區、長邊 24 區；

- (三)樓梯：

以每四看台區分配一梯，得到各區總梯數: A 層共 16 梯（個通道），B 層共 18 梯，C 層共 20 梯。本研究為求簡化：假設各區通往一樓的樓梯為獨立的，則樓梯斜長依照原設計圖各樓層高度 $\times \sec 27^\circ$ （樓層高度 $\times 2.24$ ）；並在每隔 4~5 公尺加上 3 公尺的水平轉換空間（長度）；所以 B 區樓梯斜長= $14.5+3 \times 3=23.5$ ，取整數為 25 公尺。又 C 區樓梯斜長= $37+3 \times 7=58$ ，取整數 50 公尺。

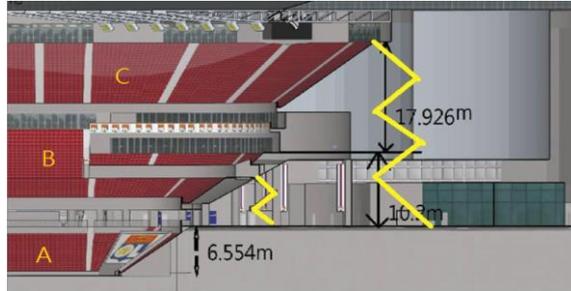
- (四)一樓大門：

依台灣內政部法規(2009)規定 A-1 型巨蛋，觀眾席樓板面積每 10 平方公尺，一樓大門寬度要 0.17m 寬為標準。所以，本研究的大門寬的總寬度要至少：

(每看台有 50m^2) \times (共 216 區) \times (0.17 公尺/ 10m^2)=183.6m，
 故，本研究設定 A 層搭配每層的看台總數的長邊有大門數 5 個，
 短邊門數 3 個，每扇門的寬度 12m，這樣的大門總寬度為：
 $12\times(5+3)\times 2=192$ 公尺。

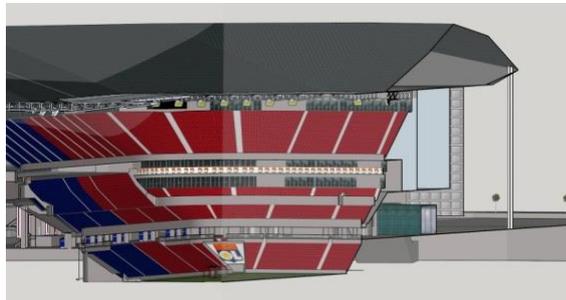
(五)球場各面向示意圖：

1.樓梯諸元(樓高及梯的配置，黃色折線即為梯)：



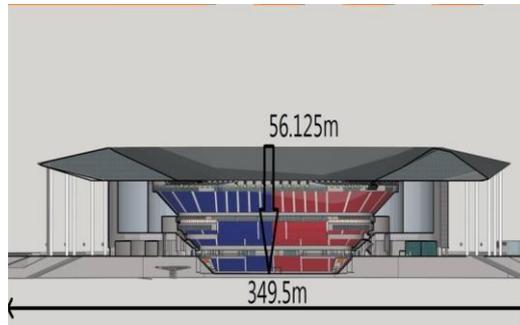
圖三

2.樓層架構(共三層樓，各有二長邊、二短邊)：



圖四

3.立面及大門(黑色為簡易屋頂)：



圖五

4.簡言之，球場內的分區人數配置如下：

	A(區)	B(區)	C(區)
長	2000	2200	2400
短	1200	1400	1600

一樓的大門數：共 16 個大門

長邊	短邊
5	3

樓梯數：

	A(區)	B(區)	C(區)
每層樓梯數	16	18	20

表一：自設規格之大型球場的人數、大樓、樓梯數配置。

二、模塊法：

(一)因為本研究的展場人數為 21600 人，而若模擬全體疏散並不
利於計算，所以將展場各種情形濃縮為一個模塊，而此模塊即可
代表疏散時間，若展場人數若需變更，僅需要微調模塊即可。

	A區	B區	C區
長區	20區	22區	24區
每區人數	100人	100人	100人
短區	12區	14區	16區
每區人數	100人	100人	100人

表二：上表是原本的配置（A B C 等比例）

	A區	B區	C區
長區	20區	20區	20區
每區入	100人	110人	120人
短區	16區	16區	16區
每區人數	80人	90人	100人

表三：因應模塊法所調整的配置

因此，在本研究的程式計算中，最小模塊組合為：

$$100+90+80+120+110+100 = 600 \text{ (人)};$$

(二)推估過程中所遇到的節點：也就是人潮可能堵塞的地方

第一節點	第二節點	第三節點
看台區門口	樓梯口	大門口

表四：本研究大展場模型中的節點

(三)預設參數：

看台速度	樓梯速度	水平速度	幾區一門	幾區一梯
1m/s	1.1m/s	1m/s	4區	4區

表五：本研究的預設參數（之後再行驗證）

三、推估過程：

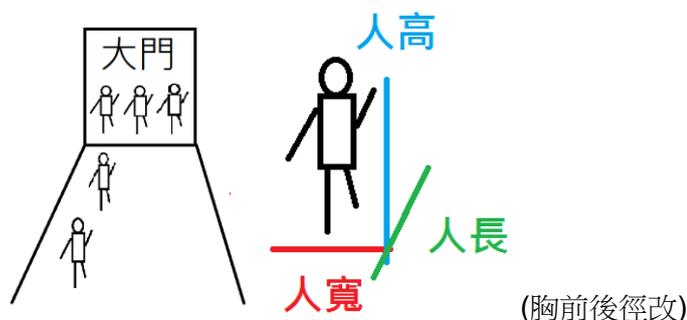
(一)模型推估過程中

設計 V. B. 程式時，要兼顧到「人」與「門」的關係。其中，人包含人潮、人潮移動方向，而本研究將展場空照圖(圖七，右圖)的人潮分類成六種，A區B區C區，各有長端、短端（如圖八、圖九、圖十）

然後，A、B、C三層都會遇到「第一個節點」也就是看台區的出口。

$$\text{因此，計算門流量方式為} \left(\frac{\text{人看台的速度}}{\text{人的長度}} \times \frac{\text{門的寬度}}{\text{人的寬度}} \right) \text{ 人/秒}$$

也就是門流量以每公尺 1 秒可以走出多少人×每公尺門寬可以容納幾人來描述。



圖六：人與門的示意圖

然而，第一個節點控制了人潮一開始的釋放量，A區因為上方為一樓即可通往大門，並不需經過樓梯，B、C兩層樓四種人潮需走樓梯下到一樓。因此，他們遇到「第二個節點」～樓梯入口，而樓梯的計算方式本來是採 $\frac{\text{樓梯斜長}}{\text{人的斜速度}}$ 來計算行走秒速。但，發現樓梯其實是屬於堵塞狀態。

$$\text{因此，改採} \frac{\text{樓梯斜長}}{\text{人的斜速度}} + \frac{B \text{ 或 } C \text{ 區人數}}{\left(\frac{\text{人樓梯的速度}}{\text{人的長度}} \times \frac{\text{樓梯的寬度}}{\text{人的寬度}} \right)} \text{ 來計算秒數}$$

但我們在推估模型的過程中遇到了一點困難：

- A. 忽略了觀眾的反應時間
- B. 沒計算到展場並非圓形
- C. 未考慮行走時間差

本研究想到的修正方法如下：

1. 增加延遲時間: 觀眾從看台到第一個節點的時間
2. 採不完全對稱參數
3. 安全係數：BP 值(ball to person)

所以，修正後算法(以 A 區為例)：

A 區秒數 = 原本的計算法

$$+ \text{A 區第一列第一排從座位到第一節點的時間} + \frac{\text{A 第一節點到樓梯口的距離}}{\text{人看台速度}}$$

也就是多加了反應時間與採不完全對稱參數。

而當 A、B、C 三層都到達一樓時會遇到大門口是否堵塞的狀態？是故，在門的部份，本研究增加了一個判斷式來判斷是否有堵塞？

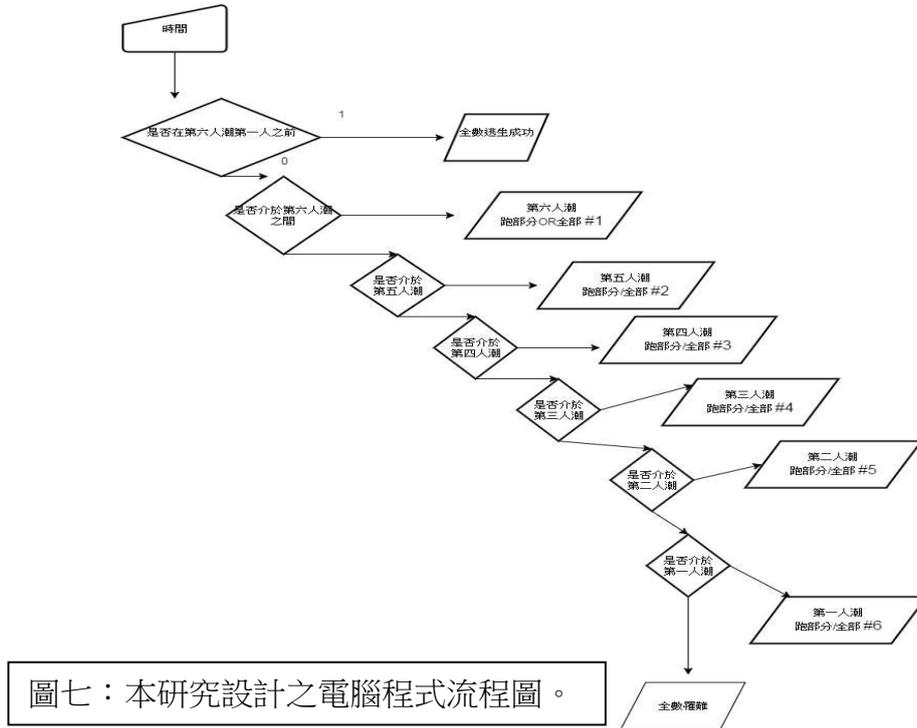
而計算總時間的情況有二：

1. 若大門口不堵塞：

人員全疏散的時間即為最後一個人離開的時間，判斷如下：
(A 不用加樓梯秒數)

$$\frac{A \text{ 或 } B \text{ 或 } C \text{ 人口數}}{\left(\frac{\text{人看台的速度}}{\text{人的長度}} \times \frac{\text{門的寬度}}{\text{人的寬度}} \right)} + \frac{\text{一樓要逃生的水平距離}}{\text{人水平速度}} + \frac{\text{樓梯斜長}}{\text{人的斜速度}} + \frac{B \text{ 或 } C \text{ 區人數}}{\left(\frac{\text{人樓梯的速度}}{\text{人的長度}} \times \frac{\text{樓梯的寬度}}{\text{人的寬度}} \right)}$$

然後，判斷 A、B、C 各長短的六種的總時間，取出六者的最大值，即為最後一人離開所需的時間。這也是串珠模塊法的計算優勢。



圖七：本研究設計之電腦程式流程圖。

2.若大門口堵塞：

接下來，就該判斷何時堵塞？未跑出的人以最大逃跑速率

(大門口最大速率 單位 $\frac{人}{秒}$)

依設計圖規格原則：

4 區一梯，總門寬 = 樓板面積(每十平方公尺)*0.17m 證之

	區	梯數	門數	一個門對多少梯
A	4x	x	$(4x+4y+4z) \times 5 \times 0.17 \times \frac{1}{門寬}$	$\frac{該梯數}{總門數}$
B	4y	y		
C	4z	z		

表六：不同區數及梯數的門數估算，及門區梯對應

令 $V_a = V_b = V_c = V$

A,B,C 總流量 =

$$\frac{x}{3.4(x+y+z)} \times \frac{V_a \times 樓梯寬}{(胸前後徑)(肩寬)} + \frac{y}{3.4(x+y+z)} \times \frac{V_b \times 樓梯寬}{(胸前後徑)(肩寬)} + \frac{z}{3.4(x+y+z)} \times \frac{V_c \times 樓梯寬}{(胸前後徑)(肩寬)}$$

$$= \frac{門寬}{3.4} \times \frac{V \times 樓梯寬}{(胸前後徑)(肩寬)}$$

又，大門口流量 = $\frac{V_{gate} \times 門寬}{(胸前後徑)(肩寬)}$

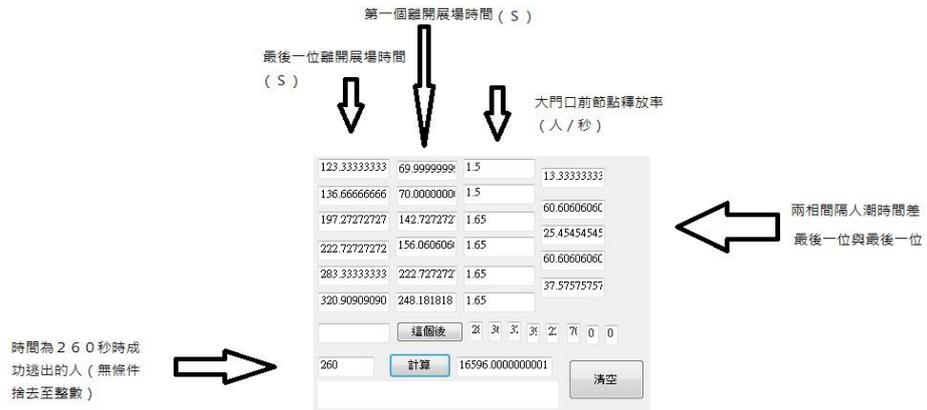
則 A,B,C 總流量:大門口流量 = $1 : 3.4 \times \frac{V_{gate}}{V \times 樓梯寬}$

所以，只有在 $\frac{V_{gate}}{V \times 樓梯寬} = \frac{1}{3.4}$ 時，大門口才可能堵塞!!

(二) 程式操作界面：



圖八：操作介面，本研究先用預設值（基礎資料）在開始調控變因之後按下按鈕（這個先），在依序計算A B C三區總時間，再按下（排秒）按鈕來排先後順序，再按下（排名）按鈕來注入數據，移動到右上的計算區按（這個後）按鈕，再按（計算）按鈕，即可求出多少秒以內，可安全避難人數為多少人。



圖九：V.B. 程式操作使用範例。

本研究的邏輯是區域算區域：A, B, C 區分別獨立，A 區自行計算，有 A 區自己的人潮流動、自己的通道、但共用大門。B 區、C 區在程式中也要先獨立計算，最後再按下大門鍵，估算門流條件，才能進行時間的估算、各區人數的移動速度及阻塞在哪一個位置。最後，判斷 A、B、C 長短六種的總時間，取出六者的最大值，即為最後一人離開所需的時間。換言之，程式的判定就是以輸入的時間為準，判定是否介於人潮經過大門口時間內，進而計算多少人可逃離展場。

(三) 研究中的程式設計是有底下大原則：

1. 採用貪婪演算法(Greedy algorithm)：

在每一步（選擇）中都採取在當前狀態下最好或最優（即最有

利)的選擇，從希望導致結果是最好或最優的算法。

2. 當逃生不限時間，全員逃走需多久時間？

本研究是以最後一個人出來為準，所以判斷 A、B、C 層長短邊六種的個別分區總時間，取出六者的最大值，即為最後一人離開所需的時間。

3. 若要限時 7 分鐘，巨蛋大逃亡會有多少人出不來？

這部份採用逆推法，也就是時間條件內可逃出多少人，再用總人數去扣掉，就可得到逃不出來的人數。

4. 門流與門速的合理條件判定：

為避免不合理及過度擁塞，本研究中的通道、樓梯寬、門寬皆採用人肩寬度(0.5m)的三倍(1.5m)或整數倍(1.5m×8=12m)。

5. 本研究的極簡化初始概念：

- (1) 人人是珠珠，人潮即串珠
- (2) 樓寬及門寬皆有固定原則，皆為 1.5 公尺
- (3) 每區人數都固定為 100 人
- (4) 建築體結構是超對稱完美比例。

(四)參數的合理化：

本研究的總人數是 21600 人。本研究所需的參數如下：
共有三層，每個看台區的人數 10x10 人，看台下至通道到水平地板速度(1m/s)、每層看台的長、短區人數 (C 為例，100 x24=2400 人、短區人數 100x16=1600 人)、A 延遲秒數(10s)、在看台的水平移動速度(1m/s)、人潮下樓梯速度(1.1 m/s，定值)、出門口前水平速度(1 m/s)、每四個看台(區)要下樓前的門寬(1.5 m)、在長、短區的大門數 分別為 6 及 4 個。

各別的參數，取用及討論如下：

1.參數一：步行速度

- (1) 實驗地點:學校樓梯
- (2) 實驗器材:碼表、皮尺
- (3) 實驗結果:

	直梯	含轉彎一次	水平地面-門	水平地面-廊
寬度	1.6m	1.4m	1.5m	>1.5m
長度	4.4m	11.3m	8.45m	30m
測試人數	9 人 (3 人/排)	9 人 (3 人/排)	42 人 (3 人/排)	4 人 (3 人/排)
所花時間 #1 (sec)	5''34	9''54	6''75	16''16
#2	4''81	10''18	8''75	17''34
#3	4''69	9''50	8''47	18''88
平均速度 (m/s)	0.9	1.16 註一	0.98	1.72 註二

表七：本研究步行速度參數量測與計算值。

註一：本研究採用下梯含轉彎一次 速度 1.1m/s。

註二：本研究採用水平地面通過門 速度 1m/s。

註三：關於水平地面步行速度各單位使用上各有差異。台北市政府，採計全長 15m，從大門到馬路上，使用水平速度為 1.2m/s。又某建商，使用水平速度為 1.5m/s。

2. 參數二：單一大門寬及總寬度

根據內政部建築物使用類組分類，本研究的巨蛋屬於 A-1 類別，且設定此巨蛋為防火結構，則依照 2009 年內政部〈建築物防火避難性能設計 90 條之一〉的規定，一樓大門的總門寬，須以觀眾席樓板面積每 10 平方公尺寬 17 公分計算。本研究預設參數 216 區，每區面積 50 平方公尺，大樓總門寬至少 183.2m。所以，本研究設定單一大門寬 12 公尺，巨蛋的長邊有 5 個大門，短邊有 3 個大門，共計 16 個大門。

3. 參數三：人均佔有空間

本研究中將人所佔有的空間均視為正方形討論，由於每個人的體格因人而異，平均值約為 0.4m×0.3m，在此取 0.5m×0.5m 當作一個人占有的面積。在此過程中，本研究其實已經預留了人跟人之間的距離了，這也容易在程式計算中以珠代人做巨蛋逃生估算，但是，也得再深究人群會有擁塞與推擠的情形，所導致的壓縮變化。

4. 參數四：流量

假設人的行進速度在樓梯或平路時不太有變動，那寬度就是影響流量的原因了。受到寬度的影響，不同樓層的流量也會不同，並且可預想的。若有一個通道口特別狹窄，則人就會在出口處回堵，形成一個瓶頸，也就是速率決定的步驟。

因此，本實驗採用實驗數據流量為每秒 5 人，並把門寬和樓梯寬皆設定為 1.5m，大門寬亦為 1.5m 的倍數。下表列出美國公路容量手冊的數據（如表八）。

表 2.1 2000 年美國公路容量手冊所訂定的步道服務水準

服務水準	描述	行人佔有空間 (公尺 ² /分)	行人平均速率 (公尺/分)	行人流量 (人/公尺·分)	v/c
A	完全自由	≥ 5.6	≥ 1.30	≤ 16	≤ 0.21
B	偶受阻礙	3.7~5.6	1.27~1.30	16~23	0.21~0.31
C	受限制	2.2~3.7	1.22~1.27	23~33	0.31~0.44
D	中度擁擠	1.4~2.2	1.14~1.22	33~49	0.44~0.65
E	嚴重擁擠	0.75~1.4	0.75~1.14	49~75	0.65~1.0
F	塞滿人群	≤ 0.75	≤ 0.75	variable	variable

資料來源：2000 年美國公路容量手冊預先修訂版
<http://traffic.ce.gatech.edu/hcqs/HCM2000>

5. 參數五：各巨蛋安全避難的時間值表列如下，本研究採用世運主場館的時間整數值 7 分鐘當成安全的門檻。

		避難至戶外時間(min)
2009世運會主場館		7.8
Tokyo Dome		11.7
Yahoo Dome		8.3
Nagoya Dome		9.0
Sapporo Dome		12.3
Ohita Dome		6.1

世運主場館及日本各巨蛋避難時間

表九：巨蛋避難的安全時間判定
(出處：大巨蛋安全體檢報告(2015,04)～世運主場館及日本各巨蛋避難時間，<http://p.udn.com.tw/upf/news/2015/1040416.pdf>)

伍、研究結果

一、本研究以位於法國的 Grand Stade 巨蛋足球場的座位分配為範本，設計了一個可容納 21600 人的大型巨蛋。不限時間，程式算出全員逃走需 320.91 秒，也就是約 5.5 分鐘。

	A	B	C			
長區人數	100	110	120	總人數	21600	label65
短區人數	80	90	100	模組單位人數	600	66
總延遲	10	10	10	模組倍數	36	67
看臺速度	1	1	1	大門口數	16	68
樓梯速度	1	1.1	1.1	大門口寬	12	69
水平速度	1	1	1	大門口在門口速度	21.333	70
長區平均距離	60	50	40	人密度	4	71
短區平均距離	60	50	40	人長	0.5	72
門寬	1.5	1.5	1.5	人寬	0.5	73
門數	0.25	0.25	0.25	B長區樓梯數	0.25	B長區梯寬
長區總時間	136.67	222.73	320.91	B短區樓梯數	0.25	B短區梯寬
短區總時間	133.33	197.27	283.33	C長區樓梯數	0.25	C長區梯寬
門流				C短區樓梯數	0.25	C短區梯寬
				B長區梯流		B短區梯流
	4區一門			C長區梯流		C短區梯流

表十：程式參數及執行結果。

二、本研究的大型巨蛋可容納 21600 人：

- (一)若在限時 7 分鐘內若要大逃亡，將會是全部的人皆可安全逃生，無人被困在建築物內。
- (二)進一步看表十一，可以知道本研究的估算在第三分鐘(180 秒)時人員逃生比例僅約 50%，但在第四分鐘內，又跑了近 5000 人。顯示本研究設計的人數對應區數、樓梯數、樓梯長、門寬及門流量，皆在合理的考量之中。

第幾秒	逃出人數	未逃出人數
30	0	21600
45	0	21600
60	0	21600
75	540	21060
90	2160	19440
105	3780	17820
120	5400	16200
135	6390	15210
150	6912	14688
165	8334	13266
180	10116	11484
240	14706	6894
300	20358	1242
360	21600	0
420	21600	0

表十一：程式執行結果（第N秒為止可逃出人數）

三、在有關程式計算時，什麼樣的條件(參數)會改變估算結果?

(一)本研究也進行了靈敏度測試。也就是用一大串數值上變動，代入程式中計算，進一步討論每個參數對於逃生時間估算的影響程度。

(二)針對本研究的六個參數的敏感度來說，門數、樓梯數以及樓梯速度分別為三個較靈敏的參數。依敏感度排行：

樓梯速度>樓梯數>門數>水平和看台速度，看臺速度與水平速度彼此間差異不大，而水平速度則是本程式中最不敏感的參數。

陸、討論

一、BP 值(ball to person)

為推估疏散時間時，本研提出了串珠模塊法。在模式中，人是用珠子替代去跑，珠子彼此連在一起沒有空隙，故稱**串珠法**。本研究是先將人以珠子來看待，最後乘上修正用的 BP 值。所以，本研究的疏散時間是理論估算，可能會更快或更慢。

本研究採取的修正方法（人和珠子的差別估算／參見附錄四）：

(一)討論節點一前的疏散情況，發現與本研究僅相差 110 毫秒

(二)考慮人經過節點時，人體左右側的可再壓縮性，推測 BP 值<1

(三)老人模式係數與輪椅模式係數

為了更貼近人性，我們假設一顆速度為 0.5m/s 的珠珠，當作是老人或行動不便的觀眾，並混在珠珠群中。假設最左前方的珠珠為老人，若是以 50m 的逃生距離來看，右邊兩排的人潮會先超越最左方的這排人流，接著老人後面的珠珠遞補上去跟著右邊兩排逃生，總逃生時間為

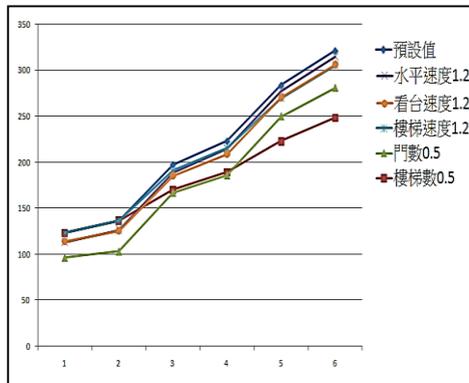
$\frac{17}{1.5-0.5}$ (超越左邊那排所需時間) + $\frac{0.5 \times 2}{1.5}$ (遞補時間) + $\frac{58.5}{1.5}$ (遞補後最後一個人走到出口的時間) = 56.67 秒。而如果左前方沒有老人的話總逃生時間為 $\frac{50+17}{1.5}$ =44 秒。(17m 為一區觀眾排成 3 排的長度)

二、參數敏感度

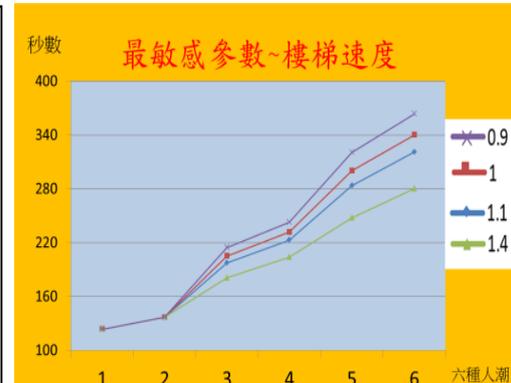
以預設參數值為基準，改變不同參數的值之後，進行結果比較。

也就是圖形上偏離預設值的程度。

由圖十可知依敏感度排行：樓梯速度>樓梯數>門數>水平和看台速度



圖十：不同參數間，六人潮對時間的敏感度



圖十一：由最敏感參數來比

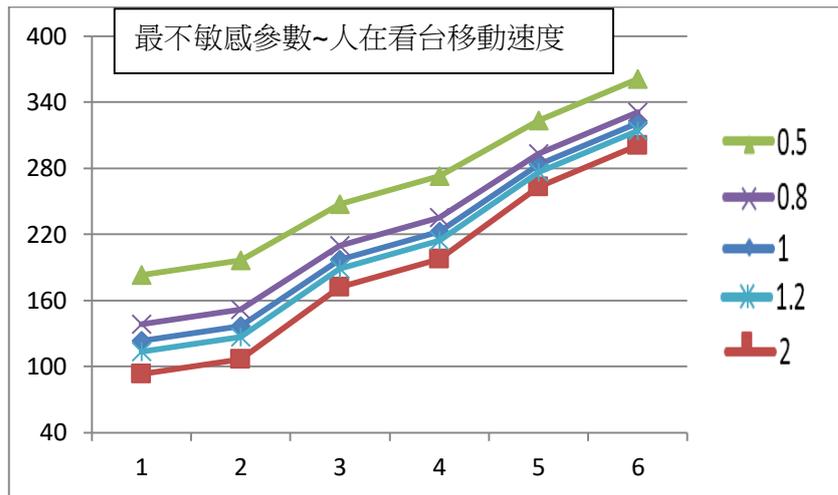
就研究中的五個參數敏感度來說，門數、樓梯數以及樓梯速度，計算結果都比較遠離了預設值，時間差異較大，是三個較靈敏的參數（參考圖十）。

若是依敏感度排行：樓梯速度>樓梯數>門數>水平和看台速度，看臺速度與水平速度彼此間差異不大，而門數對A區的影響較大。可知，**樓梯速度**才是本程式中最敏感的參數，而**水平速度**則是本程式中最不敏感的參數。

再進一步觀察門數與樓梯數在B區與C區差距，發現樓梯對C區影響是門數對C區影響的兩倍，而樓梯對B區影響與門數對B區影響相同，A區則因無樓梯。所以，影響A區的時間，只有門數。

為確認此一敏感度的推論，本研究再將靈敏度最高的樓梯速度，分別以0.9, 1.0, 1.1, 1.4m/s代入程式計算，繪圖如圖十一。因為A區長短邊皆無樓梯，並不存在時間差；仍是A區短邊可立即逃出。但BC區因為有樓梯，且B區梯長比C區來的短，確實會有逃生時間上的變化，也就是第三至第六個人潮的時間差會有明顯的依賴性（速度愈慢的梯速，逃生時間會愈久）。

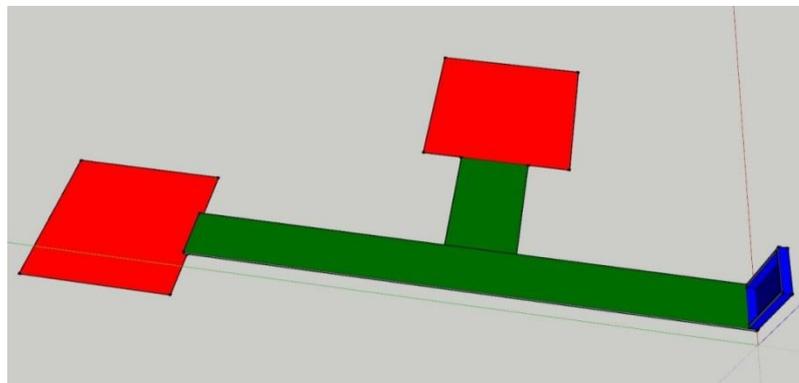
同時也將靈敏度最低的水平速度，分別以0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 2.0m/s代入程式計算，繪圖如下(圖十二)，每個人潮可以安全逃生的時間確實是不同參數間彼此有大致相同的變化，也就是六個人潮的時間差、逃出順序皆沒大的改變。



圖十二：程式中的水平速度敏感度比較圖，垂直軸表示秒數。

三、疏散至戶外所需時間

本研究也將人群在戶外的疏散時間做進一步考量及估計算，以便檢驗是否符合更嚴苛的安全疏散標準。同樣地，以疏散人數除以門流量表示最後一人抵達戶外時間，再以總人數除上區數能站的人數，再乘上區與區之間的間隔 就會等於人群中最後一個人所要走的距離。示意圖如圖十三，藍色為大門口(第三節點)，紅色為疏散時人群聚集地，綠色為戶外可行走步道。



圖十三：戶外暫留所示意圖

<p>圖說：</p> <p>藍色為大門口(第三節點)</p> <p>紅色為疏散時人群聚集地</p> <p>綠色 為戶外可行走步道</p>	藍色釋放的人數= P	人長= E
	紅色面積為= A	人寬= F
	綠色長度公尺為= B	人行走的速度= G
	綠色寬度公尺為= C	
	每幾公尺一個紅色疏散區= M	
	人疏散的密度為= D	

公式：推估人群經過藍色大門口的時間 = $\frac{P}{\frac{G}{E} \times \frac{C}{F}}$

人群是否能疏散順利 = $A \times D \times \frac{B}{M} \geq P$

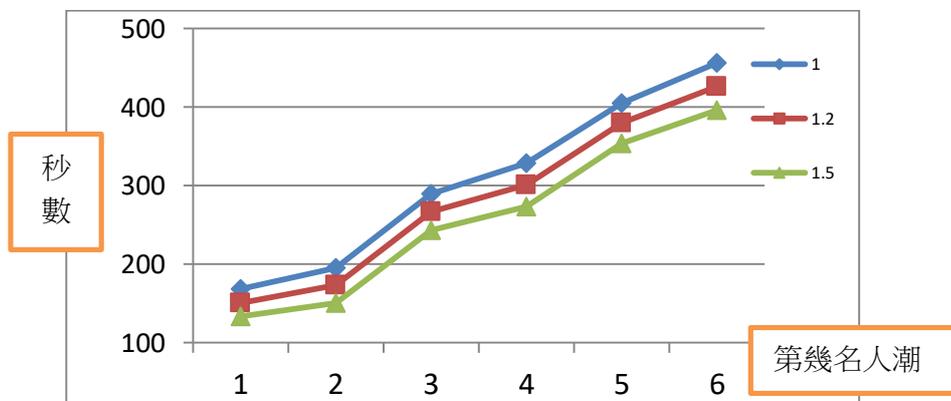
則為正常

最後一人的時間 = $\frac{\frac{P}{A \times D} \times M}{G} + \frac{P}{\frac{G}{E} \times \frac{C}{F}}$

P=	120 人
A=	20 平方公尺
B=	50 公尺
C=	3 公尺
M=	10 公尺
D=	2 人/m ²
E=	0.5 公尺
F=	0.5 公尺
G=	0.8 公尺/秒
H=	5 公尺

是否能正常疏散	可
經過大門口的秒數	12.5 秒
最後一人的時間	56.25 秒
從主幹道走到紅區時間	6.25 秒

四、傳說中的大蛋（人數倍增 21600→43200，僅調整看台速度，其他參數不變），本研究得到 456 秒(7.5 分)可完全逃出。



圖十四：本研究採看台速度 1m/s，而 TPE 用 1.2m/s，又 X company 則是使用 1.5m/s 為計算參數

由圖十三可知，看台速度可以明顯分出三個時間折線，並且本研究使用的 1m/s 與某建商的 1.5m/s 時間相差 60 秒，將影響 8300 人的逃出與否，也就是說真正決定數據的判定者（安全逃生秒數）為該變因（看台速度）的大小，若是在看台速度上做些許的微調，就可扮演上帝的角色，判人生或判人死。

	敏感度高參數 安全的前提下	敏感度高參數 不安全的前提下
敏感度低的參數 良好	良好 	不好 
敏感度低的參數 劣質	良好 	不好 

表十五

本研究又進一步分析敏感度高低的特性，若以疏散時間小於七分鐘表示安全的話，則在敏感度高的參數安全的情況下，調整敏感度低的參數僅會略微影響時間，整體仍會是安全的，相反的若是敏感度高的參數不安全，無論敏感度低的參數如何優化，對於整體時間仍只是小幅度變動，依舊無法有效縮短疏散時間。因此推論**敏感度高**的參數改變代表著結構性的改變，而**敏感度低**的參數改變只代表內部動線規劃與指示疏散方向設計和人的疏散觀念，此差異如上表十五。

柒、結論

- 一、以串珠模塊(model)法估算單一模塊的最長時間，即可得知人員疏散的時間。
- 二、若以二萬人、三層看台、四區一梯、長短邊有五及三門的巨蛋球場，並垂直分流設計，進行安全疏散估算：
 - (一)不限時間，全部人員逃走需 320 秒。
 - (二)若限時七分鐘，全員可跑完。
- 三、在本研究的巨蛋球場的格式下，只要各分區人潮不重疊，人在看台上移動速度將會是影響安全疏散的關鍵。
- 四、本研究推論安全的大型展場的設計標準：
 - 垂直動向獨立、每 400 人一個梯、大門出口前的緩衝面積足夠。

捌、未來展望

在相當程度的簡化下，以珠流流動來模擬人員逃生。但是，過程中人員的擠壓或空間壓縮所造成的時間差，仍需進一步評估與修正。

在之後也可增加場外的參數來推估從場內到場外的疏散情況讓情形更加貼近原本的實際情況。

若能解決這個人珠比的估算，相信在大型展場人員安全疏散上，或是高速公路、市區塞車的車潮評估上，也都可以用珠流模組法來估算。

玖、參考資料及其他

- 一、內政部，2011 年內政部〈建築物防火避難性能設計 90 條之一
- 二、壅塞學，西成活裕著；陳昭蓉譯，究竟出版社，2008，02
- 三、法國里昂足球巨蛋，<http://www.parc-ol.com/>
- 四、法國里昂足球巨蛋 3D 示意圖，關鍵字 grand stade
<https://3dwarehouse.sketchup.com/search.html>
- 五、美國公路容量手冊，<http://traffic.ce.gatech.edu/hcqs/HCM2000>
- 六、大巨蛋安全體檢報告～世運主場館及日本各巨蛋避難時間 (2015,04)，<http://p.udn.com.tw/upf/news/2015/1040416.pdf>
- 七、<https://zh.wikipedia.org/wiki/臺北文化體育園區>

拾、附註

附註一、程式碼

本研究採不完全對稱算法：模組原本是三種人潮(A,B,C)不分長短區計算，但因為展場為橢圓形，進而改成 6 種人潮（A 長短,B 長短,C 長短），用以非對稱之計算，並獨立它們的大門參數、樓梯參數、看臺參數、人數參數、行走類參數等。期望能更精準的估計逃生人數。其中條列 **不阻塞判斷與人數估計的程式碼**如下：

```
p1 = Val(TextBox133.Text)
p2 = Val(TextBox134.Text)
p3 = Val(TextBox135.Text)
p4 = Val(TextBox136.Text)
p5 = Val(TextBox137.Text)
p6 = Val(TextBox138.Text)
lt1 = Val(TextBox81.Text)
lt2 = Val(TextBox83.Text)
lt3 = Val(TextBox85.Text)
lt4 = Val(TextBox87.Text)
lt5 = Val(TextBox89.Text)
lt6 = Val(TextBox91.Text)
lv1 = Val(TextBox82.Text)
lv2 = Val(TextBox84.Text)
```

```

lt3 = Val(TextBox85.Text)
lt4 = Val(TextBox87.Text)
lt5 = Val(TextBox89.Text)
lt6 = Val(TextBox91.Text)
lv1 = Val(TextBox82.Text)
lv2 = Val(TextBox84.Text)
lv3 = Val(TextBox86.Text)
lv4 = Val(TextBox88.Text)
lv5 = Val(TextBox90.Text)
lv6 = Val(TextBox92.Text)
ft1 = Val(TextBox115.Text)
ft2 = Val(TextBox116.Text)
ft3 = Val(TextBox117.Text)
ft4 = Val(TextBox118.Text)
ft5 = Val(TextBox119.Text)
ft6 = Val(TextBox120.Text)
jp = Val(textBox50.Text)
j = Val(TextBox121.Text)
jt = Val(textBox51.Text)

```

```

If j <= ft1 Then
    TextBox131.Text = textBox49.Text
End If
If j > ft1 And j <= lt1 Then
    jr = (j - ft1) * lv1
    TextBox125.Text = jr * jt
End If
If j >= lt1 Then
    TextBox125.Text = p1 * jt
End If
If j <= ft2 Then
    TextBox126.Text = 0
End If
If j > ft2 And j < lt2 Then
    jr = (j - ft2) * lv2
    TextBox126.Text = jr * jt
End If
If j >= lt2 Then
    TextBox126.Text = p2 * jt
End If
If j <= ft3 Then
    TextBox127.Text = 0
End If
If j > ft3 And j < lt3 Then
    jr = (j - ft3) * lv3
    TextBox127.Text = jr * jt
End If
If j >= lt3 Then
    TextBox127.Text = p3 * jt
End If
If j <= ft4 Then
    TextBox128.Text = 0
End If

```

```

If j > ft4 And j < lt4 Then
    jr = (j - ft4) * lv4
    TextBox128.Text = jr * jt
End If
If j >= lt4 Then
    TextBox128.Text = p4 * jt
End If
If j <= ft5 Then
    TextBox129.Text = 0
End If
If j > ft5 And j < lt5 Then
    jr = (j - ft5) * lv5
    TextBox129.Text = jr * jt
End If
If j >= lt5 Then
    TextBox129.Text = p5 * jt
End If
If j <= ft6 Then
    TextBox130.Text = 0
End If
If j > ft6 And j < lt6 Then
    jr = (j - ft6) * lv6
    TextBox130.Text = jr * jt
End If
If j >= lt6 Then
    TextBox130.Text = p6 * jt
End If
TextBox122.Text = Val(TextBox125.Text) + Val(TextBox126.Text) +
Val(TextBox127.Text) + Val(TextBox128.Text) + Val(TextBox129.Text) +
Val(TextBox130.Text) + Val(TextBox131.Text)

```

附表二、建築物之使用類別、組別及其定義（2009）

類別	類別定義	組別	組別定義	
A類	公共集會類	供集會、觀賞、社交、等候運輸工具，且無法防火區劃之場所。	A-1	供集會、表演、社交，且具觀眾席之場所。
			A-2	供旅客等候運輸工具之場所。
B類	商業類	供商業交易、陳列展售、娛樂、餐飲、消費之場所。	B-1	供娛樂消費，且處封閉或半封閉之場所。
			B-2	供商品批發、展售或商業交易，且使用人替換頻率高之場所。
			B-3	供不特定人餐飲，且直接使用燃具之場所。
			B-4	供不特定人士休息住宿之場所。
C類	工業、倉儲	供儲存、包裝、製造、	C-1	供儲存、包裝、製造、檢驗、研發、組裝及修理工業物品，且具公害之場所。

	類	檢驗、研發、組裝及修理物品之場所。	C-2	供儲存、包裝、製造、檢驗、研發、組裝及修理一般物品之場所。
D類	休閒、文教類	供運動、休閒、參觀、閱覽、教學之場所。	D-1	供低密度使用人口運動休閒之場所。
			D-2	供參觀、閱覽、會議之場所。
			D-3	供國小學童教學使用之相關場所。(宿舍除外)
			D-4	供國中以上各級學校教學使用之相關場所。(宿舍除外)
			D-5	供短期職業訓練、各類補習教育及課後輔導之場所。
E類	宗教、殯葬類	供宗教信徒聚會、殯葬之場所。	E	供宗教信徒聚會、殯葬之場所。
F類	衛生、福利、更生類	供身體行動能力受到健康、年紀或其他因素影響，需特別照顧之使用場所。	F-1	供醫療照護之場所。
			F-2	供身心障礙者教養、醫療、復健、重健、訓練、輔導、服務之場所。
			F-3	供兒童及少年照護之場所。
			F-4	供限制個人活動之戒護場所。
G類	辦公、服務類	供商談、接洽、處理一般事務或一般門診、零售、日常服務之場所。	G-1	供商談、接洽、處理一般事務，且使用人替換頻率高之場所。
			G-2	供商談、接洽、處理一般事務之場所。
			G-3	供一般門診、零售、日常服務之場所。
H類	住宿類	供特定人住宿之場所。	H-1	供特定人短期住宿之場所。
			H-2	供特定人長期住宿之場所。
I類	危險物品類	供製造、分裝、販賣、儲存公共危險物品及可燃性高壓氣體之場所。	I	供製造、分裝、販賣、儲存公共危險物品及可燃性高壓氣體之場所。

附註三、內政部法規

2009年內政部〈建築物防火避難性能設計 90 條之一〉：

建築物使用類組為 A-1 組者在避難層供公眾使用之出入口，應為外開門。出入口之總寬度，其為防火構造者，不得小於觀眾席樓地板面積每十平方公尺寬十七公分之計算值，非防火構造者，十七公分應增為二十公分。

內政部 67.3.10 台內營字第 774668 號函

上開規則所稱「觀眾席樓地板面積」應指觀眾席席位及同規則同編第一二四條規定之席位間通道之樓地板面積。不包括吸煙室、放映室、舞台及依同規則同編第九十二條第二款規定觀眾席以外之兩側及後側應設置之走廊。

附註四、數學推估 BP 值

0. 人在座位區(N=nxn 個人)的移動速度及走道上移動速度皆為 0.5m/s；

1. 人潮從座位區到走道（本研究節點一之前）：

輸入公式：若 $\frac{n}{2}$ 是奇數且另在定義域 2t 代入為 0

(1)數列(就在第 t 秒的單一秒內，以數學推算出能跑出來的人數)：

當 $0 \leq t \leq 2$ ，跑出來的人數為 0 人，

當 $2 \leq t \leq \frac{n}{2} - 1$ 也就是 $2 \leq t < 4$ ，跑出來的人數為 $[\frac{t}{2}]$ 人，

註[X]表示高斯符號，為不大於 X 的最大整數

當 $\frac{n}{2} \leq t \leq \frac{n}{2} - 1$ ，也就是 $5 \leq t < 21$ 且 t 為奇數秒，跑出人數為 $\frac{n-2}{4}$

或是 t 為偶數秒，跑出人數為 $\frac{n+2}{4}$

當 $2n + 2 \leq t < \frac{5}{2}n - 1$ ，也就是 $22 \leq t < 24$ ，跑出人數為 $\frac{\frac{5}{2}n + 1 - t}{2}$

當 $t \geq \frac{5}{2}n - 1$ ，也就是 $t \geq 24$ ，跑出人數為 0 (已全數跑出)。

(2)級數(從 0 到第 t 秒的所有秒數內，能跑出來的人數)：

當 $2 \leq t \leq \frac{n}{2} - 1$

且 t 為奇數秒，跑出人數為 $\frac{1}{4}t^2 - \frac{1}{4}$ 人

或是 t 為偶數秒，跑出人數為 $\frac{1}{4}t^2$ 人

當 $\frac{n}{2} \leq t \leq 2n - 1$

且 t 為奇數秒，跑出人數為 $\frac{1}{4}nt - \frac{1}{16}n^2 - \frac{1}{4}$

或是 t 為偶數秒，跑出人數為 $\frac{1}{4}nt - \frac{1}{16}n^2 + \frac{1}{4}$

當 $2n + 2 \leq t \leq \frac{5}{2}n - 1$

且 t 為奇數秒，跑出人數為 $-\frac{1}{4}t^2 + \frac{5}{4}t - \frac{17}{16}n^2$

或是 t 為偶數秒，跑出人數為 $-\frac{1}{4}t^2 + \frac{5}{4}t - \frac{17}{16}n^2 + \frac{1}{4}$ 人

2 人潮從走道到樓梯入口（本研究節點二）

假設，樓梯寬度允許的人數為 w，又從排隊到樓梯寬度允許的人數所需時間為 $\frac{w-2}{2}$ (平均)，且轉彎時差=w(平均)；

在本研究中，w=3, n=10, 人從走道踏入樓梯時差=1 秒。

(1)就時間分段討論下，每個時段各區累積人數: 若四區(有分左、右)一梯(置中)，會有五種分區下樓的情形，以 ABCDE 討論，第一區左側會往左跑，設為 A。第一區右側會往右跑，設為 B。第二區左側亦會往左跑，也設為 B。再來是第二區右側會往右側的梯跑，設為 C，第三區左側亦會往左跑到左側的梯，也設為 C。其餘類推。

當 $0 \leq t \leq \frac{1}{2}w + 2$, 本研究採 $0 \leq t \leq 3.5$

A~E 區 跑出人數為 0 人

當 $\frac{1}{2}w + 2 \leq t \leq \frac{3}{2}w + n + 1$, 本研究採 $3.5 < t \leq 15.5$

C 區 跑出人數為 $w^2 - \frac{1}{2}w^2 - w - 2$ 人

當 $\frac{3}{2}w + n + 1 < t \leq w^2 + \left(n + \frac{3}{2}\right)w + n + 1$, 即 $15.5 < t \leq 54.5$

CBD 區：跑出人數為 $t - \frac{3}{2}w - n - 1$ 人

當 $w^2 + \left(n + \frac{3}{2}\right)w + n + 1 < t \leq N - w^2 - \left(n - \frac{3}{2}\right)w + n + 3$,

即 $54.5 < t \leq 78.5$

CAE 區：跑出人數為 $t - w^2 - \left(n + \frac{3}{2}\right)w - n - 1$ 人

當 $N - w^2 - \left(n - \frac{3}{2}\right)w + 3 < t \leq \frac{2}{3}N + \frac{1}{3}w^2 + \left(\frac{1}{3}n + \frac{3}{2}\right)w + n + \frac{59}{3}$,

即 $78.5 < t \leq 95.8$

AE 區：跑出人數為 $\frac{3}{2}t - \frac{3}{2}N - \frac{3}{2}w^2 + \left(\frac{3}{2}n - \frac{9}{4}\right)w - \frac{3}{2}n - \frac{9}{2}$ 人

當 $\frac{2}{3}N + \frac{1}{3}w^2 + \left(\frac{1}{3}n + \frac{3}{2}\right)w + n + \frac{5}{3} < t \leq \frac{4}{3}N - \frac{1}{3}w^2 - \left(\frac{1}{3}n - \frac{3}{2}\right)w + n + \frac{5}{3}$, $95.8 < t \leq 136.5$

BD 區：跑出人數為 $\frac{3}{2}t - N - \frac{1}{2}w^2 - \left(\frac{1}{2}n + \frac{9}{4}\right)w - \frac{3}{2}n - \frac{5}{2}$ 人

(2) 從 0 到第 t 秒的所有秒數內，能跑出來的人數如下：

(i) 最左及最右的兩側子區，A&E 對稱，即 $A(t) = E(t)$

若 $w^2 + \left(n + \frac{3}{2}\right)w + n + 1 \leq t$, 跑出人數為 0

若 $w^2 + \left(n + \frac{3}{2}\right)w + n + 1 < t \leq N - w^2 - \left(n - \frac{3}{2}\right)w + n + 3$,

跑出人數為 $t - w^2 - \left(n + \frac{3}{2}\right)w - n - 1$

若 $N - w^2 - \left(n - \frac{3}{2}\right)w + n + 3 <$

$t \leq \frac{2}{3}N + \frac{1}{3}w^2 + \left(\frac{1}{3}n + \frac{3}{2}\right)w + n + \frac{5}{3}$,

跑出人數為 $\frac{3}{2}t - \frac{1}{2}N - \frac{1}{2}w^2 - \left(\frac{1}{2}n + \frac{9}{4}\right)w - \frac{3}{2}n - \frac{5}{2}$

若 $t \geq \frac{2}{3}N + \frac{1}{3}w^2 + \left(\frac{1}{3}n + \frac{3}{2}\right)w + n + \frac{5}{3}$, 跑出人數為 $\frac{1}{2}N$

(ii) 走道在兩側，且對稱 B&D 子區

當 $\frac{3}{2}w + n + 1 \leq t$, 跑出人數為 0 人

當 $\frac{3}{2}w + n + 1 < t \leq w^2 + \left(n + \frac{3}{2}\right)w + n + 1$,

跑出人數為 $t - \frac{3}{2}w - n - 1$ 人

當 $w^2 + \left(n + \frac{3}{2}\right)w + n + 1 < t \leq \frac{2}{3}N + \frac{1}{3}w^2 + \left(\frac{1}{3}n + \frac{3}{2}\right)w + n + \frac{5}{3}$,

跑出人數為 $w^2 + nw$ 人

當 $\frac{2}{3}N + \frac{1}{3}w^2 + \left(\frac{1}{3}n + \frac{3}{2}\right)w + n + \frac{5}{3} <$

$t \leq \frac{4}{3}N - \frac{1}{3}w^2 - \left(\frac{1}{3}n - \frac{3}{2}\right)w + n + \frac{5}{3}$,

跑出人數為 $\frac{3}{2}t - N + \frac{1}{2}w^2 + \left(\frac{1}{2}n - \frac{9}{4}\right)w - \frac{3}{2}n - \frac{5}{2}$ 人

當 $t \geq \frac{4}{3}N - \frac{1}{3}w^2 - \left(\frac{1}{3}n - \frac{3}{2}\right)w + n + \frac{5}{3}$, 跑出人數為 N 人

(iii) 中央區走道的兩側的 C 子區

若 $\frac{1}{2}w + 2 \leq t \leq \frac{3}{2}w + n + 1$, 跑出人數為 $wt - \frac{1}{2}w^2 - w - 2$

若 $\frac{3}{2}w + n + 1 < t \leq w^2 + \left(n + \frac{3}{2}\right)w + n + 1$,

跑出人數為 $t + w^2 + \left(n - \frac{3}{2}\right)w - n - 3$

若 $w^2 + \left(n + \frac{3}{2}\right)w + n + 1 < t \leq N - w^2 - \left(n + \frac{3}{2}\right)w + n + 3$,

跑出人數為 $t + w^2 + \left(n - \frac{3}{2}\right)w - n - 3$

若 $t \geq N - w^2 - \left(n + \frac{3}{2}\right)w + n + 3$, 跑出人數為 N

【評語】 052411

本研究以電腦模擬方式，推估大型場館之人潮疏散所需時間。

主題契合時事，充分瞭解研究內容，表達清晰。