

研究背景與動機

近年大型場館活動愈加頻繁，例如演唱會、棒球賽與各類大型賽事，往往在短時間內聚集大量觀眾入場，活動結束後更會出現瞬間大規模人流同時離場的情形，因此疏散規劃已成為場館營運與公共安全中不可忽視的關鍵工作，相較於火災、地震等突發情境下的「緊急疏散」，緊急疏散研究常需考量煙霧、結構損壞與恐慌行為等高度不確定因素，較難找出可被廣泛套用的共通模式；而「一般散場疏散」則是每一場活動都會真實發生的高頻情境，其人流動線、瓶頸位置與通道使用情形更能反映場館在空間配置與疏散設計上的結構特性。因此，本研究選擇以一般散場為切入點，建立一套適用於大型體育館的人群動態疏散規劃模型，並以「最短總疏散時間」為核心目標，期望找出可作為日常散場管理及未來應變規劃參考的通用型疏散策略。

研究範圍與目的

本研究以大型體育館活動結束後之一般散場為情境，建立多時段動態網路流最佳化模型，核心目標為最小化總疏散時間（自散場開始至最後一位觀眾離開安全區域所需時間）。模型於離散時間內決定各座位區人流導向各通道與出口之分配量，並將通道容量與各節點最大容許人數（人數上限）納入安全限制；進一步透過情境比較辨識壅塞位置與時間變化，作為疏散指引、動線設計與演練安排之量化依據。

研究方法

本研究將活動結束後之大型體育館一般散場建構為多時段動態網路流最佳化問題；於離散時間集合 T 內，決定各座位區觀眾分配至通道與出口的人流量，使全體觀眾在通道容量與各節點最大容許人數等安全限制下，以最短時間離開並完成疏散，輸出各時段之最適分流方案。

問題假設:

1. 大大型場館之結構可被轉換為一個由座位區 I 及通道/出口 J 所組成的離散有向網路。
2. 人員依照規劃之疏散路徑前進，不會隨機偏離指定路徑。
3. 僅考慮場館內部之空間與動線配置，不納入煙霧、火災、結構損壞等災害因素。
4. 疏散過程採用離散時間架構，整體過程被切割為一系列長度相同的固定時間段。
5. 各通道與出口之容量 C_j 在疏散過程中被視為固定常數，不隨人群密度或時間動態改變。
6. 任何超過最大人流容量限制的疏散方案皆視為不可行解。
7. 觀眾在疏散時僅會被導向距離其所在座位區不超過預設最大可接受距離的通道，以排除過度繞路或非理性的長距離路徑。
8. 模型之目標式為最小化總疏散時間，亦即求得在滿足所有容量與安全限制條件下之最短疏散時間。

符號定義:

集合	決策變數	參數
A 節線之集合，用來表示不同節點之間的實際連線路徑	P_j^t 在時間段 t 結束時，累積滯留在通道 j 裡的人數	C_j 通道與出口的容量限制，通道 j 單位時間內的最大流量
E 座位區進入通道的集合	R_i^t 在時間段 t 結束時，仍留在座位區 i 的人數	N_i 初始人數，區域 i 初始人數
G 通道進入出口的集合	T_{max} 疏散完成時間	P_j^{max} 節點 j 的最大允許滯留人數，超過此人數即視為不安全或不可行
I 座位區之集合	X_{ij}^t 在時間段 t ，從區域 i 流向通道 j 的人數流量	
J 通道與出口之集合，出口被視為特殊的通道，其流出量為零	Z_t $\begin{cases} 1 & \text{如果在時間 } t \text{ 疏散完成} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$	
T 時間集合		
V 所有節點集合， $V=I \cup J$		

數學模型:

目標式

$$\min T_{max} \quad (1)$$

限制式

- S.T. $R_i^0 = N_i \quad \forall i \in I \quad (2)$
- $R_i^t = R_i^{t-1} - \sum_{j \in E} X_{ij}^t \quad \forall i \in I, t \in T \quad (3)$
- $P_j^t = P_j^{t-1} + \sum_{i \in E} X_{ij}^t - \sum_{k \in G} X_{jk}^t \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4)$
- $0 \leq X_{ij}^t \leq C_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J, t \in T \quad (5)$
- $P_j^t \leq P_j^{max} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (6)$
- $\sum_{i \in I} R_{i,t} \leq M(1 - Z_t) \quad \forall t \in T \quad (7)$
- $Z_t \leq Z_{t+1} \quad \forall t \in T \quad (8)$
- $T_{max} \geq t_r \quad \forall t \in T \quad (9)$
- $X_{ij}^t, R_i^t, P_j^t, T_{max} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, t \in T \quad (10)$
- $Z_t \in \{0,1\} \quad \forall t \in T \quad (11)$

本研究之目標式以最小化總疏散完成時間 T_{max} 為核心，亦即讓「最後一位觀眾離開場館」所需時間最短，作為整體疏散效率的唯一衡量指標。

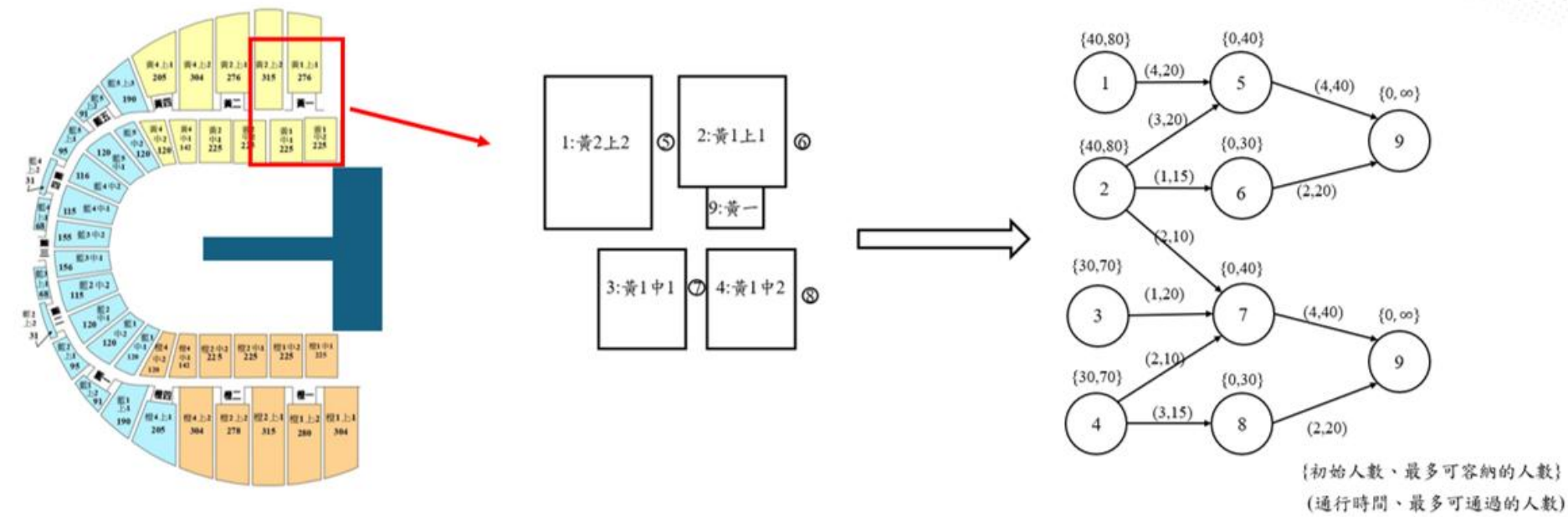
為確保方案可行且符合安全需求，模型加入多項限制式：首先以限制式(2)設定各座位區在 $t=0$ 的初始人數；限制式(3)維持座位區人數守恆，描述每期剩餘人數等於上一期剩餘人數扣除流出量；限制式(4)追蹤通道/出口節點內的累積滯留人數變化（流入-流出）；限制式(5)限制每期通道流量不得超過通道容量 C_j ；限制式(6)進一步以最大容許人數 P_j^{max} 約束任一時間段通道/出口內同時滯留人數，避免過度集中造成擁擠風險；最後限制式(7)-(11)用於定義疏散完成條件、 T_{max} 的關係，以及決策變數的非負與二元性，使模型能產生清楚的分流策略與完成時間判定。

實例情境分析

本研究選取國立體育大學綜合體育館（林口體育館）為案例，聚焦演唱會之高密度散場。場內看台、平面特區與多層通道交織，散場瞬間人流釋放且可能共用出口，易產生瓶頸。故以最小化總疏散時間為目標，並以通道容量與節點人數上限約束，驗證模型於複雜場域之適用性。

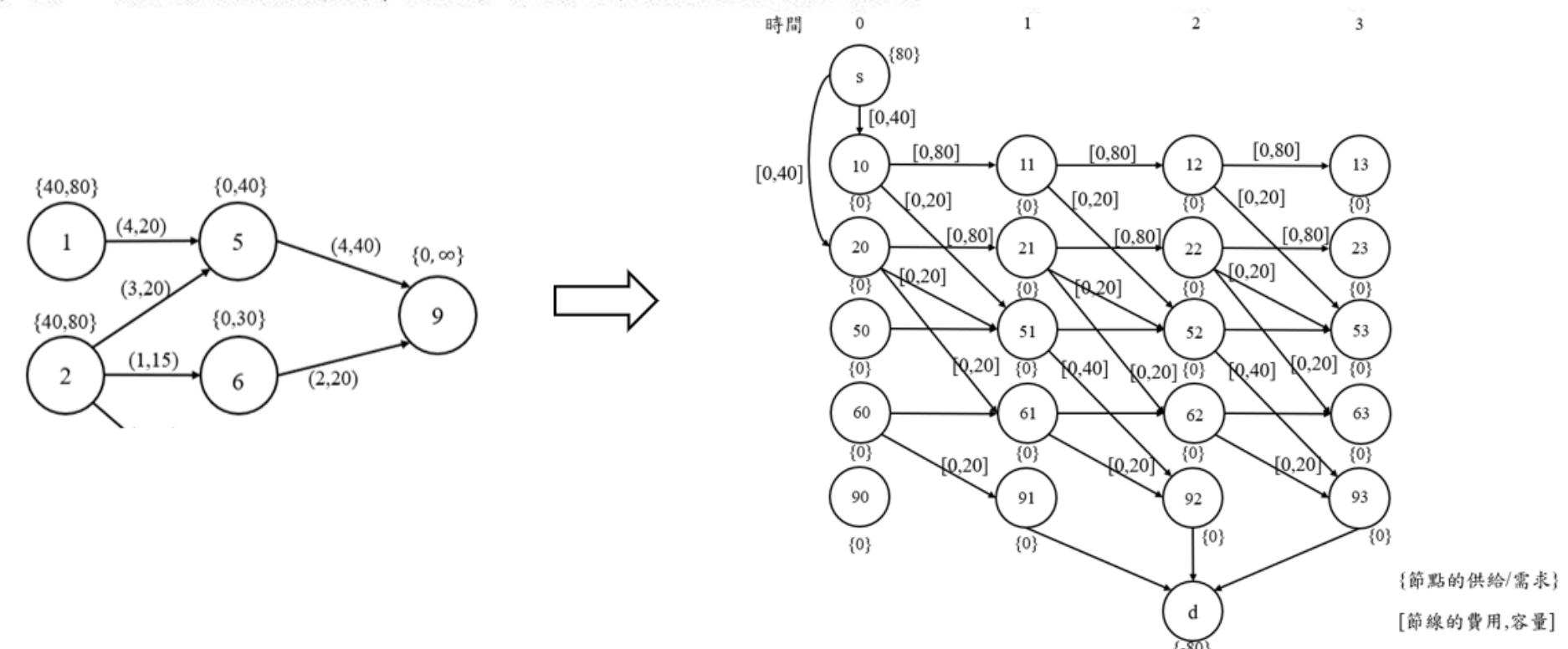
靜態網路圖建構:

為將大型場館的複雜空間轉換為可求解的網路結構，本研究先以局部座位區進行小規模疏散示範，再依場館配置建立靜態網路 $G=(V,E)$ 。其中，座位區定義為起始節點並承載初始人數 N_i ；走道、樓梯口與交匯處定義為中繼節點，用於人流轉運與暫時滯留；安全出口定義為終點節點，代表人員離開系統。節點間的箭頭為節線，表示可行移動路徑；並為每條節線設定由通道寬度推得的容量與通行時間，作為後續時空網路模型的基礎。



動態網路擴展圖建構:

疏散是隨時間變化的動態過程，靜態網路難以描述等待、排隊與擁塞，因此本研究採用時間擴展技術，將場館網路沿時間軸複製形成時空網路。模型以兩類節線表達人群行為：移動節線描述跨節點移動並受通道容量限制；滯留節線描述原地等待並受節點最大容許人數限制。藉此可同時捕捉前進與等待，將動態疏散轉化為可求解的網路流問題。



實例情境與結果分析:

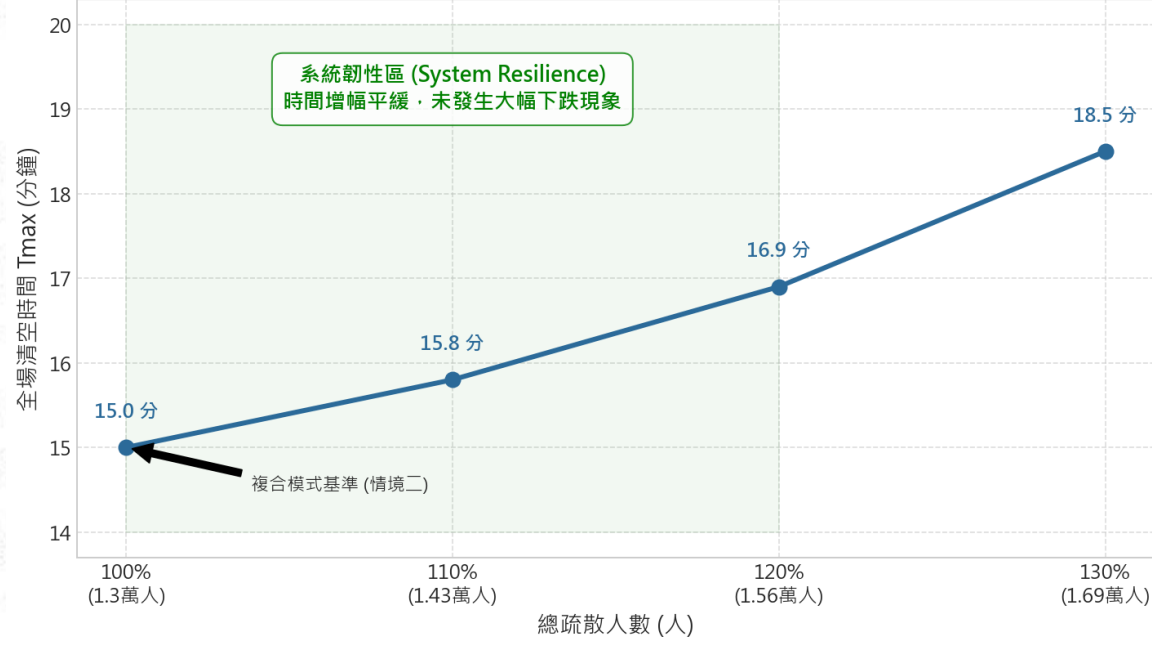
本研究以國立體育大學綜合體育館演唱會散場為實例，設計兩種常見配置進行情境比較。情境一（全座席）為看台與平面皆採座席配置，平面層受座椅與走道限制，移動路徑較受限；情境二（複合配置）為平面站席搭配看台座席，平面區動線相對淨空，可提供較高的移動效率，並提高平面出口的有效通行能力。兩情境皆在相同之通道容量與節點人數上限等安全限制下求解最適分流策略，並以總疏散時間、平均疏散效率與關鍵出口通量作為評估指標；其求解結果與差異比較如表所示：

評估指標	情境一：全座席	情境二：複合配置	差異分析 (變化幅度)
總疏散人數	9006 人	13004 人	人數負載增加 +44.4%
疏散總時間	14.00 分鐘	15.00 分鐘	時間僅增加 +7.1%
平均疏散效率	643 人/分	867 人/分	疏散流量提升 +34.8%
平面層的流量	150 人/分	180 人/分 (加權)	單出口通量提升 +20.0%

敏感度分析顯示，總人數

由 9006 增至 13004 (+44%) 時，疏散時間僅由 14 分增至 15 分 (+7%)，未出現指數型惡化，呈現低敏感度與系統韌性。其主因來自空間配置差異平面座椅障礙會降低效率，而平面淨空可使群眾多向走最短路徑並提升通量。故實務上應優先降低動線障礙並確保主要出口以高流率運作，而非單純限制人數。

總人數對疏散時間之敏感度分析 (Sensitivity Analysis)



結論與未來展望

結論

- ✓ 建立動態網路流模型，求解最短總疏散時間與最適分流
- ✓ 動線/空間配置影響大於人數，平面淨空可提升通量、減少瓶頸
- ✓ 輸出瓶頸位置與時間，提供出口配置與引導策略依據。

未來展望

- ✓ 使用模擬軟體納入人群行為因素，提升情境真實性
- ✓ 動線設計改善效益分析
- ✓ 延伸至緊急疏散情境（封閉通道、危害條件）做比較分析