

九龍達之路
香港城市大學
胡法光運動中心
陳大河綜合會堂
2016 年 5 月 20 日
屋頂結構倒塌事件
最終調查報告

(部分內容被遮蓋)

因應資料提供者曾在保密及不損害其法律權益下向屋宇署提供資料，以及為不影響可能採取的法律行動，本報告書中第 10.3 及 10.4 段的部分內容已被遮蓋。



屋宇署

2017 年 5 月

引言

1. 2016 年 5 月 20 日下午約 2 時 30 分，香港城市大學（下稱“城大”）胡法光運動中心（下稱“運動中心”）內名為陳大河綜合會堂的多用途體育館（下稱“體育館”）屋頂結構倒塌。該屋頂結構（下稱“屋頂結構”）上有淺泥層的綠化覆蓋面。事件中，兩名城大職員受輕傷，另一人受驚。三人送院治療，並於同日稍後時間出院。

2. 屋宇署立即派員視察，沒有發現運動中心其他部分有任何明顯結構危險。屋宇署亦進行緊急鞏固及清理工程，並同時就倒塌事件（下稱“事件”）展開調查。屋宇署的調查旨在評估屋頂結構在設計和建造上的結構安全及在事發前的狀況，以確定倒塌的成因。

3. 2016 年 6 月 17 日，屋宇署發表《初步報告》，涵蓋相關情況的初步發現及辨識可能導致屋頂結構倒塌的因素。鞏固及清理工程在 2016 年 9 月初完成，地盤已交還城大。

4. 本報告是事件的《最終調查報告》，涵蓋《初步報告》所載的事項，並載述：

- (a) 屋宇署調查結果；以及
- (b) 屋宇署就調查結果所作的結論。

調查方法

5. 本《最終調查報告》所載的資料以下列各項為依據：

- (a) 屋宇署在事發後進行的實地視察和調查；
- (b) 屋宇署備存的記錄，包括運動中心經批准的建築圖則、排水設施圖則和結構圖則，以及相關文件（下稱“批准圖則”）；

- (c) 從城大獲取的資料、文件及材料，包括但不限於 2016 年 6 月 10 日發表的《城大運動中心事件調查委員會報告》(經遮蓋版本) (下稱“《調查委員會報告》”¹)、城大運動中心事件調查委員會網站、事件報告書²、閉路電視錄影片段，以及校園建築物綠化屋頂的合約文件³ (下稱“綠化屋頂項目”⁴) 等；
- (d) 屋宇署與相關人士在事發後的會面記錄；
- (e) 從其他政府部門獲取的資料，包括航攝照片和雨量記錄；
- (f) 事發後現場收集的樣本實驗室測試結果；以及
- (g) 案頭研究、分析、電腦建模及模擬，包括屋宇署外聘專家的調查結果。

涉事的建築物及觀察所得

6. 運動中心及體育館

6.1 運動中心位於康樂及體育大樓內，該大樓是 1990 年 1 月落成的 6 層高鋼筋混凝土建築物⁵。位於運動中心 05 樓的體育館是一個多用途場館，淨空高度約為 10 米，觀眾席設於 06 樓。

7. 屋頂

7.1 體育館屋頂結構是以空間桁架裝置為主要結構部分，由 07 樓運動中心的主屋頂 (下稱“主屋頂”) 的鋼筋混

¹ http://www.cityu.edu.hk/ic/report/CityU_IC_Report.pdf. (此報告只提供英文版本)

² 這些是 2016 年 5 月 20 日倒塌事件發生前，城大校園發展及設施管理處因應有關體育館的投訴及報告擬備的事件報告書。

³ 根據《調查委員會報告》第 8 頁，城大與一名承建商就“設計及建造：校園建築物綠化屋頂”項目簽訂該合約。

⁴ 屋宇署《初步報告》第 13 段。

⁵ 佔用許可證指明，有關的康樂及體育大樓只准作康樂及體育綜合建築物、停車場及游泳池等非住用用途。

凝土橫樑支撐，體育館的天台為 08 樓（下稱“該屋頂”）。根據批准圖則，該屋頂是平屋頂，沒有鋪設綠化覆蓋面。屋宇署沒有任何根據《建築物條例》就該屋頂呈交改動及加建工程申請的記錄。

7.2 該屋頂長 39 米及闊 33 米，面積為 1 287 平方米，只能經由主屋頂的豎梯到達，不設邊緣防護欄障、排水明渠或雨水渠。根據批准圖則，該屋頂設計為以 1 比 80 的斜度向兩對邊傾斜，以把雨水排放至設有排水口及排水明渠的主屋頂。
(*附件 1 - 屋頂圖則*, *附件 2 - A-A 截面圖*)

7.3 根據批准圖則，該空間桁架裝置長 42 米、闊 36 米及高 2.25 米，以熱軋型矩形空心鋼管為弦、冷成型圓形空心鋼管為腹組成，由一系列間距約 3 米裝置於主屋頂四邊橫樑上的支座支撐。根據批准圖則，該空間桁架裝置支撐着作為該屋頂鋪蓋面的一層 125 毫米厚鋼筋混凝土樓板（下稱“屋頂樓板”）、20 毫米厚的地台、兩層木絲板、屋宇裝備及設備。
(*附件 3 - 空間桁架裝置的總體結構布置圖*)

8. 該屋頂的綠化覆蓋面

8.1 根據屋宇署調查所得，該綠化覆蓋面約長 35 米、闊 29 米及厚 100 毫米，面積為 1 015 平方米，為組件式綠化屋頂裝配組合，以基質物料、泥土及預種組件托盤逐層鋪設在屋頂上，以其自身重量置於屋頂上，不設任何嵌固件，四邊以 120 毫米高的獨立疏孔“L”型書擋式金屬邊緣板定位。

8.2 該綠化覆蓋面每日由自動灌溉系統監控灌溉，全部喉管皆鋪設在綠化覆蓋面內，並無任何嵌固件。調查期間發現，根據上文第 5(c)段所述的綠化屋頂項目，有一新建水缸⁶以供水灌溉校園不同地方新落成的綠化屋頂。

⁶ 一名認可人士及一名註冊結構工程師於 2015 年 7 月根據《建築物條例》向屋宇署呈交改動及加建工程圖則，於學術樓(一)的屋頂建造玻璃強化纖維水缸及相關的支撐基座。有關工程的註冊一般建築承建商亦於指明表格(表格 BA14)核證有關工程於 2015 年 12 月完成。

8.3 該屋頂並無進行新的或額外的渠務工程。根據綠化覆蓋面的設計，過多的水會從表面（即泥土及植被表面）溢出，或從綠化覆蓋面滲入基質物料，並由於引力沿屋頂的斜面流出，透過金屬邊緣板側邊的疏孔流走。從綠化覆蓋面（08 樓）排出的水繼續向下流到主屋頂（07 樓）。

8.4 根據城大《調查委員會報告》第十四頁中指出，毗鄰的惠卿劇院的同類綠化覆蓋面已在事發後差不多即時被移除，而根據有參與綠化工作的城大校園發展及設施管理處的職員目測後表示，事發後從惠卿劇院收集所得的泥土樣本與該處有關職員目擊進行的秤重示範所用的物料差別甚大。此外，根據城大《調查委員會報告》第十六頁中指出，參與綠化屋頂項目的一名認可人士採用的一套數據，有可能是以在 1989 年已被取代的設計計算資料為依據。

屋宇署調查結果

9. 相關情況及實驗室測試結果顯示，空間桁架裝置及屋頂樓板與批准設計⁷大致相若，但有下述不一致的情況，以及空間桁架裝置的外加荷載超出批准設計所預期或考慮的範圍（*附件 4 – 屋頂截面示意圖（倒塌事件發生前）*）：

- (a) 屋頂樓板上有一層厚於原本設計的地台（底層地台）及該屋頂防水膜下有另一層地台（上層地台）；以及
- (b) 綠化覆蓋面。

10. 底層地台及上層地台

10.1 根據批准圖則⁸，空間桁架裝置的批准外加荷載（即

⁷ 見批准圖則顯示的設計。

⁸ 設計外加荷載及恆載指明於建築事務監督在 1989 年 2 月 3 日批准的圖則編號 HKCP/101。在批准結構圖則中，空間桁架裝置的自身重量(0.5 千帕斯卡)已另行計算。

活荷載)為 0.75 千帕斯卡，批准恆載為 4.25 千帕斯卡，批准時已顧及空間桁架裝置的上下方裝設不同物料層⁹所造成的荷載。

10.2 事發後現場收集的混凝土芯樣顯示，屋頂樓板上有兩層地台及一層發泡膠類隔熱層，與批准設計不同。這層隔熱層的荷載(0.13 千帕斯卡)沒有造成明顯影響，但包括空間桁架裝置上的屋頂樓板、上層地台(0.88 千帕斯卡)及底層地台(1.45 千帕斯卡)重量¹⁰在內的空間桁架裝置的整體外加恆載增至 5.75 千帕斯卡，即比其批准的恆載 4.25 千帕斯卡高出約 35%。上層地台及底層地台的最高厚度分別約為 64 毫米及 93 毫米，有別於批准設計的 20 毫米厚地台。

10.3 因應屋宇署的查詢，[REDACTED]

[REDACTED] 屋宇署經考慮 1988 年至 2016 年的航攝照片、參與康樂及體育大樓建造工程的相關人員¹¹的證人陳述書，以及混凝土芯樣後，[REDACTED]

10.4 [REDACTED]

[REDACTED] 屋宇署並無有關審批上層地台圖則的記錄。

10.5 荷載加重至超出於批准圖則列明空間桁架裝置的批准恆載，與《初步報告》第 18(h)段所辨識綠化覆蓋面下方的屋頂樓板導致負荷過重的因素有關。

⁹ 這些包括屋頂樓板、20 毫米厚的地台、兩層木絲板，及屋宇裝備及設備等。

¹⁰ 根據現場收集的樣本的實驗室測試結果的平均值。

¹¹ 建造項目的認可人士、建築設計師及項目結構工程師，以及前建築物條例執行處(屋宇署前名稱)的人員。

10.6 該屋頂的底層地台及上層地台均屬《建築物條例》下的建築工程，須事先獲建築事務監督批准圖則和同意施工，方可在該屋頂進行有關工程。

11. 綠化覆蓋面

11.1. 根據事發後現場收集的綠化覆蓋面樣本的實驗室量度結果，當綠化覆蓋面處於完全濕透狀態時，其荷載約為 1.32 千帕斯卡，即比城大提供的綠化覆蓋面量度報告結果（0.656 千帕斯卡）¹² 高出約 100%。根據同樣的實驗室量度結果，基質物料的淨重量佔完全濕透綠化覆蓋面重量約 4%。

11.2. 荷載加重至超出空間桁架裝置的批准恆載，與《初步報告》第 18(i)段所辨識屋頂上鋪設的綠化覆蓋面導致負荷過重的因素有關。

11.3. 在屋頂鋪設綠化覆蓋面是否構成建築工程而須事先取得建築事務監督批准圖則及同意施工，取決於綠化覆蓋面的嵌固程度、永久性、擬定用途和規模，相關的建築工程和在綠化覆蓋面及四周設置的其他設施，以及裝配及移除綠化覆蓋面的簡易度。經考慮所有相關因素（包括但不限於上文第 8 段所述有關綠化覆蓋面的性質和設計）後，建築事務監督認為鋪設該綠化覆蓋面¹³並不構成《建築物條例》下的建築工程。鑑於該綠化覆蓋面不涉及《建築物條例》下的建築工程，因此無須事先獲得建築事務監督批准圖則和同意施工。

11.4. 建築事務監督按《建築物條例》發出的佔用許可證未有列明該屋頂的用途。根據批准圖則，該屋頂指定為《建築物條例》下的平屋頂，屬於不能到達的屋頂設計，邊緣不設防護欄障。該屋頂屬限制區，僅供維修人員使用，進入需要接受

¹² 根據《調查委員會報告》第九頁

¹³ 該綠化覆蓋面是指於本報告第 1 段所述，位於體育館屋頂結構上的淺泥層綠化覆蓋面。建築事務監督認為鋪設該綠化覆蓋面不構成《建築物條例》下的建築工程，是基於這個案的事實因素，並不代表所有綠化覆蓋面均不屬建築工程。

保安程序。無論如何，該綠化覆蓋面是該屋頂上的設施。該屋頂仍然是平屋頂，僅限於為綠化覆蓋面進行維修工作的人員進出。有鑑於此，建築事務監督認為鋪設綠化覆蓋面並未構成《建築物條例》下的用途更改。

12. 對該屋頂排水的綜合影響

12.1. 當綠化覆蓋面完全濕透時，施加於空間桁架裝置的荷載（包括屋頂樓板、底層地台、上層地台及綠化覆蓋面的重量）約為 7 千帕斯卡，比空間桁架裝置的批准恆載（即 4.25 千帕斯卡）高出約 65% 或比空間桁架裝置的總設計恆載及活荷載（即 5.0 千帕斯卡）高出約 40%。

12.2. 空間桁架裝置因鋪設了綠化覆蓋面及兩層地台，加上綠化覆蓋面吸收水分而水分積存在該屋頂上，外加荷載因而增加。由於荷載遞增，空間桁架裝置的整體撓度逐漸增加，屋頂的斜度則降低。水流及排放速率均受影響，情況因綠化覆蓋面的泥土及植被表面粗糙和高低不平而進一步惡化。隨着綠化覆蓋面的水量增加，不同位置出現積水。

12.3. 該屋頂斜度下降，阻礙屋頂的水順利排走，引致綠化覆蓋面在事發前積水，而積水進一步增加屋頂的荷載。

12.4. 上文第 10.5 及第 11.2 段提及兩項與荷載過重有關的因素，兩者綜合的影響與《初步報告》第 18(j)段辨識的屋頂積水有關聯。

13. 其他並非導致倒塌事件的發現

13.1. 屋宇署在調查期間發現批准設計與事發後現場收集的樣本之間有兩處不一致的情況。不過，結構分析顯示這兩點並非導致倒塌事件的原因，詳情載於下文。

13.2 控制該屋頂斜度的金屬嵌釘

13.2.1 根據批准設計，不同長度的金屬嵌釘固定在空間桁架裝置上方的不同位置，使該屋頂向兩對邊傾斜，以排走雨水。事發後現場收集的樣本顯示，所有金屬嵌釘均經縮短，而屋頂表面向四邊向下傾斜。縱使如此，該屋頂仍大致維持足夠的斜度，亦沒有影響結構事宜。

13.3 導向式支座

13.3.1. 根據批准設計，導向式支座是空間桁架裝置裝設於主屋頂的鋼筋混凝土橫樑上的支承點。實地視察及事發後收集的樣本發現，部分導向式支座採用了直徑較大的暗樺桿而位置亦有偏移，因此，樑面與暗樺桿的邊距（一般稱為混凝土保護層）少於批准設計。然而，根據事發後現場收集的混凝土樣本經實驗室測試結果顯示，其極限抗剪力及容許承載力均足以抵抗原本設計荷載下施加於導向式支座的所需剪力。因此，該不一致的情況並不影響空間桁架裝置的結構表現。

事件

14. 根據已有資料、屋宇署調查結果以及結構分析，下文第 15 及第 16 段載述事件經過。

15. 屋頂結構倒塌前的荷載狀況

15.1 批准外加荷載為 0.75 千帕斯卡，批准恆載為 4.25 千帕斯卡。屋宇署調查發現，在鋪設綠化覆蓋面前，空間桁架裝置的外加恆載已增至約 5.75 千帕斯卡，綠化覆蓋面進一步增加空間桁架裝置的外加荷載。綠化覆蓋面的重量因應不同含水量而變化，增加的荷載亦隨之而有所不同。

15.2 該屋頂的斜度設計為 1 比 80，但屋頂的外加荷載令實際斜度降低。額外荷載增加空間桁架裝置的整體撓度，亦降低屋頂的斜度。

15.3 2016 年 5 月 10 日，天文台三度發出黃色暴雨警告信號，以及兩度發出紅色暴雨警告信號，九龍塘區一個氣象站錄得超過 90 毫米降雨量。大雨及灌溉水滲入綠化覆蓋面，當過多的水未能有效排放的時候，綠化覆蓋面的重量便會增加。據報考試期間有些水泥碎片從體育館屋頂墮下。

15.4 在 2016 年 5 月 10 日後，綠化覆蓋面的灌溉系統繼續每日運作。從資料所得，綠化覆蓋面在 2016 年 5 月 13 日及 17 日發現有積水。

15.5 事發後從現場收集的樣本透過電腦三維等高線計算方法，推算該屋頂的斜度剖面。結構分析結果發現，厚度不一的不同物料層，連同屋頂的外加荷載所造成的撓度，導致大範圍的斜度降低，阻礙排水，以致這些範圍出現積水。隨着綠化覆蓋面的含水量增加，積水便在這些範圍形成。

15.6 結構分析發現，當綠化覆蓋面處於完全濕透，以及局部範圍出現積水時，空間桁架裝置的一條樑腹構件便臨近極限承載力，達臨界狀態。當綠化覆蓋面已處於完全濕透狀態，部分範圍出現的局部積水構成額外重量，足以觸發該屋頂結構倒塌。

16. 2016 年 5 月 20 日屋頂結構倒塌事件

16.1 2016 年 5 月 20 日早上有微雨，綠化覆蓋面如常進行灌溉。額外的水量令處於臨界狀態的樑腹構件進一步逼近極限承載能力。由於空間桁架裝置下方裝設的水管¹⁴約於下午 2 時 15 分（即倒塌發生前 15 分鐘）爆裂，體育館疏散工作人員。水不斷傾流而下，淹蓋體育館大部分樓面範圍，亦可能弄濕屋頂樓板下方的木絲板，加重空間桁架裝置的荷載。

16.2 處於臨界狀態的樑腹構件到達極限承載能力時出現

¹⁴ 根據所得資料，空間桁架裝置下方裝設的輸水管只有消防花灑喉管。

壓曲¹⁵，由損毀構件承擔的荷載瞬間重新分布至其他構件。其後，木絲板持續變濕，受影響的構件亦到達極限承載能力而損毀。隨着越來越多構件損毀，整個空間桁架裝置的結構整體性亦隨之受破壞。失去結構整體性的空間桁架裝置無法維持原狀而開始變形，對支座產生巨大的橫向力。支座的暗樺桿被扯離，屋頂結構則倒塌至體育館樓面。

結論

17. 在《初步報告》中，屋宇署根據當時所得的資料辨識出 11 項¹⁶可能導致屋頂結構倒塌的因素。經查證相關情況、有關資訊、已有文件和材料，以及結構分析和電腦建模分析後，屋宇署未有辨識出導致倒塌的新因素。基於調查結果及考慮所有相關因素後，建築事務監督認為倒塌是由於負荷過重引致，並因為綠化覆蓋面局部積水產生額外重量而觸發事件。在《初步報告》辨識的因素中，除下列 3 項是導致事件的成因外，其他因素均非直接成因：

- (a) 屋頂結構的加厚地台導致該屋頂負荷過重；
- (b) 鋪設綠化覆蓋面導致該屋頂負荷過重；以及
- (c) 綠化覆蓋面局部積水導致該屋頂負荷過重。

屋宇署

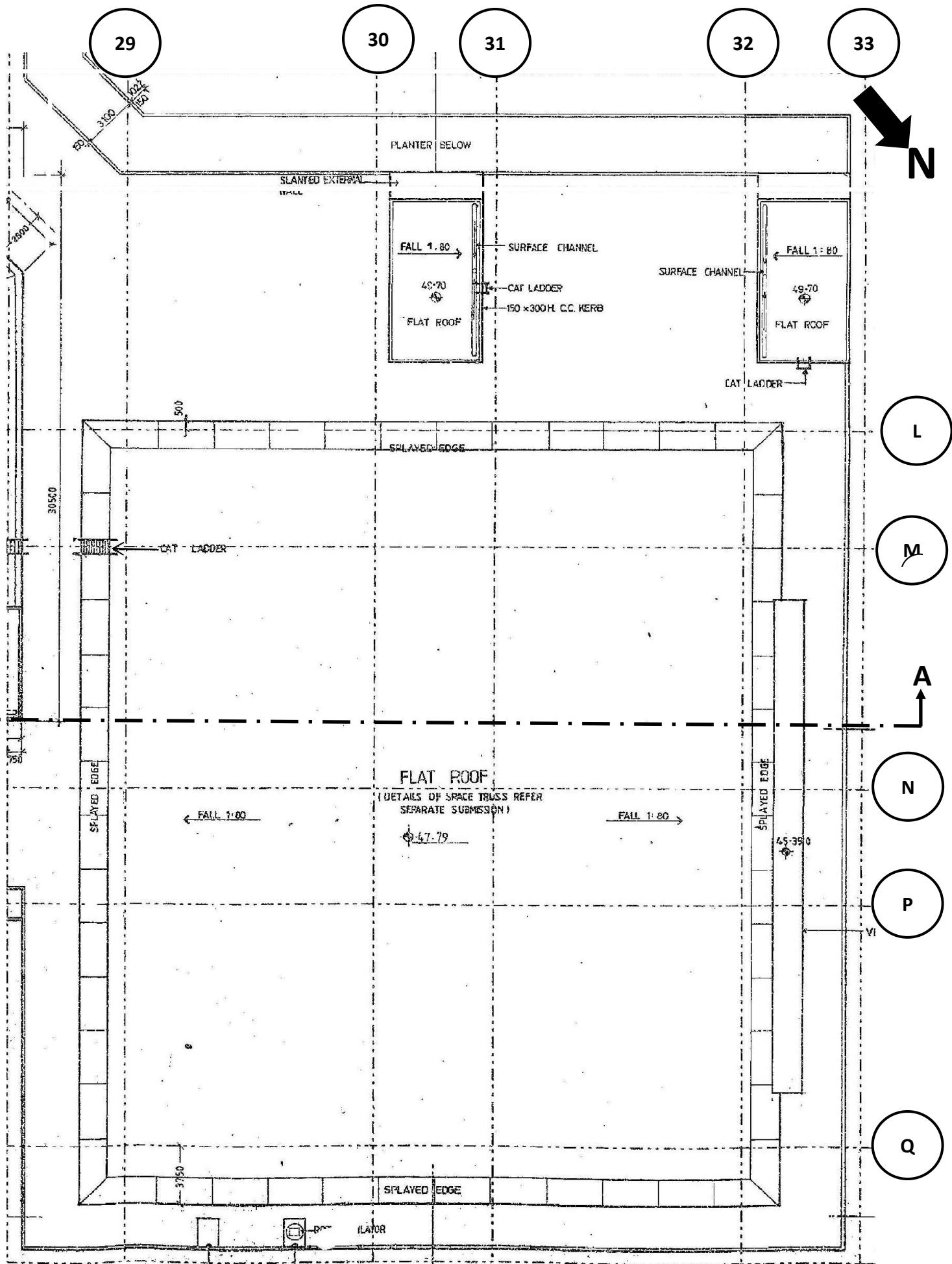
2017 年 5 月

¹⁵ 壓曲是結構組件受壓下的一種損毀情況，特徵為結構構件因高壓應力而突然發生側移損毀，而損毀時的壓應力超出該構件的極限承載能力。

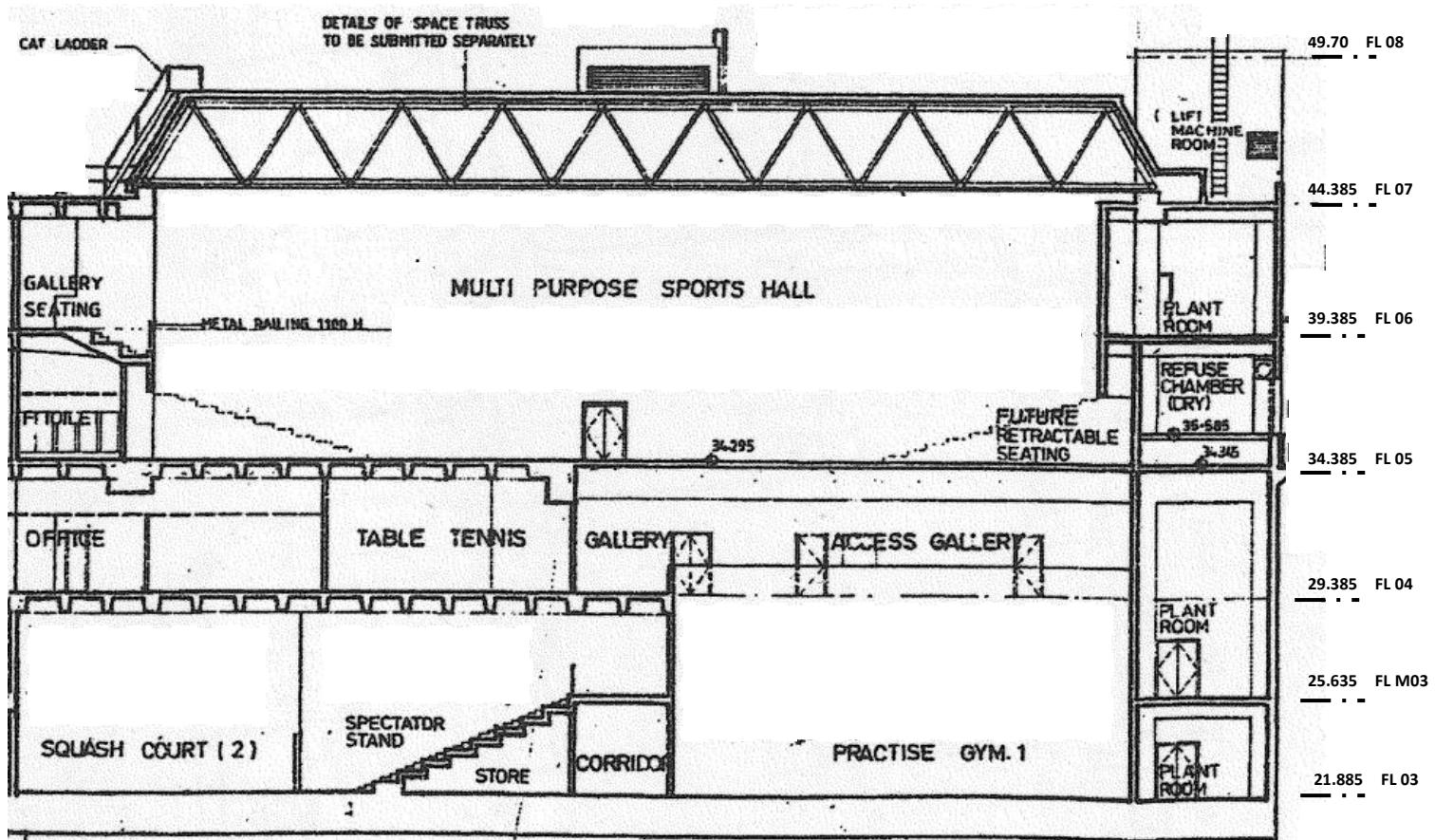
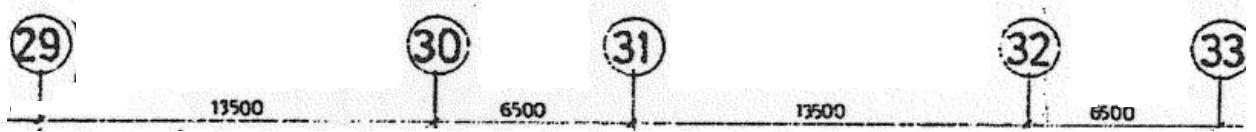
¹⁶ 11 項因素包括(a) 空間桁架裝置的設計缺陷；(b) 空間桁架裝置使用不合標準的物料；(c) 空間桁架裝置的建造不一致，不符合原本設計；(d) 空間桁架裝置工程質量欠佳；(e) 空間桁架裝置下方裝設過多屋宇裝備，導致負荷過重；(f) 空間桁架裝置欠缺保養；(g) 違規改動空間桁架裝置；(h) 綠化覆蓋面下方的屋頂樓板導致負荷過重；(i) 屋頂上設置的綠化覆蓋面導致負荷過重；(j) 排水系統欠妥及屋頂積水；以及(k) 屋頂使用不當。

縮寫及辭彙

批准設計	批准圖則顯示的設計
批准圖則	屋宇署備存的記錄，包括運動中心經批准的建築圖則、排水設施圖則、結構圖則，以及相關文件等
《建築物條例》	《建築物條例》（第 123 章）
底層地台	調查發現屋頂樓板被一層地台覆蓋
城大	香港城市大學
《調查委員會報告》	城大於 2016 年 6 月 10 日公布的《城大運動中心事件調查委員會報告》（經遮蓋版本）
主屋頂	指批准圖則顯示的運動中心 07 樓
《初步報告》	屋宇署在 2016 月 6 月 17 日發表的《九龍達之路香港城市大學胡法光運動中心陳大河綜合會堂 2016 年 5 月 20 日屋頂結構倒塌事件初步報告》
該屋頂	指批准圖則顯示的陳大河綜合會堂 08 樓
綠化屋頂項目	《調查委員會報告》提及，由城大校園發展及設施管理處於 2015 年年底推行的“設計及建造：校園建築物綠化屋頂”項目
屋頂樓板	批准圖則顯示為 125 毫米厚的鋼筋混凝土樓板，作為該屋頂鋪蓋面
體育館	陳大河綜合會堂
運動中心	胡法光運動中心
空間桁架裝置	批准圖則顯示為空間框架，用來支撐屋頂樓板、地台、木絲板、屋宇裝備及設備等
上層地台	屋頂防水膜下方的一層地台



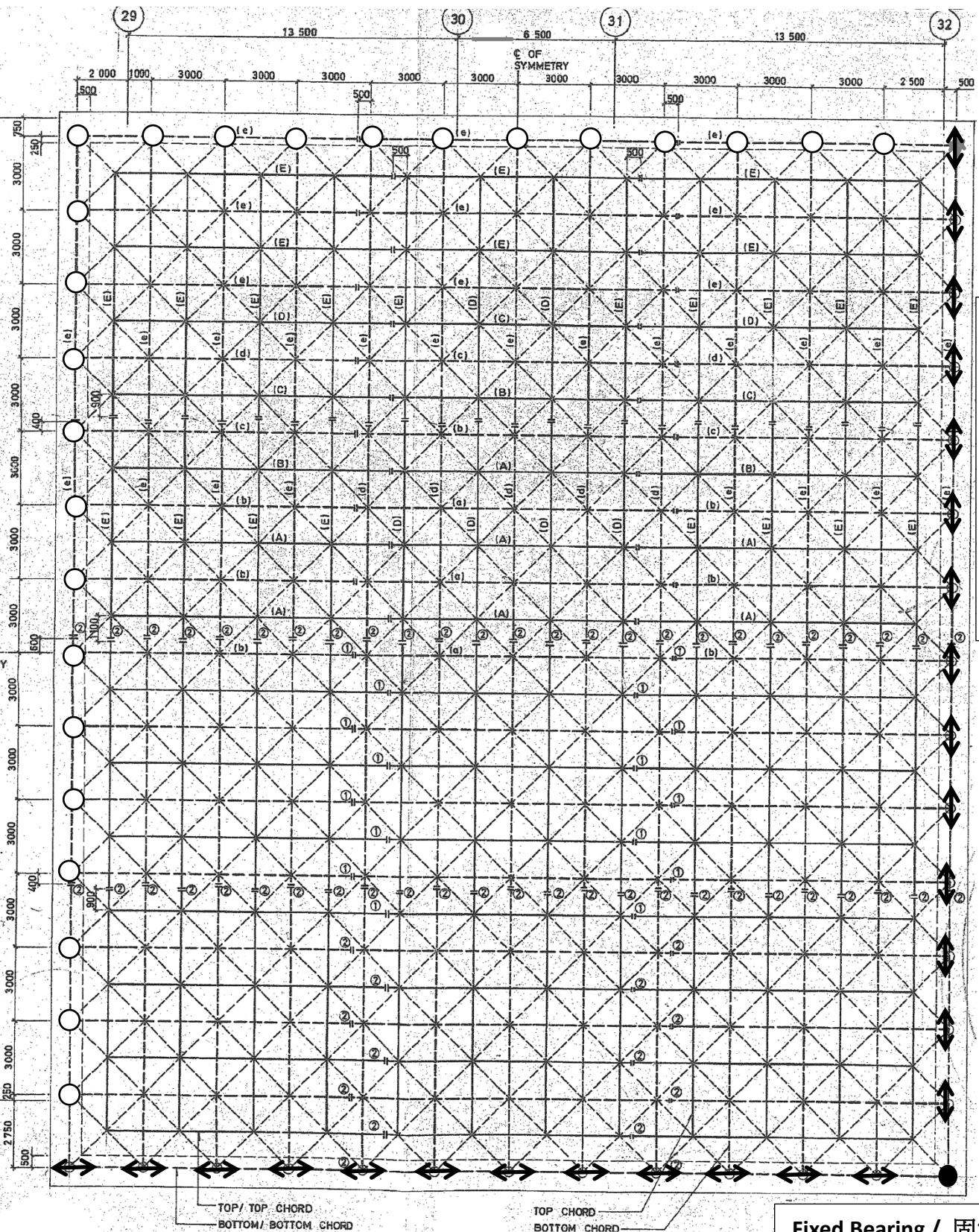
Annex 1 – Roof Plan
附件 1 – 屋頂圖則
(Floor 08 / 08 樓)



Annex 2 – Section A - A
附件 2 – A - A 截面圖
(Hu Fa Kuang Sports Centre / 胡法光運動中心)

Free Bearing / 無導向式支座 ○

Free Bearing / 無導向式支座 ○



Fixed Bearing / 固定支座



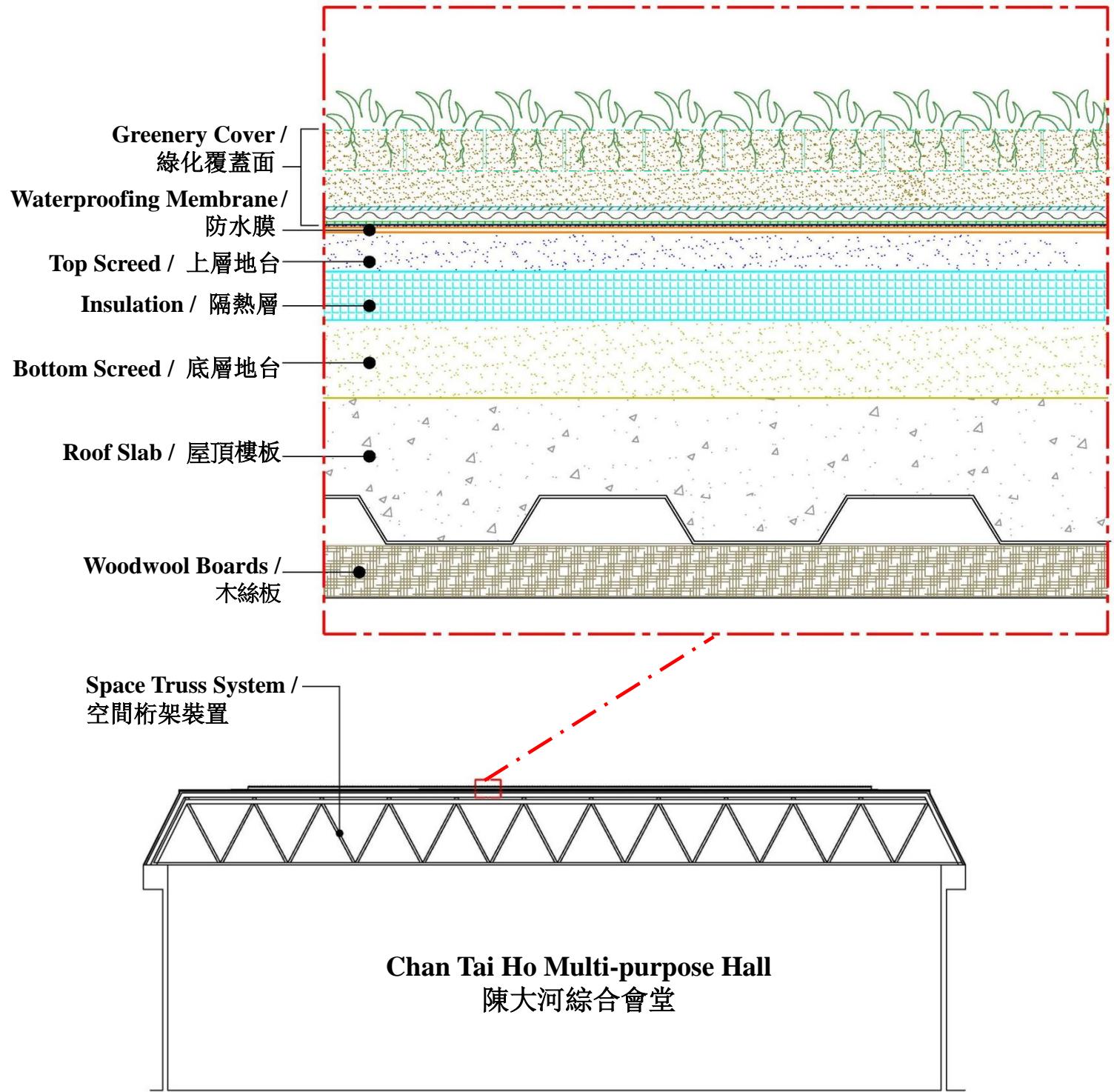
Guided Bearing / 導向式支座

(↔ Free / 活動方向)

Guided Bearing / 導向式支座
(↔ Free / 活動方向)

N

Annex 3 – General Structural Layout of the STS
附件 3 – 空間桁架裝置的總體結構布置圖



Not to Scale / 不按比例

Note: The diagram is indicative and for reference only.

備註： 圖表僅作參考示意用途。

**Annex 4 – Indicative Section of the Roof (Before Collapse)
附件 4 – 屋頂截面示意圖（倒塌事件發生前）**