

地震發生後的長週期震動

蕭乃祺

中央氣象署地震測報中心副主任

何謂長週期震動？

長週期震動 (long-period ground motion, LPGM) 係指地震發生後，地震波向外傳遞時，週期較長的波相 (phase) 所造成的震動，週期約在 2-10 秒 (Furumura & Oishi, 2023)。造成長週期震動的波相速度比 S 波速度慢，通常每秒小於 3 公里，波長可達數公里至十數公里。跟高頻震波 (1 Hz 以上) 比較起來，長週期地震波具有衰減慢、傳播距離遠的特性，當傳遞至 100 多公里以外鬆軟的地表岩層，例如沖積平原或沉積盆地，常常會來回振盪，形成表面波，震幅被放大、震動時間被拉長。

長週期震動的週期，往往與高層建築物 (如 20 層樓以上的大樓) 的自然振動週期 (natural period) 相近，因為共振 (resonance) 的關係，導致高樓產生長時間且大幅度、慢節奏的搖晃。建築物的自然振動週期隨高度而變化，建築物越高，週期越長。根據經驗法則，樓層數 N 層的建築物，其自然振動週期約等於 $N/10$ 秒。低層建築物由於自然振動週期較短 (小於 1 秒)，受到一般高頻的地震波影響較大；長週期地震波則因為震動週期較長，對於高樓層建築物的影響顯著，越高樓層搖晃振幅越大 (圖 1)。

圖 1
不同週期地震波對於建築物的影響示意圖



長週期震動開始受到世人矚目，源於 1985 年的墨西哥大地震 (Koketsu & Miyake, 2008)。該地震的地震矩規模 (MW) 高達 8.0，發生在墨西哥西南太平洋外海的板塊交界上，由於長週期震動，造成距離震央 400 公里的墨西哥市，發生重大災情，包括 2 萬人傷亡、8,000 棟房屋損壞。墨西哥市位於古湖泊沉積物的盆地上，地震波傳遞至當地後，週期 2 秒、長延時的長週期震動，因共振造成大量 6–15 層的建築物損壞 (Beck & Hall, 1986)。

另外，長週期震動同樣會造成儲油設施損壞。2003 年日本北海道十勝 (Tokachi) 外海發生規模 8.3 地震，距離震央約 250 公里的苫小牧 (Tomakomai)，雖然觀測震度僅為日本震度 5 弱，但由於長週期震動，導致一家煉油廠的儲油槽內的液體劇烈晃動，造成上方的浮頂 (floating roof) 下沉，進而引發大火 (Koketsu et al., 2005)。1999 年 921 地震發生時，我國中油公司的儲油槽，也因為長週期震動導致槽內液體劇烈晃動，造成儲油槽損壞，雖然幸運沒有引發火災，但是仍發生漏油造成環境汙染 (Yoshida et al., 2000)。

近年來，由於高層建築物越建越多，長週期震動的影響更受到世人重視。高層建築物長時間、大幅度的搖晃，內部的家具和設施可能會傾倒或移位，電梯也可能發生故障，而且樓層越高，搖晃程度往往越強，造成的損失也越大。日本 311 大地震時，震央距離超過 700 公里的大阪，高層建築物因長週期震動發生明顯搖晃。根據觀測紀錄，有大樓頂層的最大振幅達到 2.7 公尺，搖晃持續了將近 10 分鐘，同時東京有多棟 60 公尺以上高樓電梯停擺，造成人員受困 (日本經濟新聞, 2011)。另外，2025 年 3 月 28 日緬甸中部發生規模 7.7 的地震，除了緬甸發生嚴重災害外，遠在 1,500 公里外的泰國曼谷受盆地效應影響，長週期震動造成當地高樓發生災損 (國家災害防救科技中心, 2025)。

發生長週期震動的原因

長週期震動主要為表面波所造成。地震的震源深度越淺，越容易在地面表層生成表面波；另外越大規模的地震，由於震源破裂長度較長，其相對擁有較強能量的長週期地震波。地震波傳遞時，長週期成分的震波比短週期震波不容易衰減，可以傳遞到較遠的距離，而傳遞路徑與地表場址的沉積構造或材料，亦可能生成表面波。

日本學者 Koketsu 和 Miyake (2008) 的研究指出，長週期震動依據引發機制與發生位置，可以分為遠震源型 (far source) 與近斷層型 (near-fault) 二種類型。我們一般認知表面波造成的長週期震動，屬於遠震源型 (圖 2)，其大部分由隱沒帶海溝發生的大規模淺源地震、加上震波傳遞經過鬆軟的沉積構造所引發。例如海陸板塊邊界的增積岩體 (accretionary prism)，可以有效傳遞長週期成分的地震波，甚至形成表面波。

而當地震波傳到地表為沖積平原或沉積盆地時，容易陷在其中形成表面波，因其震動頻率與場址主頻相近，震幅會被放大、震動時間會被拉長。

圖 2
遠震源型長週期震動生成示意圖

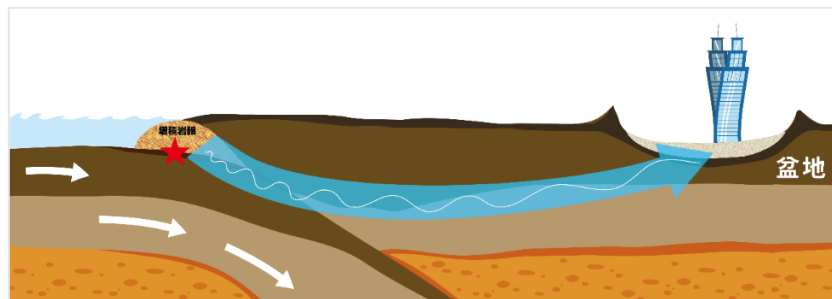
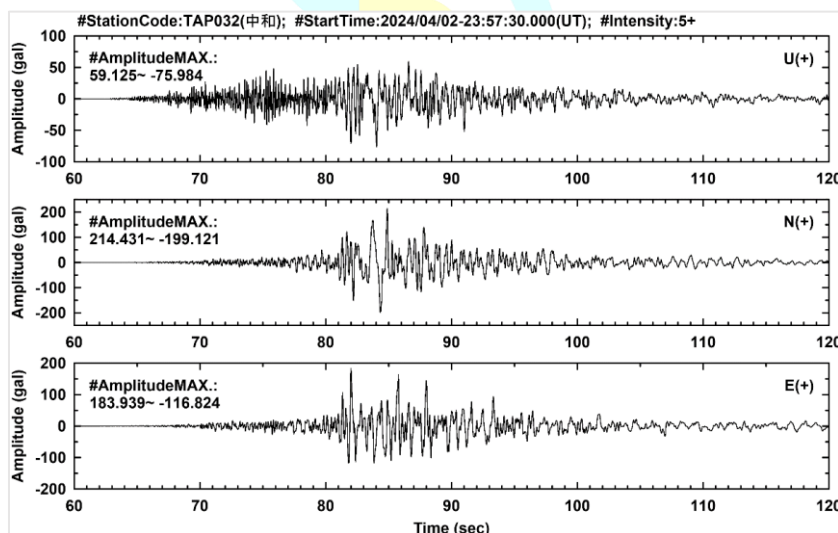


圖 3 為 2024 年 4 月 3 日規模 7.1 花蓮地震發生時，新北市中和區積穗國小的地震站所記錄到的地震波形，該地震站位於臺北盆地內，距離震央約為 125 公里。圖中地震波開始記錄的時間為臺灣時間 7 時 57 分 30 秒，發震時間則是早上 7 時 58 分 9 秒，在地震後 42 秒左右（橫軸時間比例尺 81 秒），開始出現長週期震波，週期初估約為 1-2 秒，有感搖晃時間超過 40 秒。雖然中和距離震央超過 100 多公里，但由於最大震度達到 5 強，且搖晃時間很長，在當地造成建物災害。

圖 3
2024 年 4 月 3 日規模 7.1 花蓮地震，新北市中和區積穗國小強震站所記錄到地震波圖（由上至下分別為垂直向、南北向、東西向震波圖）



另外一種長週期震動類型為近斷層型（圖 4）。當內陸地殼內發生中大型地震，沿著斷層破裂方向，有可能因為破裂方向效應 (directivity effect)，在近斷層處引發長週期、大震幅的脈衝訊號，造成災害。另外當震波傳遞到遠處的沖積平原或沉積盆地，亦可能因為場址效應，產生遠震源型長週期震動。

圖 4
近斷層型長週期震動生成示意圖

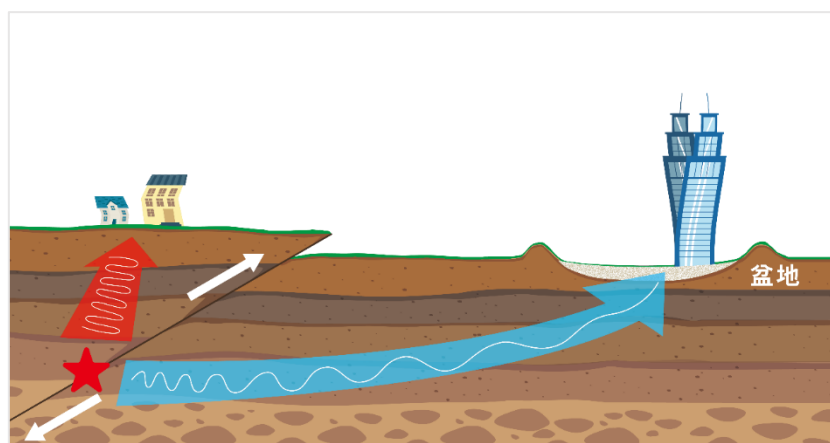
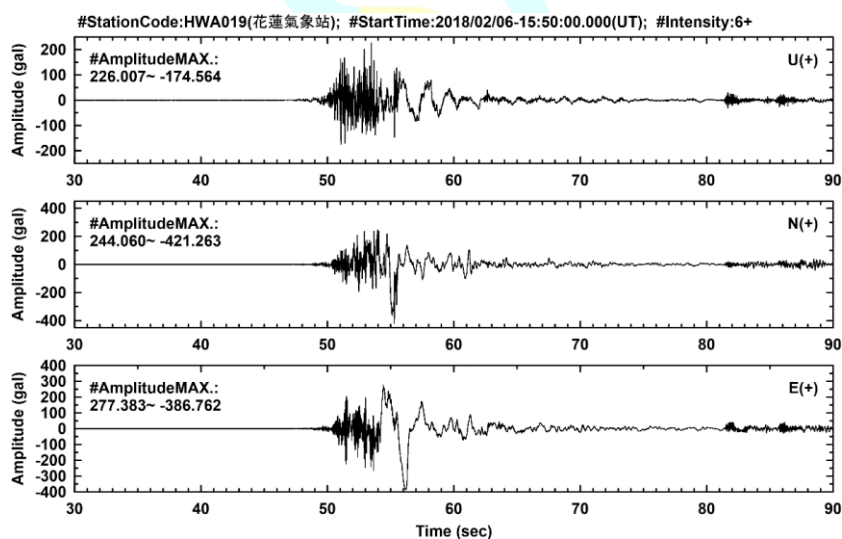


圖 5 為 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分 41 秒、規模 6.2 花蓮地震，花蓮氣象站強震站所記錄到地震波形，開始記錄時間為臺灣時間 23 時 50 分整。圖中波形紀錄顯示，地震後 13 秒左右（橫軸時間比例尺 54 秒），出現明顯的長週期脈衝波，週期約為 3 秒。該地震觸發米崙斷層錯動，位於斷層破裂方向上的花蓮氣象站，距離斷層最近距離僅數公里，由於破裂方向效應，記錄到明顯的長週期脈衝波，而此脈衝波亦是該地震造成花蓮市建築物損壞嚴重的最主要原因。

圖 5
2018 年 2 月 6 日 規模 6.2 花蓮地震，花蓮氣象站強震站所記錄到地震波圖
(由上至下分別為垂直向、南北向、東西向震波圖)



比較兩者不同類型的長週期震動，遠震源型主要是表面波的貢獻，生成的原因受到震源、路徑、場址等效應的影響，與近斷層型長週期震動相較起來，其震動的時間較長。近斷層長週期震動則主要受到震源破裂行為的影響，雖然震動時間較短，但由於其主要出現於震央距離 50 公里以內 (Somerville et al., 1997)，震幅更為劇烈，破壞程度更為顯著。

日本長週期震度分級




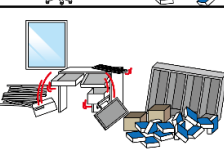
2011 年日本 311 大地震發生時，東京、名古屋、大阪等都會區的高層建築物，出現明顯的長週期震動 (Takewaki et al., 2011)，甚至引發災害。原本以地表觀測所計算的地震震度，傳統計算方法所使用的濾波器，會濾掉地震波長週期的成分，因此即便高樓搖晃劇烈，地表所計算的震度級數可能會偏小，造成發布資訊與高樓民眾體感的落差，無法忠實呈現高樓層民眾感受，以及室內家具、設施受損的情況。

因此地震發生後隔年，日本氣象廳 (Japan Meteorological Agency, JMA) 開始推動長週期震動的相關研究，並於 2013 年建立長週期震度分級 (日文名稱「長周期地震動階級」)，透過官方網站發布相關資訊 (Aizawa et al., 2014)，進行效益評估。最終在 2019 年 3 月 19 日，開始正式實施長週期震度分級制度，用意不在取代傳統震度，而是做為補充資訊，專門針對高層建築物的搖晃程度進行分級。

日本長週期震度分為 4 級，主要描述地震期間，高層建築物中民眾行動的困難程度、以及家具和固定裝置的移動或翻倒等破壞程度，級數越大代表搖晃與影響程度越嚴重，各級數影響程度的描述請參考表 1。針對的對象通常指 14、15 層以上的高層建築物，其自然震動週期約為 1.5 秒至 8 秒。

表 1

日本長週期震度分級表

日本長週期震度分級		人體的感受及行動	室內狀況
1級		<ul style="list-style-type: none"> • 室內幾乎所有人都能感受到搖晃，有些人會感到驚訝。 	<ul style="list-style-type: none"> • 窗簾、百葉窗等懸掛物大幅搖晃。
2級		<ul style="list-style-type: none"> • 感受到室內劇烈搖晃，想要抓緊固定物。 • 感覺行動受到阻礙 (例如不攙扶東西就難以行走)。 	<ul style="list-style-type: none"> • 裝有輪子的家具/設備 (如辦公椅) 輕微滑動。 • 未固定的家具可能位移，不穩固的家具可能會翻倒。 • 隔間牆等處可能出現裂痕。
3級		<ul style="list-style-type: none"> • 難以站穩。 	<ul style="list-style-type: none"> • 裝有輪子的家具/設備大幅滑動。 • 未固定的家具可能位移，不穩固的家具可能會翻倒。 • 隔間牆等處可能出現裂痕。
4級		<ul style="list-style-type: none"> • 無法站立，不爬行就無法移動。 • 身體完全任由搖晃擺布。(無法隨意行動) 	<ul style="list-style-type: none"> • 裝有輪子的家具/設備大幅滑動，且部分會翻倒。 • 大多數未固定的家具會位移，甚至翻倒。 • 隔間牆等處的裂痕會變多。

註：表格摘錄、翻譯自日本氣象廳發行資料手冊《地震と津波》

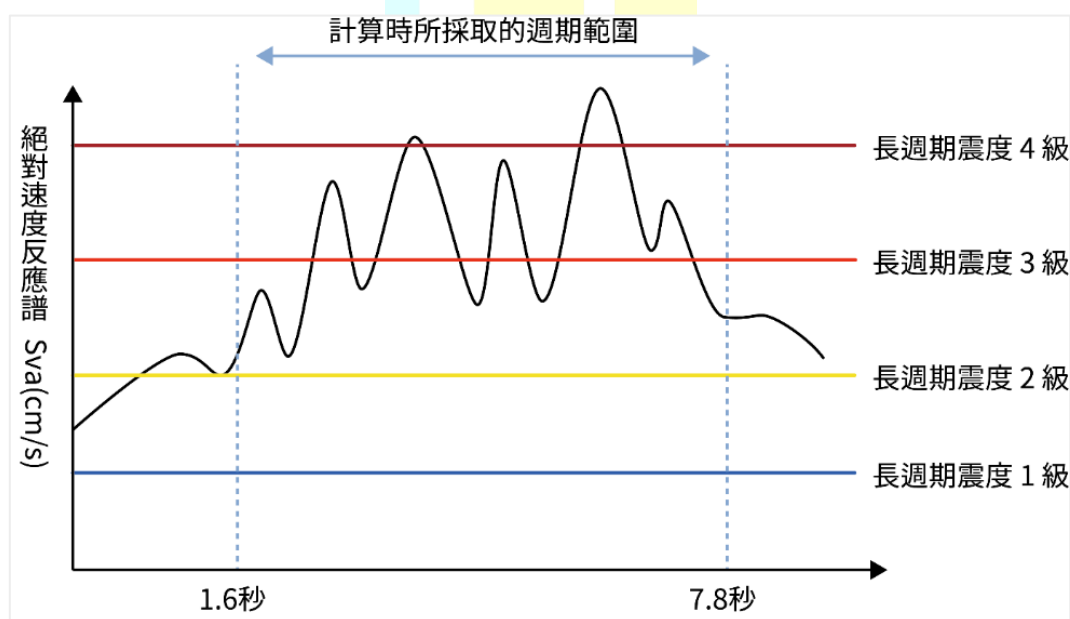
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/jishintsunami/>

不同於傳統計算震度使用最大地動加速度 (peak ground acceleration, PGA)，或是最大地動速度 (peak ground velocity, PGV) (蕭乃祺，2021)，日本計算長週期震度所依據的參數是不同週期的絕對速度反應譜 (absolute velocity response spectrum, Sva)。絕對速度反應譜用以描述單自由度結構在地震波作用下，其最大絕對速度反應與結構不同振動週期的關係，由於高層建築內的民眾的不適感、或是家具移動與設備破壞，主要與建築物的變動量及速度能量有關，因此使用 Sva 來界定長週期震度的分級。

計算長週期震度流程，首先使用地表的強震儀紀錄，模擬在地震波作用下，不同週期單自由度結構物的譜速度波形，計算過程需要的阻尼比 (damping ratio)，採用鋼筋混凝土結構常使用的 5%。然後分別將不同週期 3 向量 (垂直、南北、東西) 的譜速度波形進行向量合成，並找出整個波形紀錄的最大值，即是個別週期的絕對速度反應譜值。長週期震度計算採用的週期範圍從 1.6–7.8 秒，每增加 0.2 秒週期計算 1 次絕對速度反應譜值，最後以週期範圍內最大的 Sva 值 (圖 6)，對應到 Sva 數值範圍與長週期震度的關係表 (表 2)，即可得到當地的長週期震度。

圖 6

採用週期 1.6–7.8 秒範圍內的最大絕對速度反應譜值，對照本文表 2 得到日本長週期震度的示意圖



註：圖片修改、翻譯自日本氣象廳官方網站資料

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jishin/ltpgm_explain/about_level.html

表 2

計算日本長週期震度對照最大絕對速度反應譜值的範圍表

	日本長週期震度分級	絕對速度反應譜 S _{va} 之值 (目標週期 1.5 s < T < 8.0 s, 阻尼比 5%)
■	長週期震度1級	5 cm/s ≤ S _{va} < 15 cm/s
■	長週期震度2級	15 cm/s ≤ S _{va} < 50 cm/s
■	長週期震度3級	50 cm/s ≤ S _{va} < 100 cm/s
■	長週期震度4級	100 cm/s ≤ S _{va}

註：表格修改、翻譯自日本氣象廳官方網站資料

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jishin/ltpgm_explain/about_level.html

週期 1.6–7.8 秒範圍的反應譜值，一般認為可以呈現 15 層樓以上、一直到 70、80 層超高層建築物的地震反應，完整覆蓋日本現有絕大多數高層建築的自然振動週期範圍。因計算時間需要，日本氣象廳如有觀測到長週期震度 1 級的地震，約在地震後 10 分鐘，於官方網站上對外公布長週期震度的資訊。

臺灣長週期震度應用初探

本文嘗試使用上述計算日本長週期震度的流程，以 2024 年 4 月 3 日規模 7.1 花蓮地震為例，初步測試日本長週期震度應用在臺灣的成果。圖 7 為模擬後、全臺長週期震度分布情形，最大可以達到 4 級，而且幾乎 2/3 陸地都觀測到 1 級以上的長週期震度，顯示地震當時產生很強的長週期地震波。4 級震度集中在花蓮市區、宜花交界和平地區與宜蘭縣部分濱海地區；3 級地區則除了近震央的花蓮、宜蘭外，震央距離超過 100 公里的台北盆地、桃園、彰化的平原地區，亦可觀測到 3 級震度。

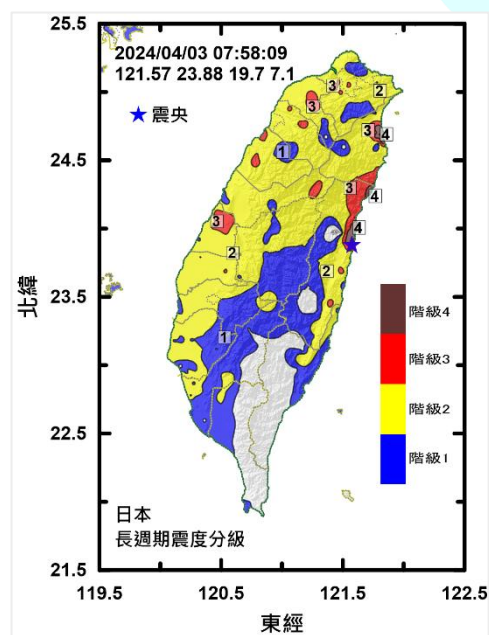


圖 7
使用日本計算長週期震度方法，模擬 2024 年 4 月 3 日規模 7.1 花蓮地震，全臺長週期震度分布情形圖。

另外，如果將範圍侷限在地震發生的花蓮地區，同時比對被判定紅單建物（主結構受損，有傾倒危險）與黃單建物（結構無立即危險，但非主結構有損）的地點（圖 8），我們可以發現高長週期震度（4 級、3 級）的分布區域，與受損建物發生的位置有很高的關聯性，顯示長週期震度應用於評估建物災情的實用性。北部地區屬於受到遠震源型長週期震動影響的範圍，同樣進行

震度分布與建物受災地的比對 (圖 9)，我們亦可發現受損的建物，比較集中在該地區最大震度 3 級的範圍、或是周邊鄰近的地方。

圖 8

使用日本計算長週期震度方法，模擬 2024 年 4 月 3 日規模 7.1 花蓮地震，花蓮地區長週期震度的分布圖，圖中同時標示受損紅、黃單建物的位置

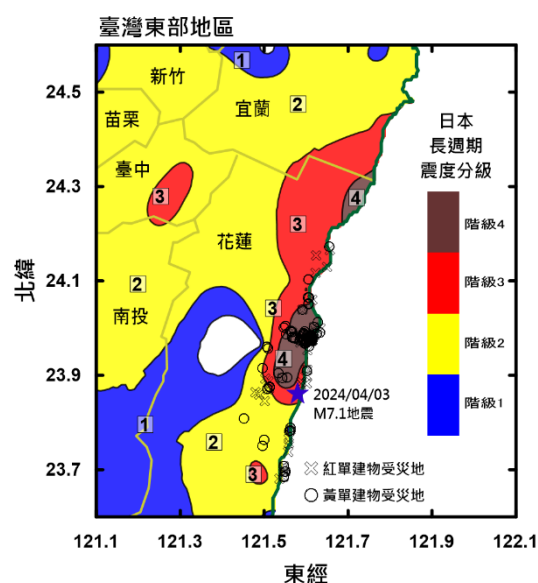
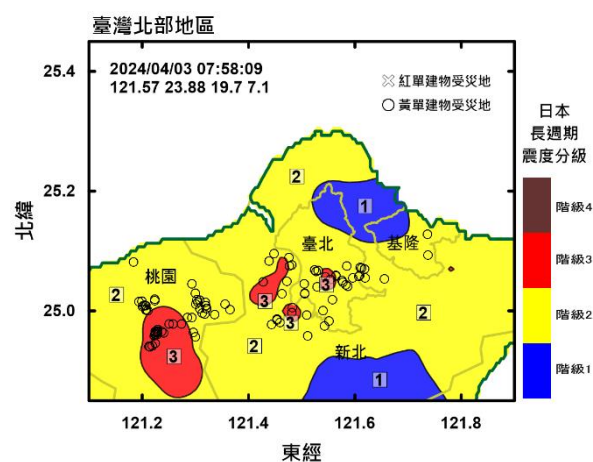


圖 9

使用日本計算長週期震度方法，模擬 2024 年 4 月 3 日規模 7.1 花蓮地震，北部地區長週期震度的分布圖，圖中同時標示受損紅、黃單建物的位置



我國人口集中的都會區，主要都位在沖積平原或沉積盆地內，其林立的高樓同樣會面臨長週期震動的問題，包括傳統震度資訊與民眾體感存在落差，以及無法呈現高層建築物內部家具、電梯等設施實際影響的程度。我國目前並沒有制定長週期震度的分級制度與計算方法，日本的經驗，值得我們參考推動長週期震動的相關研究，評估規劃我國長週期震度分級的可行性與效益。

參考文獻

- 日本經濟新聞 (2011)。東日本大震災の長周期地震動 大阪のビルも被害。
https://www.nikkei.com/article/DGXNASFK1402K_U1A111C1000000/ (日文)
- 國家災害防救科技中心 (2025)。2025 3 月 28 日緬甸地震事件報導。
<https://den.ncdr.nat.gov.tw/1330/1334/1336/24616/25173/>
- 蕭乃祺 (2020)。臺灣的新地震震度分級制度，科學研習月刊，第 59 卷，第 2 期。
<https://www.ntsec.edu.tw/liveSupply/detail.aspx?a=6829&cat=6841&p=1&lid=16214>
- Aizawa, K., Ogami, Y., Uratani, J., Sakihara, H., & Nakamura, M. (2014). *Japan Meteorological Agency information on long-period ground motion*. Japan Geoscience Union Meeting 2014 (Abstracts), April 28– May 2, 2014, Pacifico Yokohama, Kanagawa, Japan.
- Beck, J. L., & Hall, J. F. (1986). Factors contributing to the catastrophe in Mexico City during the earthquake of September 19, 1985. *Geophysical Research Letters*, 13 (6), 593–596. <https://doi.org/10.1029/GL013i006p00593>
- Furumura, T., & Oishi, Y. (2023). An early forecast of long-period ground motions of large earthquakes based on deep learning. *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL101774. <https://doi.org/10.1029/2022GL101774>
- Koketsu, K., Hatayama, K., Furumura, T., Ikegami, Y., & Akiyama, S. (2005). Damaging long-period ground motions from the 2003 Mw 8.3 Tokachi-oki, Japan, earthquake. *Seismol. Res. Lett.* 76 (1), 67–73. <https://doi.org/10.1785/gssrl.76.1.67>
- Koketsu, K., & H. Miyake, H. (2008). A seismological overview of long-period ground motion. *J. Seismol.* 12, 133–143. <https://doi.org/10.1007/s10950-007-9080-0>
- Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W., & Abrahamson, N. A. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters*, 68 (1), 199–222. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.199>
- Takewaki, I., Murakami, S., Fujita, K., Yoshitomi, S., & Tsuji, M. (2011). The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and response of high-rise buildings under long-period ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31 (11), 1511–1528. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.06.001>
- Yochida, S., Zama, S., Yamada, M., Ishida, K., & Tahara, T. (2000). Report on damage and failure of oil storage tanks due to the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan. *Journal of Japan High Pressure Institute*, 38 (6), 23–34. <https://doi.org/10.11181/hpi1972.38.363> (in Japanese)

