

氣候變遷

一些工程師需要瞭解的事

Eos Rhea Metis, Ltd. 首席總監／姚大鈞博士



在傳統的工程科別中，土木工程的使用年限應該是數一數二的久，動輒五十年、一百年是一般公共工程基本的使用年限(甚至只是設計年限)。現在已知最古老且仍在使用的拱橋可能是希臘的Arkadiko Bridge(圖1)，約建於西元前1190至1300年，迄今已有超過三千年的歷史。



▲ 圖1 希臘的Arkadiko Bridge

土木工程要屹立數百年或數千年，必須歷經世代的使用及自然的摧殘而不朽，所以自然災害是土木工程師從規劃設計到施工營運必須詳細瞭解的工程環境因子。跨河橋梁下部結構設計需要瞭解計畫洪水量，跨海橋梁則需要知道波浪高度，水庫設計需要計算集水區的降雨量特徵，吊橋及懸索橋則需有橋梁地點的風速統計資料等與氣候(Climate)及氣象(Meteorology)相關的訊息，即使是山崩與土石流也與降雨量息息相關。這些氣象與氣候訊息資料的正確性與代表性直接影響土木工程在未

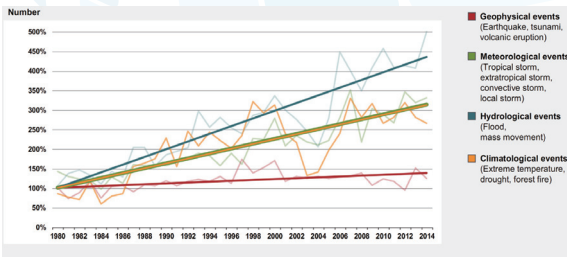
來使用期間的安全與年限壽命。

若以設計完成時間做為參考點，工程師根據規範或專業的判斷，參考在設計完成前取得的氣象與氣候統計資料完成工程設計，然而從開始施工到完工啟用及運營則是在參考點之後的氣象氣候環境中進行。設計是否適當的一個重要假設是設計完成前後的氣象與氣候條件必須大致相同，特別是一些極端氣候與氣象事件的實際發生狀況必須在設計使用的安全係數容許的極限範圍內，否則土木工程有極大的可能性在極端氣象與氣候環境下喪失原設計預期的功能，也就可能是失敗的土木工程。

可是事情真能與工程師所假設的一樣，設計前後的氣候與氣象條件大致相同嗎？從美國前副總統高爾(Albert Arnold Gore Jr.)先生在2006年所發表的著名影片“不願面對的真相(An Inconvenient Truth)”中所揭露的一些事實到美國加州2017及2018年的森林野火事件，所顯示的事實是氣候正在改變中，人類未來生活環境的氣候將不同於現在，而現在的狀況也已經與過去的不一樣，氣候改變所導致的極端氣象事件也較以往更嚴重且更頻繁發生。根據慕尼黑再保險公司(Munich Reinsurance Company)的統計結果(Hoeppe, 2016)，全世界自1980年以來氣象與氣候事件(Meteorological events

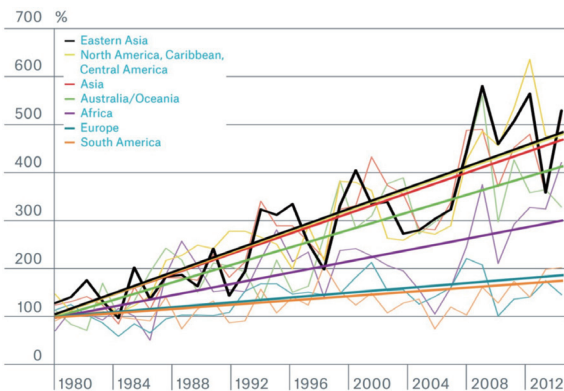


and Climatological events)發生的趨勢顯示在2014年的數量已成長超過兩倍，而水文事件(Hydrological events)則成長超過三倍(圖2)。如果我們將所有的氣象、氣候及水文事件合併為所謂的天氣相關(Weather-related)的事件，而因天氣相關的事件導致損失的事件在東亞(Eastern Asia)地區，包含臺灣、大陸、日本、南韓、越南、泰國、菲律賓及印尼，自1980年至2012期間已經成長了將近四倍(圖3)，為全球其他地區之冠。



© 2015 Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Geo Risks Research – As at March 2015

▲ 圖2 1980-2014年全球地球物理事件、氣象事件、水文事件及氣候事件數量統計(摘自Hoeppe; 2016)



▲ 圖3 1980-2012全球天氣相關事件統計(摘自Severe weather in Eastern Asia; 2013)

此外溫室氣體的大量排放也間接提高大氣及淺層海水的溫度，造成大量的蒸發與大氣中較多的水蒸氣，此狀況所形成的強烈大氣垂直對流不僅在陸地上容易造成強烈的對流性降雨

(Convective storms)，在海上也是形成氣旋(太平洋上的颱風或大西洋上的颶風)的主要原因。根據Murakami et al. (2011)的研究，由於全球暖化的原因，北半球西太平洋地區每年有颱風的日數、颱風登陸的日數及颱風的風速在未來都將明顯增加(圖4)，顯示未來氣象及氣候的模式將與現在不同，也與過去不一樣。

TABLE 1. Accumulated tropical cyclone storm days in nine coastal regions during the July–October season: observations (1979–2003), PD run (1979–2003), GW run (2075–99), future change, and level of statistical significance of future change (levels less than 90% are not shown). The off-shore edges of the coastal regions are defined as being 200 km from the coast line.

	Obs (1979–2003)	PD (1979–2003)	GW (2075–99)	GW – PD	Level of statistical significance of the future change
East Japan	44.0	65.0	53.8	-11.3 (-17.3%)	—
West Japan	124.0	119.0	95.5	-23.5 (-19.7%)	—
Korea	31.3	34.3	25.8	-8.5 (-24.8%)	—
North China	15.0	18.5	24.8	+6.3 (+33.8%)	—
Central China	53.0	32.5	51.3	+18.8 (+57.7%)	—
South China	194.0	147.3	134.0	-13.3 (-9.0%)	—
Taiwan	70.0	55.5	59.5	+4.0 (+7.2%)	—
Southeast Asia	40.5	94.8	53.5	-41.3 (-43.5%)	99%
Philippines	145.0	66.8	51.3	-15.5 (-23.2%)	—

TABLE 2. As in Table 1, but for the average instantaneous maximum wind velocity ($m s^{-1}$).

	Obs (1979–2003)	PD (1979–2003)	GW (2075–99)	GW – PD	Level of statistical significance of the future change
East Japan	27.9	20.9	22.4	+1.5 (+7.4%)	95%
West Japan	35.9	23.4	25.1	+1.7 (+7.2%)	95%
Korea	28.0	20.0	20.4	+0.4 (+1.8%)	—
North China	24.8	15.2	15.8	+0.7 (+4.4%)	—
Central China	29.0	17.4	17.6	+0.2 (+1.1%)	—
South China	28.8	16.5	17.8	+1.2 (+7.4%)	—
Taiwan	35.6	20.1	20.3	+0.2 (+1.0%)	—
Southeast Asia	27.5	16.6	17.5	+1.0 (+5.8%)	90%
Philippines	34.5	17.7	19.2	+1.5 (+8.7%)	95%

TABLE 3. As in Table 1, but for the July–October mean number of landfalling tropical cyclones.

	Obs (1979–2003)	PD (1979–2003)	GW (2075–99)	GW – PD	Level of statistical significance of the future change
East Japan	0.60	0.44	0.44	0.00 (0.0%)	—
West Japan	1.24	0.64	0.60	-0.04 (-6.3%)	—
Korea	0.76	0.32	0.28	-0.04 (-12.5%)	—
North China	0.12	0.12	0.12	0.00 (0.0%)	—
Central China	0.72	0.36	0.44	+0.08 (+22.2%)	—
South China	4.40	1.64	1.68	+0.04 (+2.4%)	—
Taiwan	1.16	0.36	0.48	+0.12 (+33.3%)	—
Southeast Asia	0.52	0.80	0.52	-0.28 (-35.0%)	—
Philippines	1.96	0.40	0.36	-0.04 (-10.0%)	—

▲ 圖4 Murakami et al. (2011)針對北半球西太平洋地區颱風天數、風速及對陸地影響天數的研究結果(摘自Murakami, Wang, and Krrh; 2011)

以上的統計及研究結果顯示天氣相關事件，特別是對流性事件，發生的頻率與數量、模式及強度已經不同於過去歷史紀錄的統計結果，未來發生的頻率及強度都將增加。這對於依賴歷史統計數據進行設計施工的土木工程而言，工程完工後的適用性、可靠性與功能性可能將面對嚴峻的挑戰與質疑。工程師不應對根據歷史統計數據設計的遲滯性因為氣候變遷在工程上的影響視而不見，然而礙於規範的限制及使用根據歷史統計數據設計進行前瞻性環境

因子推估的不確定性，在氣候變遷的影響下，為達成原有的設計目的，土木工程師勢必面臨專業上更為艱難的挑戰。

在未來不確定與未知的狀況下，可以幾乎確定的是氣候變遷將導致在歷史上較為罕見(頻率較低)的極端天氣在未來較以往更常發生且強度更高，換言之，現在兩百年回歸期的洪水位，在未來可能只是一百五十年回歸期的洪水位，在未來工程運營期遭遇實際的兩百年回歸期的洪水位亦可能較設計時規範規定的兩百年回歸期的洪水位高出許多。這並不是說一定會淹水，只是不僅淹水的機率增加了，而且淹水時的深度也可能大於預期的深度，也就是淹水的風險增加了。就工程本身而言，不僅是營運的風險增加，施工中因天氣因素影響導致的損失也會增加，社會因淹水所付出的成本亦將隨之增加。

工程師秉持傳統「人定勝天」的做法最直接的就是提高設計使用的「兩百年回歸期的洪水位」或是「計畫洪水量」，以工程的方法處理風險的問題，但是面對尚未發生的風險，第一個問題就是「應該提高多少才安全？」，對於沒有統計數據的未來事件，不僅第一個問題很難回答，遑論更高的堤防及更深的基礎背後的長期成本增加則可能不是我們目前社會經濟能力可以輕易負擔的。

所以面對氣候變遷導致的工程風險問題，工程師必須先放下傳統「人定勝天」的工程思維，而以「人須順天」的心態面對大自然無法抗拒的反撲力量，放棄「更大更高更堅固」的工程思維，而將資源投資在建設更具「韌性」的工程上。韌性工程並非捨棄現有的工程制度

或設計規範，反而是在符合規範要求及現行制度的基本條件下，接受氣候變遷及其後果對工程可能造成的影響，並以現有的資源，尋求於災害後工程可以最少的資源完成復原作業並開始運營的最佳建造或營運方式。例如易淹水地區的電力設備如變壓器及開關箱應設置於較高處所，並避免設置於地下室或地面層。或與其加高低窪地區的防洪牆高度，亦可考慮加強排水設施及區域疏散應變機制，以降低淹水時間及復原所需時間與人員傷亡，甚至配合都市規劃降低低窪地區的人口密度等。

2001年九月份的納莉颱風挾帶西太平洋豐沛的水氣，為臺灣北部地區帶來大規模的降雨。台北氣象站在當年九月十七日當天測得單日425mm的降雨紀錄，為該測站當時設站105年以來的最高紀錄，迄今仍是該測站的歷史單日最高紀錄；更在現在的新北市烏來區(當時台北縣烏來鄉)於24小時內降下2,319mm的雨量。納莉颱風帶來的雨量造成台北地區大規模淹水，導致台北捷運發生自營運迄今最嚴重的淹水事件，淹水深度在台北捷運南港機廠的出土段甚至大於當時台北捷運設計的200年回歸期洪水水位再加50cm的高度。事後經由中央氣象局的分析，納莉颱風在台北地區的降雨造成淹水的深度已經超過根據歷史數據統計推估的400年回歸期的洪水水位高度。

然而2001年台北捷運的淹水並非單一事件。光是在去年(2018)，一月份因塞納河(Seine)漲水導致巴黎地鐵局部關閉停止運營，五月份則因豪大雨導致巴黎地鐵7號線及11號線車站淹水(巴黎地鐵於1910年曾經發生淹水事故，圖5)；六月時瑞士的洛桑地鐵(Lausanne



Metro)因破紀錄的豪大雨導致車站及軌道層淹水；紐約地鐵(New York Subway)四月份車站因暴雨淹水，五個月後在九月份又因豪大雨再度淹水。僅是在過去十年，紐約地鐵在2007年淹水之後，2012年更因颶風珊迪(Sandy)帶來的豪大雨發生地鐵大規模的淹水事件(圖6及圖7)。二十一世紀開始迄今，在中國大陸已發生十起以上的地鐵淹水事件，全世界的地鐵因極端氣象事件導致的淹水已經發生數十起大型損失事件。



Flood of 1910



Now exit of Gare Saint-Lazare

▲ 圖5 1910年巴黎地鐵的淹水事故及現在的Saint-Lazare車站出入口



▲ 圖6 紐約地鐵淹水事故(Hurricane Sandy, 2012)



▲ 圖7 紐約地鐵隧道淹水(Hurricane Sandy, 2012)

對曾經發生地鐵淹水事件的城市而言，氣候變遷導致極端氣象事件引發地鐵淹水的風險事件極可能再度發生，巴黎地鐵於一百年後仍發生淹水事件及紐約地鐵在過去十年內發生多次淹水事件可為殷鑑。即使未曾發生淹水事件的城市地鐵未來仍有淹水的風險。土木工程師面對氣候變遷的風險，不僅沒有歷史的數據統計可以參考，也無法準確預測未來的狀況，更沒有規範可以依循。以台北捷運淹水風險而言，即使在納莉颱風後已根據事故調查結果補強捷運的防洪設施，仍然無法也不應保證未來一定不再淹水(今年九月台北捷運東門站人行地

下連通道發生淹水事件，幸因設置並適時關閉防洪閘門應變得宜，未釀成嚴重災害)。進一步言之，若是要做到完全不淹水，台北捷運所需投入的資源是否在經濟上有其必要性與正當性更有待商榷。

同理可知，全世界所有的捷運地鐵以目前現行的設計並無法保證在使用年限內不淹水，遑論因氣候變遷所增加的淹水風險。工程師應該做的除了以更謙卑保守的態度面對氣候變遷的影響，應更進一步強化工程與設施的韌性，接受並正視可能淹水的事實，以工程的手段降低淹水的影響與損失，更應考慮以工程的方式讓設施在淹水後得以最快的方式復原。例如避免將行控中心及機電設施設置於地下層，甚至於底層。核心設施及電力設施、出入口與通風井等應設置防洪保護，隧道內應以防洪閘門區隔防洪區塊等方式強化捷運防洪的韌性等。

氣候變遷影響人類最大的因素是極端氣候事件機率與後果的大幅增加，雖然極端氣候在機率上有其必然性，但是在土木工程的時間軸上發生時間及其後果的不確定性，使得以傳統土木工程處理極端氣候事件的方式在經濟效益上有極大的挑戰甚至無法合理進行。除了氣候變遷造成的極端氣候，如地震、海嘯、火山爆發、山崩及土石流等自然災害也有類似的特性並對人類的安全與文明造成威脅，也同是土木工程必須面對的挑戰。

土木工程是人類在面對極端氣候及自然災害衝擊時保護人類文明與資產的第一道防線，也是支持人類生存與文化延續的主要手段，土

木工程師必須積極瞭解所有自然災害的特性與風險，並將防災與減災融入土木工程中。在面對不可抗力的自然力下，工程不僅必須從傳統上防止災害發生轉型成以減少災害損失與復原成本作為主要的目標、避免盲目增加在建設更堅固工程的資源投資，更應進一步將有限資源放在建設韌性更高的工程，並結合營運持續管理(Business Continuity Management, BCM)將土木工程作為永續發展的基石。現代工程師的最大價值是在滿足規範要求的基礎上，協助客戶在面對極端氣候與自然災害的威脅時做好準備，以有限的資源將工程成果最佳化提昇客戶永續經營發展的能力，並提高工程師自身的價值。

☒ 參考資料

- [1] Hoeppe, P., 2016, “Trends in weather related disasters – Consequences for insurers and society”, *Weather and Climate Extremes*, 11 (2016) pp 70-79.
- [2] “Severe weather in Eastern Asia”, 2013, *Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft*.
- [3] Murakami, H., Wang, B., and Krroh, A., 2011, “Future Change of Western North Pacific Typhoons: Projections by a 20-km-mesh Global Atmospheric Model”, *Journal of Climate*, Vol. 24, pp1154-1169.