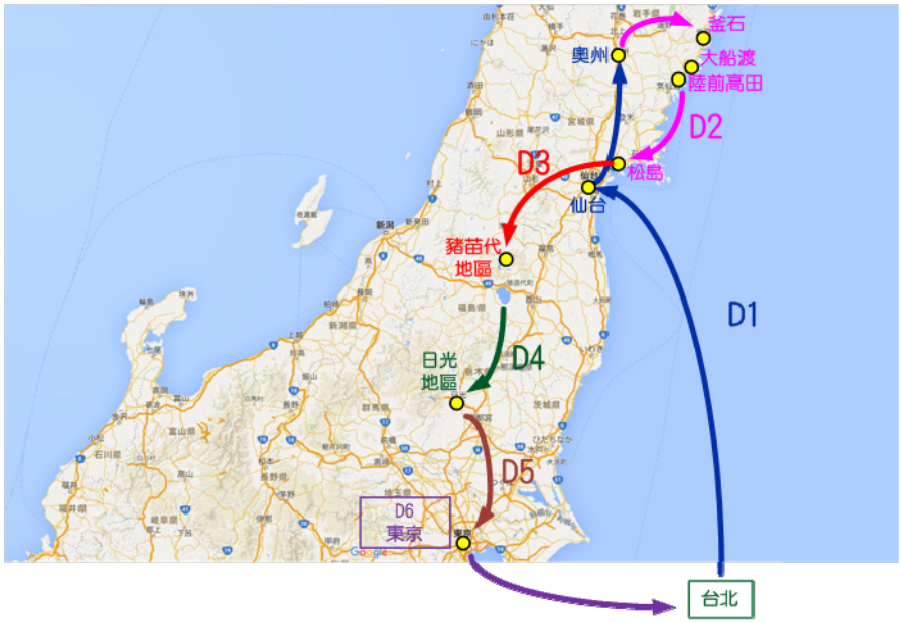
工程地質研討會專欄

地工技術工程地質研討會(29)
日本東北 311 地震復原及重建 與會報導

鄧源昌* 黃鐘**

一、活動行程與內容

世界時間 2011 年 3 月 11 日 5 時 46 分 23 秒(當地時間 14 時 46 分 23 秒，臺灣時間 13 時 46 分 23 秒)，日本本州東北外海發生大規模地震。震央位置在北緯 38.322 度、東經 142.369 度，地理位置位於日本仙台東側外海 130 公里處，距離東京 373 公里，地震規模為 9.0，震源深度 32 公里。此次大規模地震造成近二十年來罕見地震災害，地震發生之海嘯、強震、以及土壤液化災害對日本基礎建設造成極嚴重破壞，當時之福島第一核電廠之核災危機更是令人聞之色變。而地震發生至今已四年有餘，災後日本歷經清理整頓，以及檢討研究，各項復原建設也陸續於 2012 年底展開，執行至今也已近三年，漸有成果展現。地工技術研究發展基金會特於 104 年 10 月 15 日至 20 日於日本東北地區舉辦日本東北 311 地震復原及重建研討會，由富國技術工程股份有限公司 何樹根總工程師擔任領隊，並邀請國內專家磐碩工程股份有限公司 李維峰博士擔任解說，參與學員一行共 23 人。本次研討會亦邀請日本國土交通省東北整備局釜石港灣事務所、鹿島建設等單位進行參訪工程之精闢解說，使大家能於現地回顧災害狀況，比較重建現況，能更深入了解大型地震災害復原重建工程的內容。除了工程專業知識的提升以外，行程也將循奧之細道，領略日本東北中陸楓紅繽紛景緻，讓大家學習工程知識之餘，也收心靈洗滌之效。本次停駐點如圖一，行程如表一。



圖一 日本東北 311 地震復原及重建研討會之行程停駐點

* 國立中央大學土木工程學系
** 國立台灣大學地質科學系暨研究所

表一　工程地質研討會(29)～東北 311 地震復原及重建研討會參訪行程表

日期	時間	考察與討論內容
10/15	10:05-14:35	桃園機場集合，長榮航空班次 BR118，目的地：日本仙台機場
	14:35-19:00	車程、仙台市區參觀與晚餐
	19:00-21:00	車程、奧州飯店入住
10/16	07:30-09:30	奧州飯店至釜石港港灣事務所車程
	09:30-10:30	釜石港與大船渡港之日本 311 海嘯災後重建工程簡報
	10:30-11:30	現地參訪釜石港防波堤復健工程
	11:30-13:00	釜石港至大船渡港車程、大船渡午餐
	13:00-14:00	現地參訪大船渡港防波堤復健工程
	14:00-14:30	大船渡港至陸前高田工區車程
	14:30-17:30	陸前高田防波堤工程現地簡報與參訪
	17:30-19:30	往松島飯店之車程，松島飯店入住與晚餐
10/17	08:00-12:00	松島景點參訪(松島遊船、五大堂)
	12:00-17:00	世界玻璃館、豬苗代湖、五色沼參訪
	17:00-20:00	車程、磐梯溫泉飯店入住、晚餐
10/18	08:00-13:00	磐梯飯店往日光東照宮車程、日光東照宮參訪與午餐
	13:00-18:00	日光往中禪寺湖車程、中禪寺湖與華嚴瀑布參訪
	18:00~	鬼怒川飯店入住與晚餐
10/19	08:00-10:00	龍王峽地質參訪
	10:00-13:30	鬼怒川往東京之車程與午餐
	13:30-15:30	東京外環自動車道　市川中工事簡報與現地參訪
	16:00-18:30	晴空塔、淺草觀音寺參訪
	18:30~	晚餐，品川王子大飯店入住
10/20	9:00-15:30	六本木建物欣賞、台場參訪
	15:30-23:00	前往成田機場車程，搭乘長榮航空班次 BR195 回桃園機場

二、釜石港、大船渡港之防波堤復健工程

本次研討會於日本國土交通省東北地方整備局之釜石港灣事務所正式揭開序幕，由小澤敬二所長對釜石港與大船渡港之 311 海嘯災情及復健工程詳加介紹，並由李維峰博士、天鋑旅行社導遊高淑滿小姐協助日文翻譯與解說。在受災情形部分，釜石與大船渡港沿岸皆受日本 311 大地震引致之超級海嘯（高度約 10 公尺)襲擊並溢過防波堤頂，高能量海嘯漫延至陸地，同時摧毀沿岸基礎設施，災情十分嚴重。研究報告(日本國土交通省東北地方整備局釜石港灣事務所，2015a；2015b)指出釜石港地區建物被海嘯浸泡之浸水高可達高程 10~12 公尺，與河川連通區域可達 12.5~18.3 公尺，海嘯隨地形漫延之溯上高可達高程 19.2~21.4 公尺；大船渡港地區之建物浸水高程為 7.2~10.5 公尺，溯上高程為 9.9~30.1m。而本次會議地點亦難逃浸沒於海水之命運，著實令人膽顫心驚。

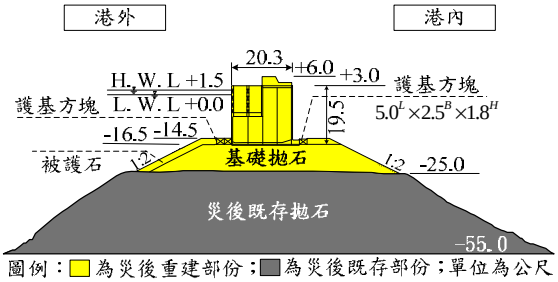
防波堤沉箱破壞機制主以海嘯襲擊超級海堤之沉箱時，因沉箱左右兩側之水位差，而靠海側之側向力較大，且因溢頂淘刷沉箱後方之拋石土堤，弱化地盤承載力，致使沉箱傾覆滑動。不同區域之沉箱傾倒現象有所差異，釜石港北堤沉箱節塊，因海嘯波進港而使節塊往港內傾倒，而南堤沉箱節塊則因海嘯波退潮之力量而使節塊往港外傾。又北堤主以粉土質砂土分佈，與南堤之礫質砂土不同，使得大地震來臨時，北堤之受震變形量較南堤大，連帶影響對海嘯之抵抗力，最終結果為北堤之沉箱傾倒數目較南堤多，部分南堤沉箱修復後仍可暫時使用。大船渡港部分，北堤與南堤之沉箱節塊完全傾覆破壞，且皆往港外傾，與釜石港之沉箱傾倒現象差異原因可能為兩區之堤防佈置形式與地質分布情形不同。

本次超級堤防雖受海嘯破壞，但仍有很好之減災效果。釜石港之海嘯侵襲分析結果顯示在沒有超級堤防時，建物之浸水高程達 13.7 公尺，溯上高程達 20.2 公尺，海嘯流速為 6.6 公尺/秒，海嘯抵達海岸堤防之時間為 28 分鐘；有超級堤防時，海嘯接觸超級堤防前，其海嘯之高程為 10.8 公尺，雖仍會發生溢頂破壞，但此超級防波堤對海嘯結構有破壞之效果，致使海嘯漫延至灣內之浸水高程降至為 8.1 公尺，而海嘯流速則為 3.0 公尺/秒，溯上高程為 10 公尺，海嘯抵達海堤岸邊之時間為 34 分鐘。以上分析結果顯示超級防波堤除了使海嘯流速與威力減半外，更重要的是多爭取了 6 分鐘的逃生時間，使得以搶救疏散人群，及達到身家財產損失降低之效，顯示出超級堤防重要性。日本也極力進行工程復健，得以護衛國土與人民。

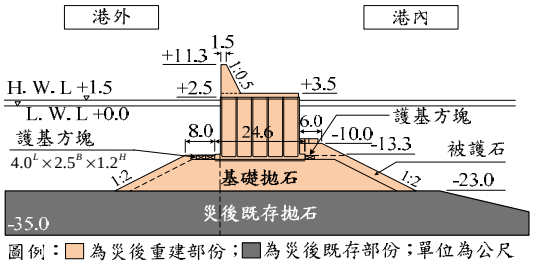
釜石港之防波堤復健工程，北堤長度為 990 公尺，南堤長度為 670 公尺，中間開口為 300 公尺，總防波堤長為 1960 公尺。大船渡港之北堤長度為 201.84 公尺，南堤長度為 670 公尺，中間開口為 300 公尺，總防波堤長為 1171.84 公尺。兩防波堤之形式皆為沉箱合成堤，整個斷面之海床基盤處為拋石堤，拋石堤上方為沉箱結構，最後於沉箱頂部設置胸牆，詳細請見釜石港之防波堤標準斷面如圖二，大船渡港之防波堤標準斷面如圖三。

整體復健首先評估沉箱損壞情形，若無法修復者則進行擊碎作業，擊碎之石料經篩選可供後續拋石作業使用；若可修復者則進行快速修復，供減緩施工時期之風浪，使防波堤施工作業得以順利進行。次之為進行基礎拋石作業，將規定之石塊以抓斗依設計圖說置入海中，形成拋石堤，並進行堤頂整平作業，拋石作業如圖四所示。拋石堤整平作業結束後則鋪設不織布，增加拋石堤與沉箱之摩擦力，並將沉箱節塊拖放至拋石堤上，靜置沉陷發展。待沉陷穩定後則進行沉箱封頂作業，後續則為各沉箱節塊之接榫，最終則為胸牆安置，即完成防波堤施工作業。

本次實地參訪項目為舊有損壞沉箱擊碎、拋石、沉箱節塊製作與拖放等作業。由於各工項皆有其工序，無法於短篇幅詳盡描



圖二 釜石港防波堤標準斷面



圖三 大船渡防波堤標準斷面

圖四 大船渡港北堤拋石作業(何樹根先生提供)

述，故以下則僅對沉箱設計施工進行詳細報導 (阮等人，2013；財團法人地工技術研究發展基金會，2015；劉，2009；鍾等人，2001)。釜石港之新建沉箱規格為長度 50 公尺、寬度 20.3 公尺、高度 19.5 公尺，斷面較災前為小；大船渡港之新建沉箱規格為長度 20 公尺、寬度 21.6 公尺、高度 17 公尺，斷面較災前為大。本復健工程之沉箱製作工法為浮船塢工法(floating dock)，係利用浮船塢艙體排水或進水使船塢得以下沈或上升之特性，於浮船塢上製作沉箱後，將浮船塢下沉使空心沉箱浮起，拖離浮船塢至指定位置之便利方法，浮船塢設施如圖五所示。由於本處沉箱屬巨型沉箱，考量施工難度與沉箱後續拖行之吃水深度，故採分階段施工。首先當沉箱施工高度為 0~10.5 公尺時，則於岸邊之浮船塢製作。當施工高度大於 10.5 公尺後，則需將沉箱移往較深之海域，方能繼續

沉箱加高作業。因不同之沉箱施工高度有對應之吃水深度，故本工程則針對不同施工高度於其施工海域設置不同高程之基礎供沉箱放置。以釜石港為例，當沉箱施工高度為 10.5~12.5 公尺、12.5~17.1 公尺、17.1~19.5 公尺，則分別對應之基礎頂部高程為-8.5 公尺、-10.5 公尺、-15.5 公尺。

沉箱製作可分為七個步驟：(1) 底版放樣與鋼模組立；(2) 鋼筋紮排；(3) 內外艙墻鋼模組立；(4) 滑動模版元件組裝；(5) 牆筋彎紮及箱壁混凝土澆置；(6) 升模及重複第(5)項之動作；(7) 內外模拆除及其他安全措施。沉箱完成後，一般會先集中儲存，使沉箱坐底於特定海域，待要安裝時再進行拖運作業，釜石港之沉箱儲存坐底海域如圖六。

沉箱拖行作業初始先使船塢進水下沉，此時空沉箱浮起，再透過主拖船與副拖船將沉箱拖行至安放地點，再於沉箱注水使沉箱坐底安放於整平後之拋石堤上。由於為重力式沉箱，安放完畢後則於箱內填海砂或其他碎石料，但不得混雜泥土或有機物等，經震實後澆置封頂混凝土、沉箱間隙澆置水中混凝土。同時沉箱海側、港側吊放護基方塊保護，至此沉箱安放填充作業始告完成。而南堤與北堤間之開口段，於海中設置倒 T 扶壁式潛堤，使船隻仍可出入港口，並達到減緩水流壓力之效，大船渡港防波堤開口段如圖七所示。

圖五 釜石港浮船塢設施(江政恩先生提供)

圖六 釜石港沉箱儲存坐底海域(何樹根先生提供)

目前釜石港防波堤復健進度已完成 13 個沉箱節塊，剩餘兩個正在製作中。完成之沉箱目前皆放於指定儲存海域區，尚未放在指定拋石堤位置。北堤現除了製作沉箱，亦進行拋石堤基礎拋石作業，以及舊沉箱之敲除。但南堤沉箱由於當初之損壞尚未嚴重，且因考量若南北堤同時敲除，造成之開口段太大，施工將受颱風來襲引致浪潮影響。故南堤目前尚未動工，只把傾倒沉箱扶正繼續使用，待北堤完工後，才進行南堤復健事宜，南堤情形如圖八及圖九。大船渡港部分，北堤目前已做 9 座沉箱，剩餘一座沉箱未做。南堤目前已完工四座沉箱，還有七座尚未施作。本兩復健工程預計 5 年完成，現已執行三年有餘，施工團隊皆表示有信心於預定時間內完成。

圖七 大船渡港防波堤開口段(何樹根先生提供)

圖八 釜石港南堤側拍(何樹根先生提供)

圖九 釜石港南堤頂部狀況(何樹根先生提供)

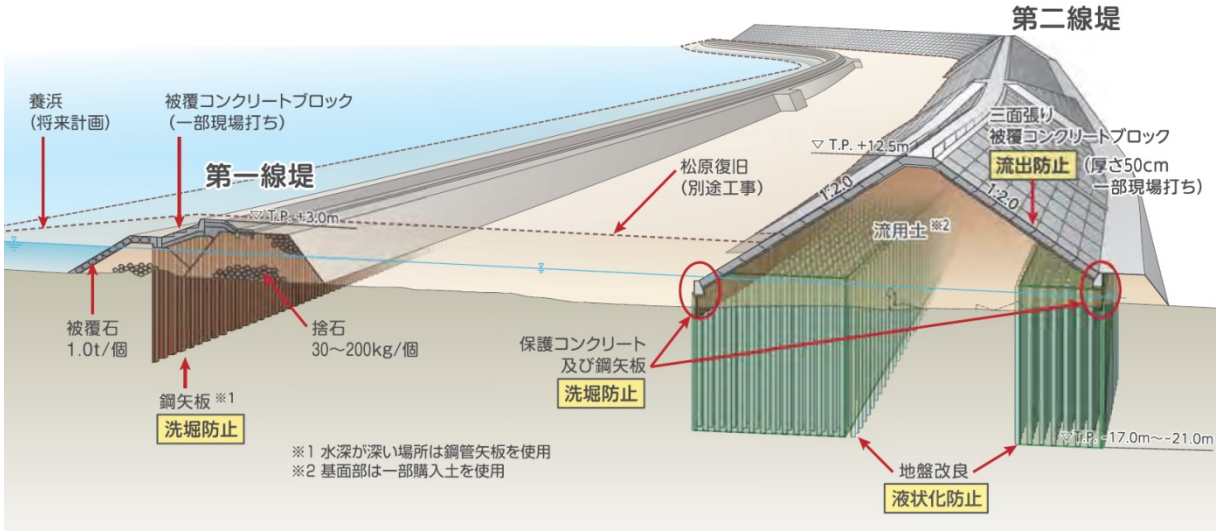
三、陸前高田復健工程參訪

陸前高田市中心座落於廣田灣北部之小平原，緊鄰於高田海岸後方，西方為唐桑半島，東方為廣田半島。該市生活機制完善，市公所、縣立高田醫院、高級飯店、運動設施如棒球場、交通設施如國道 45 號與 JR 大船渡線陸島高田站一應俱全。在高田海岸之第一線堤與第二線堤間之高田松原，與第一線堤海側之沙灘(高田松原海水浴場)為當地之風景名勝，並稱白砂青松，吸引許多觀光客前來遊玩。如此風光明麗、生機盎然之處受日本 311 地震之海嘯襲擊後，整片大地一片死寂，所有設施破壞嚴重，但仍留有希望，目前災後仍存之殘跡及希望的一本松如圖十。

圖十 陸前高田災後仍保留之殘跡及希望的一本松(何樹根先生提供)

因此，本堤防復建工程(工程名稱：高田地區海岸災害復舊-23 災 523 號及 591 號之 2 工程)之目的為回復該海岸線之繁榮原貌，以建構堅固之防波堤，保護身家財產，避免海嘯影響該區之產業經濟活動，達到守護國土之要。本工程由鹿島建設、佐武建設、明和土木與中澤組共同承攬，工程經費約 250 億日圓，工項包含防波堤工程第一線堤、第二線堤、人工造礁、浜田川水門、臨時棧橋 2 座與臨時防波堤 2 處，本工程配置如圖十一，第一線堤與第二線堤之施工剖面如圖十二。在施工料源供給方面，由於本區非建材產地，故堤體之各式石材則遠從北海道室蘭市、神奈川縣川崎市、四國香川縣、小豆島海運至工區儲料場，再用高架軌帶運輸系統運送至施工地點(圖十三)。但高田海岸為觀光海岸，無港口供貨船停靠，故興建兩個臨時棧橋供卸貨使用。但颱風來臨時風浪太大，使臨時棧橋常被摧毀，故於施工期間興建兩道臨時防波堤，減緩風浪。為了更方便施工，亦於第一線堤處使用吊車船打設鋼板樁(圖十四)，協助抵抗海浪對工事的侵襲，使工事可順利進行。第一線堤之目的為防止松原被海浪侵蝕，長度為 1768 公尺，堤頂高程為 3.0 公尺。施工順序為先透過拋石作業建造臨時工程用便道，再進一步擴大拋石範圍，堤體完成後則進行被覆石與被覆混凝土工程，完工情形如圖十五。第二線堤之目的為抵抗海嘯，並著眼於若未來發生超過設計

圖十一　陸前高田海岸災後復健工程之配置



圖十二　陸前高田之第一與第二線堤之復健施工剖面

圖十三　高架軌帶運輸系統(何樹根先生提供)

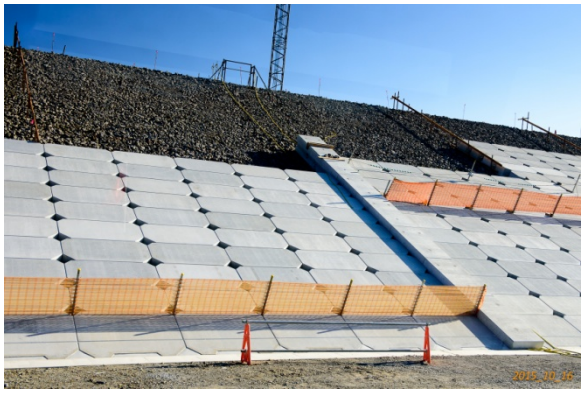
圖十五　陸前高田第一線堤完工貌(江政恩先生提供)

圖十四　第一線堤施工時所打設之擋浪鋼板樁
(江政恩先生提供)

圖十六　陸前高田第二線堤之壩體各分層材料
(江政恩先生提供)

之海嘯強度，考量延長設施的破壞時間及降低設施全壞之情形。第二線堤施工屬大壩工程，為考量數十年到百餘年發生一次之海嘯，故堤頂高程為 12.5 公尺。在日本 311 災後勘災結果及相關實驗結果顯示，當海嘯溢頂將淘刷壩趾，使壩趾地盤產生液化現象，危及堤體穩定性。故於壩趾處進行礫石樁改良，提升地盤強度。除此之外亦於壩趾處打設保護混凝土與鋼板樁，防止淘刷。壩體以水泥乾拌砂石並加水調配成設計含水量，並以搭載 GPS 之滾壓夯實機進行回填土方之施工管理，使可確實達到設計之滾壓次數與夯實度，確保回填之確實性與均勻性。在於其上鋪設不織布，及粗顆粒料供滲流消能用。最後進行被覆混凝土工程，透過被覆混凝土節塊之重量及鉤環連結強度防止壩體淘空，第二線堤壩體各分層示意圖如圖十六。節塊主要以預鑄形式，部分採現場澆置製作，成

份具有抗蝕功效，節塊間之接縫亦使用無收縮水泥填補，絲毫細節皆不馬虎，被覆混凝土施工情形如圖十七。人工造礁則可防止未來養灘之沙灘被侵蝕，浜田川水門功用為防止海嘯持續湧進浜田川，使海嘯上溯影響降低。目前施工進度為第一線堤已全面完成，第二線堤則正進行被覆混凝土工程，工程可於預定工期內完成，目前施工狀況如圖十八。

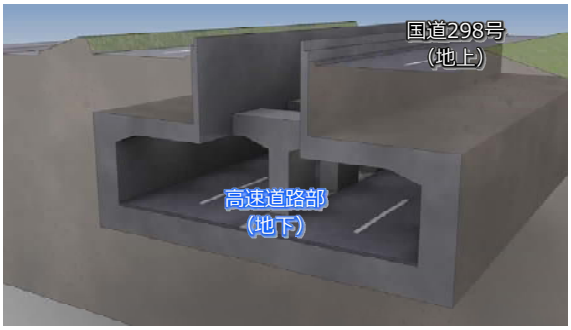


圖十七 陸前高田第二線堤之被覆混凝土
(江政恩先生提供)

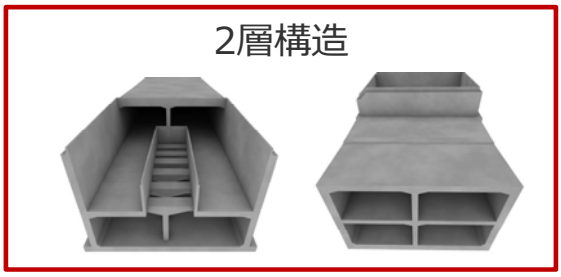
圖十八 陸前高田復健工程施工狀況
(何樹根先生提供)

四、東京外環自動車道-市川中工事參訪

日本為減少東京中心之交通量，興建環繞首都之三環狀線道路，目的為連接原有放射狀之道路，減緩交通阻塞問題。本次參觀之工程名稱為東京外環自動車道　市川中工事，連結市川市之須和田、菅野、平田、新田地區外環道路函道，屬千葉線區間，業主為東日本道路株式會社關東支社，承包商為鹿島建設、大林組、鐵建建設聯合承攬，屬統包工程。招標形式採技術與價格綜合評價，整體投標過程長達一年，施工範圍長達1.5~2 公里，實際工程金額約需花費 700~800億日圓。本工程為高速道路地下化與國道部份地上化之整備工程，橫跨河川(真間川)、市道 0124 號、鐵道(京成電鐵)、國道 14 號，且工區周邊鄰近醫院、學校及住宅密集區，施工難度極高。為使高速道路地下化，及國道 298 號同時於地面通行(部分路段亦為地下化)，故採取二層四連之箱涵結構。整個市川中工事之箱涵斷面多樣化，經過不同之既有交通設施或河川，皆有對應的箱涵形式，共計使用六種斷面，道路線形實屬複雜。舉例而言，部分地區國道 298 號為地面道路，則採用圖十九之箱涵斷面，中間有通風口；部分地區國道 298 號為地下化，則採用圖二十之箱涵斷面，上方為國道 298 號，下方為高速道路。



圖十九 國道 298 號為地面道路之箱涵斷面



圖二十 國道 298 號地下化之箱涵斷面

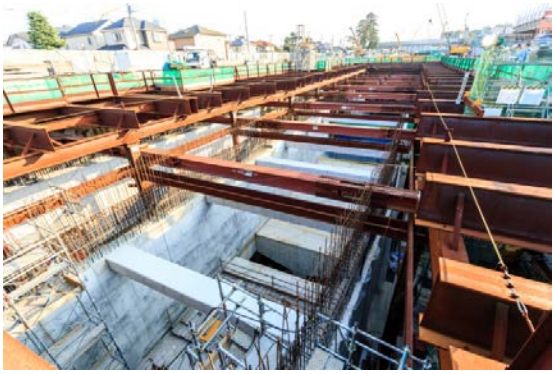
各路段箱涵斷面最終皆可連結，確保長期之耐久與耐震性。箱涵施工方式將依是否穿越重要交通設施分成明挖覆蓋與隧道式工法，此二工法在執行前皆設置高架施工便橋作為施工車輛專用道，以立體交叉的方式紓緩塞車現象，確保交通安全。明挖覆蓋工法使用時機為未通過重要設施，為順打工法，施工依序為(1) 工區周遭施作連續壁，抵擋側向土壓力及防止外來地下水進入工區；(2) 施作棧橋基樁與中間柱，供後續臨時棧橋及擋土支撐安裝之用；(3) 逐階開挖並架設臨

時棧橋與擋土支撐(圖二十一)，直至開挖預定深度；(4) 組裝大底鋼筋與模版，澆置混凝土，完成大底結構；(5) 逐層構築箱涵側牆、中牆及樓版，完成後撤除擋土支撐，施工情形如圖二十二；(6) 施作頂版，最後將中間柱與臨時棧橋切除；(7) 頂版上方回填土壤。

另一為隧道式工法，使用時機為通過重要設施如國道 14 號。其施工依序為(1) 於重要設施之兩側以明挖之方式設置豎坑及擋土設施，作為管冪工法之施工空間；(2) 施工區域設置隔音屋，防止噪音影響周遭居民；(3) 施作水平管冪工法(單管直徑 1.2 公尺，長度為 11.5 公尺，如圖二十三所示)，穿越地面道路下方至另一端之擋土設施，使可提供上部設施足夠之承載力，不影響行車安全；(4) 對管冪下方進行藥液灌漿，提升地盤強度，並進行施工坑道之挖掘；(5) 對施工坑道下方打設 H 型鋼擋土壁並進行第二次地盤改良；(6) 同前述順打工法進行箱涵區域開挖與函體構築。本箱涵施工特色為大幅減少擋土支承柱，使貫穿結構物之狀況減少，減少外部滲水情形，可提高建築物之品質。但減少支承柱時，作用於擋土壁之側向土壓力會增大，故亦安裝監測儀器，隨時監控變形與受力情形，確保安全性。

施工路段除了經過重要交通路段外，亦通過真間川，因河川滲漏將影響地下箱涵之施工，故採用鋼箱梁繞水路將原河川改道。施工方式類似前述隧道式箱涵施工法，先開挖通過鋼箱梁水路與原河川位置之下方，並施作箱涵，完工後再復原水道即可，工期較使用連續壁與地錨加勁之引水方式為短。本工區內建混凝土預拌廠(圖二十四)，可因應需求提供高品質的混凝土，且可減少預拌車在外之交通量，避免影響周圍環境。

圖二十一　箱涵施工之擋土支撐架設情形(江政恩先生提供)



圖二十二 箱涵 RC 結構施工情形(何樹根先生提供)

圖二十三　水平管冪工法(江政恩先生提供)

圖二十四 混凝土生產工廠(江政恩先生提供)

五、日本本州東部地質考查

5.1 日本本州東部地體構造簡述

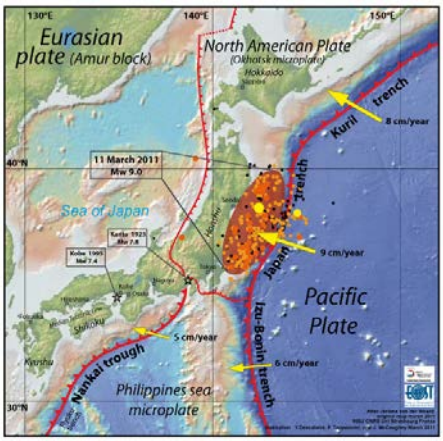
日本列島與台灣在地理位置上均坐落於歐亞大陸東側與太平洋西側的交界處。而日本列島與台灣的成因也類似，都是受到板塊擠壓的原因而產生造山、火山作用而形成陸地。由於日本列島在地質年代上屬於年輕的群島，周遭板塊持續隱沒活動盛行，因此常造成強烈的地震與火山噴發。日本列島坐落於四個板塊的交界處，分別為歐亞板塊、北美板塊、太平洋板塊、與菲律賓海板塊(圖二十五)。

本次地質考查區域為日本本州東部，地體構造上位於太平洋板塊與北美板塊的交界，太平洋板塊隱沒至北美板塊之下(圖二十六)。板塊的隱沒作用在本州地區產生了早期的增積岩楔，而此二疊紀至侏儸紀(約 3 億至 1 億 4 千 5 百萬年間)形成的增積岩楔則變成了本州的基岩。持續的板塊隱沒作用造成了隱沒地殼的熔融，形成岩漿，並在白堊紀至古新世(約 1 億 4 千 5 百萬年至 5 千 6 百萬年間)時侵入基盤，形成花崗岩等深成岩。到了中新世早期(約 2 千 3 百萬年)的時候，隱沒在北美板塊下的太平洋板塊持續熔融，並開始噴發，時間持續至現代。此時期產生各式火成岩，在本次地質考查區域內主要可觀察到玄武岩、安山岩、流紋岩、石英安山岩、以及火山碎屑等噴出岩。

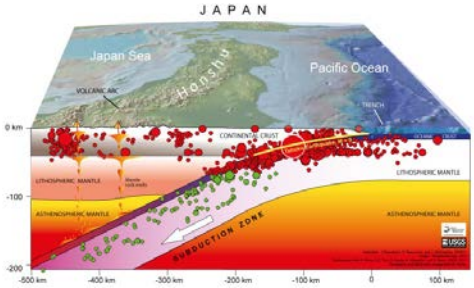
由於太平洋板塊持續隱沒至北美板塊之下，速率為每年約九公分(圖二十五中黃色箭頭代表太平洋板塊相對北美板塊之位移速度)，造成板塊間的強烈擠壓。因此，在接近兩板塊相交之海溝處發生耦合作用並累積應變能，當應變超過地殼本身的強度時即發生地震。2011 年 3 月 11 日之地震即為經由此機制所產生的地震，在圖二十五中的褐色橢圓形內的區域即為地震斷層之位置，圖二十六中的黃色線段則代表地震斷層之橫剖面位置。此一剖面圖明顯指出，聚合性板塊交界處的地震發生與火山噴發均為板塊隱沒之結果，因此，本次地質考查可說是圍繞著板塊隱沒主題進行。本次地質考查區域由北向南分別為松島灣、五色沼、豬苗代湖、龍王峽、中禪寺湖、以及華嚴瀑布(位置詳見圖二十七)。

5.2 松島灣地質簡述

松島灣位於宮城縣仙台市東北，約為 5 公里寬，10 公里長。灣內有近 260 個島嶼，多有松樹生長，景色優美，為日本三景之一，並在 2007 年被列入日本地質百選。松島灣一帶之地層主要為沉積岩，年代分布主要為中新世，但偶有三疊紀之沉積岩(圖二十八)。松島灣可能為一大型山崩所造成(Hasegawa et al., 2008; Strom, 2009)，主要原因如下：(1) 松島灣以北與以南之海岸線均為平滑之海岸線，只有此處為一眾多島嶼之海灣，島嶼可能為一大型崩坍之崩落塊體。



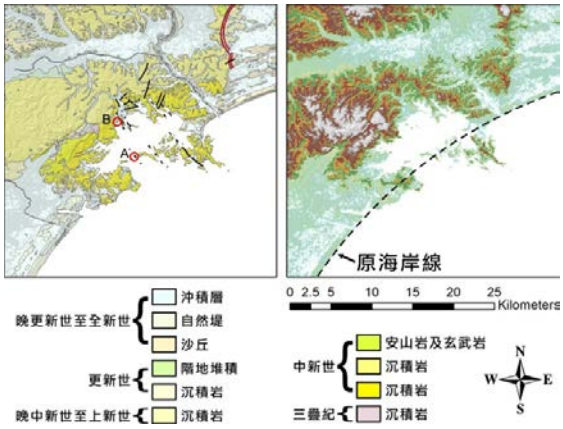
圖二十五 日本列島附近區域地體構造圖(Earth Observatory of Singapore ,2011)



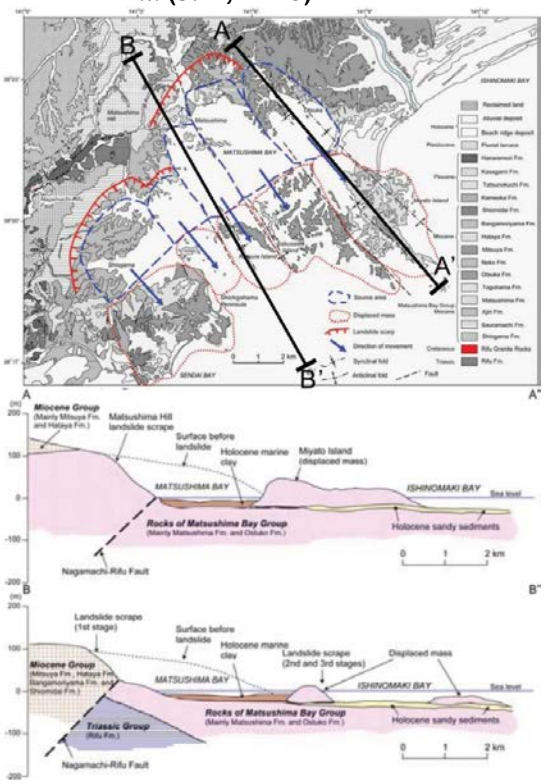
圖二十六 太平洋板塊隱沒至北美板塊之下(Earth Observatory of Singapore, 2011)

圖二十七 地質考查區域圖，左上圖內紅色方框為區域圖之位置。底圖來源：Google Earth

(2) 松島灣內之島嶼岩性與松島灣西側丘陵處相同，且丘陵區之地形上可辨認出山崩之冠部(圖二十九)。松島灣內之主要大型山崩塊體滑移距離可達五公里，山崩與松島灣西側之地層均為中新世沉積岩。灣內有將近 20 公尺之全新世泥質沉積物覆蓋於中新世沉積岩上，代表山崩發生年代可能為全新世早期(Strom, 2009)。



圖二十八　松島灣地質圖與地形圖，地形圖中黑色虛線代表山崩前之原海岸線。地質圖資來源：Geological Survey of Japan (2010)，地形資料來源：SRTM 30 m DEM (JPL, 2003)



圖二十九　松島灣地質剖面圖(Hasegawa et al., 2008)

圖三十　仁王島(何樹根先生提供)

松島灣內之島嶼均為沉積岩，圖三十為松島灣內之著名景點仁王島，因為長相神似仁王，因此命名之。仁王島上半部由細顆粒之砂岩所組成，下半部為礫岩，其中礫岩之淘選度與圓度均差，暗示礫岩之沉積環境距來源不遠。圖三十一為鐘島，主要為砂岩所組成，與仁王島上半部屬同一地層。鐘島有四個海蝕洞，據說在浪潮來襲時會從洞中發出如敲鐘般的聲響，因此命名之(仁王島與鐘島位置詳見圖二十八之 A 點)。松島灣於 311 地震時亦受到海嘯之影響，位在松島灣西側的遊船碼頭旁即豎立一海嘯高程紀念碑(位置詳見圖二十八之 B 點)，此標示指出之海嘯高度約為 170cm 高(圖三十二 A、圖三十二 B)。

圖三十一　鐘島(何樹根先生提供)

(A) 面陸側　　(B) 面海側

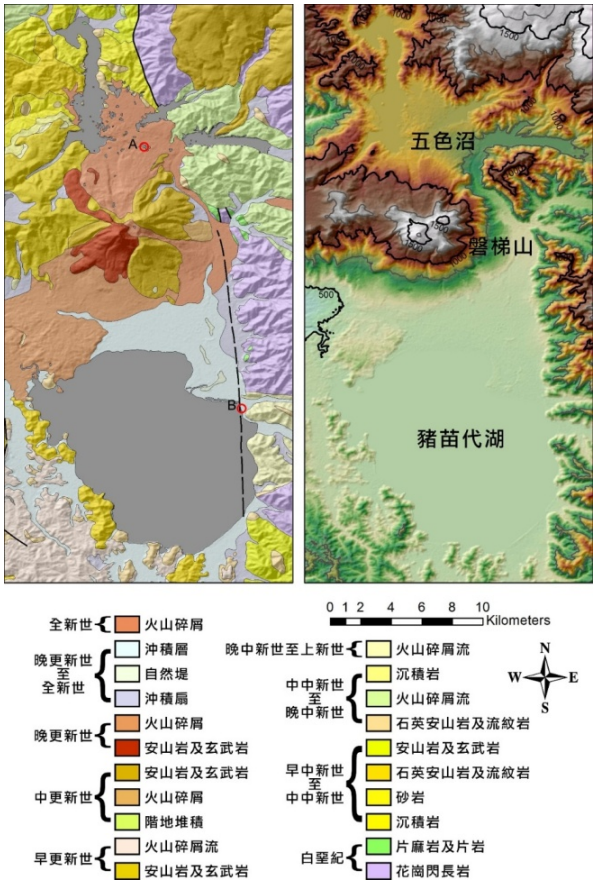
圖三十二　東日本大震災慰靈祈念碑(黃鐘先生提供)

5.3 五色沼與豬苗代湖地質簡述

五色沼位在福島縣內磐梯山北側，是數十個小型水體的總稱。當磐梯山於 1888 年 7 月 15 日爆發時，大量蒸氣噴出造成數次大規模山崩，而這些崩落的火山碎屑則堆積至磐梯山周圍，並在北側形成堰塞湖群(圖三十三)。此次噴發造成數百人喪生，同時也改變

了本區的地形景觀。由於火山碎屑內含有大量礦物質，因此當碎屑與水交互作用後，不同的水質就會產生不同的礦物結晶，同時沼內的藻類也會因為水質的差異而展現出不同的顏色(圖三十四)，以至於五色沼內各個堰塞湖的顏色都不盡相同。在秋季時，湖畔的樹林開始轉紅，亦增添了五色沼的顏色，此般天然美景讓五色沼在 1950 年時被畫定在日本的磐梯朝日國立公園內，每年吸引上百萬遊客前往此地旅遊(位置詳見圖三十三之 A 點)。

豬苗代湖位在磐梯山南麓，湖面標高海拔 514 公尺，面積 103.3 平方公里，為日本第四大湖(圖三十五)。本湖東側為南北走向的川桁斷層，該斷層於此處活動時造成區域性的陷落，因此成為地勢較低之盆地，自更新世開始，磐梯山噴發出的火成岩以及噴發同時產生的火山碎屑崩積物逐漸將附近河流阻塞，經過多年的累積後，形成了今日所見的豬苗代湖(位置詳見圖三十三之 B 點)。



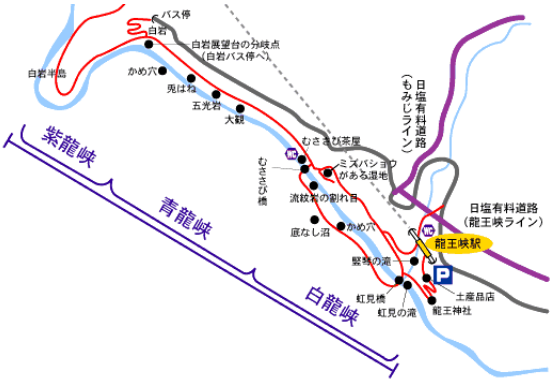
圖三十三　五色沼與豬苗代湖地質圖，等高線間距為 250 m，地質圖資來源：Geological Survey of Japan (2010)，地形資料來源：SRTM 30 m DEM (JPL, 2003)

圖三十四　五色沼景色 (何樹根先生提供)

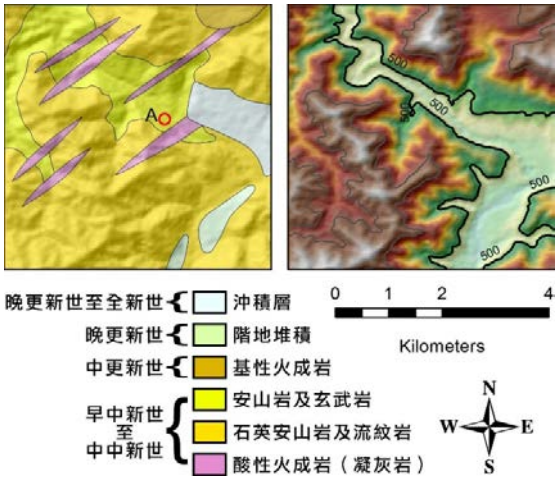
圖三十五　豬苗代湖景色，於圖三十三中 B 點向北拍攝，遠方火山為磐梯山(何樹根先生提供)

5.4 龍王峽地質簡述

龍王峽位於日本櫪木縣北部，鬼怒川上游，位於日光國立公園境內。龍王峽全長約 2 km，主要岩性為中新世早期至中期的火成岩，龍王峽內有一自然研究路，可供旅客徒步參觀峽谷內的自然景觀(圖三十六)。龍王峽內出露之岩性多變，主要為流紋岩、安山岩、玄武岩、以及少部分凝灰岩，可參照圖三十七，現地照片及解說如圖三十八、圖三十九(拍攝位置見圖三十七之 A 點)。龍王峽可分為三段，分別為白龍峽、青龍峽、以及紫龍峽(圖三十六)，三個峽的命名是根據該段峽谷內岩石之顏色而來。白龍峽之主要構成地層是中新世之流紋岩，由於流紋岩內部含有較多淺色礦物如石英、長石，因此岩石顏色較淺。青龍峽主要構成之岩石為綠色凝灰岩，因此峽谷內呈現淺綠色。紫龍峽內主要岩石為安山岩，此區安山岩年代為龍王峽內最古老之岩石(約為 2,200 萬年)，由於內含輝石以及角閃石之緣故，因此色澤偏深，導致峽谷呈現紫色。



圖三十六　龍王峽自然研究路，紅色為步道(龍王峽簡介網站，2016 年 1 月 18 日)



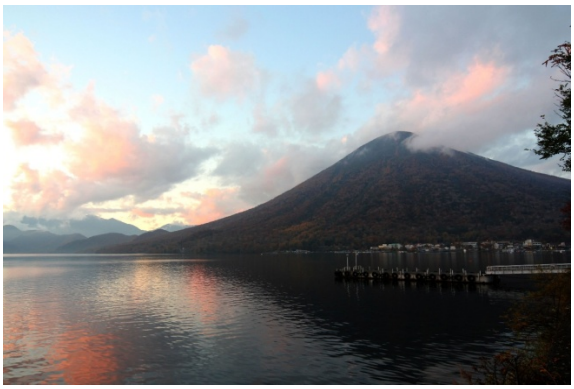
圖三十七　龍王峽地質圖。等高線間距為 250 m，地質圖資來源：Geological Survey of Japan (2010)，地形資料來源：SRTM 30 m DEM (JPL, 2003)

5.5 中禪寺湖與華嚴瀑布地質簡述

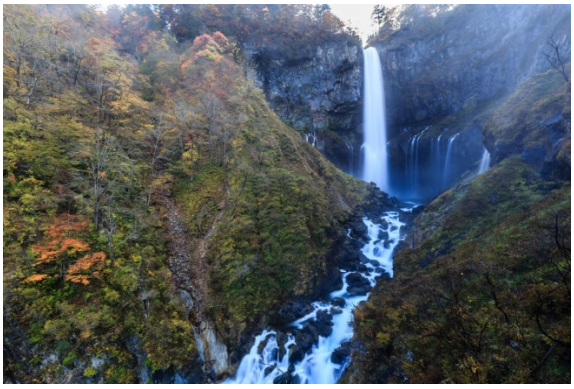
中禪寺湖與龍王峽一樣，位於日本櫪木縣北部，座落於日光國立公園之內。中禪寺湖位在男體山南麓(圖四十)，拍攝位置如圖四十四之 A 點，湖面標高海拔 1,269 公尺，面積 11.62 平方公里，湖水由華嚴瀑布洩出(圖四十一)。中禪寺湖南側之地層為晚白堊紀之石英安山岩、流紋岩、以及古新世至始新世早期的花崗岩，而此花崗岩亦出露於中禪寺湖之北側。中禪寺湖東北側以及華嚴瀑布一帶的地層，均為全新世之安山岩以及玄武岩(圖四十四)。中禪寺湖的形成年代約為兩萬年前，為男體山噴發時熔岩流阻擋河流去路而形成的堰塞湖。當堰塞湖形成後，河流改道而生成華嚴瀑布，瀑布高約 97 公尺，景色壯麗，於 1927 年被選為日本新八景，1931 年被定為日本國家名勝，並在 2007 年被列入日本地質百選。

圖三十八　白龍峽內遠眺鬼怒川上游，照片向西北拍攝。本區岩性為流紋岩，右側地層橫向破裂為水平節理(黃鐘先生提供)

圖三十九　虹見瀑布，位在白龍峽內，照片中可看出此處流紋岩內有至少三組節理(何樹根先生提供)



圖四十　中禪寺湖與男體山(黃鐘先生提供)



圖四十一　華嚴瀑布(何樹根先生提供)

圖四十二　華嚴瀑布與右邊之安山岩柱狀節理露頭(何樹根先生提供)

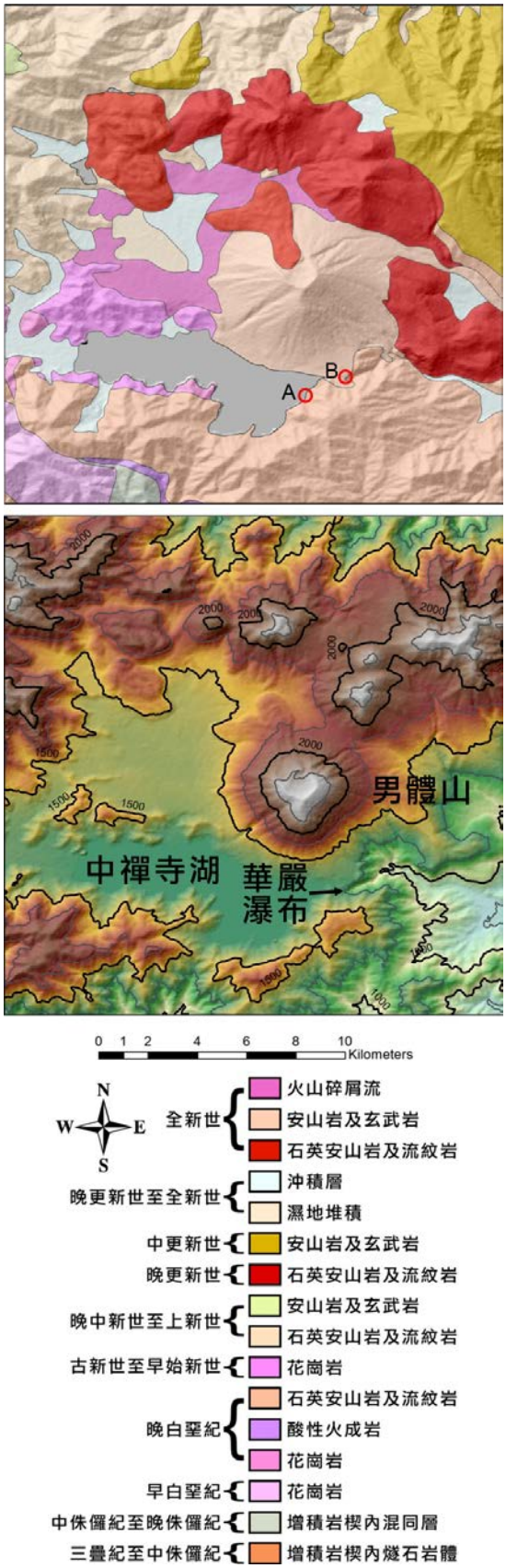
圖四十三　安山岩柱狀節理露頭近照(何樹根先生提供)

華嚴瀑布旁邊可見具有明顯柱狀節理之安山岩，外形成六角狀。其成因為岩漿冷卻時向心收縮而產生六角狀破裂，進而形成六角狀節理(圖四十二、四十三)。由於瀑布下之地層亦為此節理發達之安山岩，因此容易受到水力侵蝕作用而崩落，最近一次較為著名的例子為 1986 年十月時，瀑布下方的安山岩大量崩坍，造成瀑布向上游遷移了 4 – 5 m(Hayakawa, 2013)。圖四十一、四十二、四十三之拍攝地點如圖四十四之 B 點所示。

六、德川家康之長眠處-日光東照宮

日光東照宮位於日本櫪木縣日光市之日光山山麓(又稱為日光連山，由男體山、女峰山以及太郎山組成)，建於 1617 年(元和 3 年)，祭祀主神為東照大權現，即江戶幕府初代將軍德川家康，陪祀為豐臣秀吉以及源賴朝，為全日本所有東照宮之本社，並於 1999 年被聯合國教科文組織批准為世界文化遺產。

德川幕府第二代將軍德川秀忠依循父親遺囑，於日光興建最早之東照宮，初屬樸素。



圖四十四　中禪寺湖與華嚴瀑布地質圖。等高線間距為 250m，地質圖資來源：Geological Survey of Japan (2010)，地形資料來源：SRTM 30 m DEM (JPL, 2003)

直至第三代將軍德川家光參拜勘查之後，為了全面改造東照宮成為現今華麗之殿宇，故於日本寬永 13 年(1636 年)進行「寬永的大造替」，由日本江戶初期寬永文化的優秀技術集團承辦監製，工期長達兩年，工程金額約為現在之 200 億日圓，工程浩大。建築樣式採「權現造」與「八幡造」形式，搭配精美之雕刻及德川家之三葉家徽，使東照宮令人為之讚嘆。

本宮有兩個鳥居，位於表門前者為西元 1618 年九州筑前(福岡縣)藩主黑田長政公捐獻之巨大石製鳥居，高達 9 公尺，柱圍 3.6 公尺，2 柱中心間距為 6.8 公尺，與鎌倉八幡宮、京都八坂神社並稱日本三大石鳥居。位於陽明門前者為銅鳥居，為日本最初之銅鑄鳥居(圖四十五)。日光東照宮建築依據法華經教義，故其上雕刻許多與佛教有關之蓮花，使神道教之鳥居與佛教元素相融。雖規模較石鳥居為小，但因陰陽道之規劃，北極星可出現於銅鳥居、陽明門與江戶之直線上，又配合宮內建築之北斗七星配置，以致此區成為全東照宮靈氣最盛之處，趨使人群紛紛於此地聚集拍照留念。

神廄舍建於寬永 13 年(1636 年)，為日本神社建築史上之第一座馬廄。起初為德川家康在關原戰役時之坐騎生活處，至今則有荷蘭貝婭特麗克絲女王贈送之荷蘭白馬於內。此神廄為東照宮眾多殿宇中唯一之原木建築，採用書院式結構，於大造替期間興建，至今僅間壁和格窗有更改外，其餘地方無改建痕跡，保存良好。日本人相信猴子為馬之守護神，可保神馬不生疾病，故神廄格窗的上方雕有精美之猴子生涯圖，隱寓人生大事之因應之道，頗有教化大眾意味。其中最著名的為日光三猿，三隻猴子分別用手遮住眼睛、耳朵與嘴巴，典故來源為論語子曰之非禮勿視，非禮勿聽，非禮勿言，傳導大眾需依禮而行之概念(圖四十六)。

東照宮之正式入口為陽明門，日本寬永 13 年(1636 年)建立，為三間一戶之兩層大樓門，門高 11 公尺，寬 7 公尺，進深 4.4 公尺，由 12 支柱子組成。使用色調偏中國風，由黑、白、金、紅、青藍、藍綠、土黃共七色組成。

圖四十五 陽明門前之銅鳥居(鄧源昌先生提供)

圖四十六 神廄舍之日光三猿(何樹根先生提供)

建築雕有栩栩如生的飛龍、麒麟、龍馬、神仙等，雕工細膩及華麗裝飾，使其享有日暮之門之稱號，美得令人流連忘返。除此之外亦雕刻堯舜禹湯等賢王之傳記，隱喻德川家之德政。本次參訪正值陽明門修繕之際，未能欣賞實屬遺憾。過了陽明門後，即可來到唐門(圖四十七)。唐門即為中國門，寬度 3 公尺，進深 2 公尺，較陽明門小。但因唐門內即為祭祀德川家康之本殿和拜殿，故擔任守護本社的重要角色。為了彰顯德川幕府在日本人心中之威權形象，江戶時期只有幕臣和大名才能穿越此門，現今也只有大慶典或國賓參拜才會開放。一般參觀訪客仍不能穿過唐門進入社殿，得由右側迴廊繞行。唐門以白色為底，搭配華麗彩漆、金箔，綴以龍獅花鳥等華麗雕刻，四方軒的屋簷採用唐破風，屋頂上矗立威風凜凜的唐獅子及龍，分別代表白天與黑夜的守護神獸。唐門正面有「朝見舜帝」儀式的雕刻，兩旁白色門柱上以木製降龍與昇龍盤旋其上，在構造與技巧方面皆顯示當時工藝優異的技術。德川

家康所在之正殿，空間較為窄小，燈光昏暗。但頂上的彩繪天花板「格天井」由上百隻不同體態之金龍組成，精緻畫工生動地呈現著一格一龍，威儀令人印象深刻。基於保護文物古蹟，拜殿及正殿禁止拍照。

往奧宮、經過坂下門東迴廊時，不仿抬頭一下，在上方的蛙形飾版上藏有一隻國寶雕刻品「眠貓」，為「左慎五郎」名家的作品。圖像描述一隻黑白相間的斑紋貓在和煦的陽光下於牡丹花叢中打盹。其內涵表達有二，一為代表奧社裡一隻老鼠也沒有，表示為害作亂的老鼠皆已抓到；二為牡丹花與沉睡的貓為太陽之光之最佳詮釋，認為沉睡的貓讓後方的麻雀得以安心，意指和平共存，祈求天下太平之寓意(圖四十八)。

通過坂下門，即來到了前往奧宮之石階，需先爬上 207 階之石梯。勞其身體抵達奧宮後，區域不大，除了拜殿外，最鮮明的即為德川家康的墳墓「御寶塔」。御寶塔起初為木造，亦曾被改為石造，最後由第五代將軍德川綱吉改以唐銅製(金銀銅的合金)，為鑄工椎名伊豫之作，塔上上鎖，但據說從未被打開過。御寶塔前方有銅製花瓶、香爐、龜燭臺與鶴燭臺(龜鶴燭臺為朝鮮王朝之贈物)。拜殿後面有一道未開放之鑄拔門(奧宮唐門)，亦為鑄工椎名伊豫之作，門後有階梯可通往御寶塔之所在處，御寶塔與鑄拔門如圖四十九。御寶塔方向為面向西方，即大阪方向，此舉是因擔心擁護豐臣的西軍舊勢力，而讓德川家康往西盯著。此門並未開放，需從環墓道路旁觀御寶塔，不能直入墓地。御寶塔旁有棵伴著德川家康 600 多年的神木「成願杉(叶杉)」，有雷劈之痕跡，眾多遊客依序排隊向其許願，應屬靈驗(日光東照宮社務所，2013)。

七、東京市區之古典與現代巡禮

7.1 古典巡禮-淺草觀音寺

淺草寺位於日本東京都台東區淺草二丁目，為聖觀音宗的總本山，山號為金龍山，供奉主神為聖觀音，亦稱淺草觀音，是東京都內歷史最悠久的寺院。根據寺傳資料記載，本寺觀音像之來源起於推古天皇 36 年(628 年)，檜前浜成・竹成兄弟於宮戶川(現

圖四十七 東照宮唐門(鄧源昌先生提供)

圖四十八 守護東照宮之眠貓(何樹根先生提供)

圖四十九 奧宮之御寶塔與鑄拔門(鄧源昌先生提供)

・隅田川)捕魚時捕獲。地方官土師中知視察後則隨即將自宅改成寺廟來供奉，即為淺草寺之始。開始供奉之後，屢顯神蹟，十分靈驗，神龍亦受佛力感召前來。大化元年(645 年)，僧侶勝海上人來到淺草為此佛像建立觀音堂，並以神龍獻瑞的傳說取名「金龍山淺草寺」，並在夢中獲得開示，將本尊安立為秘藏佛像。直到了平安時代初期天安元年(857 年)，比叡山延曆寺圓仁大師蒞臨淺草寺製作了一尊與秘佛同樣身態的佛像，僅於每年的 12 月 13 日公開供眾參拜。秘佛像規格相傳為高一寸八分(約 5.5 公分)的金色佛像，由於非公開之緣故，故實體不明。江戶幕府成立後，初代將軍德川家康敕封淺草寺為幕府御

用的祈願所，使淺草寺成為舉國聞名的觀音靈場，香火鼎盛空前。現在之觀音堂為 1958 年(昭和 33 年)以鋼筋混凝土重建之建物，已恢復東京大空襲燒毀前之樣貌。此次因抵達該處之時間較晚，不及參拜與一窺內殿，實屬可惜。

淺草寺的兩重山門為雷門與寶藏門，雷門之全名為風雷神門，於西元 942 年由武將平公雅所創建，內奉風神、雷神、天龍與金龍神。雷門原建於淺草南方的駒形地區，直至鎌倉時代才移築至現在的位置。創建之初的雷門本是一座木造建築，卻不幸毀於 1865 年的江戶田原町大火。直到 1960 年，日本松下電器之創始人松下幸之助先生感念淺草觀音庇佑他大病痊癒，決定捐資重建雷門做為還願，即為現代之雷門。近代雷門以鋼筋混凝土建造而成，著名的朱紅色雷門燈籠高懸於正中央的屋樑之上，燈籠底部刻有金龍，燈籠由京都老字號高橋提燈製作，長度超過 3 公尺，重達 700 公斤，已成為旅客到訪之拍照勝地(圖五十)。

從雷門進入，通過熱鬧的仲見世通，即可看到另一高聳之山門，即寶藏門。為武將平公雅向淺草觀音祈願，使其能成為管轄武藏國(現在的東京都及其周邊區域)的官員，在得以成就宿願之後，便建造此木門還願，並內奉佛教護法神仁王金剛，稱之仁王門。後續經多次祝融之災，亦皆有重建，最近一次為 1964 年(昭和 39 年)新大谷飯店創始人大谷米太郎捐贈重建，以鋼筋混凝土建置，為三層構造組成，上部兩層是收藏室，放置寺院的寶貴物品及佛具，其內裝置有現代的防災設備結構，從此開始稱為寶藏門(圖五十一)。山形縣村山市的居民們為了紀念同鄉村岡師傅重塑吽形仁王像(圖五十二)之功勞，特地向淺草寺奉獻了一雙驅邪用的仁王大草鞋(圖五十二)。目前的草鞋為 2008 年敬奉，大草鞋高 4.5 公尺、寬 1.5 公尺、重 500 公斤，共使用了 2,500 公斤的稻草，彰顯著仁王的力量，以達驅魔避邪之用 (淺草寺觀光網站，2016 年 1 月 18 日)。

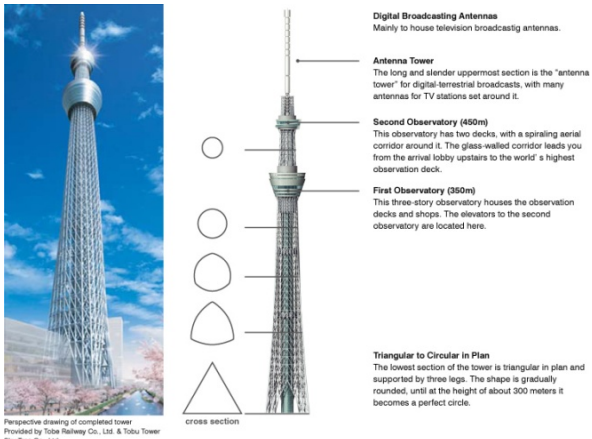
7.2 現代巡禮-晴空塔、台場

本次地質考查結束後，一行人移動至東京參觀晴空塔。東京晴空塔於 2008 年 7 月 14 日動工，2012 年 2 月 29 日完工、同年 5 月 22 日正式啟用。其高度為 634 公尺。東京晴空塔為金氏世界紀錄所認證的世界最高自立式塔形建築，目前亦為世界第二高的人工構造物，僅次於杜拜的哈里發塔。東京晴空塔之主要設計特色為底部基礎為三角形，逐漸向上延伸後轉為圓形(圖五十三)。夜間的晴空塔會打上各式燈光，在東京各處均可看見，十分亮眼(圖五十四)。在東京的最後一日，一行人前往台場，並在巨型鋼彈機器人模型前留下合影，結束了此次充滿知性的地質考查行(圖五十五)。

圖五十 淺草寺之雷門(何樹根先生提供)

圖五十一 寶藏門全景 (鄧源昌先生提供)

圖五十二 寶藏門之仁王大草鞋與吽形仁王像 (鄧源昌先生提供)



圖五十三 東京晴空塔各高程橫切圖(大林組，2015)

圖五十四 東京晴空塔夜景，拍攝地點於淺草寺旁。(何樹根先生提供)

圖五十五 地質考察團於台場巨型鋼彈機器人模型前大合照

八、結語

參訪日本 311 海嘯災後復健工程過程中，在工程面部分著實看見日本的先進技術及機具。在施工過程中，各處皆可看到日本人一絲不苟、謹慎的態度，例如儲料場之堆料十分整齊、工區整潔不凌亂、安全設施配戴不馬虎、混凝土節塊接縫填補確實。在經歷國家災難後、執行復健工程時，非以自身利益考量，而是以整個民族之安危為優先，將工程之品質做到最佳。實為台灣可效法之對象，使工程界更上一層樓。

除了工程知識外，東北秋楓美景、松島灣之各奇形怪島、華嚴瀑布之滂然大勢盡收眼裡，洗滌自我凡塵。過去歷史古蹟之人文知識陶冶身心，以及讚嘆當今宏偉之現代建設，皆令人流連忘返。最後感謝地工技術基金會、天鉉旅行社及與會人員之辛勞付出，共同為此次研討會劃下完美句點，滿載而歸。相關研討會活動照片及大合照如後所列。

參考文獻

大林組(2015)."TOKYO SKYTREE Construction Project." http://www.obayashi.co.jp/english/special/2010032622.html(2016 年 1 月 18 日)。

日本國土交通省東北地方整備局釜石港灣事務所(2015a)，「釜石港復健工程簡報」，。

日本國土交通省東北地方整備局釜石港灣事務所(2015b)，「大船渡港復健工程簡報」。

日光東照宮社務所 (2013)，「日光東照宮」，日本。

阮振興、彭國源、陳懿佐、陳謙武 (2013)，「重力式沉箱製作及拖放施工法監造實務」，*中華技術*，第 100 期，第 278-291 頁。

財團法人地工技術研究發展基金會 (2015)，「地工技術工程地質研討會(29)-日本東北 311 地震復原及重建」，地工技術工程地質研討會。

淺草寺觀光網站，http://www.senso-ji.jp/(2016 年 1 月 18 日)。

劉彥忠 (2009)，「由外廓防波堤之規劃設計談巨型沉箱之製作及拖航」，*水利會訊*，第 12 期，第 94-128 頁。

龍王峽簡介網站，http://www.ryuokyo.org/midokoro.html(2016 年 1 月 18 日)。

鍾英鳳、林原養、陳介、陳謙武 (2001)，「重力式沉箱製作與拖放施工法」，第 23 屆海洋工程研討會論文集，臺南，第 561-568 頁。

Earth Observatory of Singapore. (2011). "The great East Japan (Tohoku) 2011 earthquake: Important lessons from old dirt" http://www.earthobservatory.sg/news/great-east-japan-tohoku-2011-earthquake-important-lessons-old-dirt(Jan. 3, 2016).

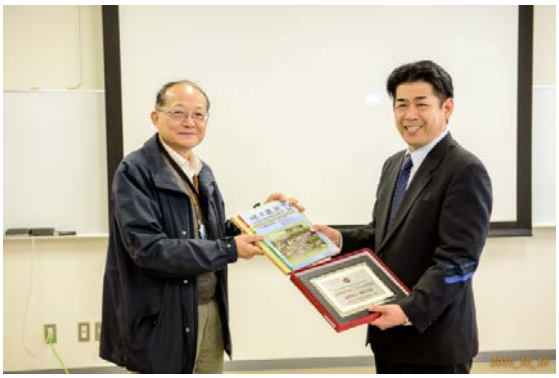
Geological Survey of Japan, AIST (2010), "Seamless Digiral Geological Map of Japan." https://gbank.gsj.jp/seamless/zoomify_en.html(Jan. 3, 2016).

Hasegawa, S., Sawada, T., Dahal, R.K., Nonomura, A., and Yamanaka, M. (2008). "Matsushima Bay as an Early Holocene coastal mega-landslide, northeast Japan." Proceedings of the First World Landslide Forum, Tokyo, 243–246.

Hayakawa, Y. S. (2013). Stability Analysis of Cliff Face around Kegon Falls in Nikko, Eastern Japan: An Implication to Its Erosional Mechanisms. International Journal of Geosciences, 4, 8-16.

JPL, (2003). "Shuttle Radar Topography Mission." National Aeronautics and Space Administration, Url:http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/.

Strom, A. L. (2009). "Catastrophic slides and avalanches." Springer, Berlin Heidelberg, 379-399.



圖五十六 感謝狀致贈釜石港灣事務所(江政恩先生提供)

圖五十九 陸前高田復健工程簡報(江政恩先生提供)

圖五十七 釜石港與大船渡港復健工程研討(李碧霞小姐提供)

圖六十 東京外環道市川中工事之現地研討(何樹根先生提供)

圖五十八 感謝狀致贈陸前高田施工單位－鹿島建設(何樹根先生提供)

圖六十一 猪苗代湖-磐梯溫泉飯店餐敘團體大合照

圖六十二 陸前高田災害復健工址團體大合照