

河床刷深對橋梁 3D 動態行為的影響

許澤善 侯義順 陳建學 賴智勇

更新日期：2010 年 04 月

一、前言

臺灣西部平原屬於現代沖積層，地質材料源於五大山脈主要成份包括版砂、粉質砂土及黏質砂土等；由於版砂構造特殊，對於上游因水土保持減少泥砂產量或水庫阻斷泥砂下移，或上下游採砂，河床具有潛在全面沖刷趨勢，對於已遭長期沖刷之橋址河床，水理應重新計算，包括重新推估流速、水深、沖刷深度等，並評估水流與基礎及堤岸之相互影響。

臺灣位於菲律賓海板塊與歐亞板塊的擠壓地帶，屬環太平洋地震帶，地震活動相當頻繁。當大地震發生時，沖積平原上之橋梁易因橋量基礎裸露而改變橋梁受力後之結構應力行為，造成橋墩基礎間存在過大的相對位移，由於此一現象已偏離既有的設計條件，橋梁將因此會在大地震中發生落橋或斷橋的現象；依據交通部民國 90 年 1 月 12 日頒布之「公路排水設計規範」有關橋梁最大可能沖刷深度規定，其主要精神在於保障橋梁基礎應深入穩定的河床底下；但對於刷深之大橋而言，雖然基礎仍深入穩定的河床底下，但在大地震作用下，橋梁是否保持穩定，應為重要的研究課題。

當深入剖析 921 大地震中災區橋梁之破壞機制時，得知當現地條件與設計條件趨於一致時，橋梁之破壞即難以發生；唯當部份橋墩基礎周圍之土層地質不同又遭受河水沖刷產生河床深槽區不一之現象，於大地震發生時橋墩基礎間因地形及地質條件不同其相對位移量亦有差異，其因係實際條件遠離設計條件，橋梁破壞乃因此發生。

由於傳統橋梁之設計，大都著重版、梁、橋墩等結構系統之分析，而未能將鄰近土層及其相關之地質與地形條件納入分析中，因此截至目前為止，地震後橋梁之破壞原因，也未能正確地加以描述，基於這種破壞原因之橋梁補強觀念很可能偏離實際需要。

由以上得知河床沖刷對橋梁於大地震中之穩定存在舉足輕重的影響，然而在公路排水設計規範中規定橋梁河床沖刷深度大於最大可能沖刷深度時，應重新計算水理，以便加強橋梁基礎之穩定外，並未要求將基礎及鄰近基礎之土壤納入 3D 動態分析之整體模式中，因此目前的橋梁耐震分析中均將橋墩底端視為固定端，換句話說，各橋墩底端均被視為無相對位移。

由於臺灣地區面積不大，卻存在 51 條活動斷層，且在地形複雜、地質及地質構造條件特殊的情況下，鐵公路橋梁之耐震設計規範理應不同於歐美等國家。基於臺灣地區之各種特殊性及維護橋梁系統於大地震中之穩定與安全，將地形與地質等因素納入整體橋梁之 3D 動態分析模式中，期望能夠掌握大地震中河床沖刷時對橋梁整體行為的影響。

二、橋梁之耐震設計

2-1 臺灣地區橋梁耐震設計規範之演進

交通部曾於民國 76 年 1 月頒布「公路橋梁設計規範」第二章 2.20 節中，綱要性地加以規範；其內容主要係參照 1980 年社團法人日本道路協會出版之「道路橋示方

書同解說 V 耐震設計編」，該文獻曾於 1990 年修訂，又在阪神兵庫地震後，於 2002 年進一步全面修訂。同時，美國公路橋梁耐震設計規範亦有長足進步，重要參考文獻有 1992 年 AASHTO 出版「公路橋梁標準規範(Standard Specification for Highway Bridge)」及 1986 與 1987 年 FHWA 出版之相關規範等。

有鑑於現行橋梁設計規範中有關耐震設計之內容，已明顯不敷國內橋梁工程之需，且先進國家開發之設計理念也極需引進並予以本土化，交通部於民國 80 起規劃執行橋梁設計規範耐震設計調查研究計畫，調查美、日等國家最新橋梁耐震設計規範架構，配合國內地震危害度與反應譜等有關研究成果，研擬適於臺灣地區之橋梁耐震設計規範，並於民國 84 年頒布實施公路橋梁耐震設計規範、民國 87 年研擬鐵路橋梁耐震設計規範，並推動鐵路橋梁耐震設計相關研究。

民國 88 年 9 月 21 日臺灣地區發生規模 7.3 之集集大地震，造成中部地區許多橋梁倒塌與破壞後，行政院國科會迅速邀請學者全面進行調查，以掌握橋梁破壞形式與結構類型、區域分佈、及年代等因素之關係及造成破壞之主要原因，供日後重建與新建橋梁耐震設計或耐震設計規範修訂重要參考，並規劃執行「公路橋梁耐震設計規範修訂草案之研究」，並於民國 90 年 6 月提出期中報告。

民國 90 年交通部規劃執行的「公路橋梁耐震設計規畫修訂草案之研究」係以集集大地震後臺灣各地區之調查結論及氣象局所得到之強震地動資料為基礎，輔以日本阪神兵庫地震及美國北嶺大地震後橋梁及建築耐震設計相規範相關之研究結果。

該公路橋梁耐震設計規範修訂草案之主要修訂重點計有：

- (一) 靜力分析方法：震區劃分之檢討修正，設計水平地表加速度之檢討，垂直地震力之檢討及相關地盤分類規定之檢討。
- (二) 動力分析方法：地震歷時之規定。
- (三) 鋼筋混凝土橋墩之耐震設計：檢討鋼筋混凝土橋墩之耐震設計條文，並增訂中空橋墩耐震設計相關規範。
- (四) 鋼橋墩及鋼管混凝土橋墩之耐震設計：修訂或增訂鋼橋墩及鋼管混凝土橋墩之相關耐震設計條文。
- (五) 支承及防止落橋構造之設計：探討及修訂支承之水平及垂直設計地震力，防止落橋長度及防止落橋裝置設計地震力及方法之修訂。
- (六) 採隔震支承墊橋梁之耐震設計：除原則性規定隔震橋梁之適用範圍，並增定隔震支承墊之線性及非線性靜力設計規定，隔震支承墊之原型測試及性能保證測試初步規定，另對於非線性動力分析進行原則性規定，需求及檢驗之規定作初步規定。
- (七) 基礎之耐震設計：針對橋梁基礎之耐震設計條文並對土壤液化評估及不穩定地盤之基礎耐震設計條文加以檢討及修訂。
- (八) 近斷層區域橋梁之耐震檢核：依活動斷層分布劃設近斷層區域後，規定近斷層區域橋梁除依規定進行耐震設計外，另須進行耐震檢核。
- (九) 橋梁耐震診斷及補強：作原則性之規定。

2-2、目前橋梁耐震評估方法

目前國內橋梁耐震評估方法，除依據前述文獻外，亦可一般橋梁在現場目視檢查前應儘可能蒐集橋梁原始設計資料及歷年來之維護資料，包含：(1)橋梁設計圖、竣工圖及結構計算書；(2)設計規範、使用材料及形式；(3)工址及鄰近地區地質資

料、現地狀況及週遭環境；(4)歷年地震、氣象、水文、交通流量及橋梁重要性評估等相關資料；(5)歷年養護維修補強等設計之記錄資料。將蒐集之橋梁相關資料彙整後填入交通部全國橋梁基本資料表，並在備註欄註明蒐集所得之資料。

其次進行橋梁現況檢測及調查，項目包含：

(一) 全面性目視檢測

採用 D.E.R.U.評等法，針對橋梁構件進行全面性檢查，快速瞭解橋梁結構初步損壞及材料劣化情形。

(二) 地質鑽探與試驗資料之蒐集

(三) 基礎沖刷資料之蒐集與測量

(四) 橋梁遺缺資料補建

(五) 橋梁儀器檢測

檢測項目包含：(1)混凝土反彈錘試驗；(2)混凝土鑽心試驗；(3)混凝土鑽心取樣抗壓試驗；(4)混凝土中性化試驗；(5)氯離子含量檢測試驗；(6)混凝土孔隙及裂縫寬度、深度檢測；(7)混凝土保護層檢測；(8)鋼筋腐蝕速率及腐蝕電位檢測。

當填寫初步承載能力評估表後，配合初步承載能力評定標準，即可評定橋梁之危險度。倘若橋梁安全有問題或有疑慮時，須立即進行或於近期進行安全檢測及評估。

當安全檢測及評估作業完成後，即可進行橋梁耐震能力評估。橋梁耐震能力評估分為初步耐震能力評估與詳細耐震能力評估。

地震中，橋梁因耐震能力不足必須考慮的破壞型式有構件破壞、支承破壞、落橋破壞、土壤液化破壞及基礎結構破壞等五種。

進行初步耐震能力評估時，一般乃依安全檢測及評估結果，參照交通部研擬之「公路橋梁安全初步檢測及評估準則」草案及解說，填寫「公路橋梁安全之耐震初步評估表」，即可初步評定橋梁耐震能力是否足夠；當評定結果為耐震能力不足或有問題時，應針對該橋梁進行詳細耐震能力評估。

進行詳細耐震能力評估時，可先行比較原有橋梁耐震設計規範與現行橋梁耐震設計規範之異同點；當中現行橋梁耐震設計規範係指民國 84 年交通部頒佈之公路橋梁耐震設計規範及民國 89 年 4 月 7 日交通部交技 89 字第 003577 號函附「公路橋梁耐震設計規範」增修條文。

(一) 初步耐震能力評估

採用「公路橋梁安全檢測及評估準則（草案）」中之評估方法，評估作業主要分為三類：落橋評估、強度韌性評估及穩定性評估。

(二) 橋梁詳細耐震能力評估

橋梁詳細耐震能力評估乃參照民國 89 年交通部頒佈的「公路橋梁耐震設計規範」、及依據民國 84 年交通部委託臺灣大學地震工程中心研擬的「電信與運輸系統之耐震安全評估與補強初步準則」。

同時彙整梁實際尺寸、檢測資料、配筋及材料強度等資料後，即可參照臺灣營建研究中心出版的「公路橋梁檢測評估」研討會論文集集中所提方法，決定構件強度與韌性不足破壞模式、落橋破壞模式、基礎破壞模式、支承破壞模式及土壤液化破

壞等五種不同破壞模式對應之橋梁崩塌地表加速度。

三、河床刷深之動態分析

3-1 橋梁 3D 動態模擬分析之材料性質

本論文針對如圖 3-1 所示之橋梁穿越淨寬為 153 公尺之河床進行 3D 動態分

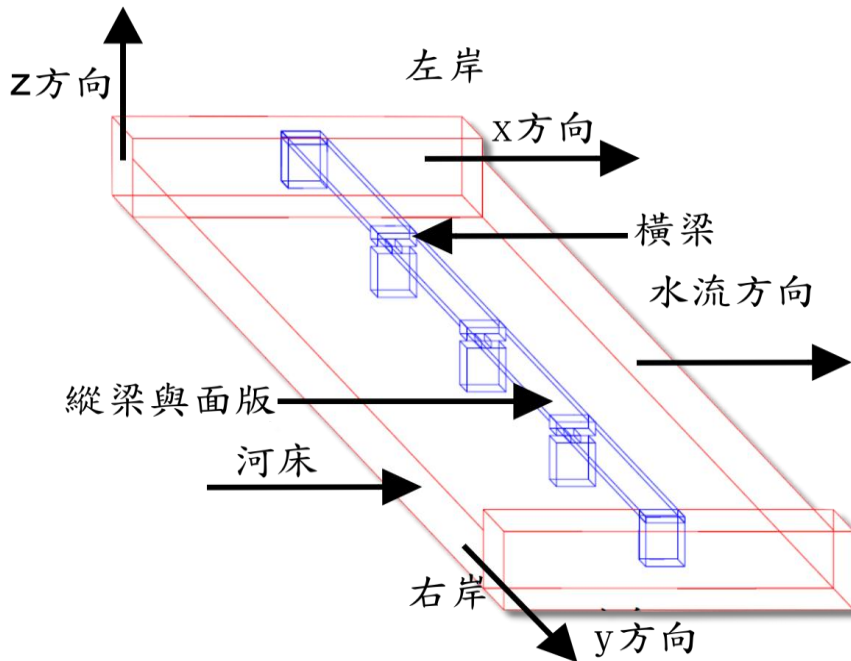


圖 3-1 含河床、兩岸及橋梁結構分析模式透視圖

分析模式中視兩岸及河床之底面為固定端，有關 RC 橋梁各主體結構之性質均視為線彈性，橋梁兩岸之材料性質視為堅硬的黏質粉土層所組成，其性質為非線性黏彈性者，將河床切割成四層，其材料性質由中砂與細砂混合而成之中等緊密砂土層所組成，其性質亦為非線性黏彈性者。

3-2 橋梁 3D 動態分析模式分為：

(一) 河床未沖刷前之橋梁分析模式。

橋梁以 3 個橋墩區分成 4 跨，各跨之淨間距為 36 公尺，橋墩之尺寸為 3 公尺長、3 公尺寬及 6 公尺高，橋墩之沉箱基礎為 12 公尺長、3 公尺寬及 18 公尺高、橋台基礎為 12 公尺長、3 公尺寬及 6 公尺高，橫梁為 12 公尺長、3 公尺寬及 3 公尺高、縱梁(含面版) 為 39*4 公尺長、12 公尺寬及 2.5 公尺高如圖 3-2 橋梁之主體結構立面圖；地質範圍為橋梁之兩岸之尺寸均為 108 公尺長、9 公尺寬及 32.5 公尺高。

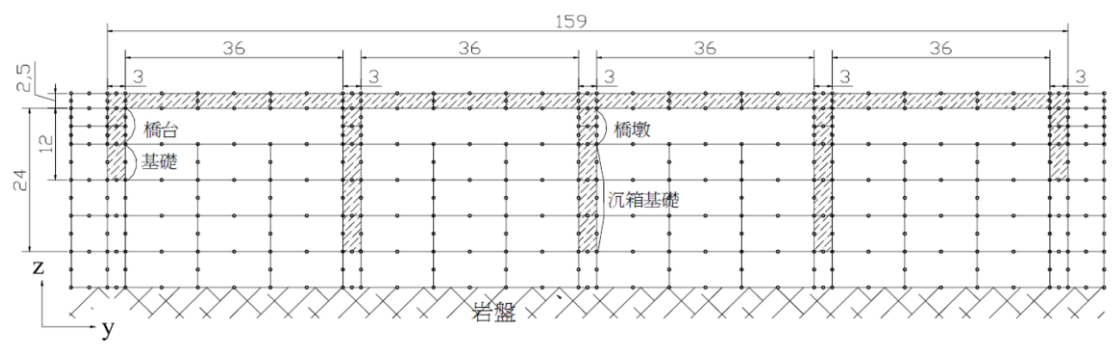


圖 3-2 未刷深之橋梁主體結構立面圖

原河床未刷深之橋梁進行 3D 動態分析，分析中為因應 NSAT 程式中有關 3D 固體元素之需要，將 3D 固體有限元素網格分割為 673 個元素如圖 3-3

所示。

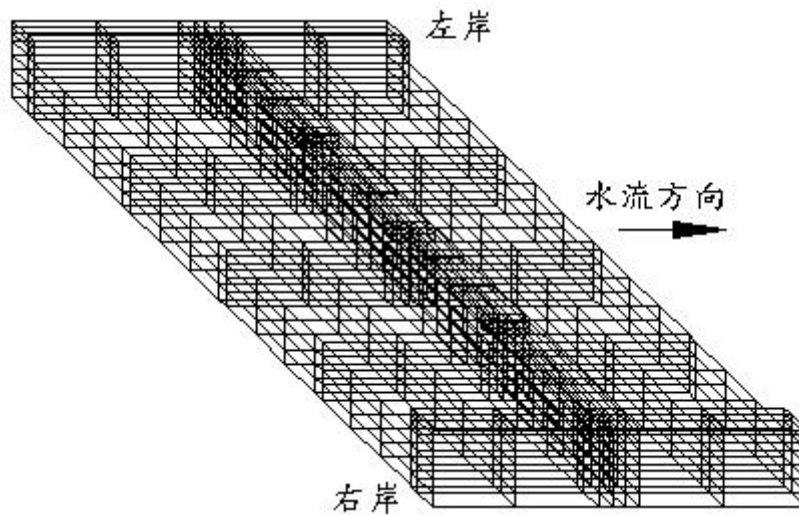


圖 3-3 未刷深之橋梁立體網格圖

(二) 河床沖刷一層之橋梁分析模式。

本分析模式之橋梁結構及地質範圍同與未刷深之橋梁相同，惟河床面向下刷深 6 公尺如圖 3-4 橋梁之主體結構立面圖。

分析中為因應 NSAT 程式中有關 3D 固體元素之需要，分割所得之 3D 有限元素整體網格合計有 577 個元素如圖 3-5 所示。

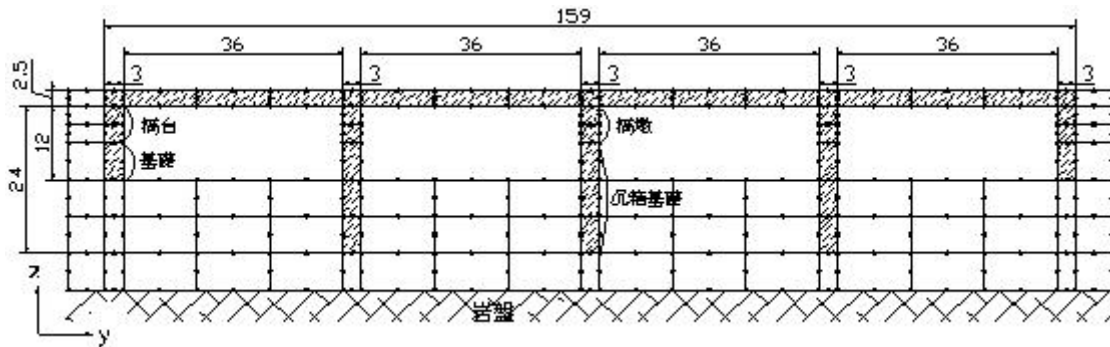


圖 3-4 河床沖刷一層橋梁之主體結構立面圖

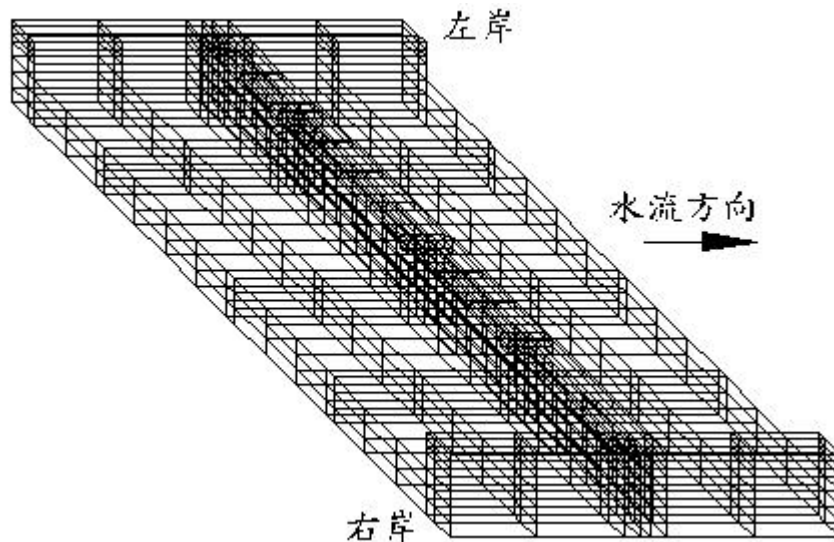


圖 3-5 河床沖刷一層之立體網格圖

(三) 河床沖刷二層之橋梁分析模式

本分析模式之橋梁結構及地質範圍同與未刷深之橋梁相同，惟河床面向下刷深二層計 12 公尺如圖 3-6 橋梁之主體結構立面圖。

分析中為因應 NSAT 程式中有關 3D 固體元素之需要，分割所得之 3D 有限元素整體網格合計有 481 個元素如圖 3-7 所示。

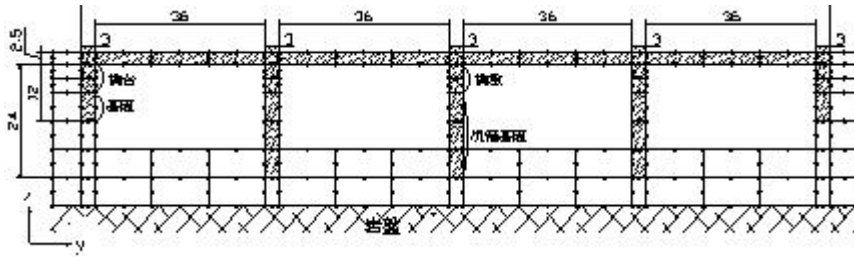


圖 3-6 河床沖刷二層橋梁之主體結構立面圖

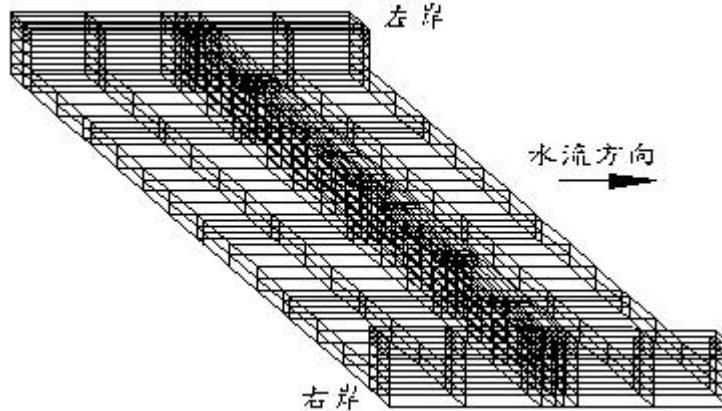


圖 3-7 河床沖刷二層橋梁之立體網格圖

3-3 橋梁 3D 動態模擬分析之地震資料

橋梁兩岸及河床底部輸入地震加速度歷時曲線係直接取自 921 集集大地震中 TCU065 (霧峰國小) 測站實錄之加速度歷時曲線 (如圖 3-8 所示)

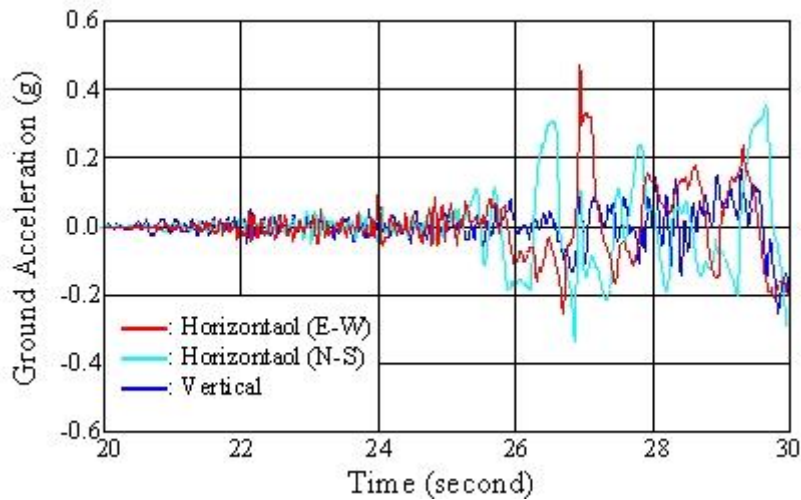


圖 3-8 TCU065 測站實錄之 921 集集大地震加速度歷時曲線

3-4 原河床未沖刷前之橋梁 3D 動態分析結果

原河床未沖刷前之橋梁 3D 動態分析，其未被沖刷之中間橋墩頂端 (如圖 3-2 所示) 之位移歷時曲線由圖 3-9 得知，未被沖刷之中間橋墩頂端之位移隨地震加速度歷時曲線之變化而改變，最大位移量為 6.8 公分。

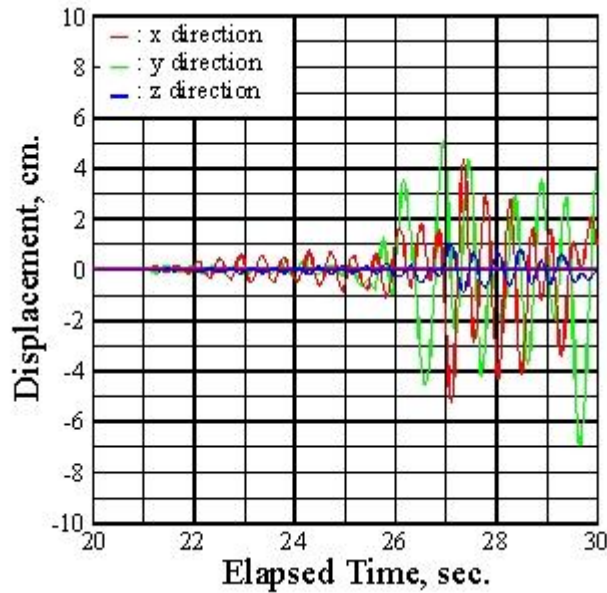


圖 3-9 未被沖刷之中間橋墩頂端之位移歷時曲線

未被沖刷之中間橋墩與相鄰未被沖刷之橋墩底端與沉箱基礎接鄰斷面中央之相對位移歷時曲線如圖 3-10 所示，由圖 3-10 得知該相對位移歷時曲線隨地震加速度歷時曲線之變化而改變，當震波由沉箱基礎下方之岩盤（如圖 3-2 所示）頂端向上傳播時，橋墩底端與沉箱基礎接鄰斷面中央之最大相對位移量為 0.85 公分。

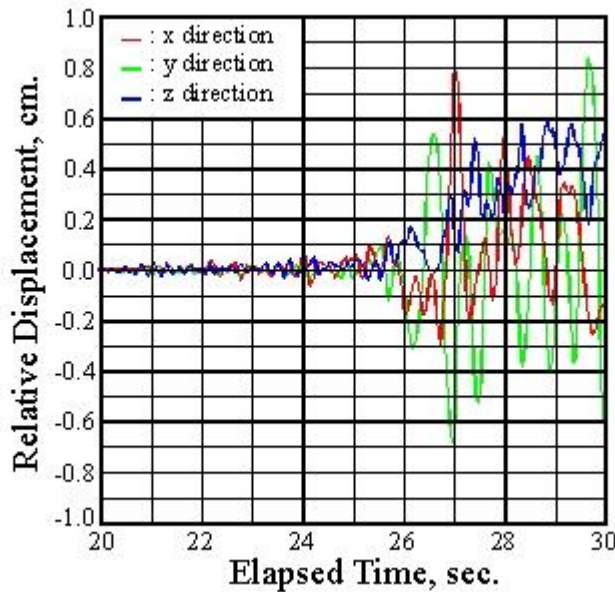


圖 3-10 未被沖刷之中間橋墩與相鄰未被沖刷之橋墩底端與沉箱基礎接鄰斷面中央之相對位移歷時曲線

3-5 河床沖刷一層之橋梁 3D 動態分析結果

河床沖刷一層之橋梁 3D 動態分析，其沖刷一層之中間橋墩頂端（如圖 3-4 所示）之位移歷時曲線由圖 3-11 得知，沖刷一層之中間橋墩頂端中央之位移隨地震加速度歷時曲線之變化而改變，最大位移量為 8.61 公分。

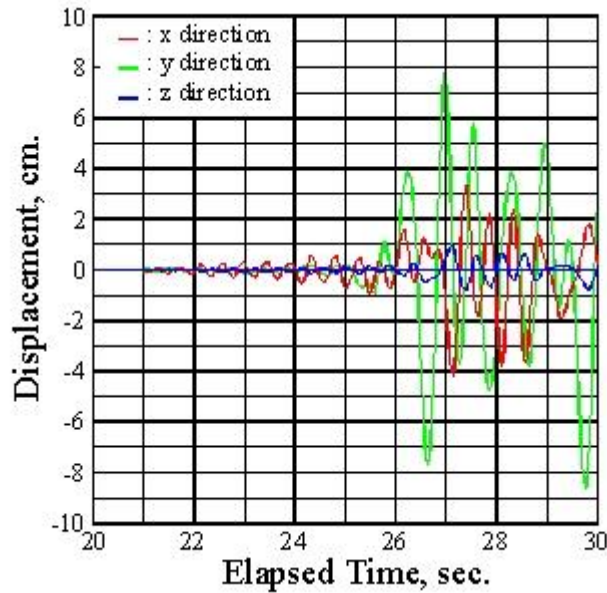


圖 3-11 沖刷一層之中間橋墩頂端之位移歷時曲線

沖刷一層之中間橋墩與相鄰沖刷一層之橋墩底端與沉箱基礎接鄰斷面中央之相對位移歷時曲線如圖 3-12 所示，由圖 3-12 得知該相對位移歷時曲線隨地震加速度歷時曲線之變化而改變，當震波由沉箱基礎下方之岩盤（如圖 3-4 所示）頂端向上傳播時，橋墩底端與沉箱基礎接鄰斷面中央之最大相對位移量為 1.13 公分。

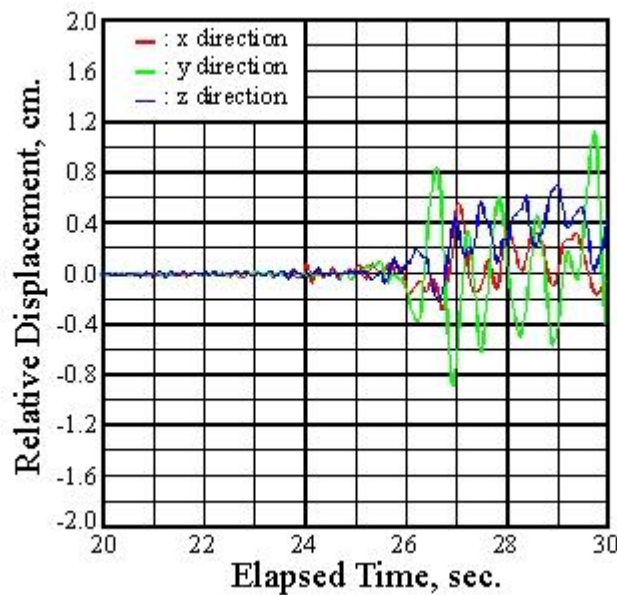


圖 3-12 沖刷一層之中間橋墩與相鄰沖刷一層之橋墩底端與沉箱基礎接鄰斷面中央之相對位移歷時曲線

3-6 河床沖刷二層之橋梁 3D 動態分析結果

河床沖刷二層之橋梁 3D 動態分析，其沖刷二層之中間橋墩頂端（如圖 3-6 所示）之位移歷時曲線由圖 3-13 得知，沖刷二層之中間橋墩頂端之位移隨地震加速度歷時曲線之變化而改變，最大位移量為 13.4 公分。

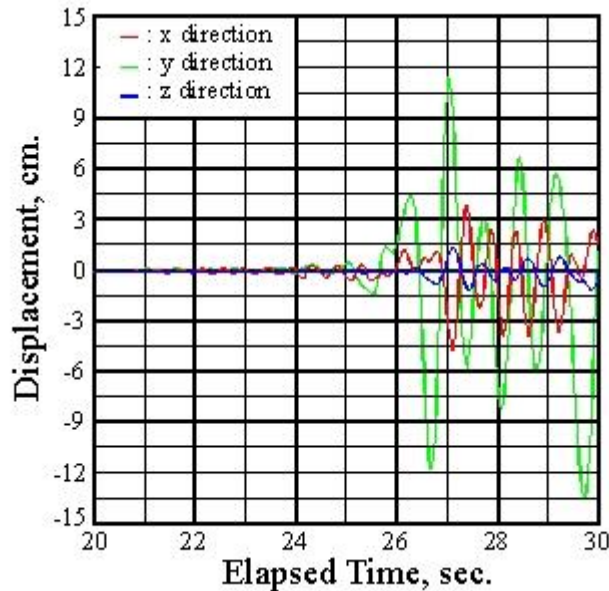


圖 3-13 沖刷二層之中間橋墩頂端之位移歷時曲線

沖刷二層之中間橋墩與相鄰沖刷二層之橋墩底端與沉箱基礎接鄰斷面中央之相對位移歷時曲線如圖 3-14 所示，由圖 3-14 得知該相對位移歷時曲線隨地震加速度歷時曲線之變化而改變，當震波由沉箱基礎下方之岩盤（如圖 3-6 所示）頂端向上傳播時，橋墩底端與沉箱基礎接鄰斷面中央之最大相對位移量為 2.27 公分。

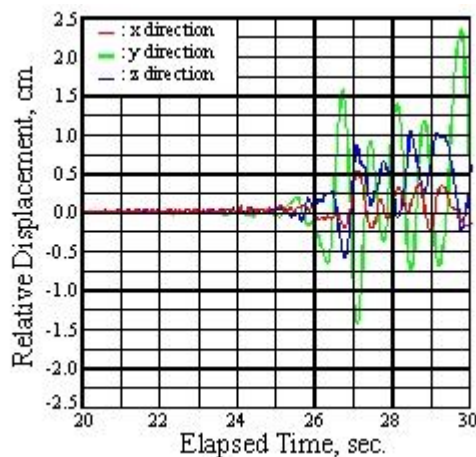


圖 3-14 沖刷二層之中間橋墩與相鄰沖刷二層之橋墩底端與沉箱基礎接鄰斷面中央之相對位移歷時曲線

四、結論與建議

臺灣地形起伏很大水流湍急容易沖刷河床，而各溪流上游大都興建水庫及攔河堰，阻礙下游河床材料黏質土壤之填補，河床不穩定性逐漸提高易於沖刷或淘空，本研究旨在於探討不同河床沖刷之地形改變對橋梁 3D 動態行為的影響，使地形與橋梁之互制行為得以顯露，經由本研究結果顯示如下結論：

- (一) 河床沖刷之深度，攸關地震時橋梁相臨兩橋墩基礎間之相對位移量，此現象在傳統橋梁設計規範中常被忽略不計。
- (二) 對於本研究中橋梁三種不同河床沖刷深度而言，顯示地形變化劇烈在強震時造成橋墩位移易產生落橋或斷柱等現象。
- (三) 對於橋梁之不同河床沖刷情況顯示，目前橋梁 3D 動態分析過於簡化僅含梁與橋墩的分析模式，未將地形變化納入分析。

經由研究結果中顯示橋梁 3D 動態分析應將地形及地質變化等條件納入分析模式中，以期在設計新橋梁或檢測時儘量符合現場實地狀況，如此才能瞭解橋梁損害之

原因，以提供新橋梁設計之參考及橋梁維修時擬定符合實際須要之補強方法。