

臺北高運量捷運系統浮動式道床軌道之探討

陳誠源

摘 要

近代世界各大捷運系統在選用軌床系統之同時總會將浮動式道床軌道 (Floating Slab Track, FST) 列入特別考量, 臺北高運量捷運系統 (以下簡稱本系統) 亦不例外, 惟本系統初期路網因故並未使用, 後續路網之新莊/蘆洲支線為記取初期路網之經驗, 兼顧振動管制相關法令頒佈前之空窗期, 將自國外引進已有廿多年實績且公認最佳減振措施之 FST, 俾使臺北捷運系統更臻完善。本文將簡述 FST 發展過程, 彙集國外已營運系統之 FST 基本性質, 並就臺北捷運系統無道碴道床軌道之現況, 建立屬於本系統較佳化之 FST 設計, 俾作為規範與圖說訂定之依據, 同時將以四個單自由度串聯模擬分析 FST 之減振效果, 並建立 FST 之可接受標準。由於 FST 在國內尚屬首創, 在有限資料下所完成之規範與圖說, 仍有相當可議或模糊有待專業廠商在日後設計、施工與驗證中澄清及修正。本文僅為拋磚性質, 成形的美玉仍有待軌道先進的挖掘與雕飾。

關鍵詞：噪音、振動、自然頻率、插入損失、浮動式道床軌道、無道碴道床軌道

一、前言

近代世界各大捷運系統在選用軌床系統之同時總會將浮動式道床軌道 (Floating Slab Track, FST) 列入特別考量, 例如: 華盛頓、紐約、多倫多、洛杉磯、巴爾的摩、亞特蘭大、達拉斯、墨爾本、香港、新加坡等地之捷運系統, 目的係就可能經過或穿越對振動敏感之路段, 以 FST 取代一般軌床系統以達到降低振動對鄰近建物之影響。臺北捷運系統亦不例外, 前英國捷運總顧問 (BMTC) 與前美國捷運總顧問 (ATC) 均有使用 FST 之規劃, 惟本系統在淡水線設計之初, 早已因經費問題形同將 FST 排除在外。初期路網各線陸續通車營運, 地下段振動問題逐漸浮上臺面, 77 年開始制定之振動管制法, 迄今仍在環保署草擬中。雖然已營運路段, 振動量測值皆在 ISO 標準之下, 但捷運係屬新建工程, 若造成既有建物之有感振動, 於法缺立論基準, 於理則深覺有愧, 同時將影響後續路網之興建。鑑於振動相關法令遲未頒佈, 本局在處理類似問題上缺乏著立點, 為記取初期路網之經驗, 兼顧振動管制相關法令頒佈前之空窗期, 引進國外已有廿多年實績且公認最佳減振措施之 FST 已是刻不容緩, 新莊/蘆洲支線將是臺北捷運系統最先使用 FST 之路線。以下謹就目前執行現況, 從 FST 之規劃至相關圖說規範訂定等作探討。

二、文獻回顧

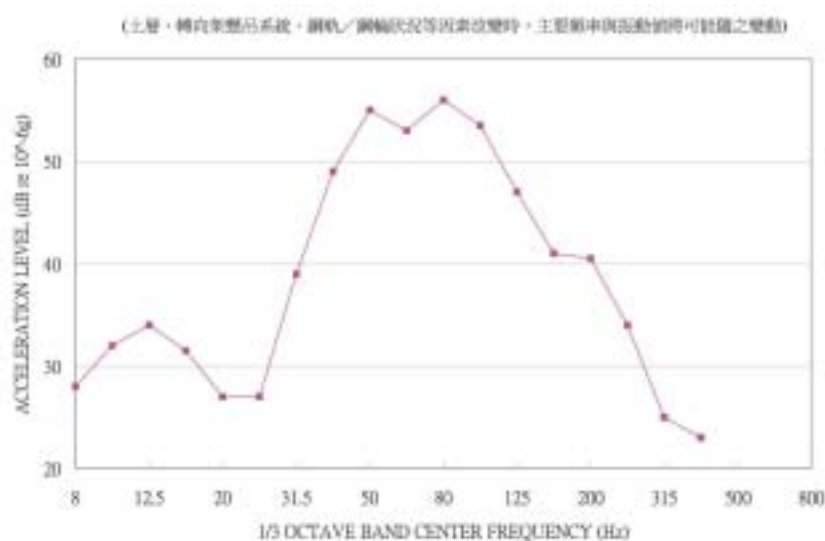
浮動式道床軌道 (FST) 最早可溯至 1965 年英國 The Barbican System, 其後 The Piccadilly Line 延伸線至倫敦 Heathrow 機場, 因局部路段穿越住宅區而使用 FST 【Grootenhuis, 1977】, 英國所發展之 FST 是以道碴道床軌道為主, 茲將其歸類為道碴式 FST。1968 至 1970 年間, 德國人 J. Eisenmann 為德鐵發展出兩種型式之 FST, 並分別用在科隆、慕尼黑以及法蘭克福等城市, 迄今效果良好 【Eisemann, 1985】。其中一種類似英國之道碴式 FST, 另一種則捨棄傳統道碴, 完全為無道碴軌道, 茲將後者歸類為無道碴 FST。前揭皆為道版厚且重量大 (Heavyweight) 之 FST, 自然頻率在 7~12Hz 之間, 軌道安裝所需預留之空間大, 相對土建結構建造成本大幅增加。由於無道碴軌道業已是新建捷運系統選用之主要規格, 除非另有註明, 以下皆指無道碴 FST。

華盛頓捷運系統 (WMATA) 是美國首先使用 FST 之捷運系統, 肇始於 1970 年代初, 稱為第 I 代 FST (連續場鑄混凝土道床版), 長度 60~70 ft, 1983 年經改良後之第 II 代 FST (半連續場鑄混凝土道床版), 長度 25 ft; 相較於英國、德國之 Heavyweight FST, WMATA 係基於能達到降低噪音與振動之功能下, 提供一穩定、安全之軌道系統, 且不致增加結構深度的前題下, 而發展道版厚度較小、重量較輕 (Lightweight) 之 FST, 自然頻率約在 14-16Hz 之間。除此之外, 另一型屬於 Lightweight FST 之不連續 (或稱 Mini) 道床版更為許多捷運系統所採用, 包括多倫

多、亞特蘭大、洛杉磯、香港等，一般皆為預鑄道床版，有時稱為 Double-Tie System，長度約 5 ft（或鋼軌扣件間距之兩倍）【Irshad, 1994】。

英鐵早期發展之浮動式道床版為連續的，其所持理由是版彎曲音波（Bending Waves）所提供之輻射阻尼可將振源所激起在共振頻率（約在 15~18Hz）之能量帶離，並且相信輻射阻尼會比支承墊所提供之阻尼為大【Wilson, 1983】。基本上，對單一振源而言，前述觀念是正確的，惟列車所產生之地傳振動，其振源為連續移動，故不管是連續或不連續道床版，振動能量幾是均勻分佈，雖然版彎曲所提供之輻射阻尼可控制共振放大倍率，惟共振時之輻射阻尼明顯很低，故輻射阻尼之重要性有必要再重新評估【Wilson, 1983】。尤其當列車行經 WMATA 第 I 代 FST 時，因道床版長度達 60~70 ft，版彎曲音波衍生車內與月台處之低頻隆隆噪音大幅增加，為改善此項結構噪音，因而縮短道床版之長度至 25ft，同時道床版周遭以彈性材處理；後續不連續 FST 之發展，道床版長度降至 5ft，更使得版彎曲音波降至最低【Wolf, 1990】，故連續道床版業已不再列入考量。

FST 經安裝測試顯示，道床版在設計時另應考量列車主懸吊系統自然頻率及地盤特性。Heavyweight FST 因自然頻率低，故應避免與主懸吊系統發生共振現象；一般情況，Lightweight FST 自然頻率在 15Hz 時，可避免前述因素衍生彼此互制行為的發生，但若土層較軟時，FST 之自然頻率宜酌於降低，以避免共振放大【Wolf, 1990】。由多倫多地鐵鄰近建物之底版振動頻譜顯示（圖一），尖峰頻率約在 50~80Hz 之間【Remington】。因 FST 之自然頻率在 15Hz 左右，故尖峰頻率 50~80Hz 之振動皆可有效降低。至於與 FST 自然頻率相近之振動，理論上需藉由阻尼使共振放大現象儘可能降低，但因列車係以連續變動位置之方式激起振動，此有別於固定振源之周期性振動，此種振動特性經觀測結果，系統共振放大約 2~4dB，而非理論計算之 12~15dB，此現象在支承墊為高阻尼或低阻尼材料、道床版為連續或不連續並無差異【Wolf, 1990】。



圖一：多倫多地鐵鄰近建物之底版振動頻譜

三、本 文

◎背景說明

基於營運維修考量，無道碴道床軌道（Direct Fixation Track，DF 軌道）業已逐漸取代傳統道碴道床軌道（Ballasted Track），從初期應用在地下段、高架段，目前平面段亦有採用無道碴軌道之案例。DF 軌道的使用雖大幅減少軌道養護維修工作，但相對地也犧牲了道碴軌道在吸音減振之功能，為彌補此一缺失，因而有無道碴道床鋼軌鋼件（Direct Fixation Fastener，DFF）或稱彈性基鈹之發展。基鈹彈性係數降低，由 30KN/mm、25KN/mm、15.76KN/mm，甚至 Cologne Egg 之 6KN/mm，目的是在軌道結構與建造成本變動不大之前題下，試圖發展出吸音減振良好之基鈹。但對於路線經過特殊地區，例如：聯合開發共構車站、隧道與鄰近建物質實連接、穿越或鄰近對振動敏感之建物等，當彈性基鈹無法達到預期減振效果時，浮動式道床軌道（Floating Slab Track，FST）是目前公認最佳替代方案。

浮動式道床軌道（FST）是利用支承墊將道床版與隧道仰拱面或橋面版等土建完成面完全隔離，以阻絕振動之傳遞，其原理是經由加大道床版質量、減小支承墊彈性係數，以降低軌道自然頻率，進而達到隔振、減振功能。以單自由度之彈簧—質量系統為例，系統減振範圍係針對振動頻率在軌道自然頻率的 1.414 倍以上之部分；至於振動頻率與軌道自然頻率相近之共振放大現象，一般係以增加阻尼來降低放大值。

列車行駛所產生之輪軌振動是因鋼輪、鋼軌及軌道支承結構之不平順所引起之地傳振動，此項振動向上會由懸吊系統傳入車廂，向下則由軌道系統、隧道結構、土層、建物基礎傳至鄰近建物結構內。在輪軌振動傳播的過程中，振動會經由軌道系統、隧道與土層之耦合損失（Couple Loss）、距離衰減（含幾何衰減與土層內部阻尼衰減）、土層與建物基礎之耦合損失、建物結構各樓層傳遞等而逐漸減小，惟一旦傳入建物內之振動仍大時，在建物內作息的人們將會感受到振動及振動經由結構面所散發出之低頻噪音（又稱二次噪音、結構噪音或地傳噪音），如果建物內有安裝精密之儀器設備，振動將會影響儀器設備之正常運作，此類振動或許會影響人們的作息或儀器設備的運作，但不致對建物結構安全構成威脅。

本系統沿線因電聯車行駛產生之噪音／振動自始係依據前美國捷運總顧問（ATC）所制定之 FE-31 報告【ATC, 1990】進行評估。目前初期路網各線業已先後通車營運，少數路段陸續反映有振動或地傳噪音問題，惟依據 Wilson【Wilson, 1983】之觀點，目前本系統地下段所用之彈性基鈹係採彈性材與上／下金屬鈹粘結之三明治式，其彈性係數（ $K=15.76\text{KN/mm}$ 或 $90,000\text{ lb/in}$ ）已是最佳化，在考量軌道側向穩定度之前題下，類似粘結承壓型基鈹之 K 值 15.76 KN/mm ，不宜再降低。故為記取初期路網之經驗，兼顧振動管制相關法令頒佈前之空窗期，後續新莊／蘆洲支線將在捷運隧道穿越公私有土地下方且其上有建築物供使用之路段

(以下簡稱地下穿越段)及鄰近噪音／振動敏感地區改用浮動式道床軌道，以期將地下段之輪軌噪音／振動問題降至最低。

°F 各系統 FST 特性彙整

無道碴 FST 依道床版質量大小分成 Heavyweight 與 Lightweight 兩種，前者有德國鐵路系統(圖二)與新加坡捷運(圖三)使用，後者則廣泛應用在北美各大捷運系統(圖四、五、六)及香港(圖七)捷運系統上，茲將各系統 FST 使用之參數彙集如表一。【Eisemann, 1985】【DORTS, 1990】【Kraft】【凌, 86】【SMRT】【WMATA, 1973、1983】【HKMRT, 1998】【Baxter, 1998】【Copey, 1989】

本系統原使用之基鈹軌床係由 ATC 逕引自北美各大捷運，在考量彼此之相容性，避免大幅增加土建結構建造費用之前題下，因而規劃採用 Lightweight FST。FST 發展迄今已近卅年，各系統在運轉期間所發生之缺點彙整如表二【Irshad, 1994】【Wolf, 1990】【Baxter, 1998】。

以香港機場快線(1998 年 7 月營運)所設計之 FST 為例，表二缺點除造價無法改善外，其餘皆已納入考量，故 FST 技術發展業已成熟。

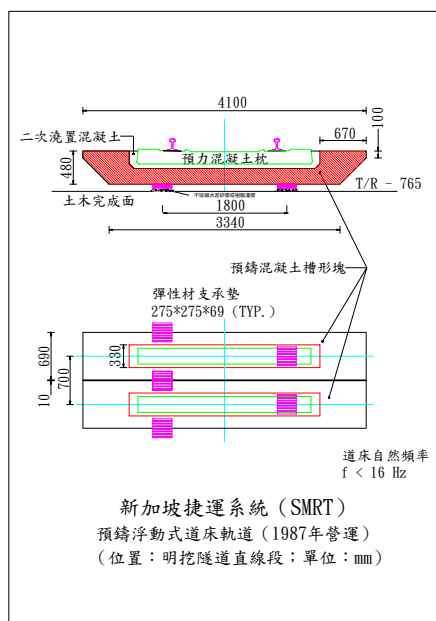
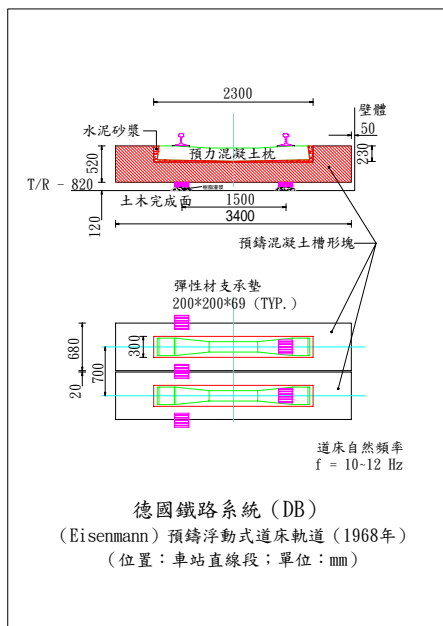
a.iii. FST 較佳化設計

現階段本系統尚無 FST 實績，故不宜談 FST 最佳化設計，惟參考各系統之規範、圖說及運轉狀況，應可嘗試建構一個較佳化設計之 FST。FST 設計考量因素可歸納為道床版、支承墊與附屬設施三部分，其中道床版之質量與支承墊之彈性係數需合併考量以決定 FST 自然頻率。FST 自然頻率小，減振效果佳，故道床版之質量希望越大越好，支承墊之彈性係數則希望越小越好，惟質量太大，將衍生土建結構之建造成本大幅提高，而彈性係數太小，則不利於軌道系統之穩定性。若取 Lightweight FST 之道床版自然頻率 15Hz~18Hz 為設計準則【WMATA, 1973】，依此準則建立 FST 剖面示意圖(圖八)，分項說明設計考量因素：

X 道床版

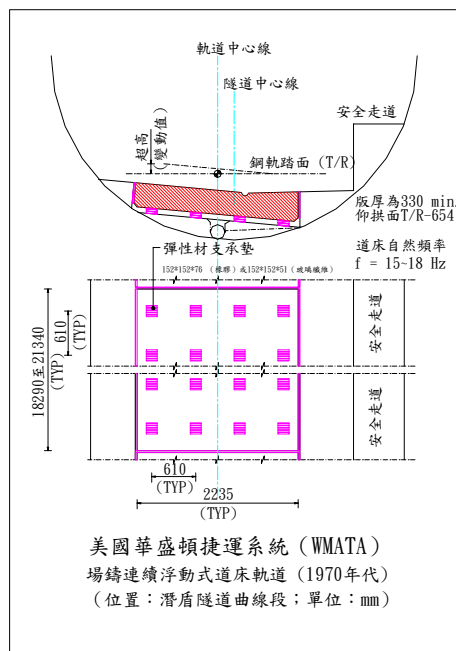
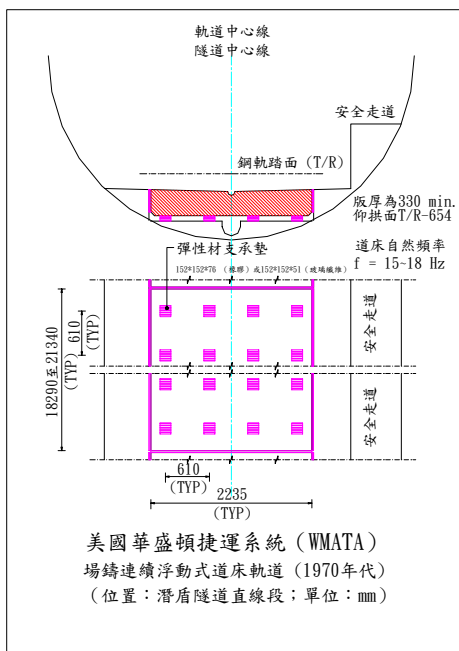
本系統之地下段結構可分成車站站體、明挖段(橫渡線及出土段)與潛盾隧道三種型式，其結構空間配置不一，在討論 FST 道床版尺寸時有必要分別說明。

目前地下段車站站體之底版約在鋼軌踏面(T/R)以下 680~700mm，橫渡線一般比照站體設計，惟部分設計標將橫渡線底版提高至 T/R-550mm。對無道碴道床軌道(基鈹軌道或 DF 軌道)而言，土木完成面為 T/R-400mm，其中包括鋼軌與基鈹總厚度約 222mm、混凝土基座(Plinth)約 178mm，至於土木完成面至站體或隧道底版之間則為二次澆置混凝土。因基座厚度 178mm 實不足以提供支承墊(厚度約 75mm)與道床版(厚度 250~280mm)之安裝，故建議土木完成面由 T/R-400mm 降至 T/R-550mm，將可避免部分橫渡線之隧道底版需降低而涉及主體結構之變更。

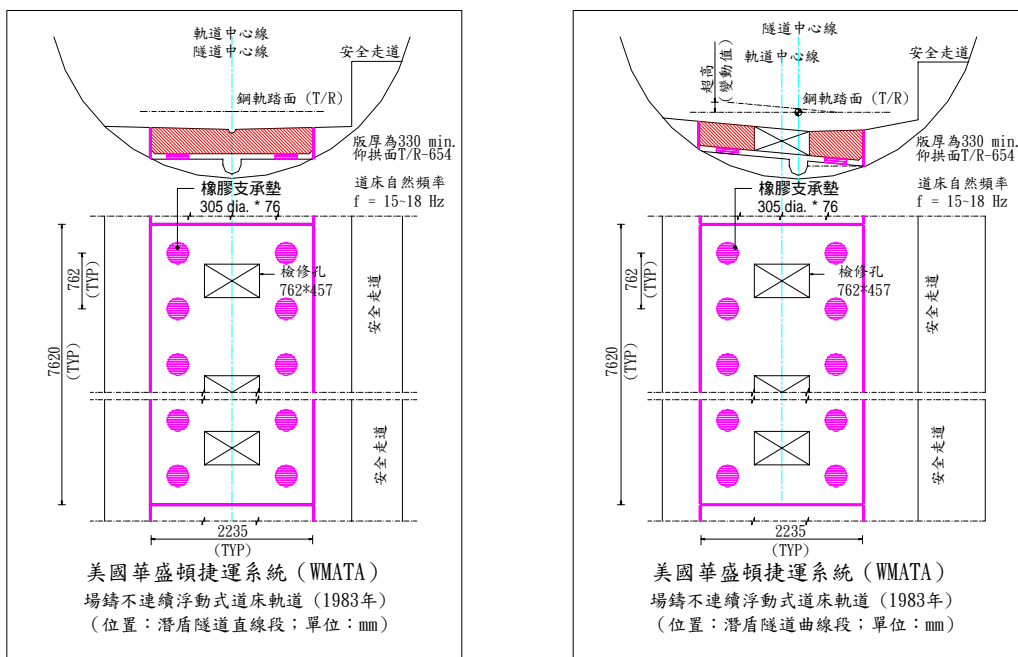


圖二：德國鐵路系統 (DB) 預鑄 FST (1968 年)

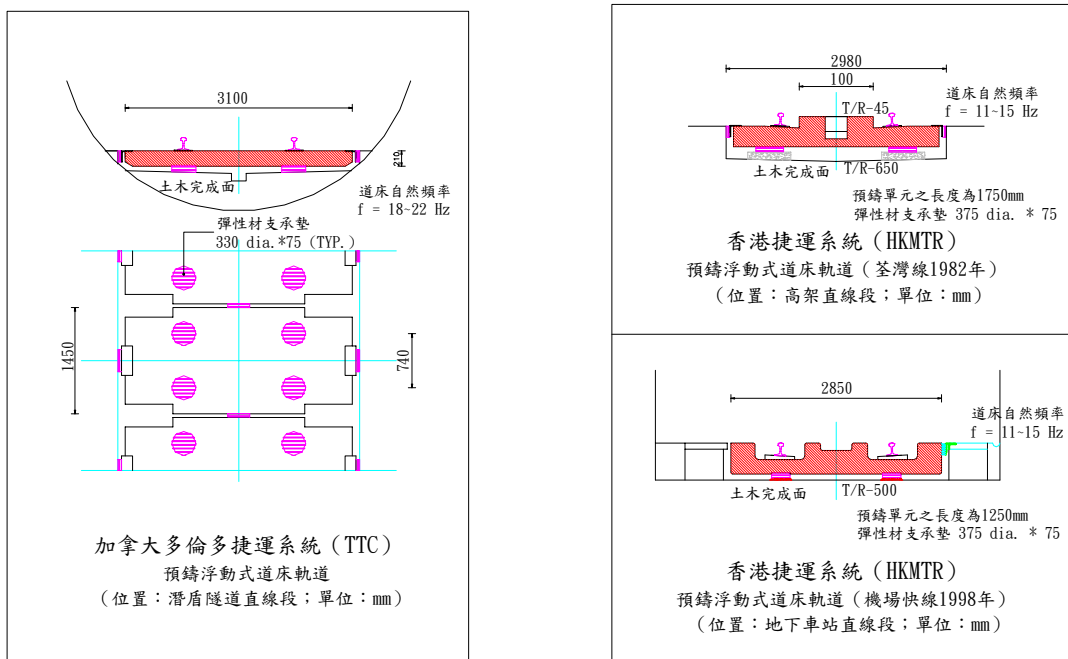
圖三：新加坡捷運系統 (SMRT) 預鑄 FST (1987 年營運)



圖四：美國華盛頓捷運系統 (WMATA) 場鑄連續 FST (1970 年代)



圖五：美國華盛頓捷運系統 (WMATA) 場鑄半連續 FST (1983 年)



圖六：加拿大多倫多捷運系統之預鑄 FST

圖七：香港捷運與機場快線系統之預鑄 FST

表一、各系統浮動式道床軌道彙整表

項 目	華盛頓 1970 年 代	華盛頓 1983 年	加拿大 多倫多	香港捷運 1982 年	香港 機場快 線	香港 西鐵	德國 Eisemann	新加坡 捷運	
潛盾隧道內徑	5080	5080	4880	5300	無	可能有	無	5080	
道版尺 寸 (mm)	長	18290	7620	1450	1450/1750	1250	1250	680	690
	寬	2235	2235	3100	2300/2780	2850	2580	3400	3500/4100
	厚	330	330	210	340/280	193	520	520	480
垂向支承墊 (mm)	□ 152*76 □ 152*51	§ 305*76	§ 330*75	§ 300*75 § 375*75	§ 375*75	§ 315*75	□200*69	□235*69 □275*69	
支承墊間 距(mm)	縱 向	610	762	740	750	750	750	700	650
	橫 向	610	1524	1500	1400	1500	1500	1600 1900	~ 1500
支承墊基座	未處理	未處理	未處理	基座/ 灌漿	基座/ 灌漿	未處理	灌漿	灌漿	
間隙(mm)	縱 向	25	25	40	50	50	50	10	50
	橫 向	25	25	100	100	100	100	無限制	100
縱/側向隔離 材	皆有	皆有	皆有	皆有	皆有	皆有	無	無	
垂向自然頻率	15 - 18	15 - 18	18 - 22	11 - 15	11 - 15	11 - 15	10 - 12	< 16	
垂向 K 值	0.525 - 0.84	3.5	8.0 - 11.94		8.0	4.7 - 5.8	5.86 - 8.44	5.25 - 7.31	
相似系統	—	—	華盛頓	多倫多	香港捷 運	香港捷 運	—	德國	

附註：頻率單位為 Hz、彈性係數 K 值單位為 KN/mm

表二、浮動式道床軌道之缺點彙整表

項 目	代表性之捷運系統	改善措施
PU 孔隙多，反覆負荷及長時間暴露 在環境因子下，幾年後易粉碎， 造成道床版局部下陷，與第三軌相 對位置有誤	華盛頓捷運系統 (WMATA) 第 I 代 FST	因製造商不當之硫化處理導致該 PU 品 質不良，屬個案性質，惟 WMATA 後續 規範僅允許使用天然橡膠
地下水滲入隧道帶入細砂聚集於 支承墊四周，長時間下導致支承墊 之功能喪失	WMATA	經灌漿填補縫隙及水柱清洗後，支承墊 之功能回復
造價為一般軌道之 3 至 5 倍	通案性問題	大量使用彈性材及費時費工，此無可避免
壽年不易評估	通案性問題	視支承墊之使用年限而定
支承墊維修檢視不易	通案性問題	WMATA 第 II 代 FST 已預留檢修孔。

置換支承墊不易		香港機場快線其道床版之側向緣石或仰拱側牆採預鑄方式，俾利維修抽換時可吊離，以提供檢修空間
列車行駛因 Bending Wave，導致低頻隆隆噪音，衍生車廂內與月台上候車之乘客抱怨	WMATA 第 I 代 FST	採用不連續道床版且相鄰道床版之間以彈性材隔離，可有效將噪音降至可接受之程度
因連續性鋼軌支承墊片太硬，導致一次空傳噪音太大，衍生車廂內與月台上候車之乘客抱怨	香港 (HKMTR) 1982 年 FST、新加坡捷運系統	使用彈性基鈹，可有效將噪音降至可接受之程度。
道床版之形狀成啞鈴形，質量集中在兩側或支承墊外側呈大量懸空，導致混凝土龜裂	墨爾本地鐵 (Melbourne Loop Subway, MURLA)	道床版之質量集中在中央且避免支承墊外側有過量之懸空版，並注意混凝土品質
土層特性頻率與道床版之自然頻率接近致鄰近建物內有低頻可查覺之振動	亞特蘭大捷運系統 (MARTA)	臺北土層經 BMTC 與 ATC 評估並無特殊性問題
周邊隔離材因連續垂向運動導致粘結破壞	WMATA 第 I、II 代 FST	周邊隔離材採機械式固定
電聯車行駛時之側向晃動偏大	新加坡捷運系統	設置側向支承墊

車站站體與明挖段（橫渡線及出土段）之內部空間較大，若支承墊之間距取 1500mm（支承墊與基鈹位置大略一致），為避免支承墊外側之道床版懸空長度太大，道床版之寬度建議為 2800mm。因隧道操作空間狹小，對預鑄道床版而言，每塊質量不宜太大，建議道床版之長度為 1450mm，相當於可容納兩塊基鈹之長度，若版厚 250mm，預估每塊道床版之質量約 2.436 Ton。至於橫渡線之道床版尺寸變化大，一般皆採場鑄 RC 版，細節則留由廠商併同特殊軌道佈置圖設計。

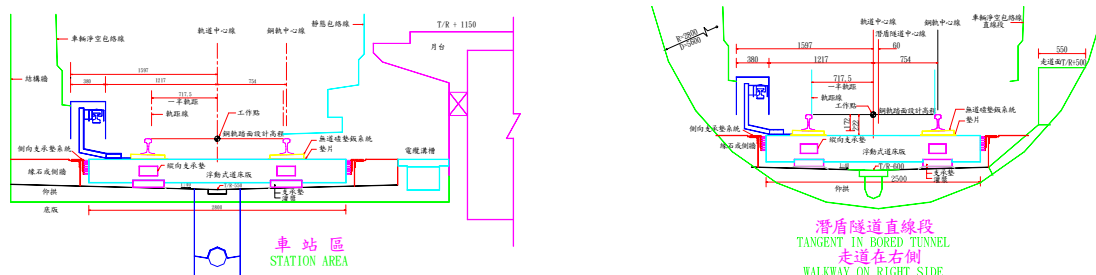
因潛盾隧道之寬度隨土木完成面降低而減小，若再考量曲率及超高之影響，道床版寬度需縮減至 2500 mm，惟為維持道床版之質量，建議土木完成面再酌予降至 T/R-600mm。潛盾段因曲線及超高之影響，道床版之尺寸較難控制，是否採用預鑄或場鑄，建議留由專業廠商考量。惟預鑄長度建議維持 1450mm，若版厚 280mm，預估每塊預鑄道床版之質量亦約 2.436 Ton。

× 支承墊

如表一所示，早期 FST 所使用之支承墊小、數量多、彈性係數低，惟發展迄今，支承墊一般係配合基鈹位置而安裝，每塊支承面積增加，數量減少，彈性係數提高。由於本系統之道床版質量略比其它系統為低，為配合道床版之自然頻率，建議每塊支承墊之彈性係數比照香港機場快線之 8.0KN/mm。

WMATA 在發展第 I 代 FST 時曾嘗試使用不同之彈性材作為支承墊，包括：天然橡膠、合成橡膠、玻璃纖維、聚胺基甲酸脂 (PU) 及其它可混合與硫化處理之彈性材等，目的在找出隔振效果佳、成本低、使用年限長之支承墊材質，惟因發生 PU 材質劣化抽換案例，WMATA 後續之 FST 支承墊業已限制只

能使用天然橡膠，對照於國內橋樑之支承墊限用合成橡膠，因天然橡膠受臭氧易劣化，需加氧化劑改善，而合成橡膠對低溫較敏感，溫度越低越硬【Roeder,



圖八：FST 剖面示意圖

1983】，惟本系統 FST 是位在地下段，無低溫與臭氧劣化問題，故基本上，天然橡膠與合成橡膠皆可適用。除 PU 有短期間使用後劣化案例而先予排除外，其它可作為 FST 支承墊之材質尚有玻璃纖維、金屬螺旋彈簧、軟木 (Cork) 橡膠等，在國外均有使用案例。

以橡膠支承墊為例，其性質是沿襲基鈹規範，至於尺寸部分，如表一所示，除德國、新加坡、WMATA 第 I 代 FST 為方形支承墊外，一般係採圓形，直徑約 300~375mm (12~15 英吋)、厚度約 75mm (3 英吋)，至於支承墊之型式是均質 (Plain) 或積層 (Laminated)，細節由廠考量，惟考量橡膠若無上/下金屬板粘結，支承墊之彈性係數易受負荷變動且有效性降低，故建議橡膠支承墊為積層，但無中間加勁金屬板。為符合每塊支承墊之彈性係數 (或壓縮勁度) 8.0 KN/mm，取橡膠硬度 40，尺寸暫定為直徑 340mm、總厚度 75mm、上/下各以 3mm 厚金屬板粘結，支承墊之應力與應變如表三所示。

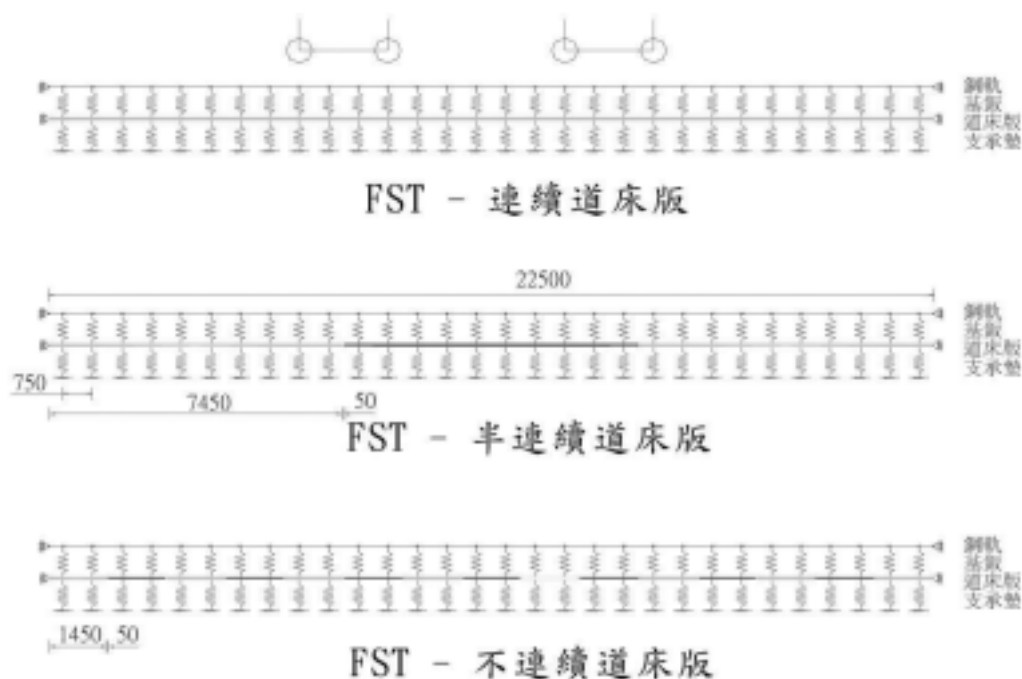
在電聯車滿載 W3 及 W4 之情況下，除垂向應變比 AASHTO 略高外，應力與應變皆符合表四之容許值。在未考慮橡膠勁度隨負荷增大現象、側向支承墊預壓力等因素下，取一節電聯車長度之軌道進行靜態分析，分析結果如圖九所示，最大垂向變位為 4.24mm，約為 DF 軌道的兩倍，是否有不良的影響？宜有專業廠商確認，但相較於 WMATA 第 I 代 FST 規範規定活負荷作用下 (不考慮衝擊效應) 之最大垂向變位為 3.2mm【WMATA, 1973】、WMATA 第 II 代 FST 分析值 0.272" (6.91mm) 及香港捷運系統的 3~5mm【Eisemann, 1985】，尚屬合理，惟垂向變位另涉及疲勞強度，故尚待後續研究。

表三、預估支承墊承受負荷之最大壓縮與剪切應變

說 明	W1	W2	W3	W4
列車質量 (kg)	39500	43100	58640	61700
每塊 FST 質量 - DL (kg)	2599	2599	2599	2599
每塊 FST 活負荷 - LL (kg)	9875	10775	14660	15425
每塊 FST 總負荷 (kg)	12474	13374	17259	18024
每塊 FST 承受之煞車負荷 (N) - $a = -1.3\text{m/s}^2$	12838	14008	19058	20053
橡膠厚度 (mm)	65	65	65	65
支承墊面積 (cm^2) - 四塊 $\phi 340\text{mm}$ 支承墊	3505	3505	3505	3505
壓縮勁度 (KN/mm) - 四塊支承墊	32.00	32.00	32.00	32.00
剪切勁度 (KN/mm) - 四塊支承墊	2.43	2.43	2.43	2.43
壓縮應力 (kg/cm^2)	3.56	3.82	4.92	5.14
剪切應力 (kg/cm^2)	0.37	0.41	0.55	0.58
壓縮應變 (%)	5.88	6.30	8.13	8.49
剪切應變 (%)	8.14	8.89	12.09	12.72

表四、橡膠支承墊容許應力與應變彙整表

參 考 文 獻	壓縮應力 kg/cm^2	剪切應力 kg/cm^2	壓縮應變 %	剪切應變 %	備註
AASHTO 或公路橋樑設計規範	56	—	7	50	不含衝擊效應
AASHTO 或公路橋樑設計規範	35	—	—	—	靜負荷
BS 5400 : Part 9.1	5.9	—	—	70	
UIC 772R	11.8.	—	—	70	
P. Srinivasulu 等	8	3	20	40	硬度 40
P. M. Sheridan 等	—	—	30	75 ~ 100	



狀況	最大垂向變位(mm)
四軸、分析長度 22.5m 之 Continuous Slab	3.60
四軸、分析長度 22.5m 之 Semi Cont. Slab (L=7.5m)	3.92
四軸、分析長度 22.5m 之 Mini_Slab(L=1.45m)	4.24

圖九：FST 在靜態負荷下之垂向變位

(i) 附屬設施

FST 附屬設施係指縱向／側向之周邊隔離材、檢視／維修空間或途徑。為避免振動由道床版直接傳至隧道仰拱，周邊隔離材之設計是相當重要的。德國、新加坡等 FST 因道床版質量大，縱向／側向皆未設計周邊隔離材，相對列車行駛時之側向晃動量較大。Lightweight FST 之道床版質量小，故皆有縱向／側向之周邊隔離材之設計，WMATA 第 I、II 代 FST 之道床版為場鑄，周邊隔離材係以結構伸縮縫之方式處理，在列車輪負荷反覆作用下，以粘著劑固定之隔離材易受力鬆脫，故多倫多採預鑄不連續 FST 後，已將側向隔離材改成機械式固定，利用螺栓固定隔離材並施加預壓力，在維修期間可隨時調整預壓力；至於縱向隔離材仍不可避免需使用粘著劑，惟香港 FST 另將縱向隔離材部分嵌入道床版內，以降低粘著破壞鬆脫之可能性。

FST 是利用彈性材隔離道床版與隧道仰拱，隔／減振效果佳為其優點，但除價格昂貴外，若設計時未預留維修空間或途徑，一旦支承墊因老化需抽換時

之代價將非常高。WMATA 第 I 代 FST 就曾因 PU 老化抽換支承墊而付出相當代價，故在第 II 代 FST 之版中央業已預留 2.5x 1.5 ft、間距 5 ft 之檢修孔，平時作為檢視隧道排水系統及支承墊之用，必要時可作為支承墊抽換之操作空間，惟檢修孔將降低道床版之質量及破壞版結構整體性。香港機場快線對維修空間或途徑之設計則採另類思考，不僅維持道床版之整體性而無需開孔，當支承墊老化需抽換時，吊離側邊預鑄緣石 (Curb)，則可進行抽換工作。本系統在站體及橫渡線之仰拱上皆有集水井設計，若要對所集水井皆預留清理空間，恐將嚴重破壞道床版之整體性，故除站體兩端與集水坑相通之集水井為保留清理空間而需在道床版上開孔外，其餘集水井所在之道床版建議不再開孔。至於預留支承墊維修空間或途徑之方式，原則傾向於香港機場快線以預鑄緣石處理，但潛盾隧道段因空間較小，維修空間或途徑之預留恐有困難。

PM. 預期效果

浮動式道床軌道之隔／減振預期效果可從兩方面探討，一為既有系統之實測值，另一為理論計算之預測值。惟國際間對振動之定義仍相當分歧，故資料之引用必須相當小心，除非另有說明，文中係以加速度振動為探討對象。茲就振動相關參數定義如下：【王, 89】

㊦ 振動加速度位準 (Vibration Acceleration Level, $L_{va,n}$): 單位為分貝 (dB)

$$L_{va,n} = 10 \log(a_n^2/a_0^2)$$

其中，

a_n : 1/3 八頻帶中心頻率為 n Hz 未經加權處理之振動加速度均方根值或稱實效值 (RMS, Root Mean Square, m/sec^2);

a_0 : 基準振動加速度或稱參考基準加速度, $10^{-5} m/sec^2$ 。

㊧ 第 n 頻帶之振動位準 (Vibration Level at n Band, $L_{v,n}$): 單位為 dB

$$L_{v,n} = 10 \log(a_{c,n}^2/a_0^2) = 10 \log(a_n^2 \times 10^{0.1C_n}/a_0^2)$$

其中，

$a_{c,n}$: 1/3 八頻帶中心頻率為 n Hz 經加權處理後之振動加速度均方根值 (m/sec^2);

C_n : 頻率為 n Hz 之加權係數 (Weighting Factor)。

㊨ 振動位準 (Vibration Level, L_v): 取頻率 1~80Hz 範圍，所有 1/3 八頻帶中心頻率之總體振動位準，單位為 dB

$$L_v = 10 \log(\sum a_c^2/a_0^2)$$

其中，

$$a_c = (\sum a_{c,n}^2)^{0.5} = (\sum a_n^2 \times 10^{0.1C_n})^{0.5}$$

㊩ 頻率 1~80Hz 範圍，FST 相較於無道碴道床軌道 (DF 軌道) 之減振效果 (ΔL_v): 單位為 dB

$$\Delta L_v = L_v \Big|_{DF \text{ 軌道}} - L_v \Big|_{FST} \quad \text{-----方法 A}$$

$$\Delta Lv = 10 \log(\sum 10^{0.1 \Delta Ln}) \quad \text{-----方法 B}$$

其中，

$Lv |_{DF}$ 軌道：DF 軌道之 Lv 值；

$Lv |_{FST}$ ：FST 之 Lv 值；

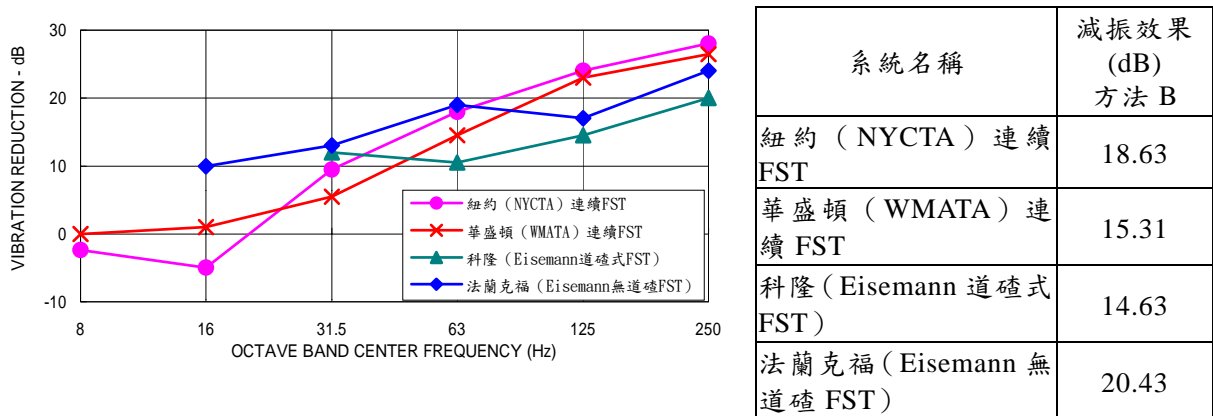
ΔLn ：DF 軌道之 Lv,n 與 FST 之 Lv,n 的差值。

實測值之減振效果 (ΔLv) 一般係以方法 A 作為評價，曲線峰值之差值將主控減振效果；惟在理論計算之預測值上，分析結果為負荷之傳遞係數 (Transmissibility, TR) 或插入損失 (Insert Loss, IL)，因方法 A 無法應用，改以方法 B 取代，各頻帶差值之最大值將主控減振效果。

X既有系統之實測值

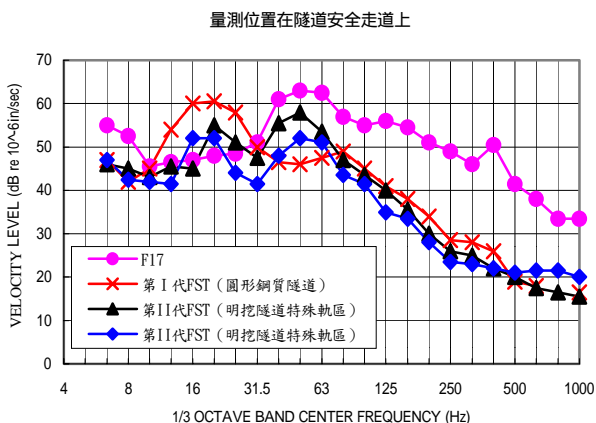
由於本系統在現階段並無 FST 使用實績，而文獻上極少數可查得之 FST 實測振動值，經重新繪製說明如下：

圖十為紐約、華盛頓、科隆、法蘭克福之 FST 相對於其傳統軌道之減振比較【Remington】，就紐約、華盛頓而言，其傳統軌道係指 DF 軌道，FST 為 Lightweight，科隆、法蘭克福為道碴軌道，FST 為 Heavyweight。因軌道系統之差異，圖示各條曲線之減振情況不宜逕相比較。另缺乏 FST 與其傳統軌道之各別振動量測值，故減振效果係以方法 B 計算。



圖十：各系統 FST 相對於其傳統軌道之減振比較

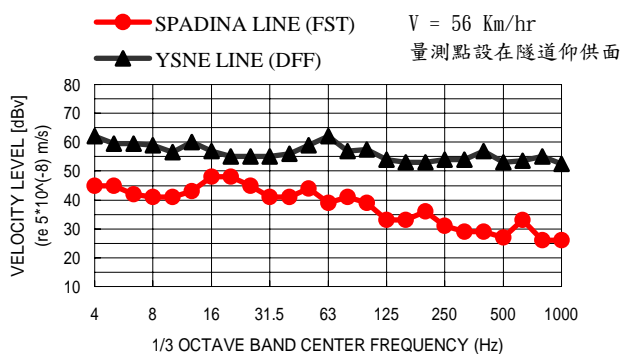
圖十一為華盛頓 FST 相對於 DF 軌道之減振比較【Irshad, 1994】，此處基鈑為 L.B.Foster 所生產之 F-17 型，彈性係數與本系統地下段之基鈑相同，圖示顯示 FST 曲線有二處尖峰值，其一代表道床版與支承墊之自然頻率，另一代表基鈑之自然頻率。



華盛頓 捷運系統	減振效果 (dB)方法 A	減振效果 (dB)方法 B
第 I 代 FST (圓形鋼質隧道)	2.73	21.35
第 II 代 FST (明挖隧道特殊軌區)	5.25	16.61
第 II 代 FST (明挖隧道特殊軌區)	8.91	20.14

圖十一：華盛頓捷運 FST 相對於 DF 軌道之減振比較

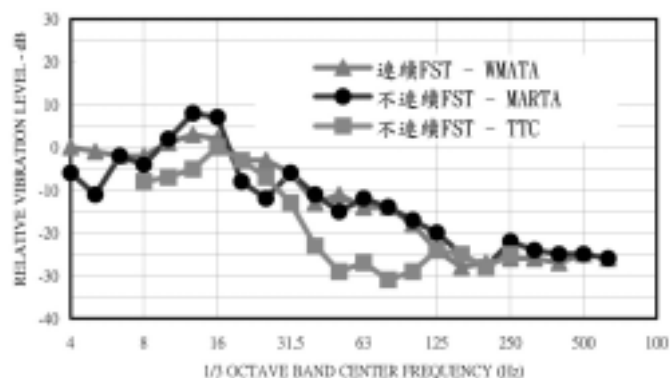
IT 圖十二為多倫多 FST 相對於 DF 軌道之減振比較【Kraft】【凌, 86】，圖中顯示 FST 之減振情況相當好。



加拿大多倫多 捷運系統	減振效果 (dB)方法 A	減振效果 (dB)方法 B
FST 相對於 DF 軌道	14.67	28.02

圖十二：多倫多捷運 FST 相對於 DF 軌道之減振比較

iR 圖十三為華盛頓、亞特蘭大、多倫多 FST 各與其 DF 軌道之減振比較【Wilson, 1983】。



系統名稱	減振效果(dB) 方法 B
華盛頓 (WMATA) 連續 FST	19.92
亞特蘭大 (MARTA) 不連續 FST	21.24
多倫多 (TTC) 不連續 FST	34.47

圖十三：各系統 FST 相對於其傳統軌道之減振比較

× 理論計算之預測值

利用理論預測 FST 減振效果之前，必需先了解電聯車【中科院，86】與軌道之特性頻率。茲將淡水線 (DM1 或 M2) 電聯車耦合 (Couple) 前之特性頻率彙整如表五。

表五、淡水線 (DM1 或 M2) 電聯車各部位重量及特性頻率

說明	W1	W2	W3	W4
車廂質量 (kg)	39500	43100	58640	61700
轉向架質量 (kg)	7500	7500	7500	7500
簧下質量 (kg) — 取設計軸重之 10%	1653	1653	1653	1653
主懸吊系統承載質量 (kg)	5847	5847	5847	5847
次懸吊系統承載質量 (kg)	12250	14050	21820	23350
主懸吊系統垂向彈性係數 (KN/mm)	2.6712	2.7376	3.2728	3.372
主懸系統垂向自然頻率 (Hz)	3.40	3.44	3.77	3.82
次懸吊系統垂向彈性係數 (KN/mm)	0.570	0.634	0.834	0.860
次懸系統垂向自然頻率 (Hz)	1.086	1.069	0.984	0.966

附註：每付轉向架有八個主懸吊系統與二個次懸吊系統

表六、捷運系統軌道自然頻率彙整表

軌道系統	無電聯車負荷	W1	W2	W3	W4	備註
DF 軌道 (K=20.38KN/mm)	—	45.67	45.68	45.75	45.76	淡水線高架段基鈑
DF 軌道 (K=15.76KN/mm)	—	40.25	40.27	40.35	40.37	地下段基鈑
FST(K=8.0KN/mm) + DFF (K=15.76KN/mm)	17.95	15.24	15.25	15.33	15.35	維持基鈑 K 值
FST(K=8.0KN/mm) + DFF (K=25.0KN/mm)	17.95	15.34	15.35	15.43	15.44	提高基鈑 K 值

依據表五結合本系統軌道相關參數，忽略樑／版彎曲效應、橡膠勁度隨負荷增大現象等，完全以單自由度串聯考量，計算彙整耦合後之 DF 軌道及 FST 之自然頻率如表六，其中 FST 系統如圖十四所示。

表六顯示本系統地下段 DF 軌道之自然頻率為 40.25 Hz，驗之於量測數據完成相符，後續將以此模態進行 FST 之減振分析。

茲將建議之 FST 在電聯車 (DM1 或 M2) 負荷 W1 情況下之系統特性頻率彙整如表七，俾利計算減振值。



圖十四：4 個單自由度彈簧質量系統

表七：FST 在電聯車（DM1 或 M2）負荷 W1 情況下之系統特性頻率表
（基鈹 $K = 25 \text{ KN/mm}$ ）

說明	DM1 或 M2 電聯車在負荷 W1 情況下				
	質量 (kg)	彈性係數 (KN/mm)	單自由度頻率 (Hz)	耦合頻率 (Hz)	頻率變化率 (%)
次懸吊系統 (M4、K4)	12250	0.57	1.09	0.97	-10.43
主懸吊系統 (M3、K3)	5847	2.67	3.40	3.69	8.54
基鈹 (M2、K2)	2013	200.00	50.17	60.37	20.34
FST 支承墊 (M1、K1)	5032	64.00	17.95	15.34	-14.54

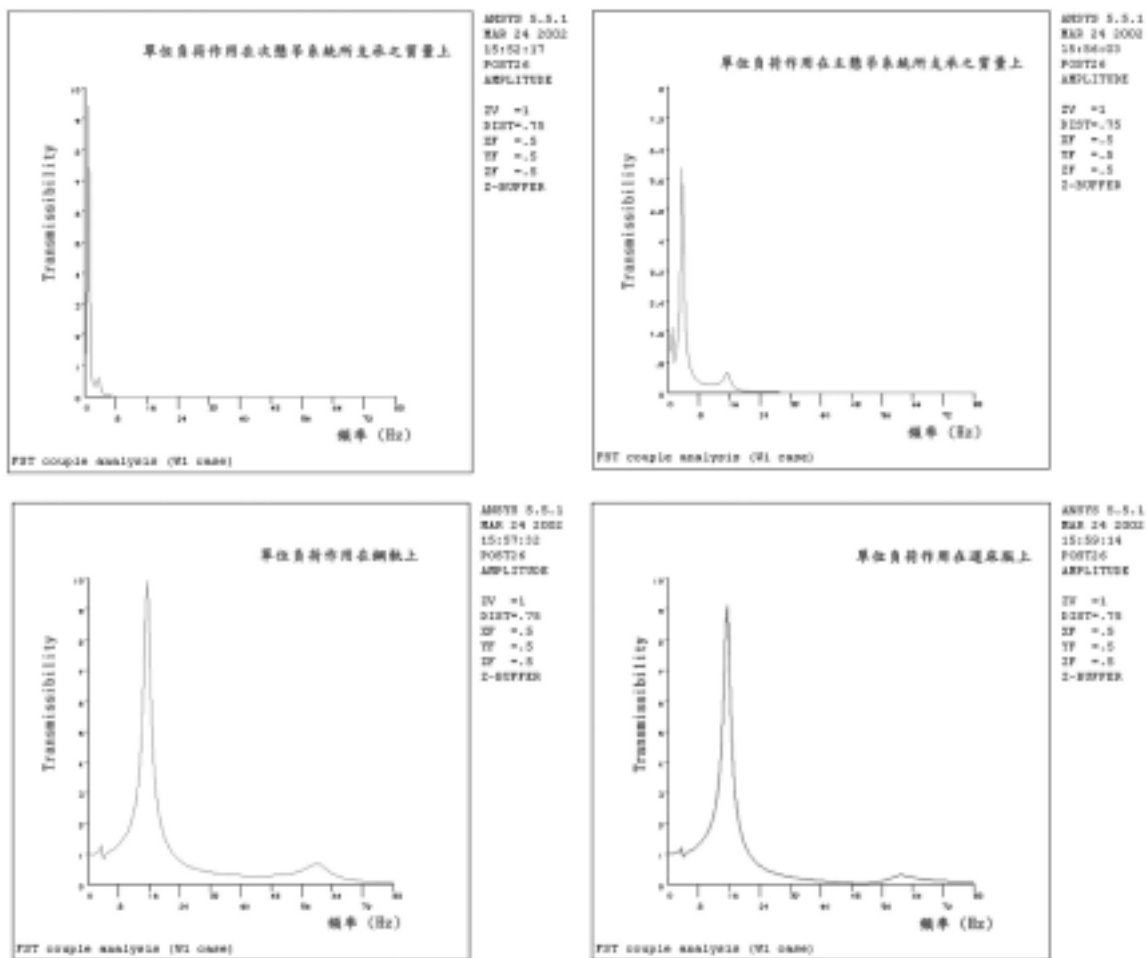
由表六、七所示，在電聯車（DM1 或 M2）負荷 W1 情況下，本系統地下段 DF 軌道 ($K=15.76\text{KN/mm}$) 之自然頻率約為 40.25Hz，當 FST 與 DFF ($K=25\text{KN/mm}$) 合併使用時，FST 之自然頻率為 15.34Hz、基鈹之自然頻率為 60.37 Hz。

圖十五為 FST 系統之傳遞係數 (Transmissibility, T)，係以不同頻率之單位負荷分別作用在圖十四所示之 M4、M3、M2、M1 時之反力頻譜，圖中顯示電聯車主懸吊系統、次懸吊系統與軌道自然頻率的互制現象不明顯，FST 的主控頻率在支承墊。圖十六為 FST 之理論減振效果，是將圖十四中之 M2 負荷圖整理而成，利用方法 A 計算之減振效果為 12.81dB，利用方法 B 計算之減振效果為 28.07dB (RMS)，因方法 A 是由頻率 80Hz 所主控，若取頻率範圍大於 80Hz，減振效果將越佳，而方法 B 之主控頻率約在 40Hz，此為 DF 軌道之自然頻率，FST 取代 DF 軌道將使軌道自然頻率由 40.25Hz 降至 15.34Hz，相對地 40Hz 範圍之減振效果會最好，故方法 B 在理論計算預測上將較符合需求。此外，考量理論計算與實務上之差異，FST 檢驗標準取理論值減 3dB 而為 25dB。

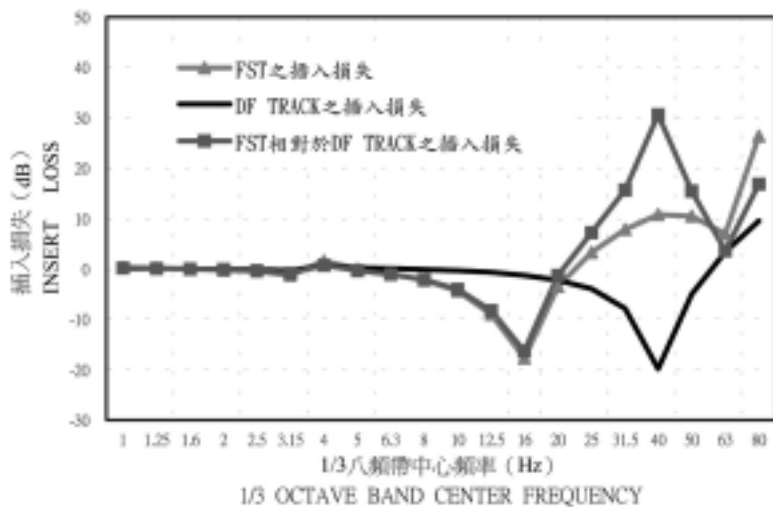
FST 與基鈹合併使用，因基鈹自然頻率附近之共振放大現象，使 FST 在此頻率附近之減振效果大幅降低，故 FST 發展之初並未與基鈹合併使用，俾使 FST 之減振效果不受干擾。惟鋼軌與道床版間僅有鋼軌墊片而未有適當之隔振材料，導致如香港早期 FST、新加坡 FST 等，列車行駛時之低頻隆隆噪音引起車內及月台旅客之報怨，為改善此一狀況，後續始有將 DFF 與 FST 合併使用。本系統後續路網雖有月台門之設計及車廂氣密性之改善，若鋼軌與混凝土道床版之間無適當緩衝材料，則低頻隆隆噪音將使乘車舒適性大幅降低，因此保留基鈹之使用。

• 振動標準

國內振動管制相關法令之進度仍停留在母法草擬階段，有關振動管制標準只能參酌先進國家之標準，目前通用之振動準則之一為國際標準組織 (ISO) 所制訂之 ISO 2631/2 『人體曝露於建物的振動與衝擊的評價 (1~80 Hz)』，其是人體受建物隔離而與振動源分屬於兩個環境，人體開始苦惱或抱怨的振動值，取各頻帶之振動加速度位準，以一基準曲線 (Basic Curve) 結合與環境相關之乘數係數 (Multiplier, M) 來表示；另一為日本所通用之振動位準，其將各頻帶之振動加



圖十五：FST 系統之傳遞係數 (TRANSMISSIBILITY)



方法	減振效果(dB)
A	12.81
B (峰值)	31.08
B (均方根值)	28.07

圖十六：FST 之理論減振效果

速度位準轉換成單一振動位準來評價振動量。

振動管制包括人體與儀器設備兩項受體，人體對振動的感覺會因振動方向及頻率而異，人體軸（垂向）最敏感的振動頻率在 4~8Hz、水平軸最敏感的振動頻率在 1~2Hz，為模擬人體對振動的感覺，量測數據會加入振動在垂直與水平方向量測的加權因子（Weighting），由於人體對水平方向振動感覺比垂直方向遲鈍，且一般水平振動量遠比垂直振動量小很多，故公害振動的測定著重在垂直方向【胡, 77】，除非另有說明，以下振動均針對垂直方向作討論。雖然 ISO 2631/2 列有環境相關之乘數係數建議值，例如：醫院等敏感地區之 $M=1$ 、夜間住宅區之 $M=1.4$ 、白天住宅區之 $M=2\sim 4$ 、辦公室之 $M=4$ 、工廠之 $M=8$ 等，惟在引用時仍需預估無感振動及其衍生之可接受的噪音值，否則將無法達到預期效果。無感振動量因人而異，茲將相關數據彙整如下：

㊦ 地震震度階之無感震度【徐, 77】

地震震度階 \ 無感震度	加速度 (m/s ²)	加速度位準 峰值 (dB)	加速度位準 均方根值 (dB)
中央氣象局 (CWB)	0.00784	58	55
日本氣象廳 (JMA)	0.00784	58	55
MM	0.00980	60	57
MSK	0.00784	58	55
Cancani	0.00250	48	45

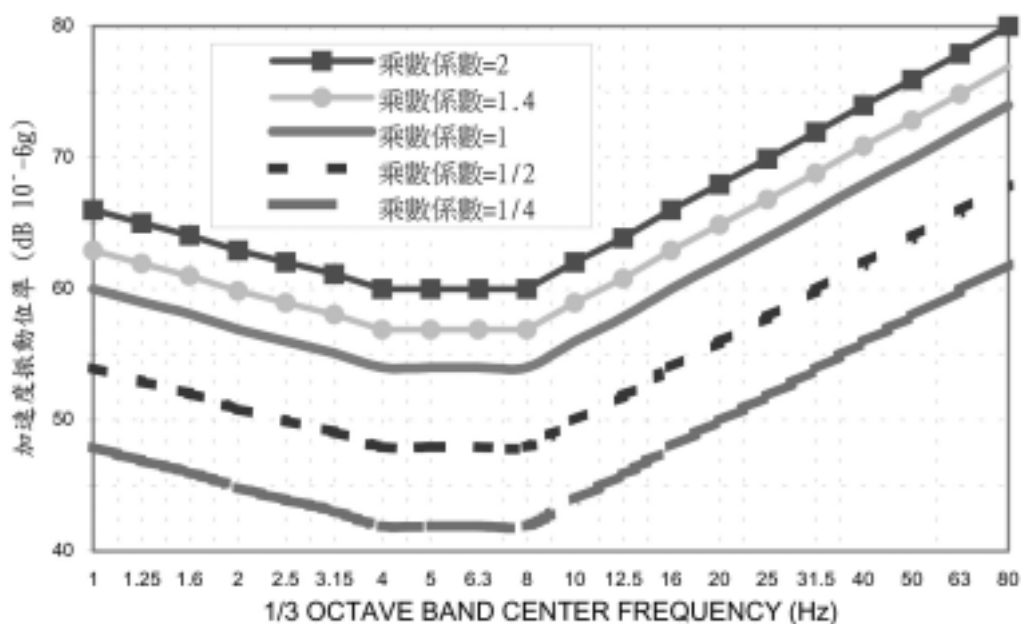
㊧ Reihher-Meister 振動感覺曲線【胡, 77】

頻率 (Hz)	4	5	6	8	10	20	30	40	50	60	80
加速度振動位準 (dB)	41	43	43.5	45	47	53	57	60	63	65	68

㊨ Tokita (1975)，針對日本高鐵沿線或工廠附近之 1000 位居民之調查，對加速度振動位準 54dB 有感覺之比率約 50%、其中 35% 有明顯感覺振動、20% 抱怨睡眠會受影響、15% 抱怨住宅之牆產生裂縫。【Remington】

㊩ ANSI S3.29-1983 就住宅區（夜間）之加速度振動位準為 54dB（ANSI 之標準較 ISO 2631/2 為嚴），惟 Nelson & Saurenman (1983) 建議住宅區之加速度振動位準降至 48~53dB，將大幅減少沿線居民對振動之抱怨。【Remington】

綜合前述，人體無感振動若設定在 48dB，以 FST 自然頻率在 15Hz 為例，相當於 ISO 2631/2 乘數係數 $M=1/4$ 之曲線，最小加速度振動位準為 42dB，相關曲線如圖十七。



圖十七：人體曝露於建物的振動與衝擊的評價（1~80Hz）
ISO 2631-2-1989（垂直方向）

振動另一項垢病是其傳至鄰近建物會經由柱、樑、版、牆散發出二次噪音，該項噪音值很小，一般只會在早晚或夜間時段比室內背景噪音略高。國內噪音管制標準並無此項之規定，故仍需參考先進國家之標準。例如：

- ㉓ 1957 年噪音準則曲線 (NC) 是早期應用最廣之室內噪音評價標準，其係根據 1964 年之前的老八頻帶所訂定【徐, 73】。
- ㉔ 1971 年 Beranek 提出較佳噪音準則 PNC (Preferred Noise Criteria) 曲線取代 NC 標準，PNC 對住宿休息場所（如住宅、醫院、旅館）之建議值 25~40，相當於 A 加權噪音級值 $L_A=34\sim 47\text{dB(A)}$ 【胡, 77】【徐, 73】。
- ㉕ 美國公共運輸協會 (American Public Transit Association, APTA) 1979 年「大眾運輸設施之設計指引」建議在一般集合住宅區之最大地傳音量為 40dB(A)【Wilson, 1983】。
- ㉖ 聯合國世界衛生組織 (WHO) 1999 年「社區噪音指引」建議室內臥室在避免干擾睡眠的前題下，八小時之均能音量 $L_{eq}=30\text{dB(A)}$ （連續音源）或最大音量 $L_{max}=45\text{dB(A)}$ （非連續音源）【Berglund, 1999】。

捷運振動是經由地層傳至建物基礎再經由結構體散發出二次噪音，前述已對振動進行管制，惟二次噪音往往是地下穿越段住戶抱怨的對象，若能將二次噪音控制在容許範圍以下，相對可平息住戶的抱怨，基於捷運輸軌噪音／振動為非連續性事件，宜以最大音量作管制，聯合國世界衛生組織 (WHO) 1999 年社區噪音指引建議值最大音量 $L_{max}=45\text{dB(A)}$ 應足敷需求，惟考量系統營運有劣化現象，故

建議取 APTA 之 $L_{max}=40dB(A)$ 作為二次噪音管制標準。

四、結論與建議

本系統自始係依據 FE-31 報告進行振動與地傳噪音之評估，目前初期路網各線業已先後通車營運，少數路段雖有振動或地傳噪音陳情問題，惟經實測之振動值皆在 ISO 標準以下，但因國內振動相關法令遲未頒佈，本局在處理類似問題上缺乏著立點，捷運係屬新建工程，若造成既有建物之有感振動，將嚴重影響後續路網之興建，雖然 DF 軌道大致已可滿足需求，惟為記取初期路網之經驗，兼顧振動管制相關法令頒佈前之空窗期，後續路網之新莊／蘆洲線將自國外引進已有廿多年實績且公認最佳減振措施之浮動式道床軌道，現階段所建立 FST 相關圖說、規範及標準，仍有相當可議或模糊有待專業廠商在日後設計、施工與驗證中澄清及修正，茲將其條列予後：

- ▣ 不連續 FST 在承受電聯車活負荷作用下之垂向變位（不考慮衝擊效應）達 4.24mm，是否有不良影響？另外，軌道系統最大容許變位量是值得探討的議題。
- ▣ 平面曲線最小轉彎半徑 200 公尺、最大超高度 130mm、縱向坡度最大 3%，以及包括緩和曲線段等，對道床版及支承墊之設計與施作是一大挑戰。
- ▣ FST 檢視與維修路徑的留設是另一值得深思的問題。
- ▣ 目前 FST 減振效果是依據理論計算並參考初期路網陳情點實測數據而訂定，可行性與否？影響日後契約之執行甚巨。
- ▣ 特殊軌區因鋼軌不連續而衍生之振動會比其它路段高出 10~20dB，但因特殊軌區一般係位在道路下方，道路因公車行駛所產生之振動值遠高於捷運之輪軌振動，兼之初期路網已營運路段之振動陳情點皆集中在地下穿越段，故新莊／蘆洲線之地下穿越段（約為總長的 1/10）已全面規劃以 FST 取代 DF 軌道，由於 FST 造價成本為 DF 軌道的三倍有餘，如此大規模地施作 FST，在其它系統並不多見（本系統在 BMTC 時代曾規劃淡水線高架段全面使用 FST，惟經 ATC 評估後捨棄），但對初次將 FST 引進國內的臺北捷運系統而言，在面臨國內振動相關法令的欠缺、住戶高標準的無感振動要求、以及一旦地下穿越段振動問題無法改善將對後續路網的新建影響深遠等等，如此規劃是不得已的措施，長遠之計，宜建立適用於臺北捷運系統之 FST 設置準則，以符經濟原則。

輪軌噪音／振動涉及路線規畫、土建設施、電聯車與軌道等多方面，雖然軌道改善措施往往是較經濟或邊際效用較高而常樂為系統所採用，但即使如軌道最佳減振措施的 FST，亦有其一定之限制，兼之人體對噪音／振動的感覺差異頗大，故 FST 減振效果並不能保證可完全符合地下穿越段住戶對噪音／振動之要求，一旦 FST 無法達到預期效果，後續可考慮從以下方面作調整：

- ▣ 路線規畫：平面曲線之轉彎半徑太小，易造成鋼軌與鋼輪之波狀磨耗，一旦波

狀磨耗發生，鄰近軌道自然頻率之振動值將大幅提高，若將最小半徑由 200 公尺提高至 300 或 350 公尺，應可大幅減緩波狀磨耗的發生。

□土建設施：工作井、聯絡通道、通風豎井、加強保護之建物等位置，因土建在灌漿時往往導致捷運隧道與鄰近建物之基礎實質相連，造成振動未經土層隔離而直接傳至建物內，若土建 DDC 在設計與施工時能多加限制並詳加紀錄，將有助於振動之防制與改善。

□電聯車之規範若能明訂振動標準，土建 DDC 在進行噪音／振動評估時才有相同基準，同時可避免目前因振源不明確的情況下，面臨對輪軌振動進行無止境且無目標的改善工作。

◇ 參考文獻 ◇

- × 王偉輝、許榮均、劉德源、吳孝三、潘正豪，捷運淡水線噪音振動調查與改進分析，捷運技術半年刊，第 22 期，第 105 至 118 頁，89 年 2 月
- × 中山科學研究院第二研究所第三組，「無道碴道床軌道扣件組件力學分析」委託技術顧問服務計畫期末報告，臺北市政府捷運工程局，86 年 10 月
- (i) 公路橋樑設計規範，第八章合成橡膠支承墊
- (ii) 徐明同，地震工程，中國工程師學會，77 年 4 月
- (iii) Leo L. Beranek, "Noise and Vibration Control", 徐萬椿譯，噪音與振動控制，協志工業叢書，73 年 4 月
- (iv) 胡金鳴編譯，公害振動的預測技術，建宏出版社，77 年 9 月
- (v) 凌建勳，捷運系統噪音與振動防治研究，臺北市政府捷運工程局，86 年 8 月
- (vi) AASHTO, "Section 14 : Elastomeric Bearings"
- (vii) ATC, "Transit Noise and Vibration Prediction Methodology and Design Criteria", Study Report No. FE-31, DORTS, Sep. 1990
- (viii) M. I. Baxter, "Versatile Track Designs Solve HK Airport Line Constraints", Railway Gazette International, Nov. 1998
- (x) Birgitta Berglund, Thomas Lindvall and Dietrich H Schwela, "Guidelines for Community Noise", World Health Organization (WHO), 1999
- [Γ] BMTC, "Quantitative Assessment of Groundborne Noise and Vibration", TMI/0110/200/1, DORTS, Feb. 1987
-] BSI 5400 : Section 9.1 : 1983, "Code of Practice for Design of Bridge Bearings"
- [J. P. Copsey, T. W. Hulme, B. Kraft & P. Sripathy, "Singapore Mass Rapid Transit System: Design", Proc. Instn Civ. Engrs, Part 1, 1989, 86, Aug., 667-707
-] J. Eisemann, L. Steinbeisser & Deischl, "Noise and Vibration Reducing Track Foundation for Subways and Rapid Transit Railways", Track Technology, 1985

- [{ P. Grootenhuis, "Floating Track Slab Isolation for Railways", Journal of Sound and Vibration (1977) 51 (3), 433-448
-]] HKMRT(香港西鐵) 規範, "Appendix E12: Technical Standards - Floating Slab Track Bearings", 1998
- [< Wilson, Ihrig and Associates, "State-of-the-Art Review : Prediction and Control of Groundborne Noise and Vibration from Rail Transit Trains", UMTA, Dec 1983
- >] Mohammad Irshad & James Haggins, "Ground Borne Noise and Vibration Mitigation Designs", APTA Rapid Transit Conference, 1994
- [< ISO 2631-2, "Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration - Part 2: Continuous and Shock-Induced Vibration in Buildings (1 to 80 Hz)", 1989
- >] B. Kraft, "Mass Rapid Transit system - System Wide Trackwork - Design Study", Mass Rapid Transit Corporation Singapore
- [[Paul J. Remington, Leonard G. Kurzweil & David A. Towers, "Low-Frequency Noise and Vibration from Trains", Transportation Noise Reference Book
-]] Charles W. Roeder & John F. Stanton, "Elastomeric Bearings: State-of-the-Art", Journal of Structural Engineering, Dec, 1983
- [“ P. M. Sheridan, F. O. James & T. S. Miller, "Design of Components"
- ”] SMRT(新加坡捷運系統) 規範, "6. Floating Slab Track、7. Turnouts on Floating Slab"
- < P. Srinivasulu & C. V. Vaidyanathan, "Handbook of Machine Foundations"
- > WMATA (華盛頓捷運系統) 規範, "Section 306: Floating Slabs", 1973
- [[WMATA (華盛頓捷運系統) 規範, "Section 306: Floating Slabs", 1983
-]] Steven Wolf, "Floating Slab Track Systems", ATC, July 1990