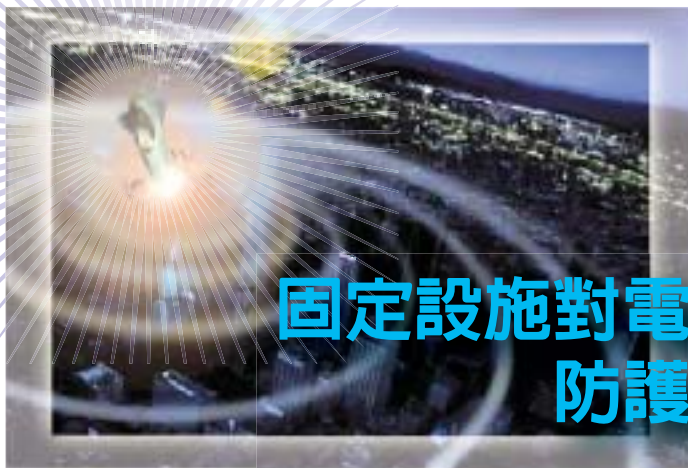




固定設施對電磁脈衝 防護之具體作為

作者/張衍智 博士

提要

本文主要研究電磁脈衝侵襲設施時，最外層的鋼筋混凝土結構之鋼筋網屏蔽效應分析與接地之基本技術，並進行鋼筋施工方法之研究。就規範所訂定的鋼筋焊接與通常所使用的綁接方法，進行屏蔽效值之實驗探討，結果顯示兩種施工方式的屏蔽效值是約略相同的。據此可了解規範所訂定之焊接施工，是爲了使鋼筋網結構成一連續的電氣迴圈，並使其接地阻抗維持在 2Ω 以下，而且毋須擔心其是否會因年代久遠而腐蝕的問題。本文也描述鋼筋網的屏蔽分析方法，以及理論分析之結果，與實驗結果是相當吻合的。

前言

伴隨科技的進步與作戰思維的改變，電磁脈衝武器的攻擊已成為未來戰爭中制敵機先的最有效戰術手段之一。它不僅會干擾，甚至於破壞國防的指管通資情監偵(C⁴ISR)系統；亦會癱瘓民生所需的電力、電信與資訊系統。任一C⁴ISR設施的結構，通常是鋼筋混凝土，其鋼筋網就是電磁脈衝輻射侵襲的第一層屏蔽防護。因此有必要去了解其屏蔽防護的效益，並進一步執行設施內二次、三次防護工程的設計。

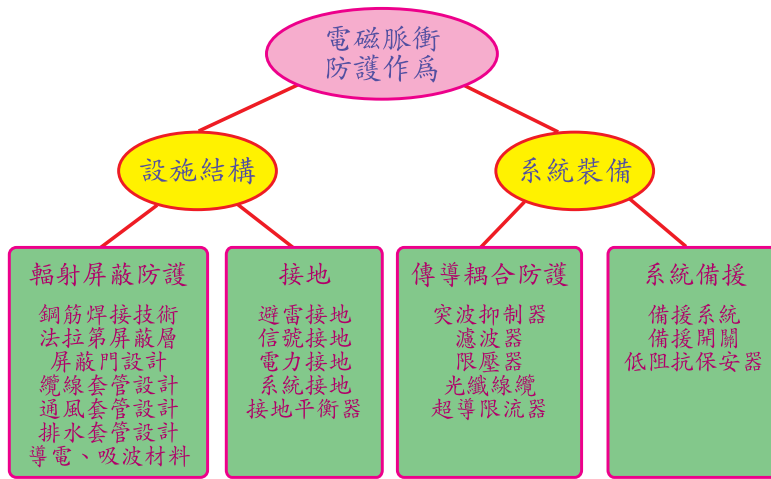
電磁脈衝的分層防護

任何C⁴ISR設施之標準電磁脈衝防護作為，依其侵襲途徑可分類為：設施結構防護與系統裝備防護等兩大部分，如圖一所示。其中，設施結構防護指的是任何軍事建物，或是機動載台的輻射屏蔽工程，其防護作為可分為：分層屏蔽與良好之接地設計。而設施結構內所置放的系統裝備，其防護作為則分為：傳導耦合防護與系統備援。其中達成傳導耦合防護的方法是加裝箱壓濾波器，且必須與屏蔽工程相互整合①②③。

① 張衍智，金屬屏蔽效應評估，中山科學研究院電子所電力電子組，民國91年1月。

② 蔡德平，電磁脈衝之防護研究基礎，中山科學研究院電子所電力電子組，民國89年6月16日。

③ Bell Laboratories: "EMP engineering and design principles", 1986.



▲圖一 完整之電磁脈衝防護作為(作者自繪)

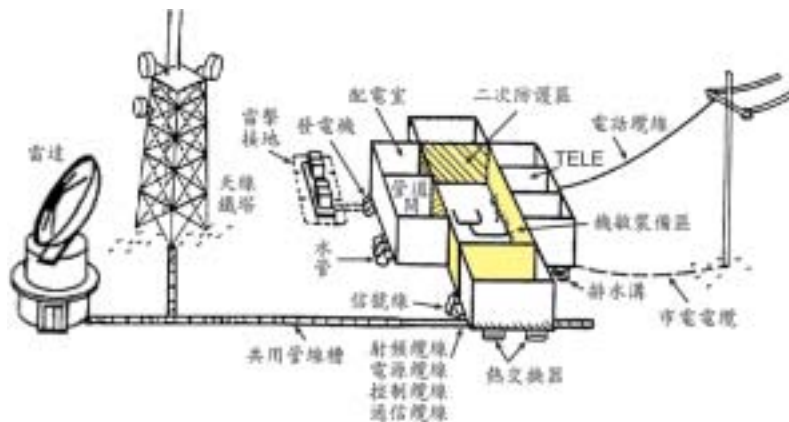
就一C⁴ISR設施之標準配置可如圖二所示。通常，該設施皆具有雷達、天線裝置、外接市電、電話線、通信線、各式冷熱水管、廢水排放管道，以及緊急備用發電機。其土建設施大多為鋼筋混凝土結構，而其內部放置有各式機敏設備，以處理各種天線所傳入之電子訊息。就鋼筋混凝土結構而言，其鋼筋網有焊接的、綁接的，或是用不同的方法，使所有的鋼筋連結處與交叉點都是電氣連結的，因此形成許多連續的導電迴圈或路徑；而且廣布建築物全體，並藉由混凝土與大地相接，因此整個結構體可作為一個接地電極，此種方式統稱為「Ufer接地」。

同時，這種鋼筋網結構配置可對低頻場提供一定程度的屏蔽；然而對高頻入射電磁場，因鋼筋之間形成的

孔洞，則無法有效的屏蔽。
④設施結構一經施工灌漿後，若該設施不能達到原先的設計能力，就需要破壞部分結構、甚至重做，既費時又花錢，不得不讓人們注意其施工方法。

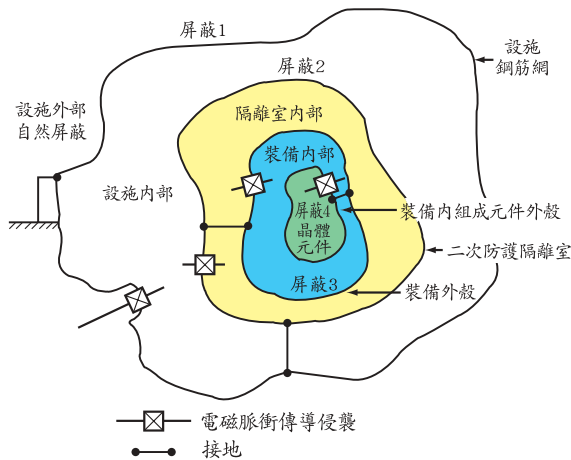
就電磁脈衝防護的有效作為與成本考量，通常採取「因地制宜」與「分層防護」為原則。「因地制宜」的原則就是考量設施所在之地理環境，就其自然環境對電磁

脈衝的屏障而規劃，並設計出最佳之電磁脈衝防護作為。而「分層防護」的原則是就設施內之裝備，依其重要性、機敏性與脆弱性，分區分層配置，以最佳化的成本而達到全防護之目的。為進一步闡述該等原則，可將圖二的設施防護，就電磁脈衝侵襲方式、電磁波由外至內行經途徑、裝備配置、接地方式進行一拓模分析，如圖三所示。



▲圖二 設施之電磁脈衝防護(作者自繪)

④ US Army, "Engineering and Design EMP and TEMPEST Protection for Facilities", 1990.



▲圖三 C4ISR設施之電磁脈衝防護拓模分析 (作者自繪)

由圖三可知，電磁脈衝侵襲機敏裝備，是逐步通過外界天然屏障、鋼筋網、二次防護隔離室、裝備機殼，以及組成元件之外殼後，所殘存的電磁波以及感應電流才可影響電子晶體元件。為使其正常運作，通常需先了解裝備及元件之耐受度後，再進行鋼筋網與二次防護隔離室之防護能力評估。由於設施建築物也可埋入地下，此時土壤層即為對電磁脈衝之第一層屏蔽，而後為鋼筋網，因此須討論與分析其屏蔽防護能力。⑤

設施鋼筋網的屏蔽效益

可定義兩個電磁脈衝的隔離防護指標：一是屏蔽因數(Shield Factor) η_E 和 η_H ，另一個則是屏蔽效值(Shielding Effectiveness)SE和SH，分別表示電磁脈衝的電場和磁場。

$$\eta_E(\omega) = \frac{E_t(\omega)}{E_i(\omega)}, \quad SE(\omega) = -20 \log |\eta_E(\omega)| \quad (1)$$

$$\eta_H(\omega) = \frac{H_t(\omega)}{H_i(\omega)}, \quad SH(\omega) = -20 \log |\eta_H(\omega)| \quad (2)$$

上述兩公式中 E_i , H_i 分別表示照射電磁波的電場和磁場場強； E_t , H_t 則分別表示穿透電磁波的電場和磁場場強。通常屏蔽因素和屏蔽效值並非固定值，會隨電磁脈衝的弦波分量頻率和所穿透介質內的位置而改變。

一、平面金屬網格的屏蔽理論

鋼筋網可視為一平面金屬網格，其屏蔽效值之分析，依頻段之不同，可分成：平面波照射遠場條件(Plane Wave Far Field)、近場條件(Near Field)以及極低頻之金屬板磁場屏蔽等方式，如圖四所示。

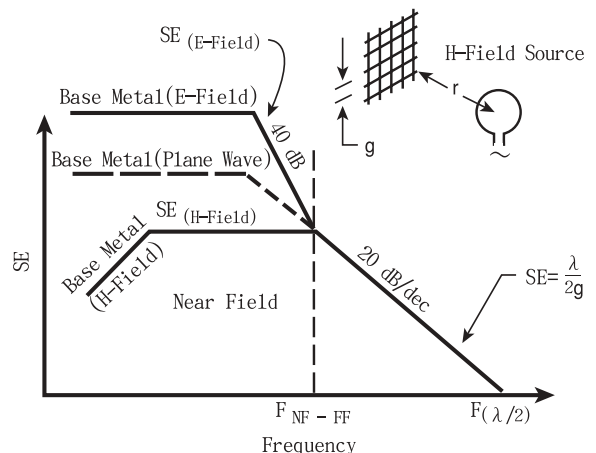
(一)平面波照射遠場屏蔽效值

平面金屬網格遠場屏蔽之公式為：

$$SE = 20 \log(15000 / g_{cm} f_{MHz}) \text{ dB}, \quad g_{cm} \leq 15000 / f_{MHz} \\ = 0, \quad g_{cm} \geq 15000 / f_{MHz} \quad (3)$$

其中， g 為鋼筋間距，單位須取 cm。

(二)近場屏蔽效值



▲圖四 平面金屬網格屏蔽分析方式⑥

⑤ 張衍智，地下掩體屏蔽分析與模擬，(桃園：中山科學研究院電子所，民國92年6月)。

⑥ Donald R.J. White and Michel Mardiguian, "A Handbook Series on EMC, Volume 3: Electromagnetic Shielding", Interference Control Technologies, Inc., 1988.

平面金屬網格近場屏蔽分析可分為：近場電場屏蔽與近場磁場屏蔽兩個方式，此與電磁場之近場特性有關。⑦⑧

近場電場屏蔽公式為：

$$SE_{(H)} = 77 - 40 \log(f_{MHz}) - 20 \log(r/g) \quad (4)$$

近場磁場屏蔽公式為：

$$SH_{(H)} = 20 \log\left(\frac{\pi r}{g}\right), r < \frac{\lambda}{2\pi} \text{ and } r \gg g \quad (5)$$

其中， γ 為電磁場源之距離，依據 MIL-STD-188-125 規範，⑨在量測屏蔽效值時， γ 是被設定為 2.05m。

(三)極低頻之金屬板磁場屏蔽

在極低頻時，平面金屬網格之磁場屏蔽效應，可以視同為一相同厚度、材質之金屬平板之磁場屏蔽效應，⑩⑪因此可以應用該金屬平板屏蔽效值公式。只是在應用此一公式時，須計算出金屬網格的金屬比例 (Percent Coverage)，而將原來公式裡金屬材質的導電率，乘以此金屬比例，即可決定出相對之金屬平板屏蔽效值。其公式為：

$$SH = 20 \log \left\{ e^{\alpha} \frac{(1+K)^2}{4K} \left[1 - \left(\frac{K-1}{K+1} \right)^2 e^{-2\gamma r} \right] \right\} \quad (6)$$

其中，對於近場電場而言，

$$K = \frac{1}{2} \pi r f \epsilon_0 \sqrt{2\pi f \mu / \sigma} \quad (7)$$

對於近場磁場而言，

$$K = r \sqrt{2\pi f \sigma \mu_0 / \mu_r} \quad (8)$$

對於遠場平面波而言，

$$K = \frac{1}{\sqrt{2\pi f \mu_r \epsilon_0 / \sigma}} \quad (9)$$

t 為金屬板厚度； γ 為電磁波傳播常數， $\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$ 。 α 為衰減常數， $\alpha = \sqrt{\pi \mu f \sigma}$ 。而 $\sigma = \sigma_r \sigma_{Cu}$ ， $\mu = \mu_r \mu_0$ 。其中 σ_r 表示介質與銅相比較的相對導電係數， $\sigma_{Cu} = 5.8 \times 10^7 \text{ mhos/m}$ 則是銅的導電係數。 μ 表示介質的導磁率(permeability)， μ_r 表示介質相較於空氣的導磁率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 則表示空氣的導磁率。 ϵ_r 表示介質相較於空氣的介電係數， $\epsilon_0 = 1/36\pi \times 10^9 \text{ F/m}$ 。考慮一鋼筋網格的間距 g 為 15cm，鋼筋直徑 d 為 8mm。則鋼筋網格的金屬含量可利用下列公式：

$$\text{Percent Coverage} = \frac{1}{g} d \left(2 - \frac{1}{g} d \right) \quad (10)$$

經計算後鋼筋網格的金屬含量為 0.104。就極低頻段而言，應採用公式(6)與式(8)。

本節介紹的分析公式，是經由理論再配合實驗數據而得之經驗公式。所算出的屏蔽效值為一最大臨界值，但仍與實驗的量測數據相差不多，不失為一值得利用的速算公式。⑫

二鋼筋網格結構體的屏蔽效值分析

現今國軍的陸基設施，為達抗炸需求，所設計之鋼筋網格的間距通常為 15cm，而鋼

⑦ 同註⑥。

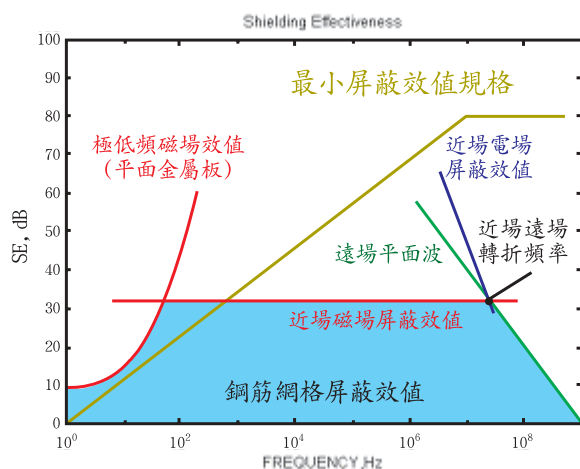
⑧ F.M. Tesche, M.V. Ianoz, T. Karlsson, "EMC Analysis Methods and Computational Models", John Wiley & Sons, (New York, 1997).

⑨ 張衍智，吳國祥，朱建中，電磁脈衝防護規範，(桃園：中山科學研究院電子所，民國90年12月)。

⑩ 同註①。

⑪ 同註⑥。

⑫ 同註⑧。



▲圖五 設施鋼筋網之屏蔽效值 (作者自繪)

筋直徑通常為8mm。利用公式(3)至(10)來計算上述鋼筋網格的屏蔽效值，可得出如圖五之屏蔽效值。^⑬由圖中可看出在近場時，計算出電場的屏蔽效值遠比遠場屏蔽效值大上許多，這種現象代表著電場的干擾是不值得去憂慮的，反而是防治近場磁場的干擾才是要去注意的。在本案例，近場磁場屏蔽效值約為32dB，是鋼筋網格之近場屏蔽效值。至於極低頻時，平面金屬板的磁場屏蔽效值隨頻率減少而降低。

圖五淺藍色區域，即為計算出的設施鋼筋網結構體之屏蔽效值。是將此一屏蔽效值與防護規範^⑭相比較。由圖中可看出該鋼筋網結構體，在頻率40KHz以上的電磁波，是無法滿足最小屏蔽規格之需求。

三、地上與地下設施的屏蔽效值分析與比較

一般建築設施皆具有地面上與地面下之樓層。在此舉一新建工程案為例。^⑮地上建築物為鋼筋混凝土，地下建築物其四周擋土

牆的結構，也是採用鋼筋混凝土之方式，而地上、下設施間之樓板結構則為一整片厚約15mm之鋼板，其上再鋪上鋼筋混凝土。

根據電磁波照射建築物之觀點，地上建築物是完全暴露在電磁脈衝的環境裡，而地下建築物受到電磁脈衝侵襲之途徑，則為：

(一)電磁波照射到建築物四周的地面，部分電磁波反射回空氣，剩餘的電磁波則穿透泥土層。殘餘在泥土層的電磁波，是否會由四周擋土連續壁穿透到地下設施，則取決於泥土層對電磁波的衰減特性。

(二)電磁波直接由地面一樓層板穿透到地下設施。

由於上、下設施間之鋼板結構具有極佳之電磁脈衝屏蔽防護能力，因此本文不予考慮電磁脈衝侵襲途徑2之效應。在前面已進行地面上鋼筋建築物之電磁屏蔽效能分析(如圖五)，在此節僅進行地面下鋼筋建築物之電磁屏蔽效能分析，並進行比較。首先討論土壤對於電磁波的衰減效應。

四、電磁波於泥土層的能量傳播分析

一般而言，土壤對於電磁波的傳導不是良導體，其導磁係數約為1，而其介電係數與導電係數隨不同的土壤材質而有不同，如表一所示。^⑯如上述，當電磁波照射到泥土層時，會有一部分電磁波反射回空氣，而其餘能量則穿透泥土層。在此，所要分析的是：穿過泥土層後的殘餘電磁波能量如何？因為此一物理量表示埋於地面下的建築設施，所承受的電磁環境。若要詳盡分析電磁脈衝的隔離防護，是一個複雜且不易求得完

⑬ 同註①。

⑭ 同註⑨。

⑮ 同註⑤。

⑯ 同註④。

表一 不同土壤材質之介電與導電值 (作者整理)

泥土層材質	介電係數, ϵ_r	導電係數, σ (mhos/m)
乾泥土	10	2×10^{-3}
森林地	12	8×10^{-3}
富含水分之農地	15	10×10^{-3}
山丘	13	5×10^{-3}
岩石高山	10	2×10^{-3}
山區	5	1×10^{-3}
水	80	5×10^{-3}
海水	80	4

整解答的工作。在實際的工程應用上，必須設法簡化問題，以求得近似的分析結果。

由金屬屏蔽理論，當電磁波自開始接觸導體表面(介面)，到通過導體平板(介面)的路徑上，其電磁場將不論電磁波照射到導體平板上的入射角度為何，始終會保持TEM波的特性，並且會隨著穿入導體的距離而衰減如下式：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}(z) \\ \mathbf{H}(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_s \\ \mathbf{H}_s \end{bmatrix} e^{-(1+j)z/\delta} \quad (11)$$

此一衰減特性稱為肌膚效應(Skin Effect)，而(11)式中 $\mathbf{E}_s$ ， $\mathbf{H}_s$ 分別是 $z=0$ 處開始穿入的電場和磁場強度； δ 稱為肌膚深度(Skin Depth)，其定義為場強衰減8.69dB的穿入距離，可以計算如下：

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\omega\mu\sigma/2}} \quad (12)$$

而 $\sigma = \sigma_r \sigma_{Cu}$ ， $\mu = \mu_r \mu_0$ ，其中 σ_r 表示介質與銅相比較的相對導電係數， $\sigma_{Cu} = 5.8 \times 10^7 \text{ mhos/m}$ 則是銅的導電係數。 μ 表示介質的導磁率， μ_r 表示介質相較於空氣的導磁率， μ_0

$= 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 則表示空氣的導磁率。另外， f_{MHz} 則表示以百萬赫為單位的頻率。

雖然土壤不是像金屬般的良導體，但也絕不是電的絕緣體。因此，電磁波於泥土層的傳播與上述理論是相似的。由電磁波傳播控制方程式：

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma^2 \mathbf{E} \quad (13)$$

其中， γ 為傳播因子，其公式為： $\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$ 。依據註釋⑰、⑱，計入反射與穿透係數，可求出於泥土層之電場解析為：

$$\mathbf{E}(d) \approx 2\mathbf{E}_{inc} \cos\phi \sqrt{\frac{j\omega\epsilon_0}{\sigma_g}} \exp[-(1+j)d/\delta] \quad (14)$$

其中， ϕ 為電磁波入射地面時之方位角，通常取0度。 d 為由地面往下之地層深度。為泥土之肌膚深度，其定義與公式(12)相同，在不同含水量的土壤肌膚深度與穿透衰減值可如表二所示。表示土壤的相對導電係數，分析時通常取 10^2 mho/m 。

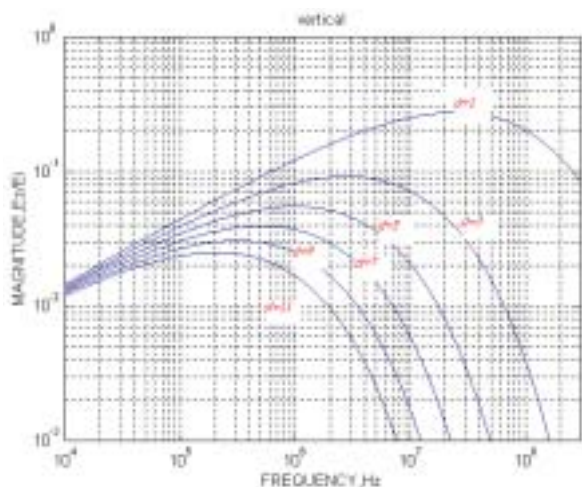
將公式(14)求解，可得出如圖六所示之不同深度下穿透電磁場的電場場強。就核爆

表二 不同含水量之土壤肌膚深度與穿透衰減值 (作者整理)

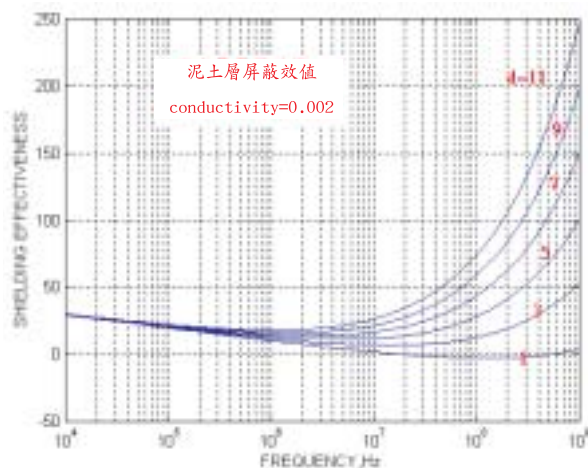
含水量 (%) 頻率 (Hz)	1%		10%		50%	
	δ (m)	A (dB/m)	δ (m)	A (dB/m)	δ (m)	A (dB/m)
1k	950	0	172	0.1	50	0.2
10k	280	0	53	0.2	16	0.5
100k	80	0.1	16	0.5	5	1.7
300k	40	0.2	9	0.9	2.8	3.0
1M	18	0.5	4.9	1.8	1.5	5.6
3M	8.7	1.0	2.7	3.2	0.87	9.9
10M	3.5	2.5	1.3	6.7	0.46	18.7
100M	0.56	15.6	0.28	31.2	0.12	68.5

⑰ Edward F. Vance, "Coupling to Shielded Cables", John Wiley & Sons, (New York, 1978).

⑱ 同註⑧。



▲圖六 不同深度下之電場分布 (作者自繪)



▲圖七 乾地泥土層之屏蔽效值 (作者自繪)

電磁脈衝的電磁頻譜範圍內（約為300MHz以內），由圖中可看出隨著泥土層的深度愈深，電場衰減得更厲害。從另一角度而言，泥土層本身就是一個屏蔽層。經由計算出的地面下設施之泥土層電磁環境，可以利用前面所提及之金屬網格屏蔽經驗公式，分析地下化設施的屏蔽效能。

五地下設施擋土牆的屏蔽效值分析

就地下化的設施來看，因其埋置在泥土

裡，設施四周的擋土牆所面臨的電磁環境，就是電磁波穿透泥土層後，在泥土層傳播的電磁場。由前述的電磁波在泥土層之傳播分析，可應用公式(14)求出不同泥土層深度下的穿透電磁波，與入射電磁波之場強比例。由屏蔽效值基本定義，如公式(1)，而可求出泥土層之屏蔽效值。

$$SE_{dB} = 20 \log \left(\frac{E_{Incident}}{E_{Transmitted}} \right) \quad (15)$$

不同含水量的泥土層，泥土的物理特性值就不同，如表一所示。如圖七所示，為不同深度下乾地泥土層的屏蔽效值，表一中其導電係數為0.002mhos/m。由圖可觀察出，深度愈深，其對高頻電磁場之屏蔽效能愈佳。

擋土牆的屏蔽效能分析，可利用上述求出的泥土層屏蔽效值，加上鋼筋網格的屏蔽效值，即可求出擋土牆的屏蔽效值。在此所採用的鋼筋網格間距為15cm、直徑為8mm，與前面(三)所述相同。此分析方式，是以“乾地”以及“溼地”兩種泥土層，求出擋土牆的屏蔽效值，計算出的結果分別如圖八、圖九所示。於圖中，同時也比較相同之鋼筋網格，將其暴露於大氣中(綠色區塊)，與埋置地下時的屏蔽效值不同。由分析結果可知，具有天然泥土層屏蔽的鋼筋網格之屏蔽效值較佳。

由分析出的屏蔽效值可看出，位於愈深的泥土層，擋土牆對高頻電磁波的屏蔽效值愈佳，但仍不能滿足規格需求。離地表1米深度的擋土牆部分，則完全不能屏蔽高頻電磁波。至於低於300 KHz以下的低頻磁場則具有極佳之屏蔽效能。另外由圖九之埋置於溼地泥土層裡的擋土牆屏蔽效值，可看出較

佳的屏蔽效能。由於溼地的導電係數為 0.01mhos/m ，為乾地導電係數的5倍。由公式(12)，當導電度愈大，泥土層的肌膚深度

就愈淺，再由公式(14)，穿透泥土層的電磁波就會衰減得愈快，因而屏蔽效值就愈大。若擋土牆埋置於溼地時，且離地表9米以上的深度時，其屏蔽效值就可以滿足規格之需求。表三所示，是將圖八、圖九之數據，就各不同深度、泥土土質以及遠近場頻段範圍，擋土牆屏蔽效值所能滿足屏蔽規格需求之頻段範圍，以供參考。

鋼筋網施工法

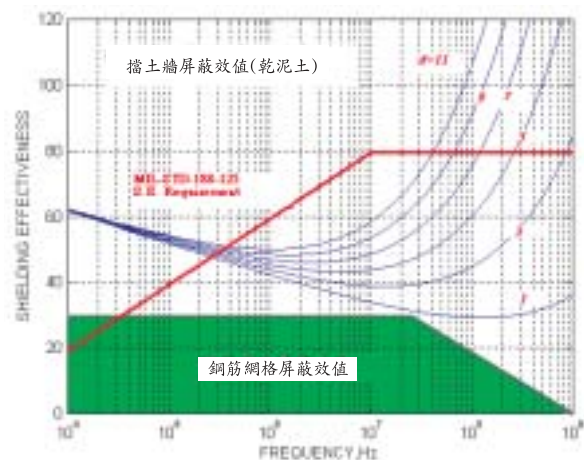
一、美軍規範訂定的施工法

依據美陸軍規範，^⑩設施鋼筋網的標準構造，必須是連續環繞在被屏蔽空間的四周，且需要按照一定的方式施工。如此不僅是為結構支撐，以及增加屏蔽效值；同時，也是為接地需求而可成一連續的電氣迴圈。其要點如下：

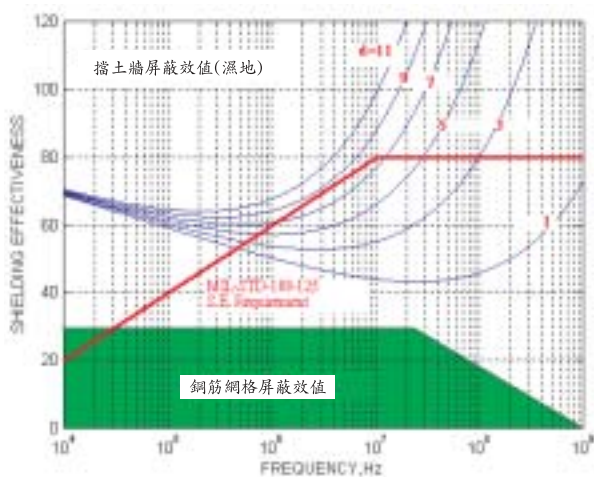
(一)為了增加鋼筋的屏蔽效值，所有的鋼筋交叉點都必須焊接，以確保在交叉點有最小的電阻，如圖十所示。

(二)如果鋼筋之疊接是無法避免的，疊接處的焊接長度至少為鋼筋直徑的三倍以上，如圖十一所示。同時，為確保其機械強度，可額外以其他的機械方式再次繫結或綁紮。但是其施工方式仍應遵循標準實務施作。

(三)在任何情況下，環繞整個牆體的鋼筋網，必須要形成連續的電氣迴圈。亦即，在鋼筋的節點（或交叉點），以及鋼筋與框架



▲圖八 擋土牆埋置於乾地泥土層之屏蔽效值（藍色曲線）（作者整理）



▲圖九 擋土牆埋置於溼地泥土層之屏蔽效值（藍色曲線）（作者整理）

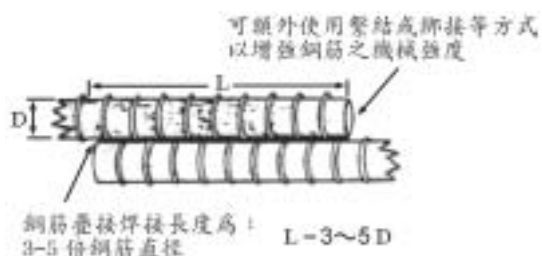
表三 擋土牆合乎規格需求之頻段範圍(作者整理)

土質	頻段	低頻磁場 (Hz)	高頻電磁場 (Hz)					
			1m	3m	5m	7m	9m	11m
乾地		<300K	NO	>800M	>250M	>120M	>70M	>40M
溼地		<500K	NO	>100M	>30M	>12M	OK	OK

⑩ 同註④。



▲圖十 鋼筋交叉點都必須焊接②①



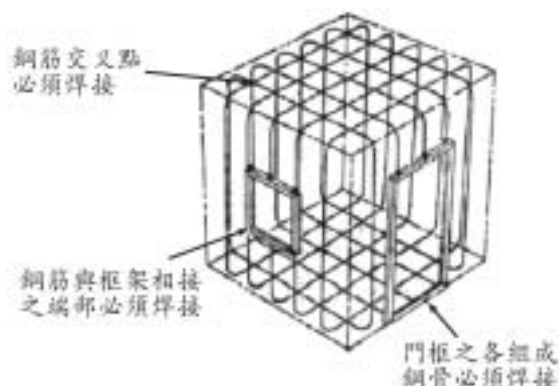
▲圖十一 鋼筋疊接之標準施工方式②①

相接端部的所有鋼筋都應該形成迴圈，並牢固的焊接在一起。連續電氣迴圈鋼筋網的中斷位置（即：鋼筋與框架相接之端部），如通風口或門，應該與該等框架焊接在一起，如圖十二所示。

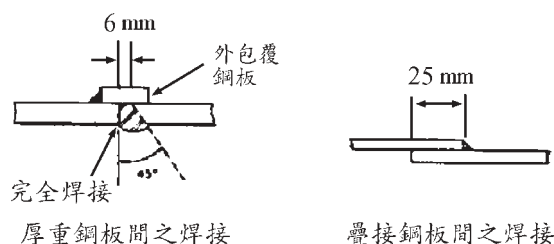
(四)鋼板與鋼板間的焊接方式，隨鋼板的厚薄而有不同之焊接方式，如圖十三(a)所示，通常較薄的鋼板是以疊接之方式來焊接。至於鋼板與角鐵架(Angle Iron)，或其它種類結構體之焊接方式，隨不同的情況而有不同之焊接方式，如圖十三(b)所示。同時，上述施工方式，也可適用於鋼筋與鋼板間，或與其它種類結構體之焊接。

二鋼筋綁接與焊接施工法的討論

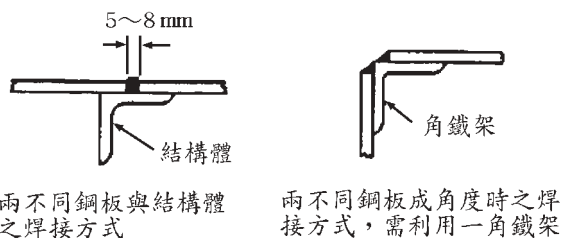
依據上述美陸軍規範所訂定的施工方法(一)與(二)，鋼筋的交叉點與疊接處都必須焊接。實際上，就國內的施工方法，通常是綁



▲圖十二 連續的電氣迴圈②①



▲圖十三(a) 鋼板與鋼板間之焊接方式②③



▲圖十三(b) 鋼板与其它種類結構體之焊接方式②④

接在一起。可以了解規範所訂定的焊接施工，是為了使鋼筋網結構成一連續的電氣迴圈，以降低其接地阻抗。通常採用此一施工方式而成的結構體，其接地阻抗可維持在 2Ω 以下，而且毋須擔心其是否會因年代久遠

②① 同註④。

②② 同註④。

②③ 同註④。

②④ 同註④。

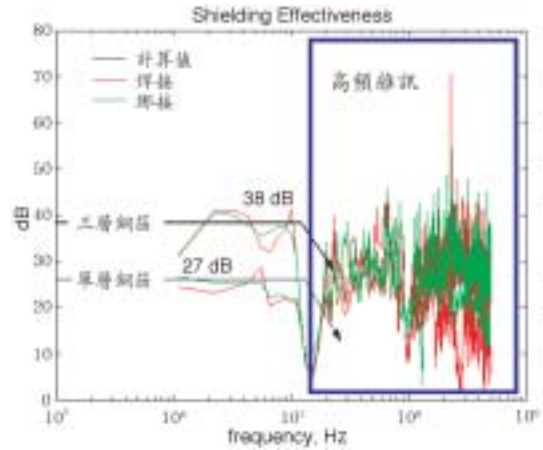
②⑤ 同註④。

而腐蝕的問題。然而此種焊接施工，是否真的會增加鋼筋的屏蔽效值。

針對此一疑問，曾進行實驗，將綁接與焊接的鋼筋網分別置入HEMP模擬器內，並以一微型電通微分感測器(D-dot Sensor)量測其屏蔽效值。其中，鋼筋直徑為10 mm、鋼筋間距為15cm，實驗情形如圖十四所示。量測結果則如圖十五所示，由該圖中可知，無論綁接與焊接的施工方式，皆不會顯著影響其屏蔽效能，國外的研究也得出相同之結論。^⑤同時，由此一實驗結果可與理論分析之結果相比較，如圖十五所示。由圖可看出理論分析的屏蔽效值為一最大臨界值，與實驗之量測數據相差不多，分析出的結果可作為設施設計之參考，以及是否進行機敏設備區的二次防護工程之依據。另外也再次證明鋼筋網結構只對低頻磁場有一定的屏蔽效能，對於高頻則需進行其它的防護工程。



▲圖十四 焊接與綁接屏蔽效能之實驗
(作者自繪)



▲圖十五 鋼筋網之屏蔽效能實驗與理論結果
(作者自繪)

接地

接地是將建築物內的用電裝備與裝置連接至大地，這種與大地相接的目的，是要建立一條低阻抗的路徑，反饋至電源—變壓器、發電機，或蓄電池，以避免火災與電擊的危害，容許快速的故障排除。^{⑥⑦⑧⑨}經由用電裝備的接地，所建立低阻抗的路徑，能減少人體暴露在危險電壓的威脅，通常這種電壓是因故障而產生的。達成各種接地所需的所有電性連接之導體即構成接地系統，可分為兩大部分，即埋設於地下的導體及地上的導體，前者稱為接地電極(Ground Electrode)，後者稱為接地導體(Grounding Conductors)，接地導體在於引導電流流入接地電極，再由接地電極散入大地，如圖十六所示。

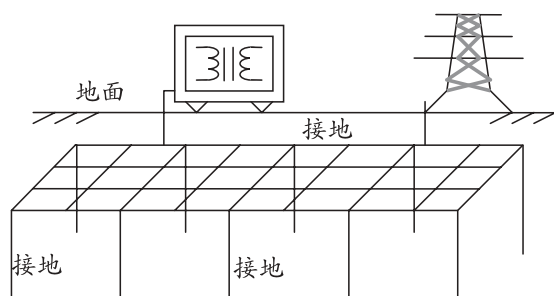
⑤ T. Karlsson, Private Discussion, December 2003.

⑥ ANSI/IEEE std 81-1983 "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System", 1983.

⑦ ANSI/IEEE std 81.2-1991 "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems", 1991.

⑧ IEEE Std 142-1991, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems", 1991.

⑨ 國防部統一通信指揮部，「地線設施與地阻值測試」，(技術通報，第131期，民國87年5月)，頁1-7。



▲圖十六 接地電極之接地網與接地棒圖例
③①

一. 接地的種類描述

接地種類可分：系統接地、設備接地、避雷接地、信號接地及屏蔽接地，各種接地的意義及其目的可說明如下：

(一)系統接地(System Grounding)

電力系統中，某一帶電導體之接地稱為「系統接地」；如：發電機或變壓器Y繞組中性點之接地、 Δ 繞組一角接地、 $3\Phi 4W$ 式輸電線中性線之接地等。系統接地的目的，在於穩定相電壓及接地故障發生時提供接地電流迴路，以便保護驅動電驛。系統接地使大地成為電路的一部分，只要有迴路形成，電力系統電流將透過系統接地點流入大地。此一設計在接地系統故障時，固然是可達到所期望的保護效果，但在平時則是一種地電流的污染(雜散電流及雜散電壓)，故規劃系統接地時應避免平時對地迴路的形成。

(二)設備接地(Equipment Grounding)

將任何設備或設施不帶電的金屬部分加以接地則稱「設備接地」；例如：各種設備的金屬外殼、配電盤箱體、控制台、鐵欄杆、圍籬、鐵架(塔)等各種管路之接地皆為設備接地。設備接地的目的，在於確保人員

的安全及保護設備於接地事故或漏電時，使外殼與人體同電位，並配合系統接地所提供之迴路，檢測接地電流，驅動斷路器跳脫。一般設備接地尚具有屏蔽電場干擾及消除靜電功能，且提供信號接地，故具有多重角色，非常重要。

(三)避雷接地(Lightening Protection Ground)

為防止自然界直接雷擊，及線路雷電感應突波所造成的破壞，而實行的接地即為「避雷接地」；包括，建築物避雷針系統、架空接地線及線路或設備的避雷器接地。避雷接地主要是提供洩放突波能量於大地，避免突波對人員、設備或建築物的閃絡(Flash Over)，故主要目的在於安全防災、系統與設備之保護。通常，避雷接地僅在突波發生時才有作用。

(四)信號接地(Signal Grounding)

「信號接地」在於提供電子電路的信號，一穩定的參考電位、迴路，以及消除雜訊；例如PC板接地匯流排、IC接地板板(Ground Base)等之接地。信號接地目的在於降低雜訊，但接地點的電位變動則可能引進更多雜訊。

(五)屏蔽接地

利用接地以屏蔽電磁場及防止電流干擾，例如：通信線路屏蔽隔離網的接地、屏蔽變壓器屏蔽層的接地、屏蔽室(Shielded Room)的接地。屏蔽接地主要目的在於降低雜訊干擾及人員安全防護。

二. 接地技術

(一)分區分層的接地

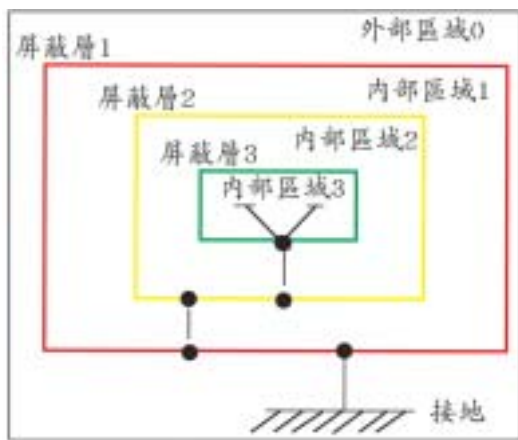
室內各用電裝置的接地設計，可依據設施內的屏蔽隔離層之設計，由內至外分

③① 吳國祥，設施接地網路協調分析，(桃園：中山科學研究院電子所，民國92年6月)。

層、分區整合，㉑如圖十七所示。不論各屏蔽層的隔離效能，其內之接地都必須以相同的方式來處理，如此可確保接地網路系統之單純與一致。由圖中可看出，由內到外依序將各屏蔽層以單獨的接地導線，連結至大地。就低頻磁場而言，通常採用單點接地；而高頻系統，其接地通常是就近接地，以避免接地引線過長而導致明顯的大地阻抗，因此採取多點接地。因此實際的設施接地裝置，通常是單點（低頻系統）與多點（高頻系統）組合的接地方式。多點接地需依據MID-STD-188-124所要求的等電位平面。接地導線不得貫穿分區之屏蔽層，以確保屏蔽效能不被減損。假如接地導線須貫穿屏蔽層時，就必須裝設限幅器、濾波器，或其它的穿孔箱壓、濾波保護裝置。

(二)土壤為電流消散媒介物

在設施外部區域的導體，如電力線、信號線與提供自來水、燃料、污水管線等公用管道設備，會成為一潛在的HEMP能量收集器。此時若設施內所建置的裝備為敏感之



▲圖十七 分區分層之接地裝置㉑

通訊、資訊交換與電腦等電子裝備時，這些外部區域的導體會等同天線般，攔截HEMP能量而產生潛在的破壞電壓和電流，並由設施的穿孔耦合進入設施內，因而成為一項特殊的挑戰。為了對設施威脅的程度降到最低，必須在設施進入點裝設箱壓濾波裝置，以將外部導體所感應的電壓和電流，降至相等於或低於設施內部重要裝備的損害限值。此時，由於土壤是一種會將電流消散的電介質，能有助於消散外部導體所收集、感應的HEMP能量。為了有效的利用土壤做為消散電流之媒介物，由外部區域通過設施至內部屏蔽層的外部導體，可深埋於地表下，但是仍需審慎的設計。同時，也必須裝設接地電極系統，以符合HEMP所需之高頻效能接地裝置。

(三)替代的接地裝置方法

通常國家電氣法規允許電氣安全接地，連接至外部的公用金屬設備管路，如：冷水幹管。然而當外部的管路是塑膠材質的情況時，就必須使用法規所指定的「人工製的」電極，包含接地棒、柵網、接地銅板或其他的被埋入金屬的構型。每一種人工製的電極都有其優點與缺點，如表四所示。就HEMP接地裝置，水平的導線是最佳的選擇，因為其具有低脈衝的阻抗值。垂直的接地棒可以被附加至水平的導線，以獲得適合於電力安全接地裝置所需的較低、較穩定的接地電阻。

(四)環形接地

避雷的接地實務，著重於使用埋入地下的水平裸露導線，並環繞建築物，以形成

㉑ 同註④。

㉒ 同註④。

表四 接地電極的類別與其相對的優缺點（作者整理）

類	別	優	點	缺	點
垂直的接地棒 (rods)		垂直的設計。 最容易安裝（特別是在既有設施的四周）。 金屬附件隨時可獲得。能被延伸至地下水位。		高的衝擊阻抗。 當有靠近地表面的大規模岩層時，就無法使用。 在高故障電流之下或在直接電擊期間，大地表面的步階電壓將會非常大。	
水平的柵網 (grid)		最小的表面電位梯度。 如果在施工之前已完成，是垂直的裝置。 在岩層會阻礙垂直接地棒使用的區域，能獲得低的電阻。 能與垂直接地混合使用以穩定電阻的波動變化。		若垂直接地棒未被使用，會因土壤的乾燥而發生電阻波動現象。	
接地銅板 (plates)		能在有限的範圍內獲得低電阻的接觸。		安裝最困難。	
水平的銅導線 (wires)		在岩層會阻礙垂直接地棒使用的區域，能獲得低的電阻，低的衝擊阻抗。 當以星型配置時是優良的 RD 接地網路。		當土壤乾燥時易於發生電阻波動的現象。	
附屬的電極（公用設備 管路、建築物基礎、設 於地下的貯存槽）		如果維持電氣連續性，能展現非常低的電阻。一般而言，有非常低的初期成本（由其他部分產生）。		在未來的改建時，只有少部分或完全無法控制。	

一種環形的接地系統。各種可能的雷電放電路徑，如朝向地表的導線、鐵塔的柱腳、與建築物的柱子，都必須連接至這種環形的接地。環形接地電極的主要優點，是能提供極低的雷擊脈衝電流與大地間之接觸阻抗。另一優點是在雷擊放電的電流進入土壤之前，可縮短其放電傳輸的距離，因為電極可以被配置在最靠近雷擊的位置。能符合電氣安全與避雷最低需求的環形接地電極構型，對於長方形與不規則形狀的建築物設計。

三 接地系統間之協調

對於各接地系統是否採共同接地、或是獨立接地，長久以來一直是學者及工程師們爭議的焦點。而共同接地最大的優點即是當發生雷擊時，各接地設備均為等電位，能夠有效降低步階電位及接觸電位，以避免人員的傷亡及設備的損害。但對於精密的電子設備而言，由於電力系統不可能是理想之三相

平衡狀態，電源中性線必定有些許電流，而中性線的些許電流即可能透過共同接地之路徑，對精密電子儀器造成嚴重干擾甚至損壞。另外，當設備外殼積存電荷，或是電力設備絕緣破壞，均可能經由共同接地路徑，對電子裝置產生干擾或破壞。相反地，獨立接地卻能解決精密電子器干擾的問題，但對於雷擊發生時，卻對地電位差所造成的問題束手無策。因此，各國對於是否要共同接地，或要獨立接地，均有不同看法。以我國為例，根據建築法規第五節之規定，一般建築物之接地，如：避雷接地，主電力接地，電腦設備接地，電話通信接地，和其他水管接地等均分開。但歐美地區有鑑於分開接地之雷擊事故仍有增無減，於是改採地線合一之共同接地方法。為有效解決爭議問題，可採取以下的解決方式：

(一)對於無精密電子裝備的地區，其接地

系統採共同接地方式連接。

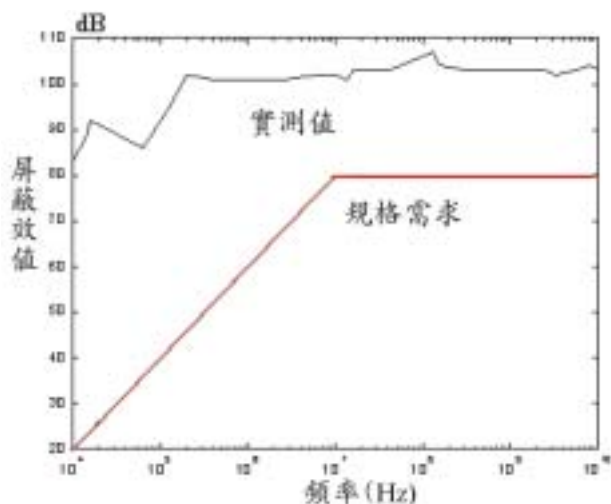
(二)對於較精密的裝備系統，為防範受地線干擾，精密電子裝備採獨立接地，其餘接地系統(如：電力系統接地、設備接地及避雷接地等)採共同接地，再使用暫態接地箝制器(Transient Earth Clamp)裝置，將裝備系統地線與避雷接地系統連接，使平時各接地系統分開，發生雷擊時地線接通合一。^{③③}

電磁脈衝二次防護工程

前述基本電磁學之理論，以及屏蔽的半經驗公式，進行土建設施鋼筋網的屏蔽效值實驗與分析，就一設施遭受電磁脈衝攻擊時，其天然屏障與鋼筋網僅有一定的屏蔽防護能力，仍無法滿足規範之需求。然而此一分析方式，是假設鋼筋網為一連續無窮大之平面網，並無任何缺口存在。實際上，任何設施皆具有門、窗、管道與線纜穿入口存在，這會造成設施的屏蔽效值降低。^{③④③⑤}

為使設施在電磁脈衝的侵襲下仍可安然運作，因此有必要進行二次防護工程。通常任何執行電磁脈衝防護工程之團隊，都會建議在設施內的機敏裝備區，建構防護隔離室。其內含有金屬屏蔽牆面、電磁脈衝防護隔離門與窗、接頭面板、箝壓濾波模組、導波管等防護組件。

電磁脈衝屏蔽防護隔離室的技術牽涉層面甚廣，從材料的選用評估、組件設計製作、施工工法品質、測試驗證、維修與監護



▲圖十八 二次防護隔離室屏蔽效值

等均需妥善規劃與執行，其中EMP防護組件需於系統安裝施工前先行驗證，以確實掌握整體屏蔽效值。

本院在國防部的支持下，進行防護隔離室研發，所完成的二次防護隔離室，^{③⑥}量測出的屏蔽效值可滿足規範需求，如圖十八所示。該隔離室的設計，除了考量到防護電磁脈衝的功能外，還考量到耐震與人因工程。同時可依據國軍現有既存設施面積之限制，建構適當之隔離室。除了電磁脈衝防護視窗外，隔離室內各種防護組件皆為市售商品，其規格與特性則可參考文獻。^{③⑦}隔離室之組裝工法與前述之工法大致相同。然而在施工組裝時，若是承商經驗不足，致使防護隔離室接收與驗證測試無法滿足規範之需求，且光是修改之花費將會使得建構成本暴增。^{③⑧}

③③ 同註③①。

③④ 同註③。

③⑤ 同註⑧。

③⑥ 張衍智等，電磁脈衝二次防護隔離室，(桃園：中山科學研究院電子所，民國93年1月)。

③⑦ 電磁脈衝防護組件型錄，(合豐公司，2003年)。

③⑧ 同註③⑥。

結論

本文運用基本電磁學理論，以及屏蔽的半經驗公式，進行土建設施鋼筋網的屏蔽效值分析，其結果是與實驗數據相吻合的。所進行之焊接與綁接鋼筋網的屏蔽效值實驗，顯示出兩者之屏蔽效值是約略相同的。據此可以了解規範所訂定之焊接施工，是爲了使鋼筋網結構形成一低接地阻抗，及連續的電氣迴圈。然而，爲了確保鋼筋網所形成電氣迴圈的可靠度，本文仍強烈建議國軍各C⁴ISR設施之鋼筋網以全焊接方式施工。

同時，由分析與實驗的結果顯現出：鋼筋網僅對低頻磁場具有一定的屏蔽效能，而無法屏蔽高頻段之電磁波。因此，對於設施之全頻段電磁波屏蔽防護，必須是經由不同防護方法來達成的，比如說：善用設施之自然環境，地下化設施之屏蔽效能就是比地面上設施來的好。地下化設施埋置在溼地是比埋置在乾地者，約多出10 dB之屏蔽效值，因此種植綠色植物，不僅可美化營區，也可保持泥土濕潤，增進屏蔽電磁防護效能。

由於不同的設施結構，如金屬架設、微波鐵塔、電力或通訊傳輸線，在不同的接地形式時，可能產生不同的電磁脈衝感應突波電壓或電流。本文也提供接地系統的觀念，以及許多接地系統改善的可行之道。此外，在充分了解接地系統觀念的情況下，才有辦法落實相關搭接措施，確保接地安全。

其實，在電磁脈衝防護的作法上，就是多層防護的觀念。可將建築物本身的外層鋼筋結構視爲法拉第籠，並善加利用天然環境，作爲屏蔽的最外層保護，再於機敏裝備區進行電磁脈衝防護二次工程，以確保設施的屏蔽防護。然後再利用突波保護器，來作

進一步的限壓及濾波。最後確實做好接地及搭接工作，便能有效抑制突波、降低突波損害而達到防護目的。所以說，接地及搭接的工作是非常重要的。

依據現已勘查過的軍事設施現況，爲達到有效防護之目的，有下列建議：

(一)改善現有之接地網路系統。

(二)善加利用天然之屏障，如：覆土層。

(三)請軍事設施使用人依其任務需求，將機敏裝備分類並集中，以進行隔離室建構之二次防護工程。

(四)電力系統、雷達、通信系統需加裝突波保護器。

(五)將置放於隔離室內之機敏裝備，加裝突波保護器與濾波器。

(六)請軍事設施使用人建構備援裝備。

作者簡介

張衍智博士，成功大學航空工程學系、臺灣大學應用力學研究所碩士、臺灣大學應用力學研究所博士。曾任助理研究員、副研究員。現任中山科學研究院電子系統所電力電子組副研究員。