

# 工程上應考慮的地震問題

## *Engineering Seismological Considerations*

徐 明 同

*Ming-Tung Hsu*

### ABSTRACT

This report represents my attempt to synthesize seismological considerations in civil engineering and my researches on seismicity of Taiwan and its relation to geotectonics in the past 20 years.

Section 1 briefly introduces the importance of seismological considerations in the field of civil engineering. In Section 2, seismicity of Taiwan is summarized with emphasis on its relation to geotectonics. The relationship between faults and earthquakes, and both geological and earthquake faults in Taiwan are mentioned in Section 3. In Section 4, first introduces the various hypothetical earthquakes, then the methods of evaluating design earthquake magnitude and intensity are discussed. Section 5 describes the spectra of ground motion and the site-dependent response spectra of structures which are currently adopted in U. S. A. and Japan.

### 一、前 言

自古以來人類對於地震抱着莫大關懷，因為地震突然發生，大者會在一瞬間把一個繁華的大都市破壞殆盡，變成廢墟，一次造成幾萬人死傷者並不罕見。1976年唐山大地震所造成之嚴重災情，我們的記憶猶新。

「為什麼會發生地震？」是大家所關心的問題，科學家對這個問題，已做了許多研究，但到目前為止還沒有達到預測的地步，故目前我們還無法知道何時會發生地震。因此在地震經常發生而常常受到災害的地區如臺灣，各種工程建設必須加以考慮地震問題。尤其是重要設施(critical facilities) [1]\*因其破壞性可能引起嚴重人命與財產的損失，以及環境的退化。例如原子能發電廠，化學工廠，液化瓦斯終點站，水壩等。此外在緊急情況時仍應保持正常服務大家之安全與健康設施，如警察局，消防隊及醫院等也包括在內。

沒有考慮地震效應的建築物，通常會受到嚴重災害，例如在伊朗或者土耳其發生地震規模 M 7.0 左右的地震，往往造成死者超過萬人以上的嚴重災害，而同樣的地震發生在紐西蘭，僅能造成死者百人左右。因為前者大部分建築物為土角所造成的；而後者為考慮過耐震的木造房屋。在臺灣亦有同樣的例子。在1935年4月21日新竹、臺中烈震，其規模M為 7.1，而發生死者 3,276 人的有史以來到現在為止的大災害，但值得注意者，其中日本人只有 5 人。臺灣人大部分住在土角造或簡陋房屋，而日本人都住在較堅固的木造房屋之故。由此可見耐震結構物之重要性。

在工程上需要考慮的地震問題，包含下列各種問題。在工址(site) 鄰近地區的地震活動情況，有無斷層，最大可能發生的地震 (maximum credible earthquake, 簡寫 MCE) 之規模 (earthquake magnitude) 和震度 (seismic intensity) 以及地震動的性質或其波譜 (spectrum) 等問題。解答這些問題必須搜集過去所得的地震資料，以統計及實驗方法處理，而預測將來可

\* [ ] 內數字指參考文獻

能發生的情況。

本文將介紹上述問題，以供工程人員做耐震設計之參考。

## 二、臺灣地區地震活動與地體構造

臺灣位於環太平洋地震帶 (Circum-Pacific seismic zone) 西側之中部附近，經常發生地震，其中一部分為破壞性大地震，而生命，財產曾經蒙受很大損失。因此自十七世紀中葉各地地方誌中就可尋找到大地震震災的記錄。自1897年起中央氣

象局各測候所安裝地震儀開始辦理地震觀測迄今已八十餘年。隨着測站與儀器設備之增設與改進，地震記錄逐漸充實。完善之地震目錄為研究地震活動及地震工程所需要的最基本資料，徐氏 [2] 所編的目錄為最新者。

關於工程上有興趣的地震為引起災害的破壞性地震，其規模M大約 5.5 以上的地震。表一及表二分別表示地震儀觀測以前及以後之災害地震目錄。至於大地震之比較詳細說明可見臺灣之大地震 [3] 。

表一：地震儀觀測以前之臺灣大地震一覽表

國曆 (太陰曆)	西曆 (太陽曆)	震 灾 地	備 考
崇禎十七年	1644年 7月30日	臺南	城壁龜裂傾倒
永曆八年十二月十四日	1654年 1月21日	臺南、高雄	餘震繼續三週
永曆十五年	1661年 2月15日	臺南	
康熙五十年九月十一日	1711年10月22日	嘉義	
康熙五十九年十月一日	1720年11月 1日	臺南	
康熙五十九年十二月八日	1721年 1月 5日	臺南	
雍正十三年十二月十七日	1736年 1月29日	臺南、嘉義、彰化	家屋倒潰死者多數噴泥，餘震繼續十天 死者多數
乾隆十九年四月	1784年 4月	淡水	
乾隆四十一年十一月	1778年12月11日	嘉義	家屋倒潰死者多數
乾隆五十七年六月二十日	1792年 8月 7日	嘉義、彰化	死者一百
嘉慶二十年六月五日	1815年 7月11日	宜蘭	家屋損壞多數
嘉慶二十年九月十一日	1815年10月13日	淡水	
嘉慶二十一年	1816年	宜蘭	家屋倒潰多數
道光十三年十一月三日	1833年12月13日	宜蘭	家屋損壞多數
道光十九年五月十七日	1839年 6月27日	嘉義	家屋倒潰、山崩
道光二十年十月	1840年11月	雲林	山崩
道光二十八年十一月八日	1848年12月 3日	彰化、雲林	家屋倒潰
同治元年五月九日	1862年 6月 5日	臺南、嘉義、彰化	家屋倒潰死傷者多數
同治六年十一月十三日	1867年12月18日	基隆	家屋流失海嘯來襲溺者數千
光緒七年三月二十一日	1881年 4月19日	臺北	家屋倒潰萬幸有死傷者
光緒十八年三月二十六日	1892年 4月22日	臺南安平	家屋倒潰多數
光緒二十一年十二月二十九日	1896年 2月12日	宜蘭	

表二：災害地震一覽表（1897—1980）

號碼	發震時（東經 120 度標準時）					震 油			規 模	災 害				地殼變動
	年	月	日	時	分	東 經 (度)	北 緯 (度)	深 度 (公里)		死(人)	傷(人)	房屋全倒 (棟)	房屋損害 (棟)	
1	1901	6	7	8	5	121.8	24.7		6.0			1	57	
2	1903	4	24	14	39	120.5	23.5		6.1	3	10	66	840	
3	1904	11	6	4	25	120.3	23.5		6.3	145	158	661	3,197	地裂，噴砂，
4	1905	3	17	6	42	120.5	23.6	很淺	7.1	1,258	2,385	6,769	14,218	斷層，地裂，噴砂，
5	1906	3	26	11	29	120.5	23.7		5.0	1	5	29	529	
6	1906	4	7	0	53	120.4	23.4		5.5	1	6	63	283	山崩
7	1906	4	8	6	40	120.4	23.4		5.5					
8	1906	4	14	3	18	120.4	23.4		6.6	15	84	1,794	10,087	地裂，噴砂，山崩
9	1906	4	14	7	52	120.4	23.4	20	5.8					
10	1908	1	11	11	35	121.4	23.7	淺層	7.3	2		3	5	地裂，山崩
11	1909	4	15	3	54	121.5	25.0	80	7.3	9	51	122	1,050	
12	1909	5	23	6	44	120.9	24.0		5.6		6	10	32	
13	1909	1	21	15	36	121.8	21.4	淺層	7.3		4	14	39	
14	1910	3	26	2	38	121.6	23.9		5.5					小損害
15	1910	4	12	8	23	122.9	25.1	200	8.3			13	59	
16	1910	6	17	13	28	121.0	21.0		7.0					小損害
17	1915	1	6	7	27	123.2	24.4	160	7.3					小損害
18	1916	8	28	15	27	120.9	23.7		6.4	16	159	614	4,885	
19	1916	11	15	6	31	120.7	24.0		5.7	1	20	97	972	
20	1917	1	5	0	55	120.9	23.9		5.8	54	85	130	625	
21	1917	1	7	2	8	120.9	23.9		5.6		21	187	498	

(續)

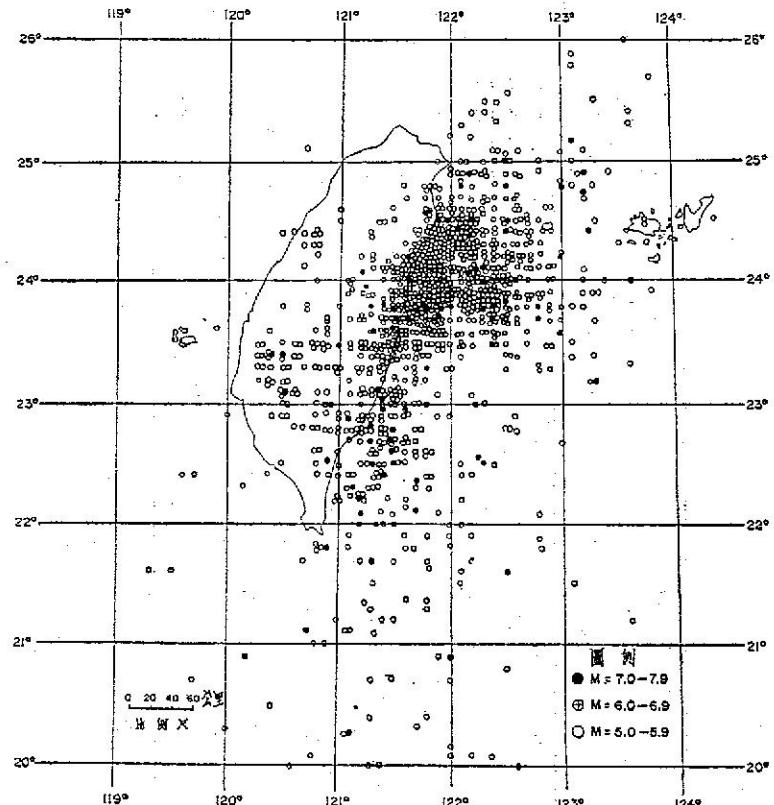
號碼	發震時(東經 120 度標準時)					震 源			規 模	災 害				淺 層 深 層
	年	月	日	時	分	東 經 (度)	北 緯 (度)	深 度 (公里)		死(人)	傷(人)	房屋全倒 (棟)	房屋損害 (棟)	
22	1918	3	27	11	52	121.9	24.6		6.2		3		6	
23	1920	6	5	12	22	122.0	24.0	淺層	8.3	5	20	273	1,275	
24	1922	9	2	3	16	122.2	24.6	淺層	7.6	5	7	14	161	
25	1922	9	15	3	32	122.3	24.6	淺層	7.2		5	24	389	
26	1922	9	17	6	44	122.5	23.9		6.0		1	6	197	
27	1922	10	15	7	47	122.3	24.6		5.9	6	2		14	
28	1922	12	2	11	46	122.0	24.6		6.0	1	2	1	33	
29	1922	12	13	19	26	122.1	24.6		5.5		1		13	
30	1923	9	29	14	51	121.1	23.8		5.5		1	1	80	
31	1925	4	17	3	53	120.2	20.4	淺層	7.1				小損害	
32	1925	6	14	13	38	121.8	24.1		5.6		1		339	
33	1927	8	25	2	9	120.3	23.3		6.5	11	63	214	1,209	
34	1930	8	8	7	49	121.3	23.2		5.6				小損害	
35	1930	12	8	14	20	120.4	23.3		6.1		4	25	49	449
36	1930	12	8	16	10	120.4	23.3		6.5					地裂
37	1930	12	22	7	52	120.4	23.3		6.5					
38	1930	12	22	8	8	120.4	23.3		6.5		14	121	2,919	
39	1930	12	22	12	19	120.4	23.3		5.6					
40	1931	1	24	23	2	120.4	23.4		5.6				698	
41	1934	8	11	16	18	121.8	24.8	淺層	6.5		3	7	11	
42	1935	2	10	3	20	122.1	24.9	60	6.3				小損害	

(續)

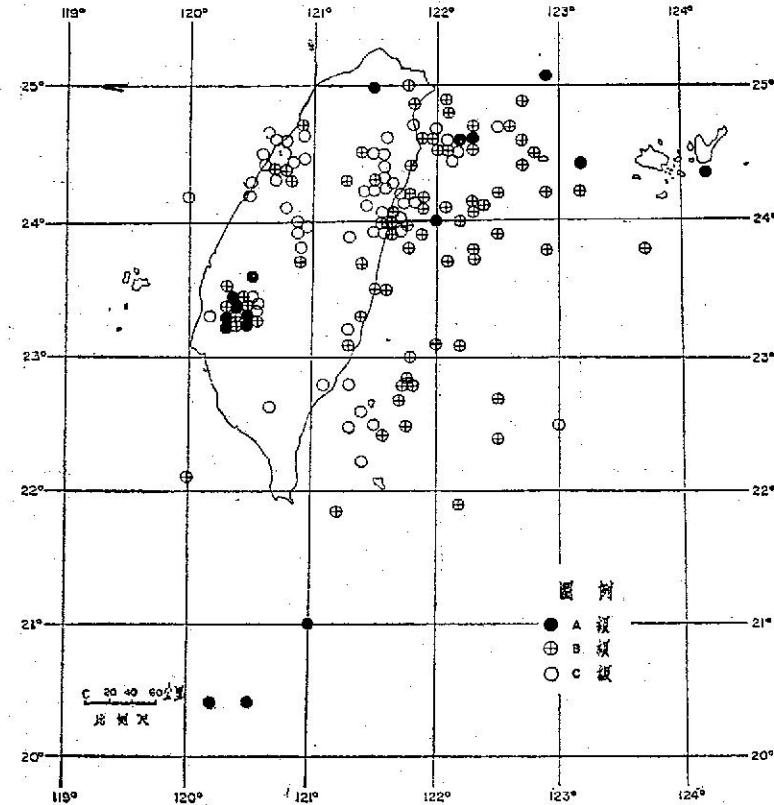
號碼	發震時(東經120度標準時)					震 源			規 模	災 害				地殼變動
	年	月	日	時	分	東 經 (度)	北 緯 (度)	深 度 (公里)		死(人)	傷(人)	房屋全倒 (棟)	房屋損害 (棟)	
43	1935	4	21	6	2	120.8	24.3	5	7.1	3,276	12,053	17,907	36,781	斷層，山崩，地裂
44	1935	4	21	6	26	120.9	24.7	淺層	6.0					
45	1935	5	5	7	2	120.8	24.5	淺層	6.0		38	28	571	
46	1935	5	30	3	43	120.8	24.1	淺層	5.6			2	24	
47	1935	6	7	10	51	120.5	24.2	淺層	5.7		2	5	190	
48	1935	7	17	0	19	120.7	24.6	30	6.2	44	391	1,734	5,887	
49	1935	9	4	9	38	121.5	22.5	淺層	7.2				114	
50	1936	8	22	14	51	121.1	22.0		7.1		14	35	341	
51	1937	12	8	16	33	121.4	23.1	10	7.0			7	140	山崩，地裂
52	1938	9	7	12	3	121.8	23.8		7.0					小損害
53	1938	11	2	14	40	121.2	24.1		6.1					小損害
54	1939	11	7	11	53	120.8	24.4	淺層	5.8			4	20	
55	1941	12	17	3	19	120.4	23.4	10	7.1	858	733	4,620	11,086	山崩
56	1943	10	23	0	1	121.5	23.8	5	6.2	1	1	1	148	
57	1943	10	23	0	15	121.5	23.8		5.6					
58	1943	11	3	0	51	121.8	24.0		5.0				87	
59	1943	11	24	5	51	121.7	24.0	0	5.7				479	
60	1943	12	2	13	9	121.5	22.5		6.1	3	11	139	295	山崩
61	1944	2	6	1	20	121.4	23.8	5	6.4			2	388	地裂
62	1946	12	5	6	47	120.4	23.1	3	6.3	77	469	3,654	2,084	斷層，山崩
63	1951	10	22	5	34	121.7	23.8	0	7.3					

(續)

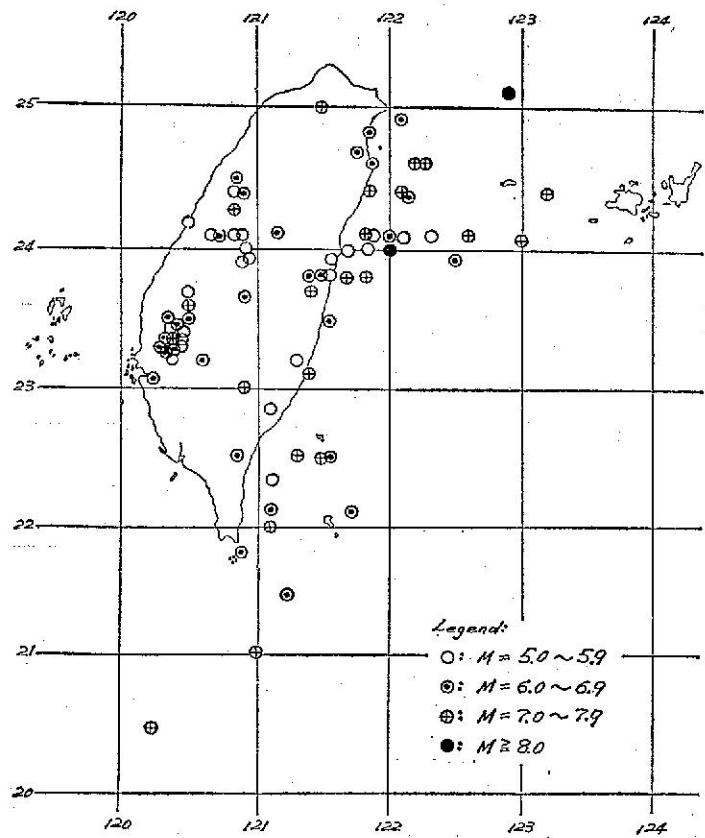
號碼	發震時(東經120度標準時)					震 源			規 模	災 害				地 裂 變 動
	年	月	日	時	分	東 經 (度)	北 緯 (度)	深 度 (公里)		死(人)	傷(人)	房屋全倒 (棟)	房屋損害 (棟)	
64	1951	10	22	11	29	121.8	24.1	20	7.1	68	856	2,382	山崩, 地裂, 斷層	
65	1951	11	25	2	47	120.9	23.0	20	7.3	17	326	1,598	山崩, 地裂, 斷層	
66	1955	4	4	12	11	120.9	21.8	5	6.7	1	7	22	171	
67	1957	2	24	4	26	121.8	23.8	30	7.0	11	33	64	100	山崩
68	1959	4	27	4	41	123.0	24.1	30	7.7	1	9	4		
69	1959	8	15	16	57	121.2	21.5	20	6.8	17	68	1,214	1,375	
70	1959	8	17	16	25	121.2	22.3	40	5.6				小損害	
71	1959	8	18	8	34	121.7	22.1	15	6.1			32	5	
72	1959	9	25	10	37	121.2	22.1	10	6.5		3	3	65	
73	1963	2	13	16	51	122.1	24.4	10	7.3	15	3	6	6	
74	1964	1	18	20	4	120.6	23.2	20	6.3	106	650	10,502	25,818	山崩, 地裂, 噴砂
75	1966	3	13	0	31	122.6	24.1	63	7.5	7			小損害	
76	1967	10	25	8	59	122.1	24.4	65	6.1	2	2	23	27	山崩
77	1972	1	25	10	7	122.3	22.5	70	7.2	1	1	2	4	山崩
78	1972	4	24	17	57	121.5	23.5	3	6.9	5	17	28	62	山崩, 斷層, 地裂



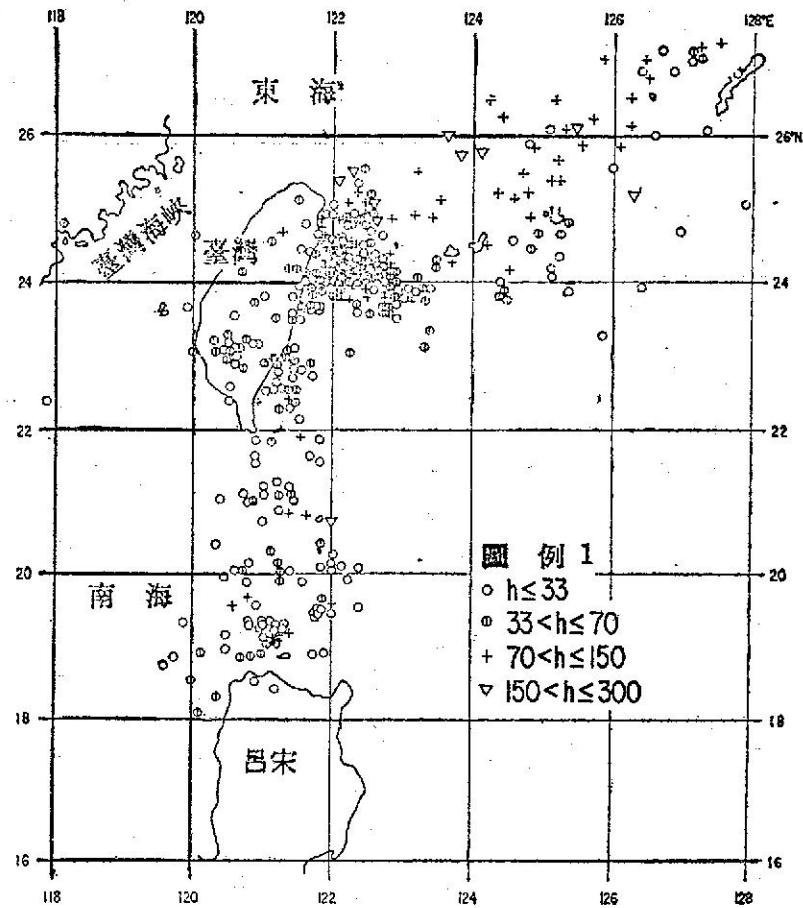
圖二 臺灣地區地震分佈圖 (1936-1973)



圖一 臺灣地區地震分佈圖 (1897-1935)



圖四 臺灣災害地震分佈圖 (1897-1980)

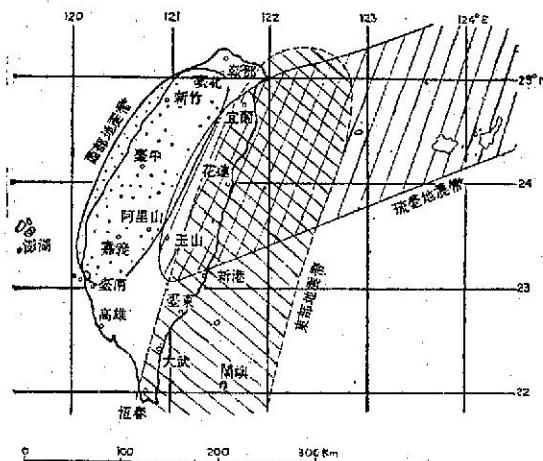


圖三 臺灣及鄰近地區地震分佈圖 (1963-1969)

表三：依有感距離半徑  $r$  定義之地震規模

地 震 規 模	定 義	Riehter 規模 M
顯著 (A 級) 地震	$r \geq 300 \text{ km}$	$M \geq 6.4$
稍顯著 (B 級) 地震	$300 \text{ km} > r \geq 200 \text{ km}$	$6.4 > M \geq 5.7$
小區域 (C 級) 地震	$200 \text{ km} > r \geq 100 \text{ km}$	$5.7 > M \geq 4.8$
局發 (D 級) 地震	$100 \text{ km} > r$	$4.8 > M$

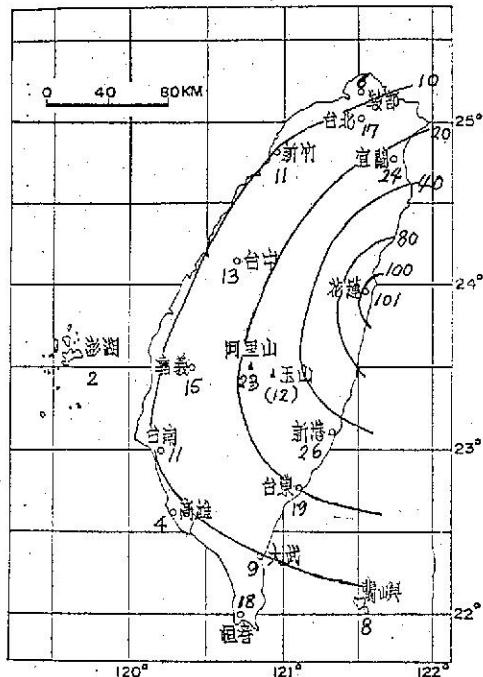
關於臺灣及其周圍地區地震分佈見圖一、二、三及四。圖一表示地震觀測開始初期之分佈圖，地震規模以 A, B 及 C 級分類，其說明見表三。圖二及圖三表示觀測網比較充實時期之分佈圖。圖四表示災害地震之分佈。由這些圖可知在臺灣地區，大部分地震集中在四個地區叫做地震區 (earthquake province)，即花蓮外海、綠島附近、嘉義及苗栗附近。而這些地震區連接起來形成地震帶。臺灣主要地震帶以北北東至南南西方向從島上及其附近穿過，可分成幾個副地震帶。徐氏 [4] 稱為東部及西部兩個地震帶，以及沿琉球列島至臺灣中部的琉臺地震帶。此三個地震略示於圖五。



圖五 臺灣地區地震觀測站及地震帶圖

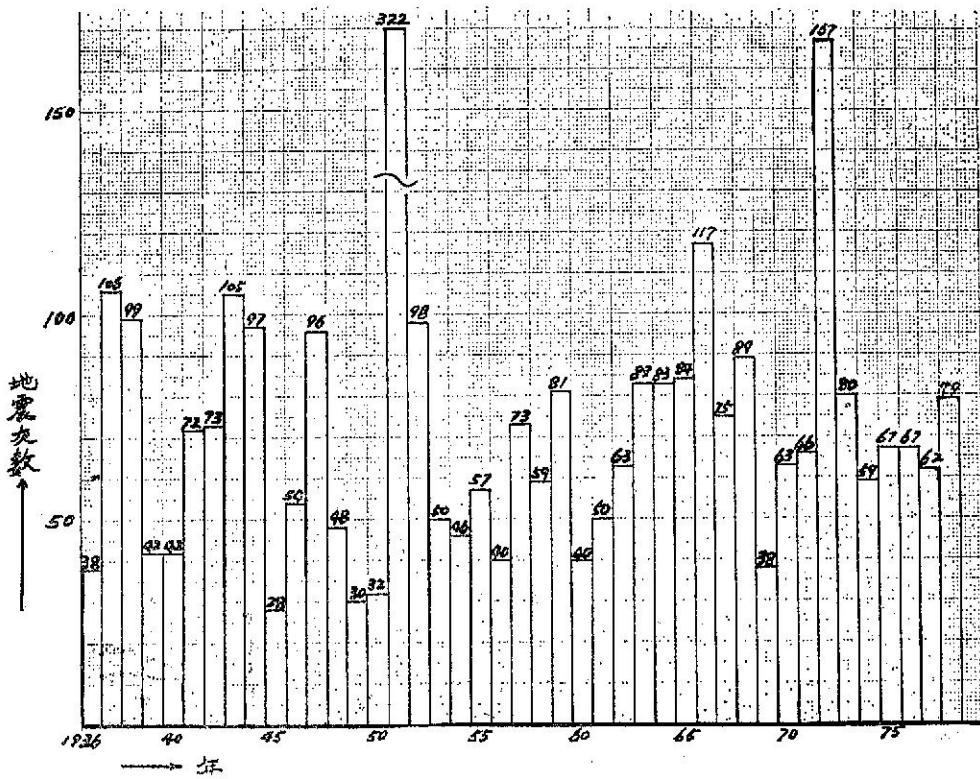
西部地震帶從臺北附近向南南西延伸至臺南附近，寬約 80 公里，東部地震從宜蘭東北外海展開，同樣向南南西延經恒春半島東方進入呂宋島，寬約 130 公里，而琉臺地震帶自琉球列島沿該列島向西南西延伸至臺灣中部結束，寬約 160 公里。值得注意者，琉臺地震帶與東部及西部兩個地震帶之走向完全不同。

臺灣地區有若干比較寧靜或無地震的地區，即西北部，西南部，澎湖羣島及臺灣海峽。為了比較起見，各測站所觀測的人體有感地震年平均次數繪成圖六。最多者為花蓮年平均 101 次，最小者為高雄只有 4 次，相差達二十五倍之多，而澎湖只有 2 次 [5]。



圖六 年平均有感地震次數分佈圖 (1940-1974)

關於地震活動之長期時間變化可見圖七。因為自 1936 年起地震資料比較充實且測站網的檢知能力 (detection capability) 也提高，規模 M4.0 以上的地震大部分可以測得 [6]，故從此年開始計算規模 M。由此圖可知地震活動歷年變化相當顯著。最高值為 322 次係發生於 1951 年，而最小值為 28 次發生於 1945 年相差 11 倍之多。地震活動是否有週期性很難說，但是有一值得注意的現象是活動最

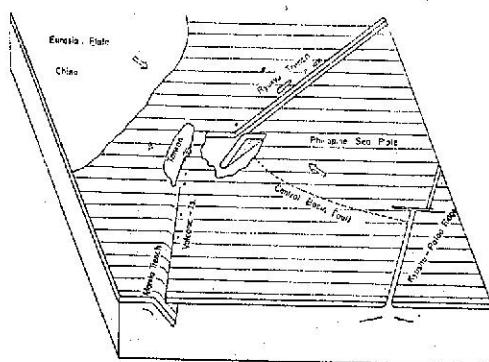
圖七  $M \geq 4.0$  地震次數歷年變化圖

旺盛之1951年，前有連續三年不活躍的期間，1972年前三年亦有同樣的現象。

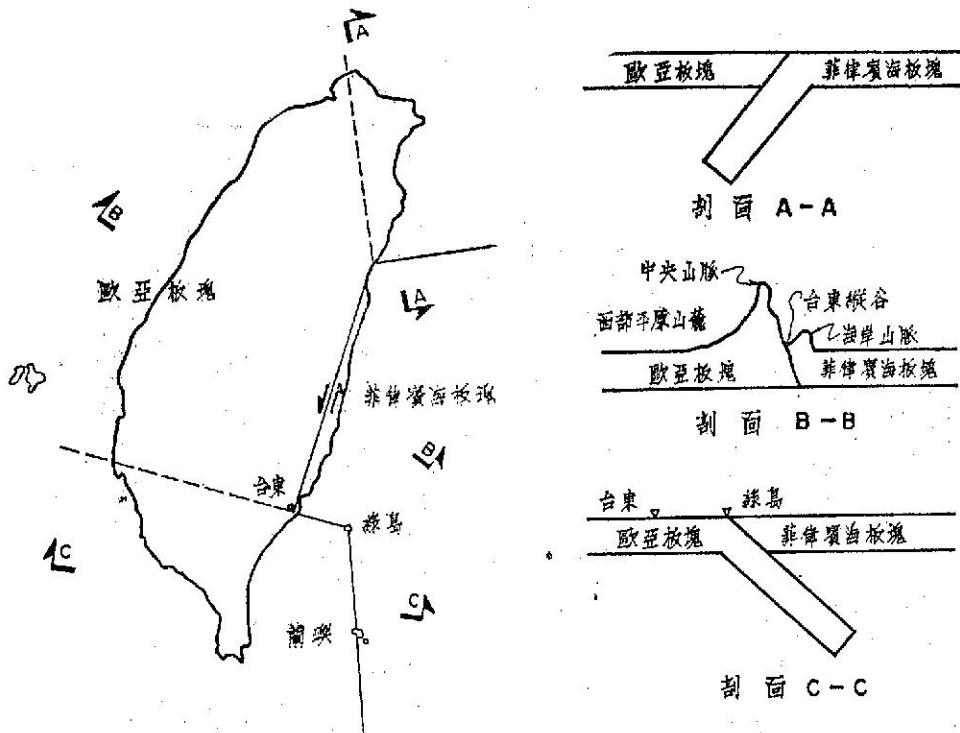
十多年來地殼科學界有劃時代的進步。板塊構造 (plate tectonics) 之理論可以解釋許多地球科學的問題，而其中之一為地震之發生機制 (mechanism) [7]。依照此學說地震即發生在板塊間之境界。據徐氏 [6]，臺灣附近板塊運動之情況如模式圖八及九。歐亞板塊和菲律賓海板塊在臺東縱

谷衝突而造成中央山脈。在臺灣北部，菲律賓海板塊沿琉球列島向歐亞板塊下俯衝 (underthrust)，形成琉球海溝，而在臺灣南部以南至呂宋島中部為止發生相反現象。參照何氏 [8] 臺灣之地質構造區，臺灣之地體構造區 (geotectonic province) 可分為(A)西部平原及山麓區，(B)中央山脈區，(C)東部區及(D)板塊隱沒區 (或深層地震區) 等四區如圖十所示。西部平原及山麓區屬於中新世及上新世，兩者以金山、竹湖、三義及觸口等斷層為境界。中央山脈區屬於漸新世及始新世 (第三紀變質岩)，而與山麓區以屈尺斷層為境界。東部區為第三紀地層所構成，包括海岸山脈重力岩幕，利吉混同層岩塊及原地堆積地質，而與中央山脈區以臺東縱谷為境界。以上所述各區內所發生的地震均為淺層地震，即其深度不超過70公里。一般來說，西部的震源深度比東部者較淺。板塊隱沒區係指菲律賓海板塊向歐亞板塊下俯衝，而兩板塊間之相對運動所引起之地震，包括較深的地震區。在臺灣附近最深者可達200公里左右。

在工程上考慮地震問題時，應對各種地體構造



圖八 臺灣及鄰近地區板塊運動示意圖



圖九 臺灣附近板塊運動模式圖

內所發生之地震分別加以檢討。

### 三、斷層與地震

斷層為兩種岩石體以一個面為境界所發生的滑動現象，可分為走向滑（strike-slip）及傾向滑（dip-slip）兩種。而走向滑斷層亦可分為左旋，右旋兩種，傾向滑斷層可分為正，逆兩種，傾向滑和走向滑分量相差不多時叫做斜斷層（oblique fault）。地震發生時出現在地面的斷層叫做地層斷層〔9〕。

地震與斷層之關係為地震學及地質學之主要研究論題。地震發生後產生斷層或者斷層運動發生後產生地震的問題爭論很久，而於1960年代已獲得定論，即地震由斷層運動所引起。許多斷層中第四紀——約200萬年到現在——以後重覆活動的或者將來有可能活動的斷層叫做活動斷層（active fault）。地震斷層原則上都屬於活動斷層。其認定為目前地震預測研究中之一主要題目。

前面已述及地震是震源附近斷層運動所引起，但地震發生後，斷層不一定出現在地表面。Tsuboi [11] 提倡地震體積（earthquake volume）的

觀念。根據他的想法，單位體積地殼物質內能蓄積的能量是一定的，而地震規模愈大，地震體積也愈大。因此規模較大的地震比較小的地震，斷層出現在地表面的機會愈多。在地殼內發生的地震，如規模M大於7.4，地震斷層的出現率可達100%，而規模M小於7.4大於7.0者，其出現率約60%〔11〕。

活動斷層諸性質中，與地震規模及發生間隔有關的主要因素計有三〔12〕。

(1)斷層系統之長度L，與所產生之地震規模M有關。

(2)第四紀後期中之平均移動速度S。松田〔12〕把S分為三級，即A級（m/1000年），B級（0.1m/1000年）及C級（0.01m/1000年）。

(3)地震時斷層運動之變位量D。

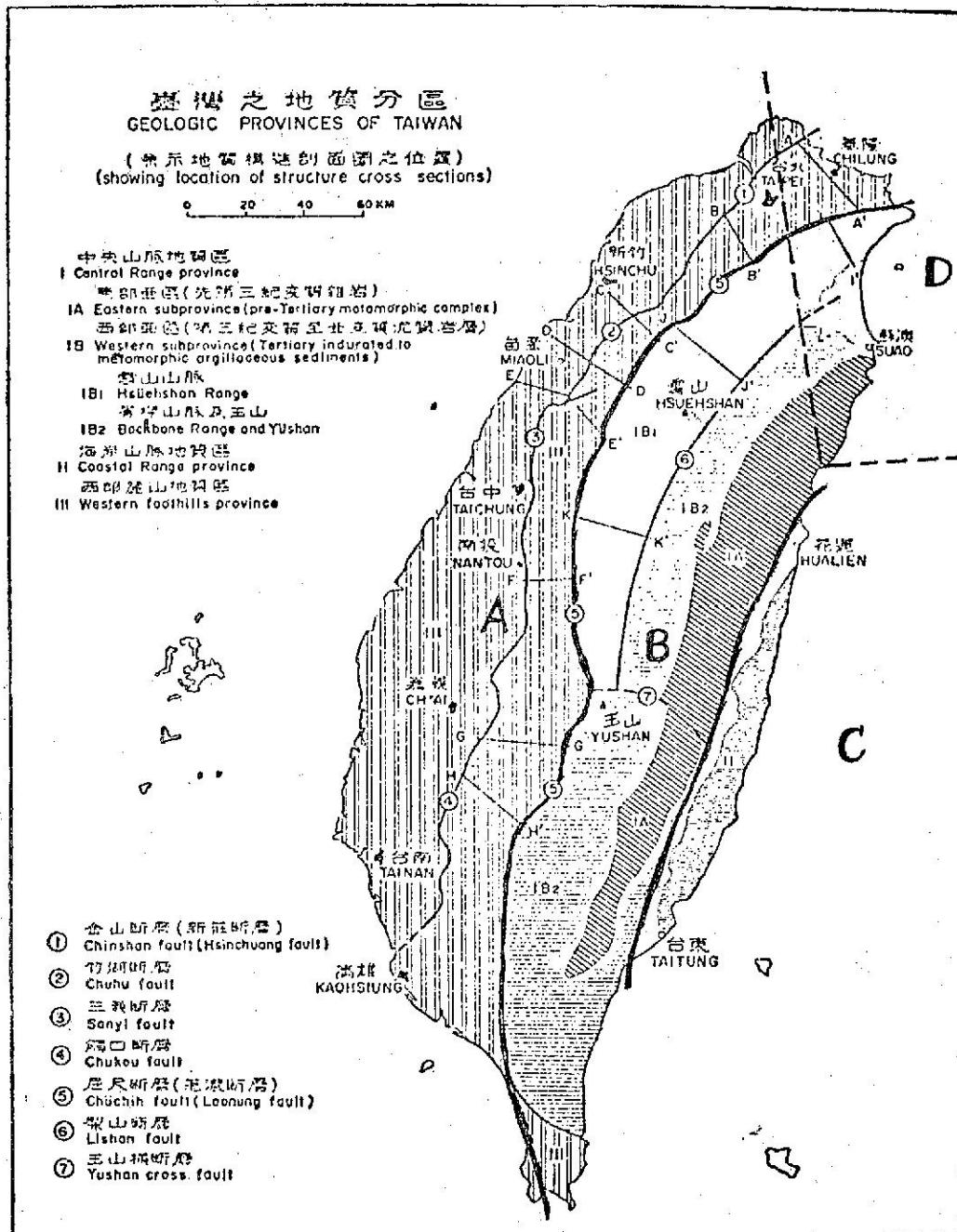
Iida [13] 搜集各地資料發見D與M，L與M有下列關係，

$$\log D \text{ (m)} = 0.55M - 3.71 \quad (1)$$

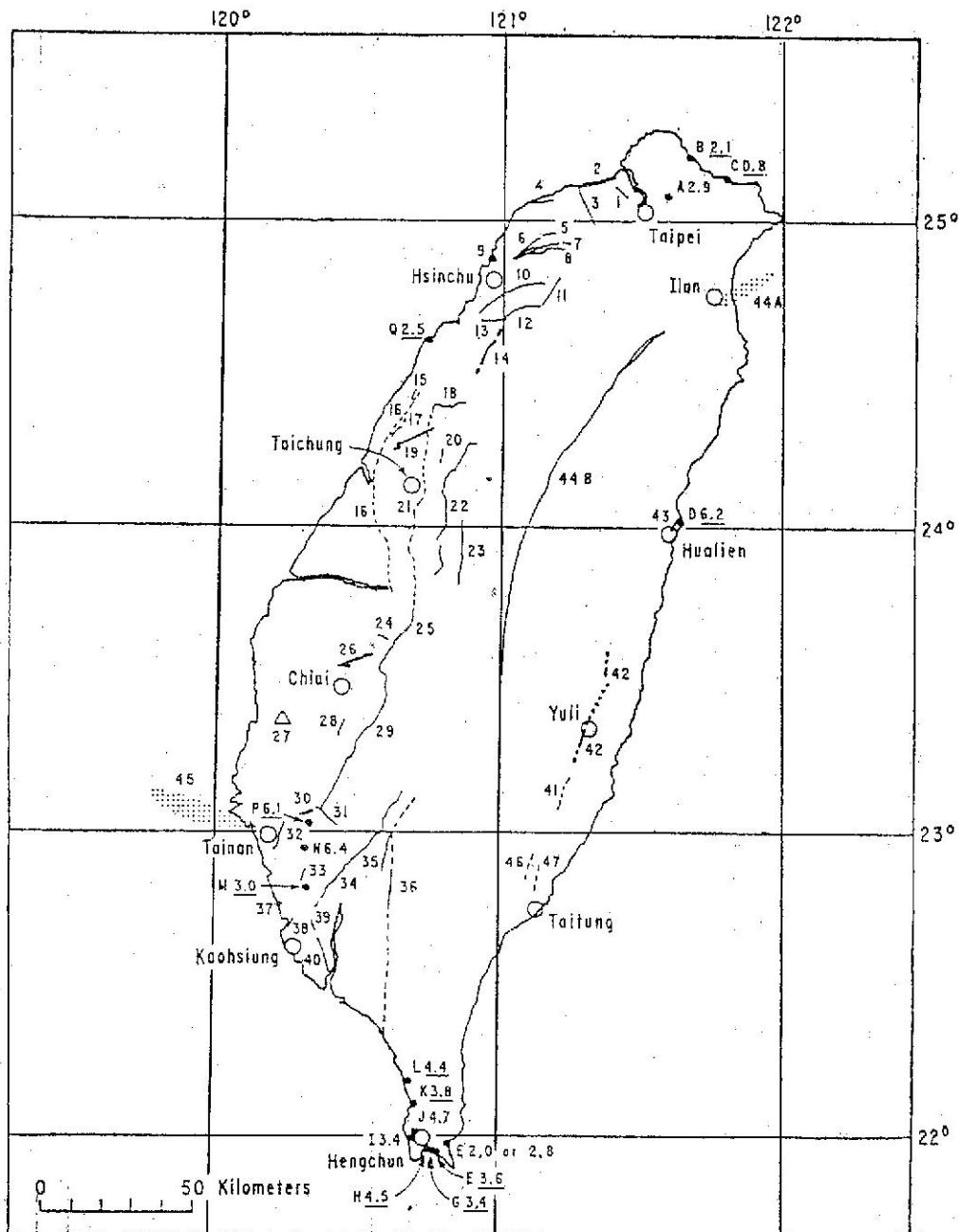
$$\log L \text{ (km)} = 1.32M - 7.99 \quad (2)$$

類似的公式很多，例如，

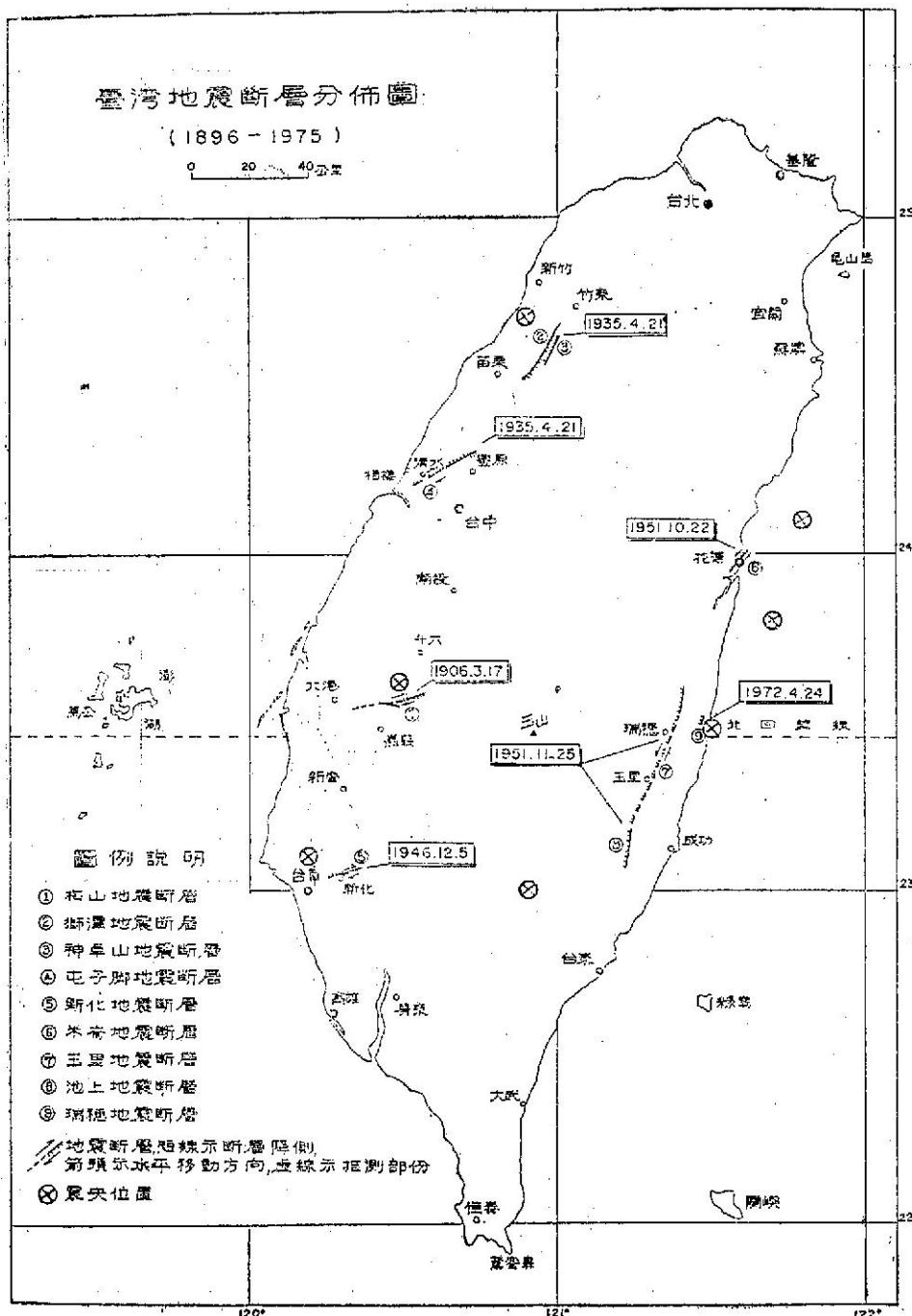
$$\log L = 0.5M - 1.8 \quad (\text{Otsuka } [14]) \quad (3)$$



圖十 臺灣之地質構造分區圖



圖十一 臺灣之斷層分佈圖



圖十二 臺灣地震斷層分佈圖

表四：臺灣地震斷層概況表

(民國前15年—民國64年)

地震斷層名稱	隨伴產生之地震	斷層走向	斷層長度 (公里)	斷層升側	變位情形
梅山地震斷層	民前5年3月17日嘉義烈震 (1906)	N53°~75°E	13	中坑以東斷層東北側為升側，中坑以西斷層西南側為升側。	最大水平位移240公分，最大垂直變位180公分。
獅潭地震斷層		N20°~30°E	21	西側	最大垂直變位300公分，水平位移不明。
屯子腳地震斷層	民國24年(1935)4月21日 新竹、臺中烈震	N60°E	20	斷層升側以南側為主，惟局部在后里車站以東，斷層北側為升側。	最大水平位移200公分，最大垂直變位60公分。
神卓山地震斷層		N20°~30°E	10	東側	最大垂直變位60公分，水平位移不明。
新化地震斷層	民國35年12月5日臺南烈震 (1946)	N70°~80°E	6	斷層升側主為北側，惟於永康附近以西，南側轉為升側。	最大水平位移200公分，最大垂直變位76公分。
米崙地震斷層	民國40年10月22日花蓮烈震 (1951)	N20°~55°E	10	東南側	最大水平位移200公分，最大垂直變位120公分。
玉里地震斷層	民國40年11月25日臺東縱谷烈震 (1951)	N20°~30°E	43	東側	最大水平位移163公分，最大垂直變位130公分。
瑞穗地震斷層	民國61年4月24日瑞穗烈震 (1972)	N25°E	2.5	東側	最大垂直位移70公分，水平變位不明。

$$\log L = 0.6M - 2.9 \quad (\text{松田 [12]}) \quad (4)$$

$$\log D = 0.6M - 4.0 \quad (\text{松田 [12]}) \quad (5)$$

據 Wallace [15]，斷層平均運動速度 S 與此斷層所產生的地震發生間隔（週期） R 有下式的關係，

$$R = D/(S - C) \quad (6)$$

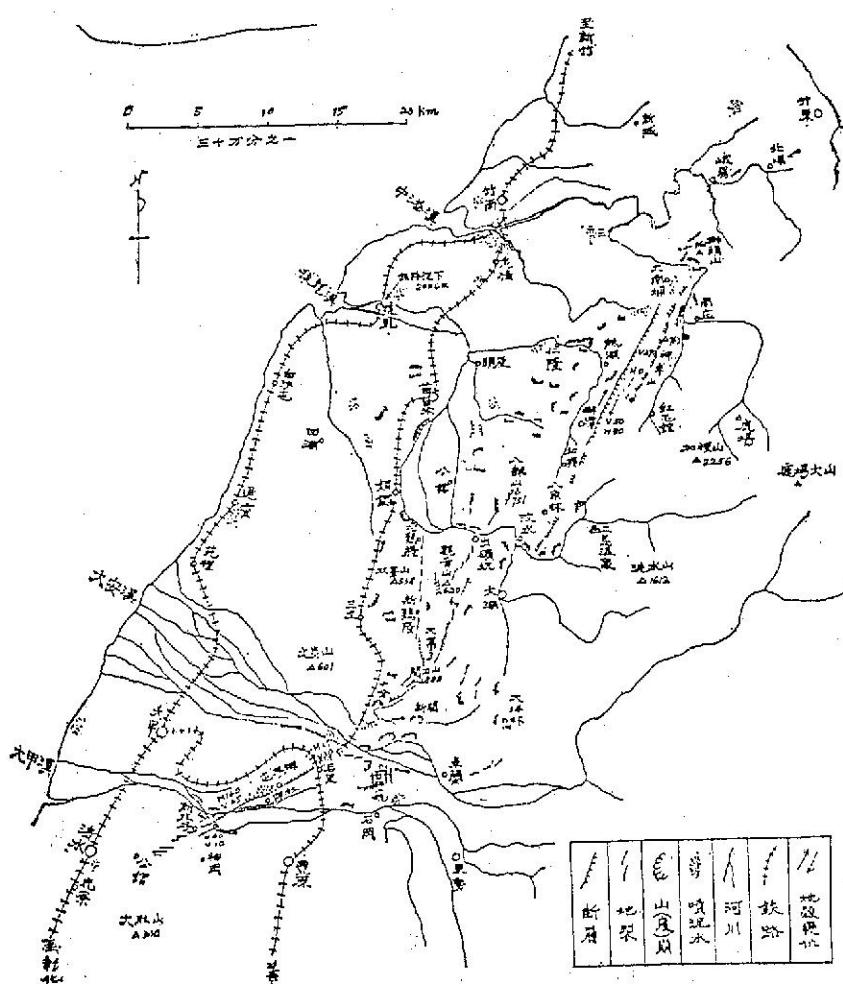
上式中 D 為斷層之變位量，而 C 為蠕動（creep）速度。如無發生蠕動的地區，可用下式。

$$R = D/S \quad (7)$$

D 及 S 均可測得，故由上式可以估計地震發生週期。

下面將介紹臺灣之斷層及地震斷層。圖十一係取自 Bonilla [16]，表示臺灣各地之斷層。圖

中數字表示斷層名稱，即 1. Wuku (五股)，2. Tananwan (大南灣)，3. Nankan (南崁)，4. Tsaota (草漯)，5, 6, 7, 8. Yangmei (楊梅) 8 亦稱 Huko (湖口)，9. 無名，10. Hsin-cheng (新城)，11. 無名，12. Chutung (竹東)，13. Touhuaping (斗換坪)，14. Chi-hhu (可能是竹湖)，15. 無名，16. Changhua (彰化) 或 Tachia (大甲)，17. Tiehchenshan (鐵砧山)，18. Sani (三義)，19. Tunt-zuchia (屯子腳)，20. 無名，21. Chelungpu (車籠埔)，22. Tamaopu-Shuangtung (大茅埔—雙冬)，23. Shuilikeng-Tatakoa (水裡坑—不詳)，24. 無名，25. Tachienshan

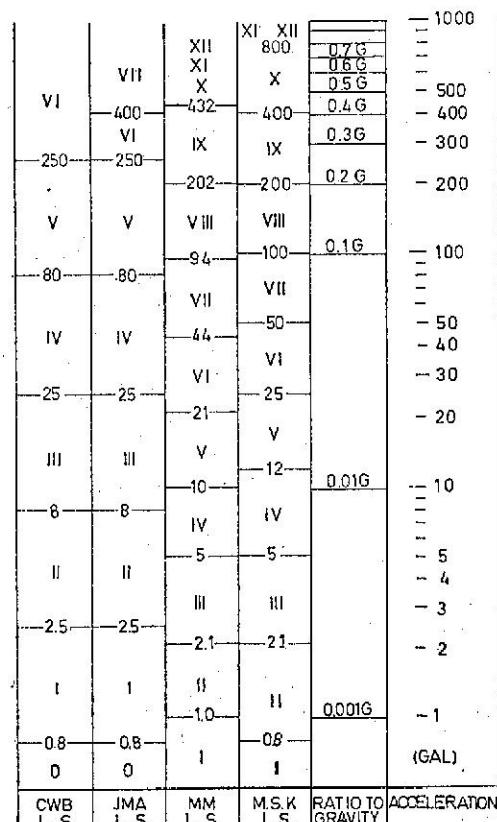


圖十三 1935年4月21日新竹臺中烈震地變圖

(大尖山) , 26. Meishan (梅山) , 27. Yichu (義竹) , 28. Muchiliag (木履寮) , 29. Chukou (觸口) , 30. Hsinhua (新化) , 31. 無名 , 32. Houchiali (後佳里) , 33. Hsiakangshan (小港山) , 34. Chishan (旗山) , 35. Liukuei (六龜) , 36. Chaochou (潮州) , 37. 無名 , 38. Yuchang (右昌) , 39. 無名 , 40. Fenshan (鳳山) , 41. Chihshang (池上) , 42. Longitudinal Valley (縱谷) , 43. Meilun (美崙) , 44. Median (中央) , 45, 46 及 47. 無名。圖十二表示張氏 [17] 臺灣地震斷層分佈圖，其概況如表四。圖十三表示1935年4月21日臺灣最大災害地震的地變圖 [9]。

#### 四、設計地震及震度

在工程上最重要的地震問題是「在工址究竟將來會發生多大的地震規模及震度？」地震規模 (earthquake magnitude) M 是測定地震大小的一種尺度，通常採用 Richter [18] 的尺度 (scale)，其定義如下：在震央距離 100 公里標準扭轉地震儀 (standard torsion seismometer, 或稱 Wood-Anderson seismometer) [固有週期 0.8 秒，倍率 2,800 倍，阻尼常數 0.8] 記象最大振幅 (單位為  $\mu$ ) 之對數，為一個無名數取至小數一位，與地震所釋放出來的能量有關。震度 (seismic intensity) 是表示地震動之強弱與加速度有關。震度用級表示，有各種震度階級，而在中央氣象局使用者如表五，和其他震度階級比較結果如圖十四。圖十五表示1935年4月21日臺灣最大災害地震的震度分佈圖關於地震規模M之詳細說明參考



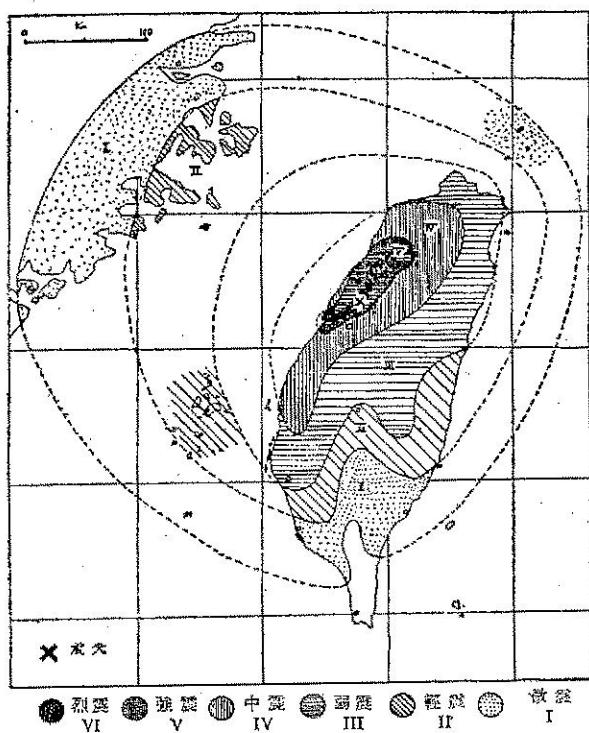
圖十四 各種震度階級對照表

表六。

解答上述問題必須先收集工址鄰近地區之地震資料，包括儀器觀測記錄及過去歷史上地震災害的文字記載，其期間愈長愈好，然後評估可能影響工址的最大地震規模及震度。通常考慮的範圍大約以工址為中心150至300公里範圍內在不同地體構造區

表五：中央氣象局震度階級

震度(級)	名稱	說	明	加速度(gal)
0	無感	地震儀有紀錄，人體無感覺。		0.8 以下
1	微震	人靜止時，或對地震敏感者可感到。		0.8 ~ 2.5
2	輕震	門窗搖動，一般人均可感到。		2.5 ~ 8.0
3	弱震	房屋搖動，門窗格格有聲，懸物搖擺，盛水動盪。		8.0 ~ 25.0
4	中震	房屋搖動甚烈，不穩物傾倒，盛水達容器八分滿者濺出。		25 ~ 80
5	強震	牆壁龜裂，牌坊烟囱傾倒。		80 ~ 250
6	烈震	房屋傾塌，山崩地裂，地層斷陷。		250 以上



圖十五 新竹——臺中烈震度分佈圖

內所發生之地震。

對於重要設施耐震設計應考慮的假想地震（hypothetical earthquake）可以分為三種，例如水壩的耐震設計考慮下列三種地震 [19] 。

(1) 可能發生最大地震 (maximum credible

earthquake, 簡寫為 MCE)

MCE 之定義為在目前已知地體構造架構下，可能對壩址產生最強烈地面振動之地震。MCE 必須所有已知地質及地震資料所支持之合理且可信的事象。其評判即根據該地體構造區過去地質運動之形跡及歷史地震記錄所推測之最大地震為依據。

(2) 設計基準地震 (design basis earthquake, 簡寫為 DBE)

DBE 之定義係在結構物經濟壽年內預期將發生一次之最大地震。其再現間隔 (recurrence interval) 通常為大壩採用 100 年內一次，中小型之普通壩將採用 50 年一次。

(3) 運轉基準地震 (operation basis earthquake, 簡寫為 OBE)

OBE 之定義係在結構物經濟壽年間預期將發生數次之地震。其再現間隔通常設為 25 年。

以上各種基準之地震，參考地質學及地震學證據以及統計方法 [20] 可以求得，而在各種地體構造大約具有一定值。地震規模求出後計算震央距離或震源距離，如有斷層存在即取斷層至工址最短距離。然後依下列震央距離  $\Delta$  (或震源距離  $R$ ) 及地震規模  $M$  與震度或水平加速度  $\alpha$  (單位為 gal) 之關係式或者圖表示加速度。

(1) 金井 [21] 公式

表六：地 震 規 模 解 說

- (1)  $M$  大於 9 之地震，自地震觀測以來尚未發生過。
  - (2)  $M$  為 8.5~9 之地震為最大級之地震，全世界大約十年發生一次。
  - (3)  $M$  為 8~8.4 之地震為第一級大地震，如震央在陸上會造成大災害，如震央在海底會引起大海嘯，且隨着有很多餘震，全世界大約每年發生一次。
  - (4)  $M$  為 7~7.9 之地震為相當大的地震，如震央在陸地會造成大災害，如在海底會引起海嘯，全世界大約每年發生二十次。
  - (5)  $M$  為 6~6.9 之地震發生於陸上會造成災害，世界上任何頭等地震觀測所可測此地震，每年大約發生一百五十次。
  - (6)  $M$  為 5~5.9 之地震，有感區域相當大，震央附近會造成災害。
  - (7)  $M$  為 4~4.9 之地震，通常不發生災害。我們通常感到者都是  $M$  4~6 之地震。
  - (8)  $M$  為 3~3.9 之地震，在震央附近，人體可以感覺。
  - (9)  $M$  為 2~2.9 之地震，人體感覺不到，震央附近之觀測所可測得。
  - (10)  $M$  為 1~1.9 之地震，用高倍率地震儀可以觀測到。
  - (11)  $M$  在 1 以下之地震，設置在適當地點之超高倍率地震儀可以觀測到。
- 以上所述僅適用於淺震源之地震。

$$\alpha = \frac{1}{T} \times 10^{0.16M - (1.66 + \frac{3.80}{R}) \times \log_{10} R + (0.617 - \frac{1.83}{R})} \quad (8)$$

上式中 T 為卓越周期單位秒。

(2) 岡本 [22] 公式

$$\log_{10} \alpha = \log_{10} 640 + \frac{\Delta + 40}{100} (-7.604 + 1.7244 M - 0.1036 M^2) \quad (9)$$

(3) Esteva 和 Rosenblueth [23] 公式

$$\alpha = 110 e^{0.5M} \times R^{-1.6} \quad (10)$$

(4) 日本建設省土木研究所 [24] 公式

$$\alpha = 18.4 \times 10^{0.308M} \times \Delta^{-0.800} \quad (11)$$

(5) 日本建設省建築研究所 [25] 公式

$$\alpha = 28.5 \times 10^{0.207M} \times \Delta^{-0.598} \quad (12)$$

(第一種地盤)

$$\alpha = 13.2 \times 10^{0.220M} \times \Delta^{-0.806} \quad (13)$$

(第二種地盤)

$$\alpha = 32.1 \times 10^{0.253M} \times \Delta^{-0.757} \quad (14)$$

(第三種地盤)

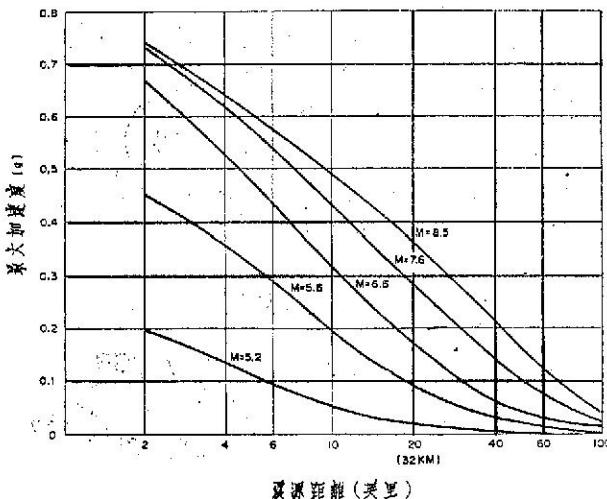
$$\alpha = 8.48 \times 10^{0.418M} \times \Delta^{-0.959} \quad (15)$$

(第四種地盤)

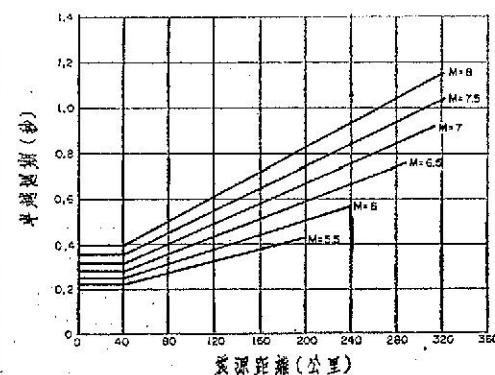
(6) Schnabel 和 Seed [26] 圖

圖十六表示震源距離，地震規模與最大加速度之關係。

至於金井公式所需卓越周期可用實測值或 Seed 等 [27] 之圖十七。



圖十六 震源距離地震規模與岩盤最大加速度之關係圖



圖十七 震源距離地震規模與卓越週期之關係圖

MCE 由上述公式或圖所求的震度不一定是最強震度，震源距離較近的較小地震，有時其震度較大。此時最大震度應用此值。事實上 MCE 可能發生的時間間隔遠超過結構物的壽命，故採用最大震度為設計震度並不太經濟故採用結構物壽命內可能發生的最大震度較為合理。此值當然比前者較小，而可做為靜態設計之基準。以上所述者為水平震度，而如需要垂直震度經驗上採用水平震度之一半。

除上述方法以外，亦可使用最大震度或地震危害圖 (seismic risk map) 求設計震度。圖十八為臺灣地區最大震度分佈圖 [28]。關於地震危害圖，目前有三種。圖十八為徐氏所繪的 50, 75 及 100 年內最大加速度之預期值分佈圖，圖二十為張

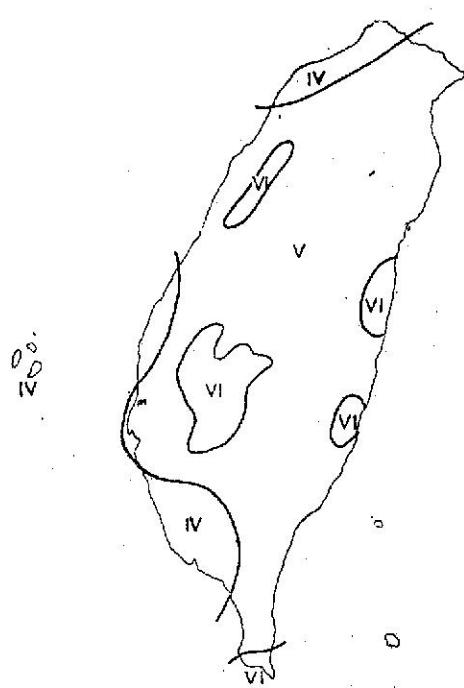
氏及蔡氏 [29] 所繪，而圖二十一為茅氏 [30] 等所繪的危害圖。關於建築技術規則中震區劃分已有徐等 [31] 之修訂建議如圖二十二。

至於強烈地震發生時強烈震動時間 (秒) 與地震規模之關係可參考 Housner [32] 之圖二十三。

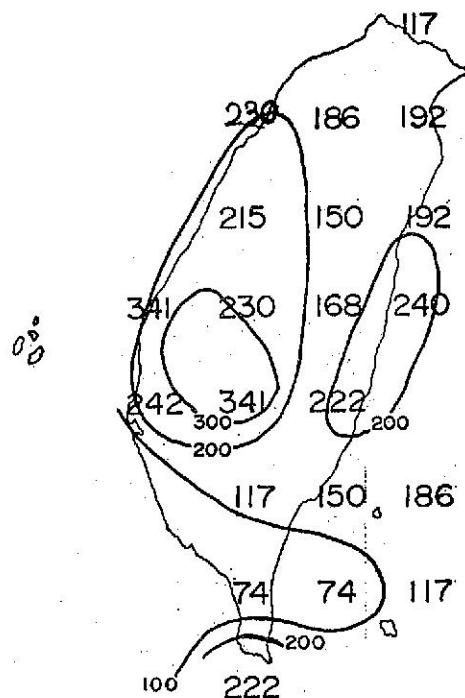
## 五、地震動波譜及結構物反應譜

前節已述靜態設計所需要的設計震，但如需要做動態分析時，須有地震動波譜 (spectrum) 才可。一般來說在特定的工址要獲得強大地震動的波譜幾乎是不可能的事。

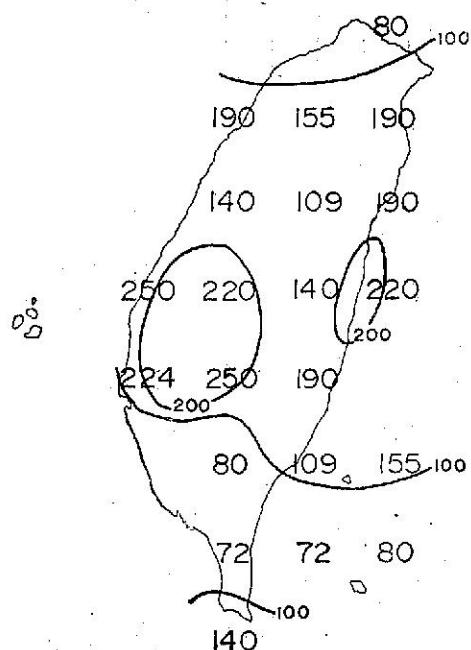
據大崎 [33]，地震動波譜計有金井 (亦名周期一次數) 波譜，機率密度波譜，Fourier 波譜 (



圖十八 臺灣地區最大震度分佈圖

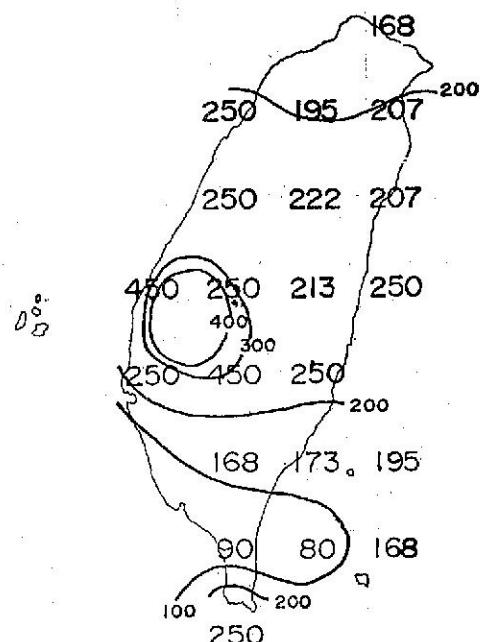


(b)

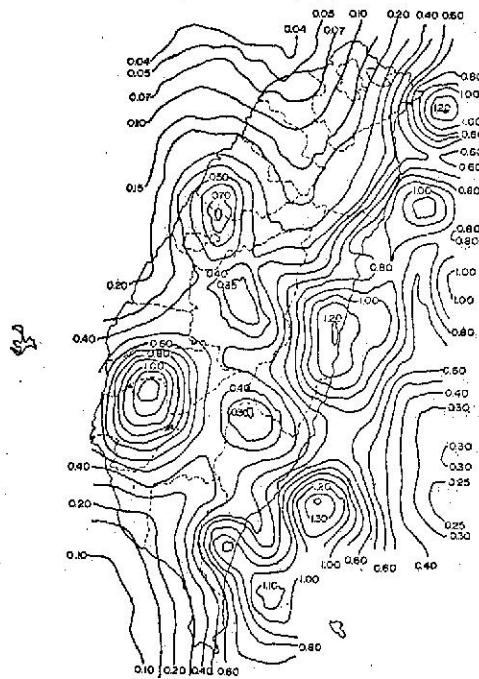


圖十九50年(a)、75年(b)及100年(c)年內可能來襲地  
震最大加速度預期值分佈圖

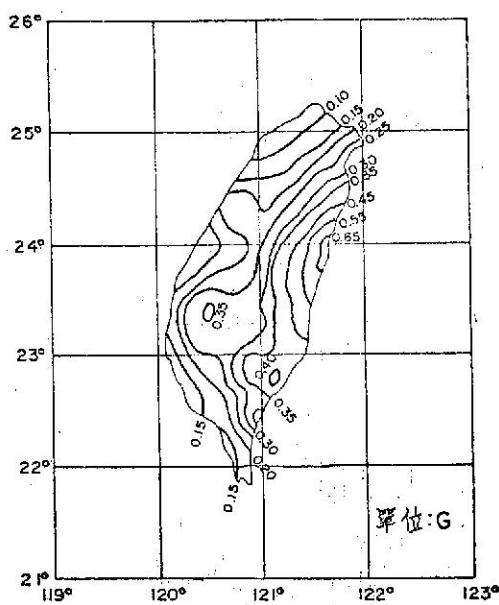
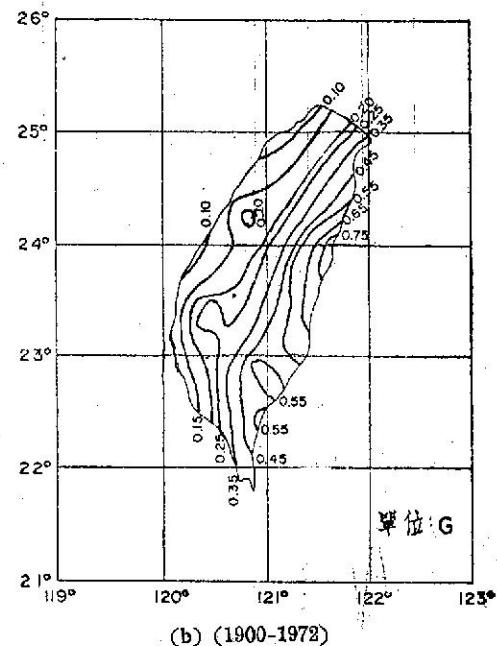
(a)



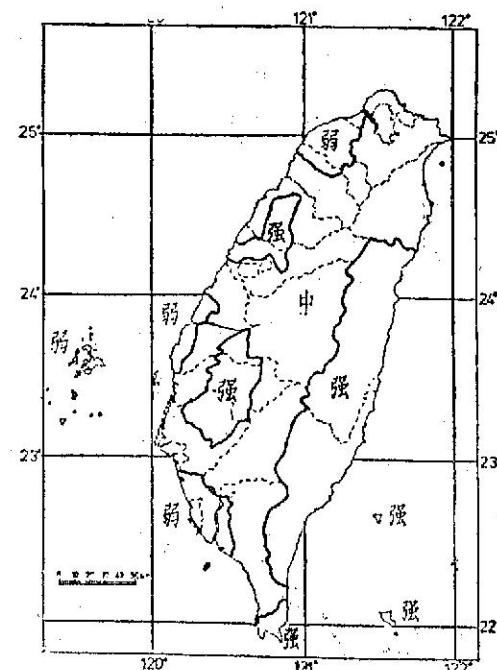
(c)



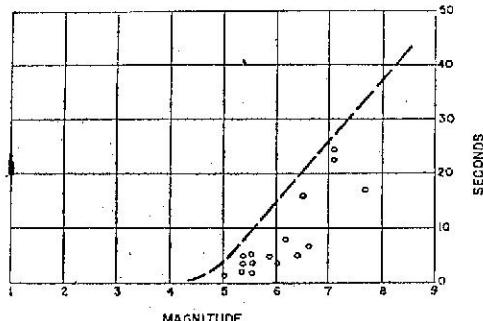
圖二十 復發週期50年之臺灣最大地震加速度分佈圖（單位為 g）



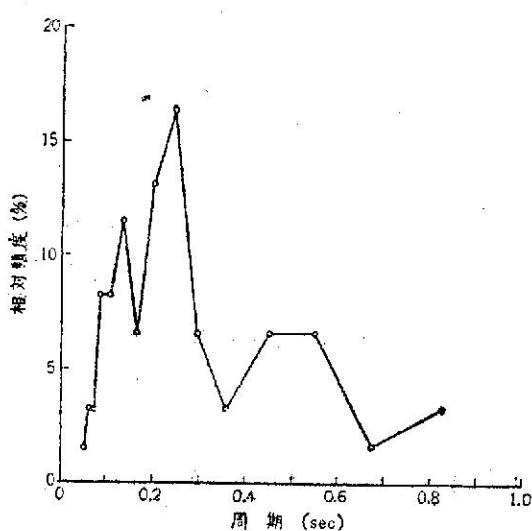
圖二十一 50年復發期之等加速度值分佈圖  
(單位為 g)  
(a) (1936-1972)



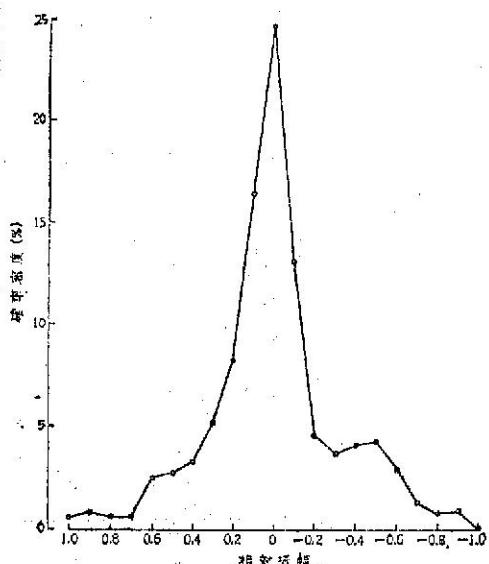
圖二十二 臺灣地區震區劃分圖草案



圖二十三 強烈震動時間秒與地震規模之關係



(a) 金井波譜

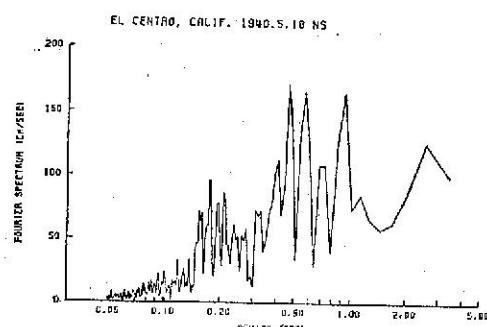


(b) 機率密度波譜

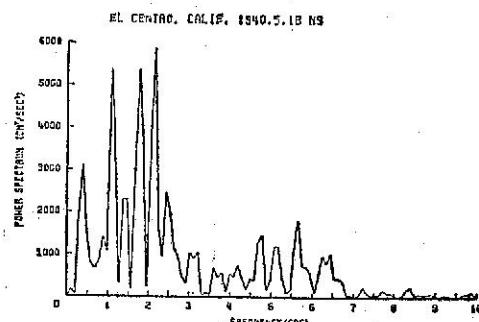
有振幅及相位兩種) 及功率波譜 (power spectrum) 等。圖二十四為美國加州1940年El Centro地震各種波譜的例子。近年來地震設備已有大改善，強震儀的設置亦增加很多，各種不同地盤的標準波譜在美國及日本已獲得不少。

在工程上以地震動波譜做入力以外，還需要結構物的反應譜 (response spectrum)，有移位，速度和加速等三種 [9]。通常普遍使用者為加速反應譜。結構物之反應為固有周期及衰減常數 (damping constant) 之函數而隨著時間而變。從耐震設計的立場來說，反應的最大值比時間變化的情形更重要。反應譜受地盤之影響很大。目前把地盤分為四種，例如在美國 Seed 等 [34] 分為下列四種：

- (1) 岩盤
- (2) 硬的土壤 (stiff soils) 深於150英尺
- (3) 深層不結合土壤 (deep cohesionless)



(c) Fourier 波譜



(d) 功率波譜

圖二十四 地震動波譜之例子

soils)，其深度深於250英尺。

(4)由軟柔至中度硬的粘土而有沙或砾層所形成的土壤堆積物

在日本土木研究所〔24〕分為下列四種：

第一種 { (1)第三紀以前之地盤(稱為岩盤)  
(2)到岩盤之洪積層厚度未滿10公尺

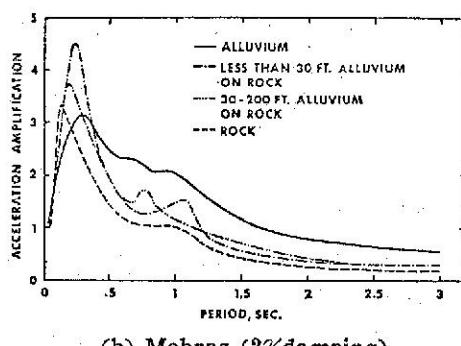
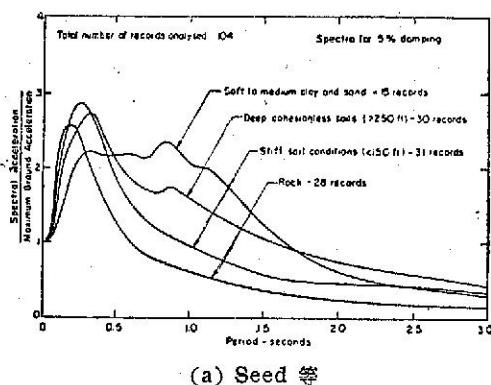
第二種 { (1)到岩盤之洪積層厚度超過10公尺  
(2)到岩盤之沖積層厚度未滿10公尺

第三種 沖積層厚度未滿25公尺，且軟弱層厚度未滿5公尺

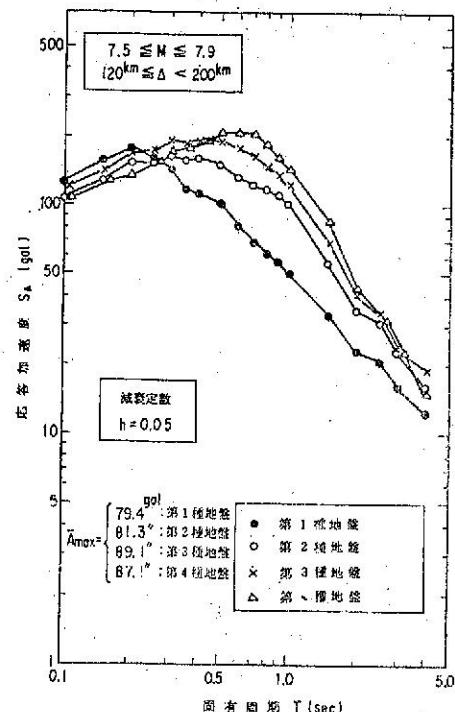
第四種 上記以外之地盤

圖二十五表示 Seed 等 [33] 及 Mohraz [35] 所得不同地盤之加速度反應譜，而圖二十六在日本〔24〕所得不同地盤之加速度反應譜之一例子。圖二十五所示者為基準化(normalized)，故一但求出工址的設計震度，即以此值為一，然後可得不同週期的反應值。

在沒有實際觀測記錄以前，只好參考這些圖。



圖二十五 美國之不同地盤加速度反應譜



圖二十六 日本之不同地盤加速度反應譜之一例

## 六、結論

以上介紹工程上應考慮的地譜問題。從臺灣的地震活動說起，言及地體構造與地震的關係以及斷層與地震的關係，並介紹臺灣的地質斷層及過去所發生的地震斷層。

其次介紹耐震設計所需要的設計震度之求法及地震動波譜以及結構物反應譜。

回想一世代以前筆者係臺灣省防颱防震委員會之一員參加防震工作。當時工程界對地震可以說沒有什麼考慮，僅沿用日據時代的震度基準為設計的依據。筆者一直呼籲耐震工程之重要性，尤其是大地震發生時。近十年來工程界逐漸重視地震問題，而且出現很多年青學人，地震工程之研究逐漸進入軌道，覺的非常欣快。

## 參考文獻

- National Academy of Sciences (1980): Earthquake research for the safe siting of critical facilities, 49 pp.
- 徐明同 (1980) : 臺灣地震目錄，臺大地震工程中心，77頁，
- 徐明同 (1980) : 臺灣之大地震，氣象學報

- , 26卷, 3期, 33-49.
4. 徐明同 (1970) : 臺灣地區有感地震次數與震度之關係, 氣象學報, 16卷, 2期, 31-35.
  5. Hsu, M. T. (1975): Report on the regional seismicity of Taiwan, Inst. Earth Sci., Academia Sinica, 131pp.
  6. Hsu, M. T. (1971): Seismicity of Taiwan and some related problems, Bull. Intern. Inst. Seis. Earthq. Eng., Vol. 8, 41-160.
  7. 徐明同 (1978) : 地震發生之機制, 科學月刊, 9卷, 9期, 42-48.
  8. 何春蓀 (1975) : 臺灣地質概論, 經濟部, 118頁,
  9. 徐明同 (1979) : 地震學, 國立編譯館, 388頁,
  10. Tsuboi, C. (1956): Earthquake energy, earthqake volume, aftershock area, and strength of the Earth's crust, Jour. Phys. Earth, 4, 63-66.
  11. 日本大ダム會議 (1976) : ダムにおける設計地震動, 30頁,
  12. 松田時彦 (1975) : 活断層から発生する地震の規模と周期, 地震, 28, 269-283.
  13. Iida, K. (1965): Earthquake magnitude, earthquake fault, and source dimensions, Jour. Earth Sci., Nagoya U., Vol. 13, No. 2, 115-132.
  14. Otsuka, M. (1964): Earthquake magnitude and surface fault formation, Jour. Phys. Earth, 12, 5-10.
  15. Wallace, R. E. (1970): Earthquake recurrence intervals on the San Andreas Fault, Bull. Geol. Soc. Am., 81, 2875-2890.
  16. Bonila, M. G. (1977): Summary of quaternary faulting and elevation changes in Taiwan, Memoir Geol. Soc., China, No. 2, 43-56.
  17. 張憲卿 (1976) : 近三十年臺灣之地震, 臺灣文獻, 27卷, 2期, 162-195.
  18. Richter, C.F. (1935): An instrumental earthquake magnitude scale, Bull. Seis. Soc. Am., 25, 1-32.
  19. Bureau of Reclamation (1978): Design and analysis of Auburn dam, P. 2-1.
  20. 林祥欽、徐明同 (1981) : 地震規模統計推定諸法之應用研究, 工程, 54卷18期, 501-
  - 511.
  21. 金井清 (1970) : 地震工學, 176頁,
  22. 岡本舜三 (1971) : 耐震工學, 473頁
  23. Esteva, L. and E. Rosenblueth (1963): Espectros de temblores a distancias moderadas y grandes, Proc. Chilean Conf. Seis. Earthq. Eng., Vol. 1, U. Chile.
  24. 日本建設省土木研究所 (1977) : 新耐震設計法(案), 15-16.
  25. 日本建設省建築研究所 (1977) : 新耐震設計法(案), 158頁
  26. Schnabel, P. B. and H. B. Seed (1973): Accelerations in rock for earthquakes in the western U. S., Bull. Seis. Soc. Am., 63, 501-516.
  27. Seed, H. B., I. M. Idriss and F. W. Kiefer (1968): Characteristics of rock motions during earthquakes, Rep. No EERC 68-5, U. Calif., 23pp.
  28. Hsu, M. T. (1975): On the degree of earthquake risk in Taiwan, Proc. 4th Japan Earthq. Eng. Symp., 59-64,
  29. Chang, C.K. and Y. B. Tsai (1977): A study on the seismic risk of Taiwan, Chinese Earthq. Res. Center.
  30. Mau, S. T. Y. Shih and J. F. Kuo (1978): Seismic risk analysis in Taiwan, Proc. Central Am. Conf. Earthq. Eng., 9-18.
  31. 徐明同、蔡義本、茅聲燕 (1980) : 建築技術規則中震區劃分之修訂建議, 土木水利季刊, 6卷, 4期, 101-105.
  32. Housner, G. W. (1965): Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault, Proc. 3rd World Conf. Earthq. Eng., Vol. 1, III 94-109.
  33. 大崎順彦 (1976) : 地震動スペクトル解析入門, 260頁
  34. Seed, H. B., C. Ugas and J. Lysmer (1976): Site-dependent spectra for earthquake resistant design, Bull. Seis. Soc. Am., 66, 221-243.
  35. Mohraz, B. (1976): A study of earthquake response spectra for different geological conditions, Bull. Seis. Soc. Am., 66, 915-935.