

自強科技叢書 002

地震工程學

Introduction to
Earthquake Engineering

原著者：岡本舜三

編譯者：國立台灣大學工學院

地震工程研究中心

科技圖書股份有限公司

地震工程學

INTRODUCTION TO EARTHQUAKE ENGINEERING



Shunzō OKAMOTO

王玉琳·侯 羿·茅聲燕·徐明同
唐治平·陳文奇·陳永祥·莫若礪
楊 秦·葉基棟·葉超雄·廖慧明
蔡義本·鮑亦興 合 譯

原 序

地震區密佈全球。欲求在地震區內之建築結構安全耐震，乃有地震工程學之發展。

地震工程學所涉學科甚廣，諸凡地球物理學、地質學、地震學、振動學、結構動力學、材料力學、工程結構、施工技術等，無不兼及。其目的乃在應用所有學科之知識於建築物之設計與施工，使其能耐受強烈之地震。

耐震問題之研究直至晚近方為工程界所重視，故坊間甚少作有系統討論之書籍。除房屋建築外，幾無書籍討論其他結構之耐震。為求地震工程更進一步發展，誠有將各項基本知識作有系統的整理與組合之必要。

自 1891 年濃尾大地震與 1906 年舊金山大地震之後，結構物之耐震逐漸為科學界所重視。在此等大地震時，房屋、橋梁、堤岸與壩等遭受嚴重損害。經由多次震災，方知結構物不但須能承受垂直力，且須抵抗水平力。

之後又有 1923 年之關東大地震。甚多工程設施及新式建築被全部破壞。地震更引起東京與橫濱兩地大火，導致 140,000 人死亡。由此次地震所得之教訓為彈性建築物之耐震問題，非從基本振動學科著手不能解決。同樣之觀點亦在世界其他地震國家發蒙。至 1940 年後由於電子計算機之發展，耐震結構之動力設計乃有重大進展。

地震工程學在 60 年代之初期有另一進展。1964 年之新潟大地震與阿拉斯加威廉王子灣大地震，因地盤破壞而招致大規模的震災。自是乃有土壤動力學之加速研究。

1954 年，作者曾著「考慮地震力之結構設計」，全書共九章，專供結構設計之用。是書於 1960 年增訂至十三章。本書乃根據是書並採納最近之進展而成，訂名為「耐震工學」，共十八章。由章數之屢次增加即可見地震工程學之發展。在此時期，地震工程學之基本由靜力學變為動力學。動力學則由純理論研究而進展至結構設計之境界。雖然此科仍未臻完備之境，近年來高樓建築皆因地震工程學之進展而能興建。

書之內容雖依地震工程學之進展而層有更改，作者在原著第一版所述之基本原則至今日仍毫未改變。在初版中，作書曾述：「吾人必須避免全憑想像中的地震而訂設計方法。除非地震振動震災害之實況能為設計工程師所了解，結構物之耐震能力能為工程師自行考慮與判斷，合理之耐震設計實不可能」。

地震工程學

本書第一章與第二章為地震學概要，簡論地球之構造，地震現象，地震之原因，地震波，地震儀，地震之強度與規模。各題均為地球物理學中之專題，然從事於耐震設計者對之必須有相當之認識與了解。

第三章敘述日本之地震情況。日本位於世界上地震最多之地區，其地震情況已經多方面調查研究。其調查方法與結果可供其他相似地區參考。

第四章概述日本最近之12個大地震。欲求耐震工程之合理設計，工程師在查閱規範前必須對震災之實況有深後之認識。因之，過去之震災調查極有價值。雖然本章僅討論日本之大地震，所述地震災害與世界其他地區大致相同。

第五章討論地震與地盤振動之關係。吾人由經驗已熟知地震震災因地盤改變而有顯著的不同。震災的程度受地盤的影響遠較震央距之遠近為大。在今日，地盤調查已為都市計劃中不可缺少之一項工作。

第六章至第八章討論現階段在日本實施之耐震設計與規範。因為耐震設計之理論基於動力學，本書主要討論動力設計方法。然而靜力設計仍在普遍施用，故本書亦常論及。

第九章討論土壤結構物之耐震問題。如前所述，土壤問題直至最近方自動力學著眼。目前仍在研究時期，其實際應用仍有待於將來。因此本章著重以靜力學方法處理土壤構造物另輔以若干動力學方面之考慮。希望在將來能改變為完全以動力學為基本之土壤構造物耐震設計。

第十至十八章分論各種結構物之耐震問題：第十一章論港灣，第十二章論橋梁，第十三章論重力壩，第十四章論拱壩，第十五章論土壩與堆石壩，第十六章論水道，第十七章論地下結構，第十八章論房屋建築。

耐震結構物之建造乃一綜合性之高超技術，必須廣聚多數專家之經驗及各項研究之成果。因之，編著本書時，曾參考引用甚多研究論文，及東京大學生產技術研究所，材料動力學實驗室（著者研究室）之研究報告。因此本書之有成實歸功於多數學者之研究。如對原著有誤解，或探討不深，皆著者之過。

本書為慶賀著者六十生辰，本書於一九七三年被翻譯成英文出版*。著者將在此向慶賀委員會諸師長及友輩，尤其是委員會主席永田進博士、執行秘書久保慶三郎博士、與田村重四郎教授致謝。寫作本書時，曾蒙東京大學生產技術研究所之久保慶三郎博士、田村重四郎博士、岡田恒男博士、加藤勝行氏、森地重暉氏，以及東京大學地震研究所之伯野元彥博士鼎力協助。原稿之整理以及計算、製圖承生產技術研究所之田沼淑子小姐及塚田道子女士協助。東方阿爾發公司之田中氏協助將本書譯成英文，東京大學書局之三輪茂雄氏、佐佐木貞治氏，及井上三雄氏與歐姆出版公司之扶島啓治氏協同將本書付印出版，著者在此一併致謝。

目 錄

原 序

譯 序

第一章 地 震 蔡義本譯

- 1.1 地球的構造 3
- 1.2 地球的歷史 4
- 1.3 地 震 7
- 1.4 地震現象 12
- 1.5 地 震 波 18
- 1.6 地震的觀測 21

第二章 地震強度 蔡義本譯

- 2.1 地震強度階級 29
- 2.2 工程上的地震強度 31
- 2.3 地震的大小 36

第三章 日本之地震活動情況 徐明同譯

- 3.1 概 述 41
- 3.2 地 震 帶 45
- 3.3 地質構造之關係 49
- 3.4 地震次數 51
- 3.5 地震危害度 53

第四章 日本的大地震及災情 茅聲燕譯 徐明同

- 4.1 濃尾地震 (1891) 57
- 4.2 關東地震 (1923) 61

4.3	北丹後地震 (1927)	66
4.4	三陸海嘯 (1933)	67
4.5	靜岡地震 (1935)	68
4.6	東南海 (東海道) 地震 (1944)	69
4.7	南海地震 (1946)	70
4.8	福井地震 (1948)	73
4.9	十勝沖地震 (1952)	77
4.10	北美濃地震 (1961)	78
4.11	新瀉地震 (1964)	80
4.12	十勝沖地震 (1968)	86

第五章 地盤對地震之影響 鮑亦興譯

5.1	概 述	93
5.2	沖積地盤之地震振動	95
5.3	岩石地盤之地震振動	111
5.4	彈性波之傳播	117
5.5	波動在表面層之多重反射	121

第六章 耐震設計用地震動 唐治平譯

6.1	概 述	131
6.2	地動之震幅	132
6.3	地動之波形	137
6.4	震央附近之地動	147
6.5	設計用地震之決定	153

第七章 耐震設計的步驟 莫若礪譯

7.1	地震係數法	157
7.2	動力分析 (彈性結構物)	165
7.3	動力分析 (非彈性結構物)	187

第八章 耐震設計條款 莫若礪譯

8.1	概 述	195
8.2	若干結構物之耐震條款	196

第九章 地震時之土壓 葉超雄譯

9.1	概 述	209
9.2	土壤之動態特性	211
9.3	斜坡之穩定	224
9.4	作用於擋土牆之土壓	230
9.5	地震之承載能力	240
9.6	地表之沉陷與破壞	247

第十章 公路、鐵路及河流之耐震性

10.1	公路及鐵路	葉基棟譯	255
10.2	河 流		272

第十一章 港灣設施之耐震性 陳永祥譯

11.1	概 述	279
11.2	新生地及防波堤	279
11.3	重力式碼頭岸壁	280
11.4	板樁擋土牆	285
11.5	棧橋式碼頭岸壁	294

第十二章 橋樑之耐震性 陳文奇 茅聲燕譯 王玉琳

12.1	樑式橋樑之震害	301
12.2	樑式橋之振動	310
12.3	上部結構的耐震設計	335
12.4	基礎的耐震設計	353
12.5	拱 橋	365
12.6	吊 橋	367

第十三章 混凝土重力壩之耐震性 茅聲燕譯

13.1	震 害	381
13.2	作用在壩上的地震力	384
13.3	混凝土重力壩之耐震設計	393
13.4	中空重力壩	395

第十四章 拱壩之耐震性 茅聲燕譯

14.1	概 述	397
------	-----	-----

地震工程學

14.2	震 害	397
14.3	壩振動分析方法	398
14.4	地震時壩之反應	408
14.5	拱壩之耐震設計	419
14.6	地震時基礎岩盤之穩定(滑動之穩定)	422
第十五章 堆填壩之耐震設計		楊 秦譯
15.1	地震損害	427
15.2	振動分析方法	435
15.3	壩體地震中的振動反應	444
15.4	壩的崩毀	471
15.5	耐震設計	480
第十六章 給水設施的抗震性		侯 羿譯
16.1	概 述	491
16.2	地下管線	491
16.3	蓄 水 庫	501
16.4	水 渠	503
16.5	水 池	504
第十七章 地下結構之耐震性		唐治平譯
17.1	概 述	507
17.2	地下洞穴四週地區地震時之應力	511
17.3	地下結構物之地震震測	514
17.4	地震對地下結構物之損害	518
17.5	水下隧道之耐震性	520
第十八章 建築之耐震性		廖慧明譯
18.1	概 述	527
18.2	動力設計法	528
18.3	各 論	531
參考書目		539

譯 序

臺灣位於太平洋地震帶西環，大小地震頻繁。近年來，政府迭訂經濟發展計劃，從事財經改革，興辦各項建設。實施以來，工商業日見發達，國民所得激增，臺北、高雄等大城市之急速擴展，即為經濟繁榮之一明證。

正在擴展中之各大城市，新建高樓大廈，如鱗櫛比。此類高樓遭遇大地震時，是否安全，深為一般人士關切注意，高樓大廈外，更有水庫大壩、鐵路、公路之橋梁與隧道，核能電廠，港灣，機場等重大建設。此等重大結構，應如何設計與施工，使能耐受強烈地震，更為所有工程師亟欲求知者。

為配合國家重大工程建設，國立臺灣大學工學院於民國六十七年設立地震工程研究中心。其目的在引進地震工程學最新學術，並從事有關臺灣各項地震工程之研究，以應用於耐震設計與施工。

地震工程學，兼容地球物理學、地質學、地震學、振動學、材料力學、土壤力學、結構動力學、施工技術，以及彈性波動學各科，所涉甚廣。其講授與研究自非少數人或單一機構所能勝任，中心同仁等有鑒於此，乃請由臺灣大學轉請行政院國家科學委員會撥專款籌辦「地震工程研討會」。於民國六十八年二月至六月，以三星期時間講解地震工程學，繼則就學員工作有關之地震工程問題，擇要研討。期能於短期內，將地震工程學作初步之介紹，並促進學術界與工程界對地震工程學之認識與研究興趣，俾今後有更密切之合作。

本研討會之學員係由政府單位及公民營機構推薦，講員及研究指導則由地震工程研究中心聘請各大學及工程機構之學者專家擔任。為求對地震工程學作一有系統之講解，特選前日本東京大學教授岡本舜三博士所著「耐震工程學」為主要教材，經得原著者同意，請由各講員分章譯成中文彙成此書，並定名為「地震工程學」。

如原序所記，本書日文本於 1954 年問世。1972 年，岡本教授六十大慶，在東京大學生產技術研究所同仁會同出版公司，將是書譯成英文出版以為祝壽。英文較日文版稍有增刪，本書乃參照日、英兩版本直譯。倘譯者對原著者有補充或持不同意見，則於各章以「譯者註」敘釋。

地震工程研討會之籌辦，承國立臺灣大學閻校長振興及工學院虞院長兆中之鼓勵，而研討會及本書翻譯之籌劃，得國立臺灣大學土木工程學系系主任茅聲燾博士及地震工程研究中心主任葉超雄博士全力協助，諸講員先生慨然應諾翻譯本書各章，特此一併致謝。研討會之開辦，由行政院國家科學委員會全力支援；本人參與是項盛舉，係由美國國家科學基金會資助，在此謹向中美兩大科學機構致謝。

地震工程學

此研討會能匯聚臺灣工程界與學術界前輩後進，專家學者一百餘人於一堂，研討地震工程學，誠為難得之盛事。工程前輩詹天佑先生於民國五年（告青年工程學家）一文中說：「精研學術，以資發明，鏡以蟬而日明，鋼以鍊而日堅，凡諸學術，進境而無窮，駕輕就熟，乃有發明。」又說：「行遠自邇，登高自卑，一蹴而及，非可永久。工程事業，必學經驗相輔而行，徒恃空談，斷難任事。……勿襲高深之學說，勿以下位為鄙夷，勿方出校門，遽以人不為我若……力祛驕矜，以勤慎為方針，務求深造。……若夫浮躁狂妄者流，未有不敗者。」（見凌鴻勛、高宗魯合編：詹天佑與中國鐵路）特錄於此，願與工程界同仁共勉之。

本書中文本譯成後由地震工程研究中心印成講義分發參加「地震工程研究會」學員。嗣後各方需要此講義者甚多，乃由中心商請科技圖書公司，就修正後之講義重新排印出版，特此附誌。

鮑亦興於

國立臺灣大學地震工程研究中心

民國六十八年六月

第一章 地 震

EARTHQUAKES

1.1 地球的構造

(1) 組織

地球是一個半徑長達 6,400 km 的球體。人類依循不同線索已可推斷其內部構造的梗概。比較不同地點在地震時所發生的振動情形乃是一個很重要的研究方法。地震乃是因地球內部擾動所釋放之能量經由地層傳達至地表而引起的振動，所以在地表所觀測到之振動樣式和傳播路徑的構造密切相關。因此分析地表的地震動樣式也就成為探測地球內部構造的方法。

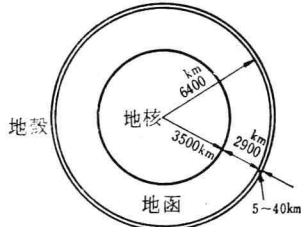


圖. 1.1 地球的構造

根據震波研究結果，地球是由三個性質不同的層圈所構成。這三個層圈分別為地核（中心圈），地函和地殼（岩石圈）。如圖 1.1 所示，地核包括地球的中心部份，為一半徑約 3,500 km 之圓球。由於它不能傳播橫波而被認為是由液體

表 1.1 地球各組成部份之比重

地殼		2.7~3.0
地函	外圈	3.3
	內圈	5.7
地核	外圈	9.7
	中心	12.3

4 地震工程學

物質所組成。地函包裹着地核，其厚度約有 2,900 km，主要是由超基性橄欖岩所組成。地殼是由花崗岩質和玄武岩質的火成岩、水成岩和這兩種岩石經變質形成的產物所組成。地球內部各組成部份的比重詳見表 1.1。

(2) 溫度和壓力

地球的溫度隨深度的增加而升高。在 100 km 深處的溫度是 1,000 ~ 1,500 °C，而 700 km 深處的溫度約為 2,000°C，地核內部的溫度則為 4,000 ~ 4,500°C。在地球表面部份地溫增加的梯度是 30°C/km，不過地溫梯度是隨深度增加而逐漸減小。

地球內部的壓力，在地函上部是 9 t/cm²，地核上部是 1,400 t/cm²，地核中心部份為 3,700 t/cm²。這些壓力遠超過岩石在普通情況下所具有的單軸壓縮強度。

(3) 地震波傳播速度

縱向地震波的傳播速度在地殼的花崗岩質部份為 6.0 km/sec，玄武岩質部份為 6.7 km/sec，而在地函部份平均約為 8.2 km/sec。在地殼和地函交界面附近地震波的傳播速度發生不連續變化。跨過這個界面，橫向地震波的傳播速度由 3.7 km/sec 變為 4.4 km/sec，同時縱向地震波的傳播速度由 6.3 km/sec 變為 7.8 km/sec。這個地震波速度的不連續面稱為莫霍不連續面以紀念其發現者。在日本此一不連續面之深度約為 35 ~ 45 km。

(4) 地殼的構造

在海洋和大陸（包括大陸棚）地區的地殼，其厚度和組成均互不相同。在海洋之下地殼為玄武岩質，厚度約為 5 km。在大陸地區地殼有兩層，上層多花崗岩質而下層為玄武岩質，地殼厚度約為 30 至 40 km。因此大陸是浮於地函上的薄板，地函具有可塑性。地殼可能因為地表物質的配置變化或地函的輕微變動而變形。這種平衡的保持稱為大地均衡。更有進者，地殼被認為是隨地函的對流運動而在移動，其結果就是今日我們所見到的大陸和島嶼的分佈情形。

1.2 地球的歷史

地球的誕生時間一般被認為是和星河宇宙的形成大約相同，即 45 億年前。微

細的固體粒子和氣雲一面旋轉一面濃縮，密度的增加導致溫度上升一直到原子反應作用發生，更進一步增加能量。有相當長一段時間地球是保持現在的三層，同時地殼分裂成大陸和海洋。一般相信自古生代開始以來地球的狀況即達到今日所見者。

表 1.2 地質年代表

前寒武紀	{	太古代				
		原生代				
古生代 (2.2~6.0 億年)	{	寒武紀	{	無脊椎動物類三葉蟲		
		奧陶紀				
		志留紀				
		泥盆紀	{	直骨魚類		
		石炭紀				
二疊紀	{	兩棲動物類				
中生代 (0.7~2.2 億年)			{	三疊紀	{	鳥類、爬蟲類
		侏羅紀				
		白堊紀				
新生代 (7 千萬年)	{	第三紀 (哺乳動物類)	{	古第三紀	{	古新世
		第四紀 (人類)	{	更新世 (洪積世)		
					全新世 (沖積世)	{
			{	中新世		
					{	上新世

地球地質歷史年代的劃分列於表1-2 時間越近，地質年代的劃分越細，例如新生代的第四紀只追溯到 10,000 年前而第三紀則追溯到 7 千萬年前。目前在日本所常見的岩石大多數屬於第三紀，不過和現代地震發生最有關係的地殼形成過程是發生在第三紀或晚於第三紀，特別是第四紀。

地球是不停的在變動，這是因為地球內部的物質和地球以外的太陽不斷的供給能量所致。地球表面有侵蝕現象，不停的侵蝕高山和平原而產生土壤和石頭，

6 地震工程學

搬移至海底沉積。火山活動的噴出物和生物的遺體也堆積在海底。此外，在海洋底下地函物質有湧升而在大陸底下的物質則有沉回地球內部的傾向。結果使得大陸四周的地函因為對流和沉積物重量而下沉，而同一地區之地殼也向下彎曲形成槽狀稱作「地槽」。在地槽中間深陷的地殼長期承受高溫和高壓而導致沉積物發生變質和使地函物質侵入地殼而形成花崗岩。

只要有地函對流所產生的強大水平壓力存在，則上述地殼的下沉運動就會持續不停。然而由於此種下沉運動是和大地均衡互相對立的，所以一旦地函對流趨於緩慢或停止時，先前下沉部份即會因大地均衡作用而又浮起，甚至於使新形成的地塊高出海平面。隨後陸塊因為侵蝕減輕其重量而進一步升高，於是地平線上出現了崇山峻嶺。一般認為新的大陸面積是由上述過程而形成於舊有大陸的周圍。這種過程即所謂的造山運動（見圖 1.2）。

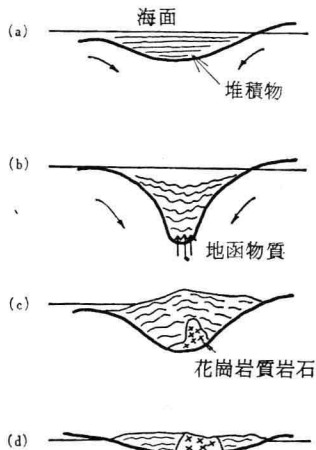


圖 1.2 造山運動示意圖

(a)地函對流和沉積物的重量(b)導致地槽的形成(c)地函物質侵入形成花崗岩。隨後地函對流趨於消沉而使大地均衡壓力作用以造成新的山脈(d)由侵蝕而減輕新地塊的重量，進一步促使大地均衡式的上升

從古生代以後的造山運動過程，我們已有粗略瞭解。在古生代以後至現在之

間這段 6 億年內，大陸面積即如圖 1.3 所示者有相當大幅度的擴大。值得注意的一件事乃是今日地震頻繁的地區也正是近代造山運動發達的地區。

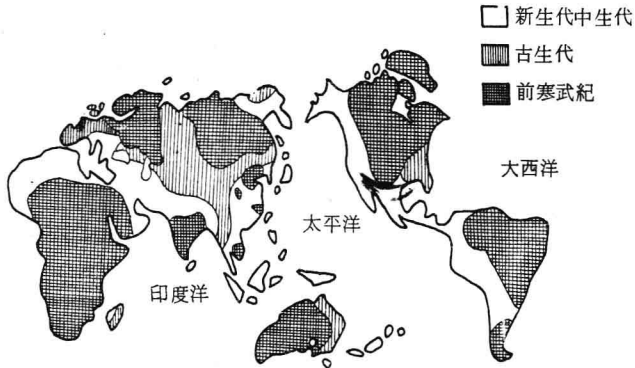


圖 1.3 由造山運動所形成的新陸地

1.3 地 震

(1) 震源

在大量能量儲蓄於地球內部和大陸不斷的增長的情況下，地球表面部份也發生各種變化，地震乃是其中的一種變化現象。地震乃是地殼或地函上部因突然受到擾動在短時間內釋放大量能量而引起地盤強烈振動的一種現象。一次地震所能釋放出來的最大能量大約是 5×10^{25} erg，這約佔每年地球經其表面所散失的總熱量的 $1/1,000$ 。

一個地震最先開始的地方稱作震源，而震源投影於地面之點即為震央。震源是根據在地表上不同地點所觀測到的地震波動而決定的。

在地表上的地震動幅度開始比較輕微而後突然增大。這種大幅度振動會持續相當一段時間，其後逐漸減弱。我們將初期比較輕微的振動稱作初動，而稍後大振幅的振動稱為主動，隨後部份則稱為餘動。

從稍後比較詳細的說明中，我們知道有兩種地震波動可以經由地殼傳播，一種為縱波或伸縮波，另一種為橫波或變形波。當能量在地震震源突然釋放時，這兩種波即同時開始向四面八方傳播出去。然而因為縱波的傳播速度較大，因此它

8 地震工程學

到達地面的時間也比較早。地震的初動部份即是由這種波所引起的。隨後而至的橫波和表面波則引起主動。

是故，假設

- s : 為自震源至觀測點的距離
- v_s : 為橫波傳播速度
- v_p : 為縱波傳播速度
- T : 為縱波與橫波到達時間差

則

$$T = \frac{s}{v_s} - \frac{s}{v_p} = \left(\frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_p} \right) s$$
$$\therefore s = \left(\frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_p} \right)^{-1} T \quad (1.1)$$

此處 T 可由觀測之初動持續時間求得，而 v_p 和 v_s 為當地的地質常數。所以，從震源至觀測點之距離大致和初動持續時間成正比例，其比例常數一般約為 8.0 km/sec。

當 s 從三個觀測點決定後，我們便可以這三個觀測點為中心，以對應各點之 s 為半徑劃三個球面，這三個球面之交接處即是震源所在。

如此所決定出來的震源乃是地震波動最先開始的地點，但並不一定就是釋放能量最多的地方。換言之，地震的真正發源地不一定局限於一個小區域；有時，地震發源地可能涵蓋相當大的範圍，甚至於只限於一個區域。例如，1923年的關東大地震的震源經決定是在南方約 10 km 之處，然而最大的地殼變動則發生於相模灣底下（見圖 1.7）。

大地震通常不僅一次即止。通常有一些地震會陸續發生，不過規模會逐漸減小。最初一次激烈地震稱為主震，隨後各次地震稱為餘震。餘震震源通常不和主震震源在一起。相反的，主震震源常位於餘震震源帶的邊緣上。餘震震源所佔的體積通常隨着主震後的時間而增大。一般相信初期微震發生的範圍即表示引起主震的能量貯存的範圍。圖 1.4 表示 1968 年十勝沖外海大地震餘震分佈範圍的面積高達 300 × 150 km。

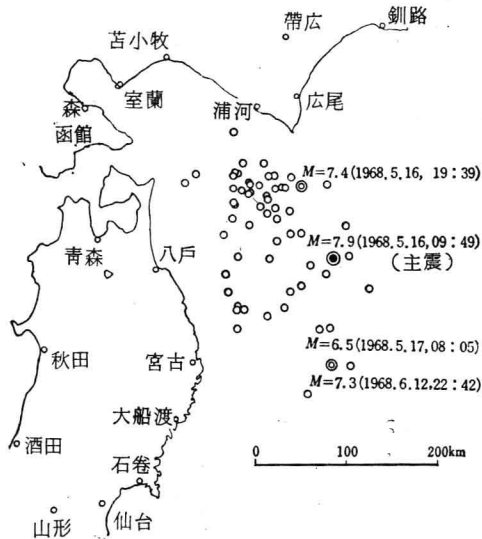


圖. 1.4 1968年5月16日海外地震的餘震分佈情形
 ◎: 主要餘震 ○: 餘震

在日本當地震按震源深度分類時，在地表下 30 km 以內者稱為極淺地震，30 至 100 km 深者稱為淺地震，而深於 100 km 者為深地震。在其他國家，深度在 60 km 以內者稱為淺地震，60 至 300 km 深者稱為中等深度地震，而深於 300 km 者為深地震。震源深度之最大限度約為 700 km。

(2) 地震起因

關於地震的起因，已有各種不同理論被提出以解釋地震的間歇性發生，規模有大小之別，以及不均勻的地域分佈等特性。目前流行的理論可歸納為兩種基本觀念，其一為岩漿活動，其二為造山力之作用後果。前一類理論將地震視作一種由岩漿強行侵入已經失去熱與應力平衡的半凝固的地殼部份，致使其中舊裂縫擴大或造成新裂縫，甚或因為岩漿狀態突然改變而引起的地殼突變現象。後一類理論將地震視作一種由造山力所引起並積蓄於地殼中的應變能突然釋放所造成的現象。一般相信此種造山力是因為地函中的對流運動所產生的。