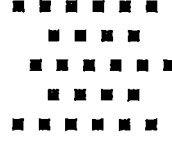


強震動

観測記録とその特性

翠川三郎

[著]



朝倉書店

1

強震動の観察

目次

1. 強震動の観察	1
1.1 揺れの強さを表す尺度	1
1.2 大地震での揺れと被害	4
1.3 震源近傍での激しい地震動の痕跡	10
2. 強震動の観測	18
2.1 強震観測の歴史	18
2.2 強震計の種類	22
2.3 強震動データ	27
3. 震源域およびその周辺で観測された強震記録	30
3.1 震源域およびその周辺での観測事例	30
3.2 大振幅の強震記録の最大加速度・速度	53
4. 強震記録にみられる地震動の特性	60
4.1 地震動特性の支配要因	60
4.2 震源特性	60
4.3 伝播特性	63
4.4 地盤特性	66
5. 強震動の予測	76
5.1 強震動の予測手法	76
5.2 地震動の距離減衰式	78
5.3 地震ハザードマップ	87
5.4 建築物の動的解析で用いられる設計用入力地震動	96
索引	109

1.1 揺れの強さを表す尺度

地震時の揺れの強さを表す尺度として、震度階が古くから用いられてきた。これは、人体感覚や周囲の物体の挙動、構造物の被害などから地震の揺れの大きさを順序づけしたもので、19世紀に提案された(池上, 1987)。初期に提案され広く利用されたものとして、1883年に提案されたロッシンフォームレベル震度階があげられる。現在は、これを改良した12階級(I~XII)からなる改正メルカリ震度階が国際的に広く用いられている。わが国では、4階級からなる関谷の震度階がロッシンフォームレベル震度階とほぼ同時期に提案され用いられた。これが1898年に中央気象台(気象庁の前身)により7階級(0~VI)に細分化され、1948年福井地震を契機に震度VIIが追加され8階級となった。このように、わが国で用いられている気象庁震度階は改正メルカリ震度階とは異なる生い立ちを持つが、両震度階のいずれも、低震度では人体感覚が、中震度では周囲の物品の挙動が、高震度では構造物の被害が、それぞれ主な判定基準となっている。このことは、後述する気象庁の震度階級関連解説表からも読み取れる。

日本で組織的な震度観測は、1884年に内務省地理局が全国の測候所、府県庁、郡区役所など約600ヵ所に対して地震が観測された際に震度を報告するよう依頼したことに始まる(気象庁, 1986)。1904年には気象官署や民間への委託をあわせ1,437の観測所から震度のデータが収集された(気象庁, 2009a)。当時は、地震計による観測がまだ十分でなく、地盤現象の把握は、震動の強弱や揺れの方向等についての体感や被害調査等により行われていた。昭和30年(1955年)代もほぼ同数の観測点が維持されていたが、地震計による観測を中心とした業務の構築が行われてきたことから地震観測としての震度観測はその役目を終え、1958年から順次観測所の整理が行われた。1988年には、全国158ヵ所の気象官署において震度観測が行われるのみとなった(気象庁, 2009a)。

このように、1県当たり30点程度だった震度観測がその1/10の粗いものとなったこともあり、大地震が発生した際に各地の震度が通信アンケート調査によって調査されるようになった。例えば、1943年から1968年にかけて18の被害地震で調査がなされた(佐藤, 1973)。その後、太田・他(1979)はアンケート調査による震度の精度向上のために調査法を改良し、この方法により、1995年兵庫県南部地震も含め多数の被害地震でアンケートによる震度が調査されている。近年では、郵送でなく、インターネットを利用した国際的な震度調査も行われている(Wald et al., 2012)。

1980年代後半より、気象庁は、観測員の主観による精度不足や震度発表の迅速化などの問

5.2 地震動の距離減衰式

a) 距離減衰式の歴史

ある一つの地震の際に各地点で観測された最大加速度と距離の関係プロットすると、図5.2のように、振れの強さは震源からの距離とともに減衰する。距離減衰式は、観測データから図の曲線のような平均的な関係を求めて、地震規模や震源からの距離などの数少ない簡単な情報だけで地震動の強さを予測する式である。なお、距離減衰式は、距離による地震動の減衰だけでなく地震規模などの影響も含めて地震動の強さを決めるものである。距離減衰式では意味が狭くとらえられる恐れがある。そこで、最近では地震動予測式と呼ばれる場合も増えているが、ここでは、従来通り距離減衰式と呼ぶこととする。

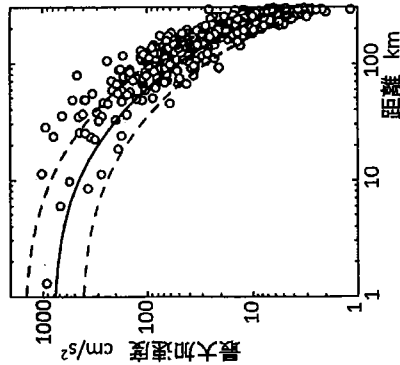


図 5.2 2000 年島根県西部地震での最大加速度の距離減衰

距離減衰式は観測記録に基づくが、初期の距離減衰式の濠川の際には、利用できる強震記録に限られていることから、工夫がなされている。米国では、1930年代に強震観測が開始され、1940年代から地震動の最大加速度と地震規模や震央距離の関係が検討されはじめ (Gutenberg and Richter, 1942)、1956年に最大加速度の距離減衰式が提案された (Gutenberg and Richter, 1956)。この距離減衰式は1933年から1954年までにカリフォルニアで得られた約200の強震記録に基づいている。震源近傍の記録はほとんどないが、震央直上で推定された震度の値から震央距離が0での最大加速度の値を推定して距離減衰式を構築している。

日本では、1950年代から金井による強震動の研究がなされ、 M および震央距離、地震の卓越周期をパラメータとした地震動の距離減衰式が提案され、この式が1933年から1957年までにカリフォルニアで観測された強震記録の最大加速度をおおむね説明することが確認されている (Kanai, 1961)。この式は、日本で強震記録がほとんどない時期に、変位の距離減衰をまず坪井式に、日立川の基礎での地震動の観測結果と地震の振動特性に関する半実験式を組み合わせて巧妙に構築されたもので、その導出過程は田中 (1985) により解説されている。その後、1966年の松代群発地震の臨時強震観測により震源付近で得られた強震記録を用いて、震源近傍まで適用可能なように式が改訂された (Kanai et al., 1966)。これが金井の距離減衰式と呼ばれ、その後、日本では長い間利用された。

その後、米国では、1971年サンフェルナンド地震や1979年インペリアルバレー地震で多数の強震記録が得られるたびに、多くの距離減衰式が提案されてきた。日本でも、1988年十勝沖地震などで多数の記録が得られるようになり、例えば、1963年から1970年に得られた330記録から距離減衰式がKatayama (1974) により提案されている。さらに、1995年兵庫県南部地震で震源付近での記録が得られたり、K-NETなどの強震観測網が充実したりし

て、利用できる記録が増加するたびに、多くの距離減衰式が提案されるようになった。既往の米国の研究については、Trifunac and Brady (1976)、Campbell (2003) などにより、わが国のものについては、望月 (1983)、翠川 (2009) などにより、世界各地のものについては、Douglas (2016) などにより、それぞれレビューがなされている。

文 献

- 1) Campbell, K.: Strong-motion attenuation relations, International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology Part B, Academic Press, pp.1003-1012, 2003.
- 2) Douglas, J.: Ground motion prediction equations 1964-2016, <http://www.gmpe.org.uk/gmpeport2014.pdf> (last access 2016/12/13).
- 3) Gutenberg, B. and C.F. Richter: Earthquake Magnitude, Intensity, Energy, and Acceleration, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.32, pp.163-191, 1942.
- 4) Gutenberg, B. and C.F. Richter: Earthquake Magnitude, Intensity, Energy, and Acceleration (Second Paper), Bull. Seism. Soc. Am., Vol.46, pp.105-145, 1956.
- 5) Kanai, K.: An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motion, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. of Tokyo, Vol.39, pp.85-95, 1961.
- 6) Kanai, K., K. Hirano, S. Yoshizawa and T. Asada: Observation of strong earthquake motions in Matsushiro area, Part 1, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. of Tokyo, Vol.44, pp.1269-1296, 1966.
- 7) Katayama, T.: Statistical Analysis of Peak Accelerations on Recorded Earthquake Ground Motions, 生茂研究, Vol.26, pp.18-20, 1974.
- 8) 翠川三郎: 地震動強さの距離減衰式, 地震動, Vol.61, pp.5471-477, 2009.
- 9) 望月利男: 強震動と最大地動予測式, 地震動と地震—地震動シンポジウム10年の歩み—, 日本建築学会, pp.62-81, 1983.
- 10) 田中貞二: 金井式に関する調査, ORI 研究報告 85-02, 大崎総合研究所, 37pp., 1985.
- 11) Trifunac, M. and A. Brady: Correlations of peak acceleration, velocity and displacement with earthquake magnitude, distance and site conditions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.4, pp.455-471, 1976.

b) 距離減衰式を構成する要素

地震動の振幅 (A) は震源からの距離 (X) とともに減衰するが、距離が非常に近くなると、振幅は飽和する傾向がみられる。また、地震条件によっても地震動の強さは異なる。さらに、地震規模 (M) が同じでも地震のタイプ等によって地震動の強さは変わる。距離減衰式ではいくつかのパラメータを説明変数とした関数を仮定して、観測値を回帰分析して求められる場合が多い。例えば、司・翠川 (1999) の距離減衰式では以下のような関数型が用いられている。

$$\log A = aM - b \log(X + d(M)) + c_1 + e_j + fD - kX \quad (5.1)$$

右辺の第1項の a は地震動強さが地震規模 M に依存する割合を示す係数で、地震動強さとして最大加速度を用いた場合には0.5の値をとり、最大速度の場合には0.6程度とやや大きくなる。第2項の b は断面面積距離 X [km] による減衰の割合を表す係数で、1の値がよく用いられ、ごく浅い地震の場合には観測結果をよく説明している。図5.2からわかるように、距離が近いところでは地震動の強さは距離によらず一定の値に収束する傾向があることから、 X に $d(M)$ を加えることで、 X が0になっても地震動強さ A は飽和するようになっている。図5.3に $M = 6 \sim 8$ での最大加速度の距離減衰を示す。

$d(M)$ を M の関数としているのは、地震動の強さが飽和しはじめると距離が地震規模により異なり、その結果、震源に非常に近いところでは地震動の強さは地震規模によってあまり変化

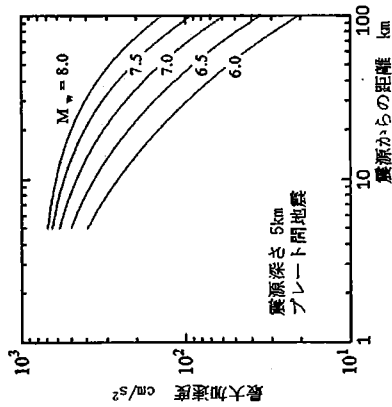


図 5.3 司・翠川 (1999) の距離減衰式の M 依存性

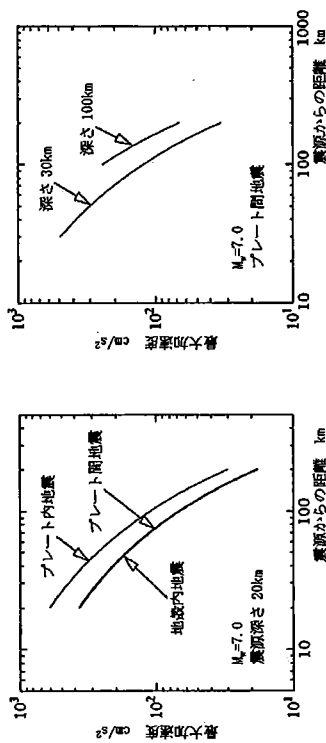


図 5.4 地震タイプによる影響

図 5.5 震源深さによる影響

しないという観測事実からである。既往の距離減衰式では、標準的な地震で $500 \sim 1,000 \text{ cm/s}^2$ 程度の最大加速度値で飽和するものが多い。ただし、後述するように距離減衰式からの値と個々の観測値との差は小さくないので、このことが震源近傍での最大加速度が $1,000 \text{ cm/s}^2$ を上回らないということの意味するものではない。

第3項の α_j は地震条件による変数で、通常の地震に対しては深さ 30 m までの地震の S 波速度 V_{s30} [m/s] となる結果となっている。最大加速度に対しては深さ 30 m までの地震の S 波速度 V_{s30} [m/s] を変数とした関数を用いられている。第4項の e_j は地震のタイプ j による変数で、図 5.4 に示すように、スラブ内地震ではプレート間地震や地震内地震に比べて最大加速度が 3 割程度大きくなる結果となっている。第5項の f は震源深さ D [km] に依存する割合を示す係数で、図 5.5 に示すように、震源深さが 50 km 深くなると最大加速度が 3 割程度大きくなる結果となっている。最後の項は伝播経路での粘性減衰等を表す項で、距離が遠い場合に影響を及ぼす。結局、この式では、地震の規模・タイプ・深さや、観測点の地震条件、震源から観測点までの距離、の5つのパラメータ(説明変数)で地震動の強さが予測される。表 5.1 にこれら

表 5.1 司・翠川 (1999) の距離減衰式の係数

	a	b	d(M)	c_1	c_2	c_3	f	k
最大加速度 [cm/s ²]	0.5	1	$0.0055 \cdot 10^{0.5M}$	0 (地震) -0.146(岩盤)	0.61(地震内) 0.62(プレート間) 0.83(プレート内)		0.043	0.003
最大速度 [cm/s]	0.58	1	$0.0028 \cdot 10^{0.5M}$	$1.83 - 0.66 \log V_{s30}$	-1.29(地震内) -1.31(プレート間) -1.17(プレート内)		0.038	0.002

の係数の値を示す。この式は、地震動強さとして最大加速度および最大速度を対象としているが、応答スペクトルを始めとしてエネルギー・スペクトルや震度などの地震動強さを対象としたものも多数提案されている。

文 献

- 1) 司 宏俊・翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第 523 号、pp.63-70, 1999.

c) 距離減衰式のパラツキ

距離減衰式は個々のデータから得られる平均的な関係であり、図 5.2 に示したように、実際の個々の観測結果は距離減衰式からパラツキを持って分布している。確率的な地震動評価において低確率での地震動強さは、このパラツキに大きく支配されるため、近年の研究では、距離減衰式から得られる平均的な地震動強さのみならず、そのパラツキについても重要視されている。

図 5.6 は司・翠川 (1999) の距離減衰式からの最大加速度値に対する観測値の比をとり、その対数の値の頻度分布を示したものである。距離減衰式に対する観測値のパラツキは対数正規分布となっている。この場合の標準偏差は 0.3 であり、既往の他の距離減衰式の標準偏差も同程度の値を示す。距離減衰式に対する標準偏差が 0.3 程度であることが、地震動の予測精

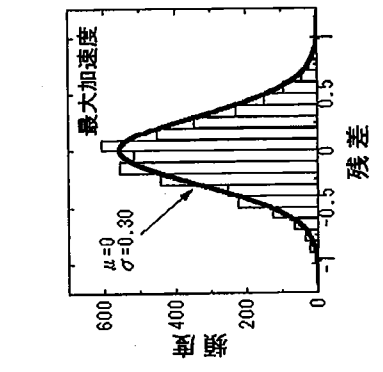


図 5.6 距離減衰式からの観測値の残差の分布

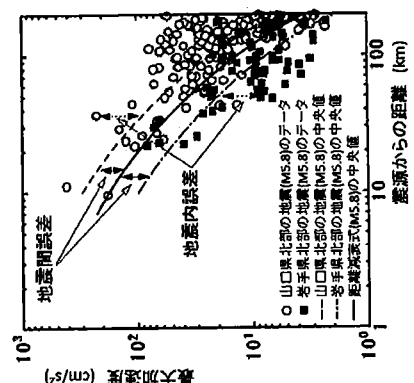


図 5.7 地震内地震と地震間地震の説明図

卓越周期 67, 71
 断層破壊伝播効果 63, 82, 83
 断層長短距離 64, 79
 断層モデル 34, 40, 61, 101
 単体の転倒 10, 11
 長周期地震動 72, 74, 102, 103, 105
 跳躍現象 14, 16
 ディレクティブイ効果 63
 デジタル式強度計 23, 26
 伝播特性 60, 63, 82
 東北地方太平洋沖地震 (2011 年) 14, 50, 54, 99
 十勝沖地震 (1968 年) 19, 35
 十勝沖地震 (2003 年) 102
 な行
 長野県西部地震 (1984 年) 12
 南海トラフ巨大地震 101, 103
 新潟県中越地震 (2004 年) 12, 47
 新潟地震 (1964 年) 19
 入力地震動 96-99, 103

濃尾地震 (1891 年) 12
 ノースリッジ地震 (1994 年) 41, 63
 は 行
 ハイブリッド手法 77, 91, 100-102
 パークフィールド地震 (1966 年) 34
 パークフィールド地震 (2004 年) 45
 バコイマダム 37, 42
 八戸港湾 35, 37, 97, 98
 半経験的手法 76, 77, 101, 102
 兵庫県南部地震 (1995 年) 5, 12, 19, 43, 63, 99
 表面地震 66, 69
 表面波 72-74
 福井地震 (1948 年) 4, 19
 ら 行
 理論的手法 76, 77, 86, 102
 ロングヒューズ地震 (1933 年) 18, 30

著者略歴
 翠川三郎 (みどりかわ・まふろう)
 1953 年 東京都に生まれる
 1980 年 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了
 現在 東京工業大学 環境・社会理工学 建築学系・教授
 工学博士

強 震 動
 — 観測記録と その特性 —

2018 年 2 月 20 日 初版第 1 刷
 2018 年 6 月 25 日 第 2 刷

著 者 翠 川 三 郎
 発行者 朝 倉 誠 造
 発行所 株式会社 朝 倉 書 店
 東京都新宿区新小川町 6-29
 郵便番号 162-8707
 電 話 03 (3260) 0141
 F A X 03 (3260) 0180
 http://www.asakura.co.jp

(検印省略)
 ©2018 (無断複写・転載を禁ず) 印刷・製本 デジタルペブルリッシングサービス
 ISBN 978-4-254-26648-1 C3052 Printed in Japan

ICOPY <(社)出版者著作権管理機構 委託出版権>
 本書の複製権等は著作権法上での例外を除き禁じられています。複写される場合は、
 そのつと事前に、(社)出版者著作権管理機構 (電話 03-3513-6969, FAX 03-3513-
 6979, e-mail: info@copy.or.jp) の承諾を得てください。

定価は表紙に表示