

(60) 神戸における地震危険度解析

清水建設(株) 技術研究所 正会員 石川 裕
同 和泉研究室 同 奥村俊彦

1. はじめに

本報告では活断層を考慮した地震危険度評価の考え方を整理した上で、神戸を対象とした確率論的地震危険度解析ならびに確率論的想定地震の算定を行った。その結果に基づき、本年1月の兵庫県南部地震の際に記録された最大加速度の再現期間について検討した。

2. 活断層を考慮した地震危険度評価の考え方

(1) 評価手順

図-1に活断層を考慮した地震危険度評価のフローを示す。基本的には①過去の地震、②周辺の活断層、③特定の地震、に基づき確率的に想定地震を設定する流れと、確率論的地震危険度解析を行なう流れに分けられる。後者の手法として、④過去の地震発生データに基づく解析と⑤活断層データに基づく解析がある。そして、想定地震と確率論的地震危険度解析を結びつける概念として、著者ら¹⁾が提案している⑥確率論的想定地震の考え方が利用できる。

このうち①については、過去に発生した地震のうちサイトに大きな地震動をもたらしたと推定されるものの再来を考えるものである。②はサイト周辺の活断層を調査し、その断層の活動による地震を想定するものである。地震の規模や位置を評価するための活断層データベースとしては「日本の活断層」²⁾やそれを基に1回の地震で活動する断層を整理し直した「起震断層」³⁾がある。しかし、一般に個々の活断層はA級活断層でも平均活動間隔は数百~1,000年のオーダーであり、周辺に活断層が分布しているからと言ってやみくもにそれを危険と決めつけるのは工学的に妥当な判断とは言えない。松田⁴⁾は活断層がある程度近い将来に活動するかもしれない目安として、活断層の平均活動間隔と最近の活動からの経過時間に基づき「要注意活断層」を指摘しており、こうした考えが活断層選定の参考となる。ただし、活断層の諸元にはきわめて大きな不確実性があり、平均活動間隔といってもせいぜい100年オーダーの精度で議論できるにすぎないことは認識しておく必要がある。③特定の想定地震とは過去の地震活動様式の分析や地震地体構造などに基づいて、そのような地震は必ずしも過去には発生していないものの、近い将来発生が懸念されている地震を意味する。駿河湾を震源とする東海地震などがこれに当たる。

確率論的地震危険度解析は従来、④過去の地震発生データに基づくものが一般的であった。最近、⑤活断層データに基づく地震危険度解析も研究されている(例えば文献5)が、後述するような問題点が検討課題として残されている。

以上に示したような考え方により想定地震は設定されるが、そこには多くの不確実性が含まれる。特に、その地震の発生頻度に関してはあいまいな場合が多く、こうした点で想定地震とサイトの地震危険度との関係は明瞭にされていない。このような背景から、著者ら¹⁾は想定地震と確率論的地震危険度解析を統一的な枠組みで議論するため、⑥確率論的想定地震の概念を提案している。

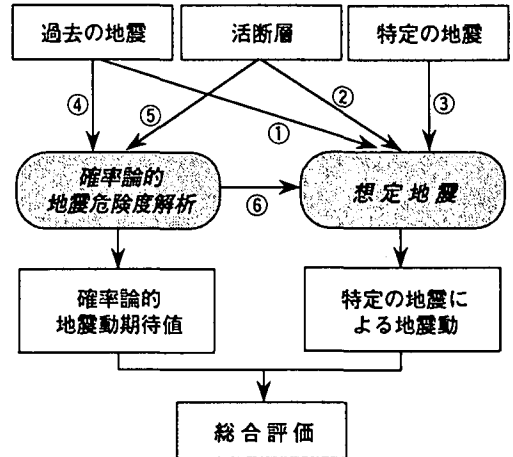


図-1 地震危険度評価のフロー

(2) 評価結果の解釈

以上の方法により地震危険度評価を行なうと、複数の想定地震による地震動とある期間を考慮した地震動強さの確率論的期待値が評価される。上述したように、想定地震は地震の規模や位置は明瞭ではあるが、そのような地震の将来の発生頻度に関しては不明確な場合が多い。一方、地震動強さの確率論的期待値あるいは確率論的想定地震による地震動を評価する場合には再現期間などのリスク指標をどう設定するかがポイントとなる。したがって、最終的に地震動あるいは地震荷重を設定するには、こうした評価結果の性格の違いを理解しておくと同時に、対象となる構造物の構造特性（ねばり強さなど）、重要度、経済性などを総合的に踏まえた判断が必要となる。今後は構造物や施設の重要度の概念が明確にされ、それに応じて異なる強さの地震動をきめ細かく評価することが要求されるようになると思われる。

本報告では以下、図－1に示したフローのうち、④地震発生データならびに⑤活断層データに基づく地震危険度解析と、活断層を考慮した場合の⑥確率論的想定地震について論じる。

3. 活断層を考慮した地震危険度解析と確率論的想定地震

(1) 活断層を考慮した地震危険度解析の方法

活断層を考慮した地震危険度解析については既にいくつかの研究例（例えば文献5）が報告されているが、次のような問題点が検討課題として残されている。i) 活断層のモデル化（グループ化とセグメント化）、ii) 活断層の諸元および諸関係式に含まれる不確定性の評価、iii) 活断層データと地震発生データの解釈と組み合わせ。

兵庫県南部地震を見ても明らかのように、1回の地震で活動する断層は1本の活断層とは限らない。また、非常に長い断層では1回の地震で全体が動くとは限らない。こうした点を考慮して活断層をモデル化する作業がi)の問題である。本報告では、このような問題点を踏まえて活断層データを整理し直した松田³⁾による「起震断層」を地震危険度解析における活断層モデルとして用いる。ii)については、例えば断層の平均変位速度の値が1オーダー変われば、その活断層での地震発生率も1オーダー変化するというように、場合によっては結果に大きく影響する重要な問題である。感度解析などの不確定性評価を行なって影響の大きい要因を把握していく必要があるが、本報告ではこの問題については扱わない。iii)に関して、亀田・奥村⁴⁾は一つの解決策として、地域ごとに個別のデータに基づき算定された地震発生率のうちの大きい方を採用することを提案している。この考え方は両データのもつ欠点を補う意味で有用であるが、地域によってはいずれかのデータに基づく情報が消えてしまうことになる。そこで、本報告では両データを独立と見なし、両データに基づく結果を足し合わせた解析を行なってみる。もちろん、地震発生データの中で特定の活断層の活動であることが明らかなものについては、いずれかのデータよりその地震の分を除いておく必要がある。また本報告では、活断層の活動による地震も経時的にポアソン過程に従うと仮定するが、最新の活動履歴が明らかな活断層については、本来、その時点からの時間依存性を考慮すべきであると考えられる。

本報告では、1回の地震により個々の活断層モデルの全長が破壊すると仮定し、その際の地震のマグニチュード（固有規模）は断層の長さに応じて松田式⁵⁾により求める（固有地震モデル）。地震発生頻度は平均変位速度と地震時の断層変位量との比により算定する。地震時の断層変位量は地震マグニチュードとの関係式⁶⁾により評価する。

(2) 確率論的想定地震

次に、活断層を考慮した場合の確率論的想定地震¹⁾について検討する。確率論的想定地震とはサイト地震動について与えられたリスクレベルのもとで、発生の条件付確率（貢献度）が大きい地震域に対して設定された想定地震であり、その諸元としてはハザード適合マグニチュード・震央距離・震央方位⁷⁾を用いる。この考え方をいけば考慮するリスクレベルとともに対象とする地震動の周期帯域に応じて、

合理的かつ定量的に想定地震を設定することができる。

本報告では活断層を考慮するため、個々の活断層モデルについても地震域の一つとして考える。以下では、地震発生データと活断層データを個別に用いた場合に加えて、両データを足し合わせた地震危険度解析ならびに確率論的想定地震について検討を行なう。

4. 神戸における解析例

(1) 活断層を考慮した地震危険度解析

以上に述べた手法を用いて神戸における地震危険度解析を行なう。ここでは対象とする地震動指標は地表における最大加速度とし、そのアテニュエーション式は福島・田中式⁹⁾を用いる。式に含まれるばらつきは対数標準偏差が0.5の対数正規分布でモデル化している。

地震発生データに基づく地震危険度解析の方法は標準的なもの¹⁾である。地震域モデルを図-2に示すが、ここでは12分割のモデルの他に南海地震 ($M=8.0\sim8.4$, $\Delta=130\text{km}$) を別個にモデル化している。ただし、南海地震も含めてすべての地震ともポアソン過程に従うと仮定している。図-3には活断層データに基づく地震危険度解析で用いた活断層モデルを、表-1にはそのうちの主な活断層の諸元を示す。活断層モデルは基本的に「起震断層」³⁾に基づいているが、直線でモデル化しているなどの理由により、表-1には一部文献³⁾と値が異なっているものもある。同表に示しているように、本報告では六甲断層帯の平均変位速度を文献⁴⁾に基づいて0.8mm/年と仮定している。

図-4に地震発生データに基づく解析結果(細実線)と活断層データに基づく解析結果(細点線)を比較して示す。最大加速度が200Gal以下の範囲では地震発生データに基づく結果の方がやや大きめの年超過確率を与えるが、それ以上の加速度レベルでは活断層データに基づく年超過確率の方が大きくなる。図-4中、太い実線で示した結果が両データによる解析結果を足し合わせたものである。地震発生データと活断層データを足し合わせた解析結果を用いても、神戸における最大加速度の100年再現期待値はおおよそ200Galである。また、兵庫県南部地震で経験した600~800Galという最大加速度の年超過確率は 10^{-3} 以下、すなわち再現期間では1,000年以上ということになる。

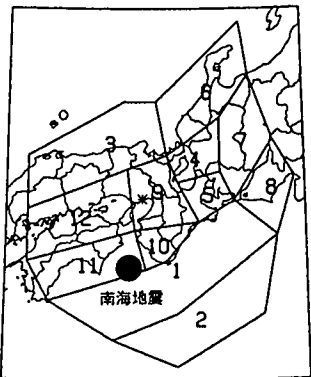


図-2 地震域モデル

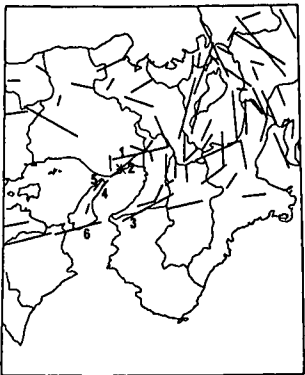


図-3 活断層モデル

表-1 主な活断層の諸元

	活断層名	活動度	平均活動 間隔(年)	断層 長(km)	M	最短距 離(km)	$\hat{A}_{max}$ (Gal)
1	有馬・高槻断層帯	B	約8,300	52	7.7	10	500
2	六甲断層帯	B*	約3,100	31	7.3	0.5	636
3	MTL和泉・金剛断層帯	A	約840	53	7.7	42	254
4	淡路島東岸断層帯	B	約3,500	22	7.1	16	344
5	淡路島西岸断層	B	約2,200	14	6.7	19	256
6	MTL淡路島南縁断層帯	A	約700	44	7.6	52	198

* 六甲断層帯の平均変位速度は0.8 (mm/年)としている。
 $\hat{A}_{max}$ はその活断層が活動した場合の最大加速度の中央値。

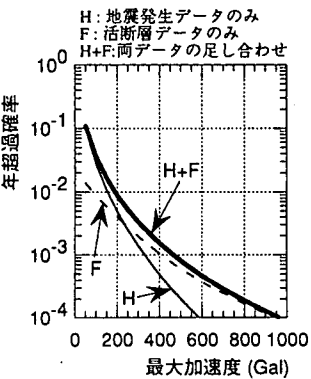


図-4 神戸におけるハザード曲線

(2) 確率論的想定地震

表－2に神戸における確率論的想定地震について解析した結果について、年超過確率が0.01および0.001の場合の各地震域（活断層）の貢献度を示す。

地震発生データのみに基づく結果では、最大加速度を対象としていることもあって、いずれの場合とも直下地震（地震域No.9）の貢献度が圧倒的に大きくなっている。

活断層データのみに基づく結果のうち、年超過確率が0.01の場合には多くの活断層が貢献してくるが、なかでも地震発生頻度が高いA級活断層である2本のMTLの貢献度が大きい。一方、年超過確率が0.001になると、神戸近傍に

位置する活断層の貢献度が相対的に大きくなり、なかでも六甲断層帯の貢献度が26%と最も大きくなる。

両データを足し合わせた場合の貢献度は2つのケースとも、個々のデータに基づく結果を折衷した形となっている。ただし、この結果には地震発生データに基づく解析で用いる地震域モデルの大きさが影響してくるため、その設定方法ならびに活断層モデルとの整合方法について今一度吟味が必要である。

5. むすび

兵庫県南部地震の発生を見た今、今後の地震危険度評価においては、活断層の情報を何らかの形で取り入れていく必要性が指摘できる。こうした観点から、本報告では活断層データを考慮した地震危険度解析ならびに確率論的想定地震について検討を加えた。ここで示した方法は一つの試案であり、今後種々の条件の再吟味が必要なことは十分認識している。特に、文中でも述べたように、活断層データには地震源としてのモデル化や発生頻度の評価などに大きな不確実性が含まれることから、こうした点を工学の問題にいかに取り込んでいくかについても含めて、今後総合的に検討を加えていきたい。

本報告をまとめるにあたっては京都大学教授・亀田弘行先生から多くの有用な意見をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 亀田弘行・石川 裕・中島正人：想定地震の工学的設定法に関する研究，京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告，別冊第14号，1994.
- 2) 活断層研究会編：〔新編〕日本の活断層一分布図と資料，東京大学出版会，1991.
- 3) 松田時彦：最大地震規模による日本列島の地震分帯図，地震研究所彙報，Vol.65，pp.289-319，1990.
- 4) Matsuda, T.: Active Faults and Damaging Earthquakes in Japan — Macroscopic Zoning and Precaution Fault Zones, Maurice Ewing Ser., Vol.4, Am. Geophys. Union, pp.271-289, 1981.
- 5) 亀田弘行・奥村俊彦：活断層データと歴史地震データを組み合わせた地震危険度解析，土木学会論文集，第362号/I-4，pp.407-415，1985.
- 6) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について，地震，第2輯，第28巻，pp.269-283，1975.
- 7) 亀田弘行・石川 裕：ハザード適合マグニチュード・震央距離による地震危険度解析の拡張，土木学会論文集，第392号/I-9，pp.395-402，1988.
- 8) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, Shimizu Technical Research Bulletin, No.10, pp.1-11, 1991.

表－2 確率論的想定地震の貢献度

地震域（活断層）	年超過確率 0.01			年超過確率 0.001		
	H	F	H+F	H	F	H+F
	153 (Gal)	83 (Gal)	189 (Gal)	329 (Gal)	406 (Gal)	464 (Gal)
直下地震（No.9） (M:6.4～6.9・Δ:25～30km)	71%	—	43%	87%	—	25%
南海地震 (M:8.2～8.3・Δ:130km)	15%	—	7%	6%	—	<5%
1：有馬・高槻断層帯	—	<5%	<5%	—	8%	7%
2：六甲断層帯	—	<5%	<5%	—	26%	24%
3：MTL和泉・金剛断層帯	—	12%	9%	—	21%	14%
4：淡路島東岸断層帯	—	<5%	<5%	—	11%	8%
5：淡路島西岸断層	—	<5%	<5%	—	8%	5%
6：MTL淡路島南縁断層帯	—	14%	8%	—	11%	6%

(注) H：地震発生データのみによる結果，F：活断層データのみによる結果，H+F：両データを足し合わせた結果。