

兵庫県南部地震による上水道停止期間と地震動のマクロ的相関について

中村孝明¹, 静間俊郎², 藤井俊二³, 飯塚崇文³

¹正会員 工博 株式会社篠塚研究所 (〒160-0023 新宿区西新宿4-5-1 幸伸ビル新宿)

²正会員 工修 株式会社篠塚研究所 (〒160-0023 新宿区西新宿4-5-1 幸伸ビル新宿)

³非会員 工博 大成建設株式会社 技術研究所 建築研究部 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

兵庫県南部地震による上水道の供給停止被害に着目し、停止期間と地震動とのマクロ的相関を前提に、地震動の大きさ (PGA) に応じた停止期間を推定する一価関数を統計的に求めた。統計結果として、上水道の停止期間には上限があり、その平均はおよそ42.3日である。PGAが180Gal以下の場合、1日以内に供給される可能性が高い。停止期間の予測は大きなばらつきを伴うため、評価した関数は1次情報として扱うのが適当と考えられるが、簡便さという点では実用的である。

Key Words : *earthquake disaster, water supply recovery, regression analysis, maximum likelihood method*

1. はじめに

ライフラインの供給停止が長期になれば、市民生活や企業活動に与える影響は甚大なものとなる。しかし、数時間あるいは1日程度で復旧するのであれば、その影響は極めて小さい。地震被害想定や地震リスクマネジメント¹⁾では、構造物被害に加えライフラインの供給停止も重要な被害要因として考えなければならず、特に供給が再開されるまでに要する時間の予測が重要となる。

ライフラインの停止期間は、地震動の大きさ、ライフライン施設の脆弱性、設置地盤、ライフライン網のシステム構成、復旧方法、復旧のための作業人員の数や配置状況など、様々な要因に関係する。このため、本来であれば対象地域のライフラインのシステム構成や脆弱性を調べた上で、想定地震による被災状況を予想し、復旧戦略を想定し、各地域での停止期間を推定することが望ましい。しかし、このような作業は煩雑で労力も多大に掛かる上に、想定地震や被害の様相、復旧戦略、確保できる作業人員など、条件が変われば違った結果となることが予想され、停止期間の予測は基本的に難しい。特に、特定の施設を対象とした地震

リスクマネジメントあるいは自治体が行う地震被害想定では、ライフライン網のシステム構成や脆弱性を考慮した予測は、労力面から見ても現実的とは言い難い。

本報は、上水道の供給停止に着目し、停止期間と地震動とのマクロ的相関を前提に、地震動の大きさを指標とした上水道停止期間を評価する一価関数を、兵庫県南部地震の被災情報から統計的に評価する。

2. 情報収集と整理

停止期間と地震動の関係を捉える上で、地域毎の停止期間と地震動の大きさを一対で対応させる必要がある。本報では町丁目を単位とし、地震動の大きさは地表面最大加速度 (PGA) を採用する。上水道の被害状況については、神戸市²⁾、西宮市³⁾、宝塚市⁴⁾の各水道局がその詳細を報告書として取りまとめている。停止期間については、供給再開までに要した期間を地域毎に地図上に色別表示している。そこで、色別されたエリアを白地図等に転写し、町丁目毎の上水道停止期間を同地図から拾うこととした。一例として西宮市の町丁目毎の上水道停止期間ならびに地震動の大きさ

表-1 各町丁目毎の上水道停止期間とPGA
(西宮市の一例)

液状化 判定	町丁目	PGA (Gal)	停止期間 (日数)
0	西宮市大谷町	553	42
0	西宮市松園町	548	42
0	西宮市霞町	547	42
0	西宮市羽衣町	544	42
0	西宮市寿町	540	42
0	西宮市千歳町	538	42
0	西宮市安井町	535	42
0	西宮市末広町	534	42
0	西宮市分銅町	532	42
0	西宮市常磐町	530	42
0	西宮市城ヶ堀町	529	24
0	西宮市平松町	528	42
0	西宮市中前田町	525	42
0	西宮市江上町	524	24
0	西宮市郷免町	522	42
0	西宮市中須佐町	521	42
0	西宮市榎塚町	520	42
0	西宮市中殿町	518	42
0	西宮市御茶家所町	518	42
0	西宮市森下町	518	33
0	西宮市弓場町	517	42
0	西宮市津田町	517	42
0	西宮市神明町	514	33
0	西宮市屋敷町	514	42
0	西宮市西福町	513	33
0	西宮市両度町	513	33

(PGA)を表-1に示す。PGAは篠塚研究所の推定結果であり、推定方法ならびに結果の詳細については文献5)を参照されたい。また、大規模の液状化が発生した地域ならびに地震動の推定範囲外の地域は除外し、最終的に神戸市2064、西宮市338、宝塚市253、合計2655の町丁目の停止期間ならびにPGAの一対データを整えた。PGAによる停止期間の散布状況を図-1に示す。図中停止日数0日は、地震直後も概ね給水可能であるか、あるいは1日程度で給水が可能となった地域である。図より、ばらつきは大きいものの、地震動と停止期間には概ね相関があることが分かる。また、加速度の大きい範囲では停止期間の頭打ち、すなわち上限があることが分かる。ちなみに、停止期間は最大で73日、PGAの最小は277Gal、最大は757Galであった。

3. 統計処理方法

停止期間の推定は、図-1の散布データから最小2乗法によって回帰式を求めることが一案として考えられる。しかし、通常の最小2乗法は誤差の分布(縦の分布)が正規分布に規定されてしまうため、加速度の小さい領域ではマイナスの停止期間が暗に取り込まれてしまう。そこで、正規分布の代わりに下限値を0とする関数を採用する必要がある。下限値を持つ分布は

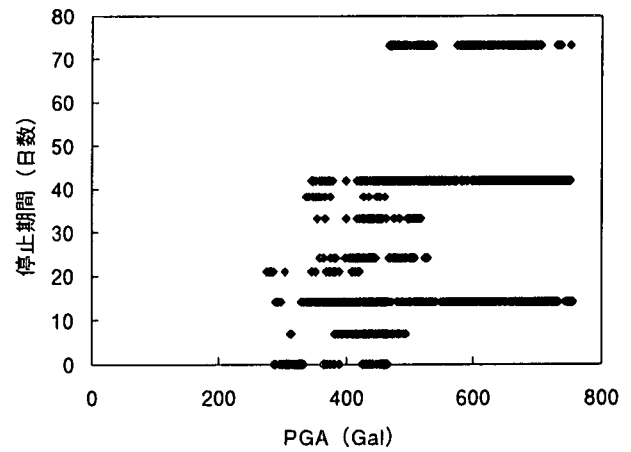


図-1 PGAによる停止期間の散布状況

対数正規分布、極値分布、 Γ 分布等があり、本研究では Γ 分布を採用することとする。 Γ 関数の一般形は次のようになる。

$$f(z) = \frac{z^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha) \beta^{\alpha}} e^{-\frac{z}{\beta}} \quad (1)$$

ここに α 、 β は形状母数、尺度母数である。 $\Gamma(\)$ はガンマ関数を表す。各母数から分布の平均値ならびに分散は以下のように表される。

$$E(Z) = \alpha\beta \quad (2)$$

$$Ver(Z) = \alpha\beta^2 \quad (3)$$

一方、停止期間には下限値0日に加え、上限値が存在することが予想される。その理由は、供給停止が際限なく長期化するとは考えられないこと、図-1の散布図の様子から上限の存在が認められ、兵庫県南部地震は過去最大規模の地震であること、などによる。そこで、回帰式として上下限が設定でき、上下限へ漸近する一価関数として以下を適用する。

$$y^* = \frac{\beta_0}{1 + e^{\beta_1 + \beta_2 x}} \quad (4)$$

ここに、 β_0 は上限値、 β_1 、 β_2 は形状を規定する係数で、これらが未定係数となる。 y^* は停止日数の推定値、 x は地震動の大きさ(PGA)である。また同式では下限値は0に規定される。観測された停止日数を y とすると、誤差 ε は推定値との差として以下のようになる。

$$\varepsilon = y - y^* \quad (5)$$

次に、(4) 式は地震動に依存する停止日数の散布の平均値を示す関数であることから、 y^* は Γ 関数のパラメータと以下のように関係付けることができる。

$$y^* = \alpha\beta \quad (6)$$

また、誤差（縦の分布）を Γ 分布と仮定すると、同分布の確率変数 z は (5) 式を使い、次のように表される。

$$z = y = y^* + \varepsilon \quad (7)$$

(4)、(6)、(7) 式の関係をもとに (1) に適用すると、 Γ 分布は地震動 x と停止日数 y の関数として次のように表される。

$$f(x, y) = \frac{y^{\left(\frac{y^*}{\beta} - 1\right)}}{\Gamma\left(\frac{y^*}{\beta}\right) \beta^{\left(\frac{y^*}{\beta}\right)}} e^{-\frac{y}{\beta}} \quad (8)$$

一連の定式化で、未定係数は Γ 分布の尺度母数である β 、回帰式の β_0 、 β_1 、 β_2 の計 4 つとなる。一方、形状母数 α を未知量とすることもでき、この場合 (8) 式は以下のように書き換えられる。

$$f(x, y) = \frac{y^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha) \left(\frac{y^*}{\alpha}\right)^{\alpha}} e^{-\frac{y}{y^*}} \quad (9)$$

形状母数 α を未知とした場合、 Γ 分布の形状が固定化され、 β を未知とした場合は地震動の大きさに応じて分布形が変化することになる。どちらが良いかは、実被害との適合度によって決定される。

未定係数の算定では最尤法を使うこととし、尤度関数は以下ようになる。

$$L(\alpha, \beta, \beta_0, \beta_1, \beta_2; x_i, y_i) = \prod_{i=1}^n f(x_i, y_i) \quad (10)$$

ここに、 x_i 、 y_i はサンプル個々の地震動 (PGA) ならびに停止日数を表し、本検討では $n=2655$ である。未定係数は、(10) 式を最大にする値として求められる。

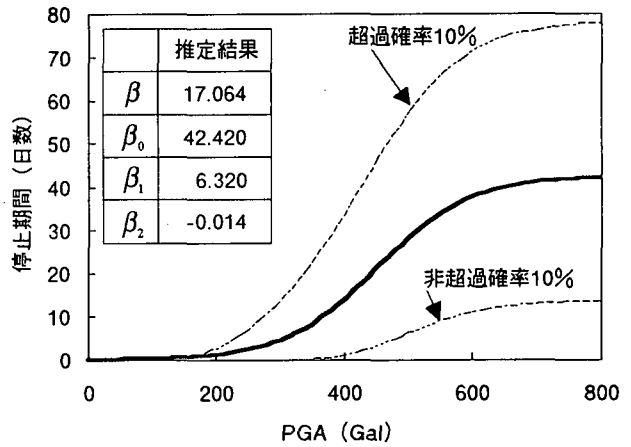


図-2 統計的に評価された停止期間の期待値を表す一価関数

上水道の停止期間の調査報告は、各市によって扱いが異なり一貫していない。ちなみに神戸市は 14 日、42 日、73 日で区切られ、西宮市は 14 日、24 日、33 日、そして 42 日である。また、宝塚市は 7 日、14 日、21 日と 1 週間毎に区切られている。本評価手法を使う理由は、停止期間の違いを一括して扱うことができること、地震動に対応した停止期間の期待値を一価関数で評価できること、などである。

尚、本モデルは文献 6) に示されている被害関数の考え方を参考にした。同関数は誤差を β 分布で近似し、地震動の大きさにおいて離散的に扱っているが、本モデルは誤差を Γ 分布とし、地震動の大きさにおいて連続的に扱っている。

4. 統計解析結果

最尤法に基づき、未定係数を α ならびに β とした場合の統計解析を行い、尤度において β を未知とした方が実被害との適合度が良いことが分かった。以下に β を未知とした場合の結果を示す。

図-2 に、PGA に対応した停止期間の期待値（平均値）を評価する一価関数を示す。同図には、未定係数ならびに超過確率 10% と非超過確率 10% のラインを併記する。それぞれの超過ラインより、地震動の大きさと共にばらつきが大きくなっているのが分かる。地震動の小さい領域では無被害である可能性が高いことから、実状を反映していると共に、一般的な認識と整合的である。一方、未定係数から、停止期間の上限値は平均で 42.4 日である。また、停止期間の最大である 73 日を越える確率は、800Gal を条件とした場合 0.124 となる。停止期間が平均で 1 日以下となるのは 180Gal 以下であり、この加速度以下では上水道被害は軽微であることが予想される。尚、サンプルの範囲

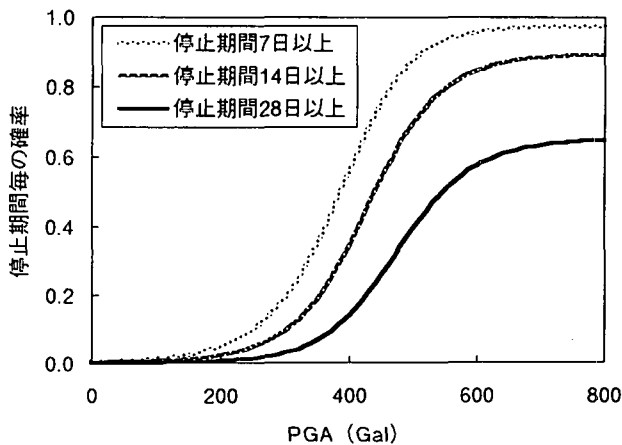


図-3 停止期間毎のSeismic Fragility Curve

外である250Gal以下ならびに750Gal以上は、(4)式の関数形を前提とした外挿補完となる。

次に、停止日数が7日以上、14日以上、28日以上について、それぞれの状態になる可能性を確率で示すと図-3のようになる。これはFragility Curveに相当するもので、図-2の関数の横切片を越える確率を Γ 分布の累積として求めたものである。Fragility Curveは、供給停止に伴う派生的損害を損失の期待値として評価する場合に有効である。図より、加速度の大きい領域ではFragility Curveが頭打ちとなり、停止期間の確率は一定値に漸近する。これは停止期間に上限を設けたことが原因である。水道網が壊滅的な被害を受けたとしても供給停止が際限なく長期化するとは考えられず、上限を設けた提示モデルは現実的であると考ええる。従って、1.0以下で上限を持つような確率関数であっても実用上は問題ないとする。

提示した停止期間の期待値を求める一価関数やFragility Curveの精度改善を目指すには、被災情報のさらなる取り込みが必要であることは言うまでもない。しかし、地震動のばらつきを含めた様々な不確定要因の関与を考えると、停止期間の推定には大きなばらつきを伴うことは避けられない。ばらつきの主因は地震動と停止期間をマクロ的に捉えた本モデルの前提に基づいていることは明らかである。このばらつきを問題にするのであれば、ライフライン施設のシステム形態や構造物としての脆弱性を反映した被害の発生に着目することが必要である。この場合、評価ツールの開発や地域固有の情報の収集・取り込みなど、多大な労力を伴うことになる。利用目的や被害想定の手組、期待される精度等を踏まえ、被害予測の方法は適

宜使い分けることが必要と考える。

尚、本検討では、都市域を襲った直下型地震の被災情報に基づいていること、地震動の大きさはPGAであり、停止期間の評価単位は町丁目であること、大規模な液状化地域は除いていること、などに留意する必要がある。

5. まとめ

兵庫県南部地震による上水道の供給停止に着目し、停止期間と地震動とのマクロ的相関を前提に、地震動の大きさを指標とした停止期間を推定する一価関数を統計的に求めた。その際、供給停止が際限なく長期化するとは考えられず、上限を設定できるモデルを設定し、誤差の分布を Γ 分布と仮定した。統計結果として以下を得た。

- 1) 停止期間の上限は平均で42.4日であった。
- 2) 兵庫県南部地震での最大の停止期間である73日を越える確率は800Galを条件に0.124である。
- 3) 軽微な被害と思われる供給停止期間1日以下は、PGAで180Gal以下である。

諸仮定や前提条件を考えると、本報の結果は1次情報として扱うのが適当と考えられる。しかし、簡便さという点では実用的であり、今後、地震被害想定や地震リスクマネジメントへの利用性について検討していきたい。

参考文献

- 1) 塚田康夫・木村雄一・河村壮一：SRMによる免震建物のライフサイクルコスト評価，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.1，1998，pp.241-246。
- 2) 神戸市水道局：阪神・淡路大震災水道復旧の記録，1996，p.163。
- 3) 西宮市水道局：阪神・淡路大震災水道復旧の記録，1996，pp.1-49。
- 4) 宝塚市水道局：阪神・淡路大震災水道復旧記録，1996，pp.1-11。
- 5) 中村孝明・長沼敏彦・静間俊郎・篠塚正宜：統計解析による道路橋脚の地震時損傷確率に関する研究，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.3，1998，pp.3165-3170。
- 6) Federal Emergency Management Agency：Earthquake Damage Evaluation Data for California，ATC-13，1985，p.492。