

(90) 被害早期把握のための地震動強度の推定および遠隔監視地震計の配置について

神戸大学工学部 高田 至郎
舞鶴工業高等専門学校 ○高谷 富也
大阪ガス(株)供給部 福家 貞二
神戸大学工学部大学院 福井 真二

1. まえがき

都市における電力・ガス・通信・水道等のライフライン施設は、数多くの構成要素がネットワーク状に複雑に連結したシステムであるため、その地震被害は様々な都市機能の障害を引き起こし、都市における諸活動への影響は深刻なものとなる。このため、ライフライン施設の被害復旧は早期にその機能回復が行わなければならない。図-1は時間軸をlogスケールで考えた場合における地震発生からライフライン被害の復旧が完了するまでの時間的な流れを示したものである。地震早期検知システム¹⁾によって、直後に襲来する地震動に備えた緊急行動をとり、地震波到来後、1時間以内に被害を把握し、何らかの応急処置を施すことができれば、復旧作業の円滑化と機能回復の早急化が可能であると考えられる。このため、供給地域における地震動強度を正確に捉え、被害状況を早急に、かつ詳細に把握する上で、遠隔監視地震計を効果的に配置する必要がある。本研究では、図-1に示す1~100分間における迅速な被害把握の調査活動に役立てるために、限られた地点に設置された遠隔監視地震計による記録データより供給地域における地震動強度を推定する手法を提案するとともに、ライフライン被害の調査率および把握率などの観点より、遠隔監視地震計の効果的な配置に関する検討を行う。

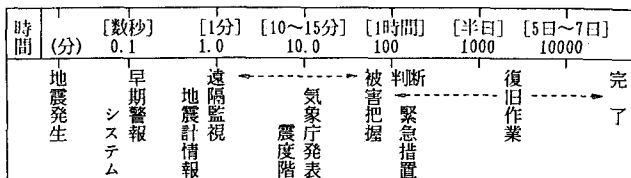


図-1 地震直後の被害把握および復旧作業の時間的な流れ

2. 地震動強度の推定

(1) 推定法の概要

本研究で提案する地震動強度の推定手法は、有限要素法や境界要素法に用いられている形状補間関数²⁾を用いるものである。すなわち、図-2に示す4地点の最大加速度値が与えられている場合、補間関数を用いれば、式(1)より任意地点における最大加速度 A_{max} が求められる。

$$A_{max} = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) A_i \quad (-1 \leq \xi \leq 1, -1 \leq \eta \leq 1) \quad \dots\dots (1)$$

ここに、

$$N_1(\xi, \eta) = 0.25\xi\eta(1-\xi)(1-\eta), \quad N_2(\xi, \eta) = -0.25\xi\eta(1+\xi)(1-\eta),$$

$$N_3(\xi, \eta) = 0.25\xi\eta(1+\xi)(1+\eta), \quad N_4(\xi, \eta) = -0.25\xi\eta(1-\xi)(1+\eta)$$

また、 $A_i (i=1\sim 4)$ は i 番目の観測地点において観測された最大加速度の値である。

ところで、観測地点が図-2に見られるようにちょうど正方形の4点上に設置されているのではないため、上述の推定法を任意形状の4節点四辺形に対する推定法に修正する必要がある。

いま、図-3の全体座標系に示すような四辺形面上に4箇所の観測地点が存在するものとする。このとき、式(1)を用いた加速度値の推定を行うためには、4箇所の観測地点と同図の局所座標系あるいは図-2に示す4節点の位置

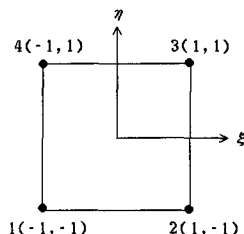


図-2 加速度観測地点

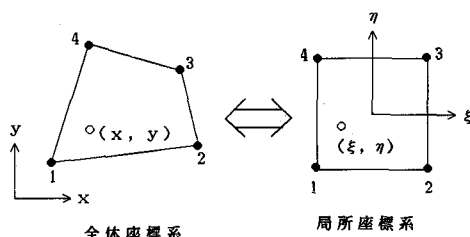


図-3 全体座標系と局所座標系

との写像を考えればよいことがわかる。すなわち、全体座標系における (x, y) という地点が局所座標系の (ξ, η) の点に相当することがわかれば、式(1)より容易に (x, y) における最大加速度値が推定できる。ところで、局所座標系 (ξ, η) と全体座標系 (x, y) の間には次式に示す関係がある。

$$x = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) x_i, \quad y = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) y_i \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 x_i 、 y_i はそれぞれ*i*番目の観測地点の*x*座標値および*y*座標値である。

ところで、同じ地震波に対しても地盤条件の違い、すなわち地盤の良し悪しによって観測される加速度値は異なるため、上述の加速度推定手法は、加速度の観測地点および推定地点が同一の地盤に対してのみ使用でき、異なる地盤への適用はできない。このため、本研究では、地表面加速度のアテニュエーション式³⁾に用いられている表-1に示す地盤種別毎の増幅率*A_m*を用いて、地盤の最大加速度*A_{max}*を算定する。

$$A_{max} = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) A_i \times \frac{A_m}{A_{m_i}} \quad \cdots \cdots (3)$$

なお、*A_{m_i}*は*i*番目の観測地点の増幅率である。

(2) 地震動強度の推定結果

阪神地域における8箇所の加速度計より得られる最大加速度の値を用いて、上述の推定法により点データの加速度を面データに変換する。ところで、近年、大阪地方には、大きな被害をもたらす地震は発生していないため、本研究では加速度計の実測データを用いる代わりに、過去の地震データを基にして、式(4)に示す加速度のアテニュエーション式³⁾より得られる基盤加速度*A₀*に表-1に示す地盤の増幅率を乗じて8箇所の最大加速度*A_i*の算定を行い、上述の推定法より地域全体における震度階分布の推定を行う。

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \frac{111 \times 10^{0.534M}}{(\Delta + 30)^{1.856}} \quad (\Delta \geq \Delta_0(M)) \\ A_0 &= 99.6 \times 10^{0.0864M} \quad (\Delta < \Delta_0(M)) \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (4)$$

ここで、 Δ は震央距離(km)、*M*はマグニチュード、 $\Delta_0(M) = 1.06 \times 10^{0.242M} - 30$ である。

図-4、5はそれぞれ表-2に示す吉野地震および南海地震に対する8箇所の加速度計の最大加速度の推定を式(4)より行い、式(1)により震度階分布の推定を行ったものである。図-4に示されている吉野地震に対する震度階分布については、震源に近い地域では震度Ⅶが見られ、推定要素内のほとんどが震度Ⅵとなっている。一方、図-5の南海地震に対する震度階分布については、震源が遠くにあるため、推定要素内のほとんどが震度Ⅴ-となっていることがわかる。

3. 地震計の最適配置について

本研究では、地震直後における被害早期把握に有効となる遠隔監視地震計の配置を決める要因として、

- I. 地震被害が発生しやすいところ（軟弱地盤地域、液状化地域）
- II. 二次災害による影響が大きい地域（人口・管敷設密度の高い地域、重要施設がある地域）

表-1 地盤の増幅率*A_m*

地盤種別	1種地盤	2種地盤	3種地盤	4種地盤
増幅率	0.9	1.0	1.1	1.2

表-2 過去の地震諸元

地震名	年代	東経	北緯	M
河内・大和地震	1936年	135° 42′ 00″	34° 30′ 00″	6.4
吉野地震	1952年	135° 48′ 00″	34° 27′ 00″	7.0
東南海地震	1944年	136° 12′ 00″	33° 42′ 00″	8.0
南海地震	1946年	135° 36′ 00″	33° 00′ 00″	8.1

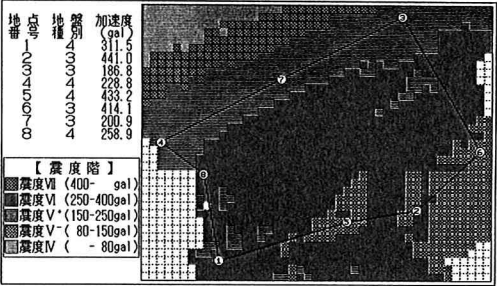


図-4 震度階分布の推定結果（吉野地震）

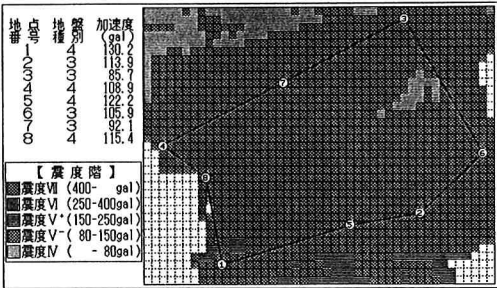


図-5 震度階分布の推定結果（南海地震）

Ⅲ. 過去の震源域と地震動分布・活断層の位置

Ⅳ. 復旧ブロックの分割

Ⅴ. 地震計設置による経済効果

の5項目を設定し、Ⅴ. の経済効果を考慮した最適配置間隔を考える。

(1) 目的関数の設定

本研究では、図-6に示すように設置間

隔を決定する場合の相反要因としてA)とB) (a) 目的関数決定の相反要因 (b) A), B)と損失額との関係
を考え、A)とB)を併せた損失額を最小にする

る配置間隔を最適配置間隔と定義する。また、地震計から得られる情報を次式に示す調査率 Q と把握率 P の関係に用いるものとする。

$$\text{調査率 } Q = \frac{\text{調査済み面積}}{\text{調査対象地域の面積}}、\text{把握率 } P = \frac{\text{地震計情報からの推定を基に優先順位を決定した現地調査において確認した被害箇所数}}{\text{総被害箇所数}} \dots (5)$$

ここに、調査率 Q の分子項は、地震直後の地震計の情報に基づいて、被害状況を把握するために調査員を現地に派遣し、被害状況を確認した地域の面積である。調査率は、調査員動員数と時間の経過によって増加する値である。二次災害発生を防ぐために遮断の判断等を早期に行う必要がある場合には、それに対応する調査率が調査動員体制に応じて決められる。つまり、現地調査を開始する段階で被害状況がある程度推定できているならば、調査初期段階において把握率は100%に近づき、二次災害発生の確率は急速に下がる。したがって、同じ調査率であっても、有効な地震計情報があることによって、被害の把握率は急激に増加することが期待できる。調査率 Q と把握率 P は、時間とともに増加する関数であるとし、地震計の配置間隔 R との関係を次式のように与える。

$$P = Q(1-Q)\alpha R \dots (6)$$

ここに、 α は P 、 Q の値に伴って変わる係数である。図-7は式(6)において αR をパラメータにして調査率 Q と把握率 P の関係を示したものである。

次に、地震による二次災害として次の2点を考え、把握率 P とのかわり合いを検討する。

① 食い止めることができなかった二次災害

② 正確な供給停止ができなかったために起こる需要家へのサービス低下

ここで、被害に伴う二次災害発生率 E と、供給停止による各需要家の迷惑率 T を次のように定義する。

$$\text{二次災害発生率 } E = \frac{\text{二次災害発生箇所数}}{\text{本管の総被害箇所数}}、\text{迷惑率 } T = \frac{\text{供給停止需要家数}}{\text{総需要家数}} \dots (7)$$

ただし、二次災害発生率 E 、迷惑率 T の値は、地震動強度に比例するものとする。いま、二次災害発生率 E と迷惑率 T は把握率 P によって図-8のように変化するものと考えれば、 E と T は次式で表わされる。

$$E = C_1 e^{-\beta_1 P}, \quad T = C_2 e^{-\beta_2 P} \dots (8)$$

ここに、 C_i 、 β_i ($i=1,2$)はそれぞれ $P=0$ のときの発生率および発生危険度減少率である。

また、二次災害および供給停止に伴う損害額について、把握率 $P=0$ のとき、次のように設定する。

① 複数箇所二次災害が発生したとき、それに伴う損害額.....A万円

② 供給停止によって供給されないとき、需要家への迷惑に伴う損害額.....B万円

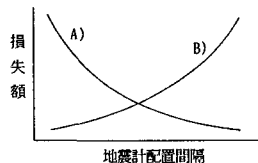
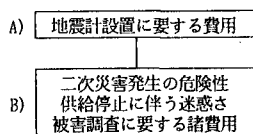


図-6 目的関数

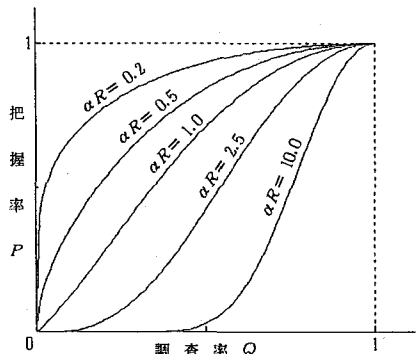
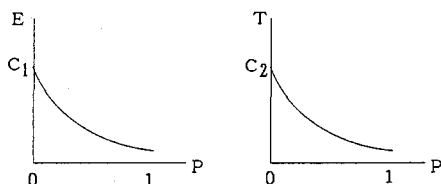


図-7 調査率と把握率の関係



(a) $E-P$ の関係 (b) $T-P$ の関係
図-8 E 、 T 、 P の関係

ただし、①は、二次災害は比較的供給量の多い本管において発生するものとし、②については、各需要家へ供給する支管において供給停止に伴うサービス低下（迷惑）が起こり得るものと仮定する。したがって、A、Bは管の材料や状態、あるいは震度などによって変化するものであるから、A、Bを次式のように表わす。

$$A = q_1 \cdot \pi R^2 = a \cdot k_1 \cdot l_1 \cdot \pi R^2, \quad B = q_2 \cdot \pi R^2 = b \cdot k_2 \cdot l_2 \cdot \pi R^2 \quad \dots\dots (9)$$

ただし、 k_i : 管の材料、震度によって決まる管延長1 km当りの被害発生箇所数（箇所/km）

l_i : 1 km²当りに延びる本管（ l_1 ）、支管（ l_2 ）延長平均（km/km²）

a : 本管1箇所の被害によって起こる二次災害による損害額（万円/箇所）

b : 支管1箇所の被害に伴って供給停止が発生し、停止箇所の需要家が迷惑するときの損害額（万円/箇所）

以上より、目的関数は、地震計等の観測機器設置にかかる費用と、式(9)によって表わされる損害額、および目標把握率に達するまでに要する諸費用の総和 Z としては、次式のように表わされる。

$$Z = \frac{S}{\pi R^2} n + AE + BT + q_3 P \pi R^2 = \frac{S}{\pi R^2} n + (q_1 C_1 e^{-\beta_1 P} + q_2 C_2 e^{-\beta_2 P} + q_3 P) \pi R^2 \quad \dots (10)$$

ここに、 S は供給面積(km²)、 n は観測機器1設備当りの設置に要する費用(万円)、 q_3 は1km²当りの把握率を1.0にするのに要する費用（人件費、機材費等）（万円/km²）である。

したがって、ある調査率 $Q = Q_1$ のときの目標把握率 $P = P_1$ としたとき、 $P_1 = Q_1 (1 - Q_1) \alpha R$ なる関係を満たす (α, R) は無限個存在する。任意に (α_1, R_1) を選べば、 $Q = Q_1$ 、 $\alpha = \alpha_1$ として、 Z を最小にする $R = R_s$ が式(10)から求められる。このとき、 $R_s \neq R_1$ ならば α_1 を変えて、一致する R を探し、 $R_s = R_1$ であるならば、 $R = R_s = R_1$ は式(6)、(10)をとともに満たし、把握率と経済効果の両面で満足する配置間隔となる。

(2)適用例

適用例として、 $C_1 = 0.3$ 、 $C_2 = 0.5$ 、 $a = 1000$ 、 $b = 100$ 、 $l_1 = 1.0$ 、 $l_2 = 4.0$ 、 $q_3 = 1000$ 、 $\beta_1 = 3.4$ 、 $\beta_2 = 3.9$ 、 $n = 1000$ 、 $S = 10000$ なる値を設定し、調査率 $Q = 20\%$ における把握率 P と地震計配置間隔 R の関係を示したものが図-9である。なお、本管と支管の被害率 k_i ($i=1,2$) は、対象とする地盤加速度100gal、300galに対して表-3に示す値を用いた。地盤加速度が100galでの把握率と配置間隔の関係に比べて、300galでは配置間隔がほぼ一定値となっている。これは、地震動強度が強ければ被害が多くなり、調査率 Q と把握率 P の関係が直線的な関係になるためと考えられる。

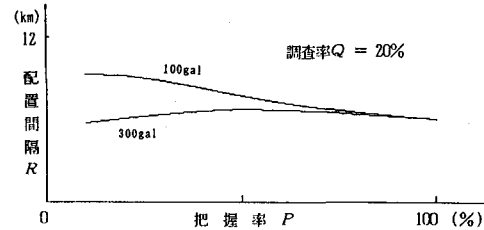


図-9 把握率と配置間隔の関係

表-3 本支管の被害率

被害率 (箇所/km)	100gal	300gal
本管(k_1)	0.0	1.5
支管(k_2)	1.0	3.5

4. あとがき

本研究では、ライフライン施設における被害の復旧作業の円滑化および機能回復の早期化に必要な供給地域における地震動強度の推定法の提案および遠隔監視地震計の効果的な配置に関する検討を経済効果の面より検討した。その結果、限られた地点に設置された地震計による記録データより供給地域における地震動強度を推定することができ、ライフライン被害の調査率と把握率の関係、把握率と二次災害の関係等を考慮した目的関数を用いれば、地震計の効果的な配置に関する有益な情報が得られることがわかった。

参考文献

- 1) 高田至郎、笹倉真一：地震早期検知システムと震害情報の収集、土木学会関西支部年次学術講演会概要集、1-91、1990。
- 2) 鷲津久一郎、宮本 博、山田嘉昭、山本善之、川井忠彦：有限要素法ハンドブック I 基礎編、培風館、1981。
- 3) Kameda, H., Sugito, M., and Asamura, T.: "Simulated Earthquake Motions Scaled for Magnitude, Distance, and Local Soil Conditions", Proc. 7WCCE, Vol.2, pp.295~302, 1980。