

経済的・社会的効果を勘案した
ライフライン用モニタリング地震計の配置間隔

AN OPTIMUM SPACING OF SEISMOGRAPHS IN MONITORING NETWORK
CONSIDERING BOTH INSTALLING COST AND MINIMIZED LOSS

高田至郎* 福家貞二** 上野淳一***

By Shiro TAKADA, Teiji FUKU and Junichi UENO

It is important to obtain various information of seismic damage to lifeline systems as quickly and accurately as possible in order to make quick functional recovery for damaged lifeline facilities. In order to decide the optimum density of seismographs in a monitoring network, the method considering both installing cost and saved amount in damaged area has been proposed. Case studies on optimum interval are calculated in actual areas.

Key Words: seismic monitoring, interval of seismographs,
cost-benefit analysis

1. 緒言

地震時に被害を受けたライフラインシステムの速やかな機能復旧のためには、システムが被った地震被害の程度と箇所をできる限り早くかつ正確に把握することが必要となる。対象地域における正確な加速度分布を把握したとしても、地震によるライフラインの被害個数を減らすことはできないが、被害の個数と位置を精度よく算出できるため、限られた復旧用人員・資材を的確に配置することができ、復旧曲線を速やかに立ち上げることができる。また復旧能力と比べて明らかに被害個数が多い場合の供給停止の判断も正確なものとなる。本論文では加速度分布を正確に把握するための地震計ネットワークを構築する際の地震計の配置間隔の決定法として、地震計の設置コストと地域が被る損失の低減額のバランスを考慮した方法を提案する。今、当該供給地域が供給停止のためのブロックに分割されており、地震時にはブロック毎あるいはさらに分割された部分毎に供給停止が可能であるとする。地震が発生した場合には、地震動モニタリングシステムからリアルタイムで得られる入力加速度情報をもとに、各ブロックに対して供給停止をするか否かの判断を下さねばならない。各ブロックにおいて加速度を過大に見積れば不必要な供給停止をすることになり、過小に見積れば必要な供給停止をしないことになる。不必要な供給停止をすれば、そのブロックの経済活動・日常生活に支障をきたすことになり、必要な供給停止をしなれば、そのブロックでの漏洩を許し住民・施設を2次災害の危険にさらすことになる。供給停止判断の不正確さに起因する経済的損失・社会的損失は、地震

* 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町1)

** 大阪ガス(株)供給部中央指令室 (〒541 大阪市中央区平野町4-1-2)

*** 工修(株)鴻池組 土木本部第1技術部 (〒541 大阪市中央区北久宝寺町3-6-1)

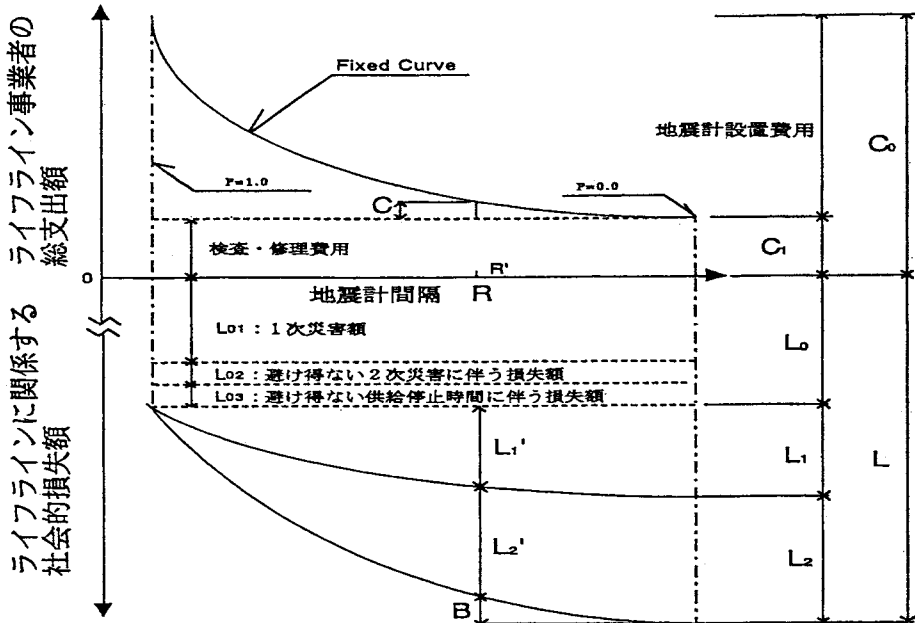


図1 地震計設置に伴う経済効果の目的関数

計を密に設置して加速度分布の予測の精度を向上させることにより減少させることができる。しかしながら、地震計を設置するためのコストの制約もある。そこで本文では地震計のコスト、各ブロックを構成するメッシュの用途・重要施設の有無などを考慮して最適な地震計の個数・配置間隔を算出する方法を提案する。

2. 目的関数

最適地震計間隔 R (km) は Z を最大にするものであり式 (1) のように定義される。

$$Z = B / C \quad (1)$$

ここに C は地震計の設置コストであり、 B は地震計ネットワークによる被害予測精度の向上により未然に防止（低減）できる損失額である。図1に B と C の関係を示す。図中において C_0 は地震に際してライフライン事業者が支出する費用総額である。 C_0 の内 C_1 は地震後の被害箇所の調査及び復旧にかかる費用であり本地震動モニタリングシステムによる緊急停止の有無に関係なく、すべての路線は検査されると考えた場合、本システムの有無に関係しない支出となる。 L はライフラインに関するすべての損失の総額である。 L_0 は本地震動モニタリングシステムに関係しない損失額の合計で、その内 L_{01} は地震発生と同時に起こる1次災害の損失であり、 L_{02} および L_{03} は地震発生後、本地震計情報をもとにした緊急対応が行われるまでのタイムラグの間の供給停止による損失および2次災害による損失額である。この L_0 は本モニタリングシステムから正確な地震動分布を把握し的確な対応を迅速にとったとしても低減できない損失額であるが、管路や設備自体の耐震性を向上させることにより低減できるものである。

R' の地震計間隔を持つモニタリングシステムからの情報をもとに緊急対応を行ったと仮定すると、 L_1' は必要な供給停止を的確に行うことができなかった事に起因する2次災害による損失額で、 L_2' は不必要な供給停止を行ってしまったことにより利用者が被る損失額である。これらは、地震計間隔を密にして正確な地震動分布を把握して緊急対応を行うことにより低減できるものである。供給停止判断を行う対象の地域にお

表1 被害と対応ケース

	供給停止すべき被害の有無	対応
ケース1	有	停止した
ケース2	有	停止しなかった (L_1' が発生)
ケース3	無	停止した (L_2' が発生)
ケース4	無	停止しなかった

いて、地震時に起こり得るケースは表1のようである。その地域内で地震動を均一とみなしてよいほど面積が十分に小さく、かつそこに地震計が設置されている、すなわち最も密に地震計が設置されているとき、地震動の分布は正確に把握される確な対応（ケース1又は4）ができる。地震計の密度が疎になるほど、この地域における地震動の推定値の誤差が大きくなり、不的確な対応（ケース2又は3）が発生する。

図1中の L_1 および L_2 は、間隔Rで隣接する2個の地震計の測定値に相関がないほどRが大きい、すなわちネットワーク効果がない状態で対応を行った場合の損失額である。式(1)中のBは以下のように定義される。

$$B = (L_1 - L_1') + (L_2 - L_2') \quad (2)$$

式(2)の初項において

$$L_1 = E_1 \cdot \sum_{i=1}^m (F_i \cdot a \cdot k \cdot l_i) \quad (3)$$

$$L_1' = E_1' \cdot \sum_{i=1}^m (F_i \cdot a \cdot k \cdot l_i) \quad (4)$$

$$E_1 = G_1 \cdot e^{-\beta_1 \cdot P} \quad (5)$$

$$L_1 - L_1' = G_1 (1 - e^{-\beta_1 \cdot P}) \cdot \sum_{i=1}^m (F_i \cdot a \cdot k \cdot l_i) \quad (6)$$

ここに、 E_1 はつぎのように定義する。

$$E_1 = (\text{供給停止すべきであったが停止されなかった地域の面積}) / (\text{供給全域面積}) \quad (7)$$

すなわち E_1 は、各地域において表1中のケース2のように、地震動推定値の誤差に起因する誤った判断によって2次災害が発生する確率すなわち被害を過小評価してしまう確率である。 E_1 は、式(5)のように定義され、配置間隔Rの関数であるが、変数Pおよび係数 β_1 を介して表される。Pはネットワーク効果による地震動分布の捕捉の程度を表すパラメータで、地震計間隔が最小の時（すべてのメッシュに地震計が設置されている時）、 $P = 1$ すなわち地震動分布は完全に把握されていると考える。その場合 E_1 は0に近づく。ただし、地震動入力より被害の程度を算出する過程の誤差のため0にはならない。一方、地震計間隔がその内側を補間できる限界距離以上の時に $P = 0$ 、すなわちネットワーク効果はないと仮定する。Pの減少に伴い E_1 の値は当然大きくなるが、 β_1 はその関係を表現するための係数で、地震被害データより推定されるべきものである。図2、図3にこれらの関係を示す。mは供給エリアの総メッシュ数である。係数aは本管1箇所の被害が2次災害に至る割合で、次のように定義される。

$$a = (\text{2次災害発生個数}) / (\text{被害箇所数}) \quad (8)$$

F_i はi番目のメッシュにおける2次災害1箇所あたりの平均損害額（万円/2次災害箇所）で以下の3要因から決定されるものとする。

A要因；地域の用途（一般住宅、中高層住宅、商業、業務、工業、公共業務、文教、厚生、公園緑地、

運動競技施設、運輸流通施設、供給処理、防衛施設、空地、改変工事中)

B 要因；需要家数（過密・標準・過疎）

C 要因；重要施設（病院・学校・消防署・エネルギー供給施設・警察）の有無

係数 k （箇所／km）は本管の材料・地震動強度によって決まる管延長 1 km あたりの被害発生率である。

係数 l_i は i 番目のメッシュにおける本管の敷設延長である。 m は供給エリアの総面積である。

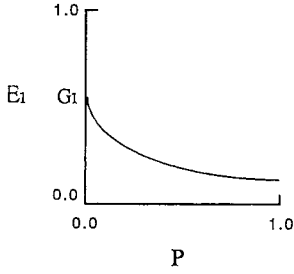


図2 E_1 とPの関係

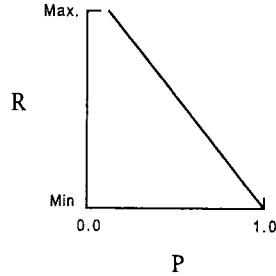


図3 PとRの関係

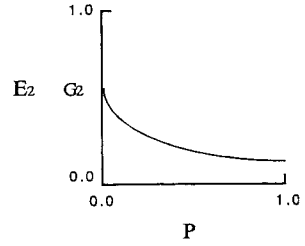


図4 E_2 とPの関係

次に式（2）の第2項の不要の供給停止に伴う損失の低減額について述べる。

$$L_2 = E_{2, P=0} \sum_{i=1}^m (M_i \cdot T_{ave}) \quad (9)$$

$$L_2' = E_2 \sum_{i=1}^m (M_i \cdot T_{ave}) \quad (10)$$

$$E_2 = G_2 \cdot e^{-\beta_2 \cdot P} \quad (11)$$

$$L_2 - L_2' = G_2 (1 - e^{-\beta_2 \cdot P}) \cdot \sum_{i=1}^m (M_i \cdot T_{ave}) \quad (12)$$

ここに、 E_2 は、表1のケース3のように地震動強度を過大評価してしまう確率で次のように定義する。

$$E_2 = (\text{供給停止する必要がないのに停止した地域の面積}) / (\text{供給全域面積}) \quad (13)$$

E_2 は E_1 と同じく配置間隔Rの関数であるが変数Pおよび係数 β_2 を介してあらわされる。 β_2 は β_1 と同様の目的の係数である。図3、図4にこれらの関係を示す。ここに、 T_{ave} (hour)は、地震の規模に応じた平均供給停止時間で既往の被害より推定される。 M_i は*i*番目のメッシュにおける単位供給停止時間あたりの損失額で、以下の前述2要因から算出されるものと仮定する。

A 要因；地域の用途（一般住宅、中高層住宅、商業、業務、工業、公共業務、文教、厚生、公園緑地、
運動競技施設、運輸流通施設、供給処理、防衛施設、空地、改変工事中）

B 要因；需要家数（過密・標準・過疎）

なお、式（1）における地震計の設置費用Cは、次式で表される。

$$C = n \cdot (\text{供給区域の面積}) / R^2 \quad (14)$$

3. 地形・地質条件による配置間隔の制限

本節では複数の地震計で囲んだエリア内部の任意の点の地震動を推定する場合の当該地域の地形・地質とエリアの大きさの関係について考察を加える。著者らは文献¹⁾で形状補間関数の考え方をを用いて、既知点の地動から任意点の地動を算出する方法を提案している。そこでは地表面で観測された地動を一旦、地震基盤面に戻して、その面内での線形補間を原則としている。観測点から地震基盤面までの沖積層厚さの変化の影響

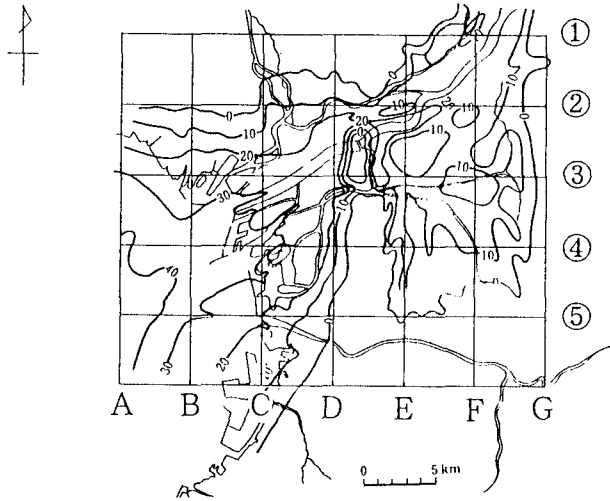


図5 沖積層下限等深線図

単位 (m)

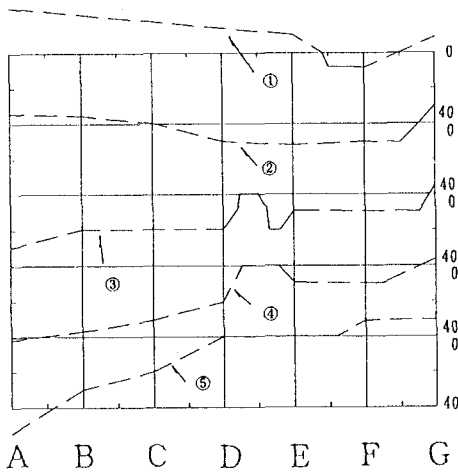


図6 沖積層厚さの分布 (東西)

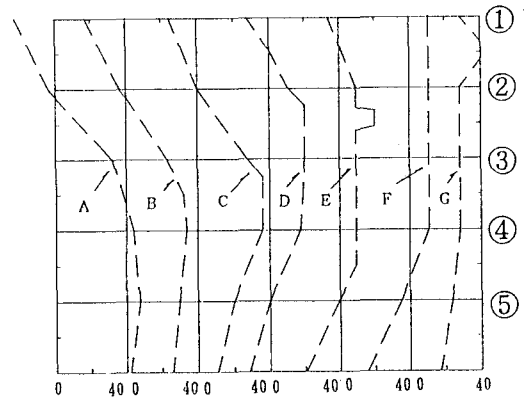


図7 沖積層厚さの分布 (南北)

は地震増幅率を導入することで考慮される。しかし鉛直方向1次元での増幅率であり、地震基盤面の2次元平面的な変化の影響は配慮されない。一般に、1組の地震計の間の距離が大きくなっても、その間で地質地形の条件の変化が緩慢な場合には内挿補間は可能である。しかし、モニタリング地震計のネットを組む場合にはできるだけ地形地質の条件が一様な地域を覆うように構成することが望ましい。図5²⁾は、或る大都市域の沖積層下限等深線図で、同図中に示す5Kmピッチの東西・南北方向の測線について沖積層厚の分布を表

示したものが図6、図7である。図5に示す地域は周囲を山地に囲まれた内部に厚く軟弱な海成層が堆積した盆地構造であるが、図中の測線DとEの間に沖積層厚が0となる台地が存在している。ネットワークを構築する場合は、このような部分を挟まぬように地震計を設置しなければならない。また、2次の形状関数で補間する場合、地震計間での層厚の分布の推移が上に凸の区間と下に凸の区間を同時に含まぬような間隔で設置しなければならない。以上述べた点を考慮する場合、図5の地域においては10Km程度を地震計間距離

これらの条件はモニタリング地震計システムができる限り精度の良い関連地域の地震動を把握するためには経済的な効果に優先して検討されるべき内容である。即ち、形状関数の補間によって、より大きな地震計配置間隔を経済効果の面から決定すべきであるが、その際、地形地質の一様性は経済効果から配置距離を検討する制約条件と考えるべきである。

4. 具体的適用例

ガスの安定供給のために形成されているスーパーブロックを対象として、地域特性の異なる2つのスーパーブロックを取り上げて地震計設置間隔を試算した。

4.1 地域特性の異なる広範な地域を含んだブロック（ケース1）

本ブロックのエリアは京阪神西部に位置し、300m x 400mのメッシュ6998個から構成され面積は839.76km²である。南側は都市域、東側と西側は住宅地域、北側は住宅地域、農業用地、山林などから構成されている。各メッシュに1個ずつ地震計を設置した場合にrが最小になると仮定する。メッシュのサイズは、管路データが300m x 400mを単位としてデータベース化されており、それを利用することを考慮して決定した。300m x 400mのメッシュは一辺が約350mの正方形に面積がほぼ等しいので、その場合 r=0.35kmと換算される。一方、3. で検討したように沖積層厚の分布、地表面加速度のマイクロゾーンネーション結果³⁾を参考に20kmまでの地震計間隔ならばネット効果があると仮定する。これは供給区域内に2個の地震計を配置した時の地震計間隔20.5kmにほぼ等しい。

この試算においては式(2)の第1項のF_i、第2項のM_iを決める際のA要因(用途)に応じて基本となる損失額F_{i0}、M_{i0}を表2のように設定し、その金額にB要因(需要家数)による係数F_{i1}、M_{i1}とC要因(重要施設の有無)による係数F_{i2}を乗じて各メッシュのF_iおよびM_iを算出した。それぞれ設定した係数を表3、表4に示す。

$$F_i = F_{i0} \cdot F_{i1} \cdot F_{i2} \quad (15)$$

$$M_i = M_{i0} \cdot M_{i1} \quad (16)$$

全メッシュについて、2万5千分の1の土地利用図⁴⁾より上記のA、B、Cの要因について読み取りを行った。尚、1メッシュに複数の重要施設がある場合もまれにあるので、その場合はC要因による係数をそれぞれ乗じた。それらを集計することにより以下の値を得た。

$$\sum_{i=1}^m F_i = 2,093,778 \quad \sum_{i=1}^m M_i = 664 \quad (\text{単位; 万円})$$

本計算においては、a=0.01, k=1.5, l=0.12, Tave=1.5(day), n=1000(万円/地震計), G₁=G₂=0.5, β₁=β₂=1.6の値を用いている。

このような条件のもとでの配置間隔R(km)と式(2)の目的関数Zとの関係を図8に示す。図8より最適な地震計の配置間隔は14.35kmであることがわかる。この場合、(供給区域の面積)/R²≒4となり地域内に4個の地震計を配置することになる。

表2 用途地域の影響

A要因	区分	基本となる F_{i1} (万円/2次災害)	基本となる M_{i1} (万円/停止時間)
1	一般住宅地域	1000	0.15
2	中高層住宅地域	5000	0.75
3	商業地区	2000	2
4	業務地区	5000	0.5
5	工業地区	2000	1.5
6	公共業務地区	5000	0.5
7	文教地区	1000	0.75
8	厚生地区	1000	0.75
9	公園緑地	500	0.05
10	運動競技施設	500	0.05
11	運輸流通施設	2000	0.5
12	供給処理施設	2000	0.5
13	防衛施設	2000	0.5
14	空き地	10	0.01
15	改変工事中区域	100	0.05

表3 需要家数の影響

B要因	区分	F_{i1} 用係数	M_{i1} 用係数
1	過密	1.5	1.5
2	標準	1	1
3	過疎	0.5	0.5

表4 重要施設の有無による影響

C要因	区分	F_{i2} 用係数
1	消防	1.5
2	ガス施設	1.4
3	病院	1.5
4	施設なし	1
5	警察	1.3
6	学校	1.1

4.2 高密度人口密集市街地を含むブロック（ケース2）

本ケースは、京阪神中心部の高密度市街地の例であり、300m x 400mのメッシュ1639個から構成され面積は196.7km²となる。ケース1と同じく最小の地震計間隔を0.35km、ネット効果のある最大地震計間隔は、地形・地質条件の変化が比較的急であることより10kmと仮定した。全メッシュに対して、A、B、Cの各要因について読み取りを行い、以下の値を得た。

$$\sum_{i=1}^m F_i = 4,425,230 \qquad \sum_{i=1}^m M_i = 1,520 \qquad (\text{単位; 万円})$$

地震計設置のための費用をn=1500（万円/地震計）とした以外の係数はケース1同様と仮定した。このような条件のもとでの配置間隔R(km)と式(2)の目的関数Zとの関係を図9に示す。図9より最適な地震計の間隔は7.2kmとなる。この場合エリア内に配置する地震計の個数は4個となる。ケース2の場合はケース1と比較して4分の1程度に小さいエリアであるが、地震計は同数必要となることがわかる。

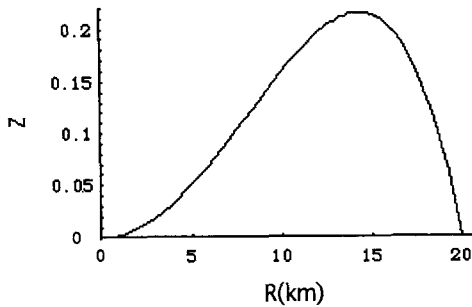


図8 目的関数（ケース1）

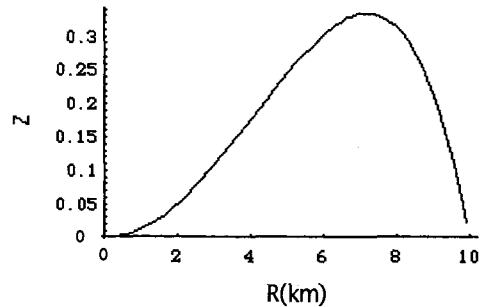


図9 目的関数（ケース2）

5. 結論

地震動モニタリングシステムは、地震動をモニターするための地震計を、地域にどのように配置すべきかを提言し、設置された地震計によって地震が発生した時にリアルタイムに地中管路の被害推定を行うための基礎データとなる加速度あるいは速度の地域分布を捉えるためのシステムである。本文では、システムが地域の経済的損失を低減する効果、地域の特性などを考慮した、モニター地震計の設置間隔を決定する目的関数を提案し、2地域を対象とした試算により7～14kmの配置間隔を得た。しかしながら、本文で提案した方法で算出される最適地震計間隔は、 a , T_{ave} , β など地震被害データに基づいた係数を仮定して算出されたものであるが、これらの係数値については更に豊富なデータによって値を修正する必要も考えられる。

参考文献)

- 1) T. Takatani, S. Takada, S. Fukui, T. Fuke; An estimating method of predicted seismic ground motions and an arrangement of remote monitoring seismographs for early detection of earthquake -damage. Proc. 10th WCEE, Vol.9, pp.5569-5574, 1992
- 2) 土質工学会関西支部・関西地質調査業協会; 新編大阪地盤図、コロナ社、1987
- 3) 吉川宗治・岩崎好規・田居優; 大阪地域の地震防災とボーリングデータベースによる大阪地盤のサイズミックゾーニング、都市防災シンポジウム講演概要集、土木学会関西支部、1987
- 4) 建設省国土地理院; 1:25,000土地利用図

(1993年 9月16日受付)