

都市供給施設 (ライフライン)

1. 序論
2. 水道とガスに関するこれまでの検討
3. 不整形な表層地盤のための手法の提案
4. 結び

国井隆弘*

要約

都市供給施設とライフラインとの関連・名称を定義した上で、水道・ガス管という地中埋設管に焦点を絞り、ハードな面から地震災害想定技法の検討を行なっている。ライフラインの同技法の取り扱い手法の歴史的背景に言及して、現在まで提案されている手法を評価している。その結果ライフラインにおいては、神奈川県の記事および岩倉市の報告書が十分に評価できる事、および今後の課題を示している。この課題には耐震設計法である応答変位法の問題点あるいはこれまでの手法に関する問題点が含まれるが、それに対して解決できる新しい技法の提案がなされている。この技法は最近多くの議論をもたらしている表層地盤の不整形性の観点にあり、その背景および今後の展望について新しい論点が明らかにされている。

1. 序論

地震災害想定技法が検討されるべき対象施設のなかで都市供給施設は、比較的新しい施設の1つである。この様に新しいとする言葉には2つの意味が含まれる。その1つは土木・建築などの施設に比べて同技法が議論された歴史が新しい事であり、他の1つは都市供給施設のなかには古くからある水道・ガス・下水施設と共に最近になり建設され始めている地中に埋設される送電送信施設等が含まれる事にある。

都市供給施設と呼ばれるものは現在
 上水道（給水・配水・貯水等）施設
 ガス（都市導配管・プロパン等）施設
 下水道（処理・送水等）施設

送電（給電・配電・変電等）施設

送信（電話・電信・光電波等）施設

などが代表的な施設として考えられる。これらの施設の地震災害想定技法を議論するためには施設を3種類に分類する必要がある。1つは土木・建築・生産施設などにもっとも多く見られる構造物であるが、平面的には点として存在し、地表あるいは地中に基礎を持ち地上に本体を置くものである。これらには震度法・動的解析法等通常の設計法が適用でき同技法も類似したものとなる。2つめはやはり点として存在するが地中に本体があるものである。これらは地下タンクに代表されるが土圧を含めた土と構造物の相互作用の影響を考慮することが不可欠である。3つめは水道・ガス管の様な地中に埋設された管状の配置形態を持つも

*東京都立大学都市研究センター・工学部

のである。これらの施設は設計法として応答変位法が適用される。本研究は都市供給施設のうちこの3つめの施設を検討の対象とする。3つめの都市供給施設はライフラインと呼ばれる。広義のライフラインにはこの他、地上にある道路鉄道あるいは送電等も含まれる。本論では、地中に埋設されたライフラインに限ってこれを対象とする。したがって

- ① 水道およびガスまたは石油パイプライン施設
- ② 共同溝（専用溝もある）あるいは下水道施設
- ③ 沈埋トンネル施設
- ④ 地下鉄、地下街（路）施設

等が考えられる。4種類に分けたのはそれらの主体となる細長い部分の太さ（剛性）および周辺地盤特性の違いによる。一般に①より④になるほど太く（③④は同程度）、①と③がまた②と④が共に類似した地盤に設置される事が多い。ここでは特に「水道とガス施設」を念頭に入れて議論を進める。すなわち水道とガスは都市供給施設でありかつライフラインであると見なせるからである。しかしながら地震災害想定技法のうちハードに関する観点では他の施設も基本的にはほぼ同様に扱える。

水道とガス施設の地震災害想定技法のためにはかなり概略であるが

- a) 構造物としての耐震性
 - a-1: 管路に生じるひずみ
 - a-2: 管路以外の部分および施設
 - a-3: 砂地盤の液状化
- b) 必要な機能の維持と漏えい
 - b-1: 緊急対応システム
 - b-2: 供給回路（ネットワーク理論）
 - b-3: バックアップシステム
- c) 施設の機能が損失した時の影響

に大別して検討すると分かり易い。a) から c) に移行するに従ってハードからソフトの問題になると考えられる。c) については本号の他の論文でとりあげる。本論では a) を中心に述べたい。なお b) は後述する岩倉市の例が参考となる。

2. 水道とガスに関するこれまでの検討

石油パイプラインの耐震安全性に関する問題が議論され始め、地下に埋設された管（以後ここでは『地中埋設管』という名称で呼ぶ）の耐震設計手法が確立されたのは1977年であり（建設省総合技術開発プロジェクト, 1977）他の構造物に比較して新しい。この手法は応答変位法と呼ばれる。その考え方の説明は省略するが、各種施設が応答変位法に基づいて設定した設計指針等の要点をまとめると表1となる（高田, 1989）。現在はこれらの指針によって設計されているが、10年程前に埋設された地中埋設管にはこの手法が適用されてない事等から地震災害想定技法の1つとして応答変位法が採用され得る。

しかしながら東京の様に広域において地中埋設管を個々にこの手法に照らし合わせていくのは非常に困難であり不可能に近い。そこで地震災害想定技法としては

- ① 地中埋設管の実態の把握手法
- ② 地中埋設管の種類と強度の推定手法
- ③ 地中埋設管に生じるひずみの把握手法
- ④ 過去の地中埋設管の地震被害の調査

が注目される事項である。これらに関して最初に本格的な検討を加えたのが久保らによる

『東京区部における地震被害の想定に関する報告書』, 東京都防災会議, 1978年

である。この中では水道とガスについて①は東京区部においては各区において管の種類ごとの総延長および各種継手の総数を求めるのが限界であるとしている。②については今後の実験的研究待ちと考えている。③④については区部を1kmのメッシュで取り扱い、卓越振動数のばらつきおよび地盤種別の3種のパラメータを用い、これをひずみの代わりにの指標とし、これと1923年の関東大地震およびその他の地震での被害率との関係をもとに被害の予測を行っている。また砂地盤の液状化についても検討を加え各区ごとに被害予測数の割り増しを行っている。被害予測結果は1kmのメッシュごとに3つのランクで示されている。

表1 地下の管路の耐震設計指針等の要点の比較

項目	石油パイプライン 地震対策要綱	水道施設耐震工法 指針	ガス導管耐震設計 指針	共同溝耐震設計 要項	地下管路設備耐震 設計指針 (NTT)
基盤 入力	設計基盤面水平震度： $K_{0A} = \nu_1 \cdot \nu_2 \cdot K_0$ K_0 : 基盤標準設計 水平震度 ($K_0 = 0.15$) ν_1 : 地域別補正係数 ν_2 : 経由地の利用区 分別補正係数	設計水平震度： $K_A' = 3/4 \cdot \Delta_1 \cdot K_0$ Δ_1 : 地域係数 K_0 : 標準設計水平震 度 (0.2 を下まわらな い値)	設計水平震度： $K_{0A} = 0.15 \cdot \nu_1 \cdot \nu_2$ ν_1 : 重要度係数 ν_2 : 地域別補正係数	設計水平震度： $K_A' = 3/4 \cdot \nu_1 \cdot K_0$ K_0 : 地表面標準設 計水平震度 ($K_0 =$ 0.2) ν_1 : 地域別補正係数	設計水平震度： $K_{0A} = 0.15 \cdot \nu_2$ ν_2 : 地域別補正係数
表層 地盤の 固有 周期	$T = C \cdot \frac{H}{V_{1i}}$ T : 表層地盤の地震 動の周期 H : 表層地盤の厚さ V_{1i} : 表層地盤のせん 断弾性波速度、粘 性土の場合では、 V_s ($= 20 \times 10^2 N^{0.5}$) の平均値とし、砂質土 の場合では最大値と する。 C : 粘性土地盤 $C = 4$ 砂質地盤 $C = 5.23$	$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{1i}}$ T_G : 表層地盤の基本 固有周期 H_i : 第 i 層の厚さ V_{1i} : 第 i 層地震時せん 断波速度 i) 弾性波探査値の 1/2 ii) N 値から推定	$T = \frac{4H}{V_s}$ $V_s = \frac{\sum V_{1i} \cdot H_i}{H}$ T : 表層地盤の固有 周期 H : 表層地盤の厚さ ($\sum H_i$) V_{1i} : 第 i 層地震時 せん断波速度 i) 弾性波探査 $\times C$ $C = 0.85$ (粘性土), 0.6 (砂土) ii) N 値から推定 砂質土: $V_s = 62 \cdot N^{0.21}$ 粘性土: $V_s = 122 \cdot N^{0.078}$	$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{1i}}$ $T_i = 1.25 T_G$ T_G : 地盤の特性値 (s) H_i : i 番目の地層 の厚さ V_{1i} : i 番目の地層 の平均せん断弾性波 速度 粘性土層の場合 ($1 \leq N_i \leq 25$) $V_{1i} = 100 \cdot N_i^{1/3}$ 砂質土層の場合 ($1 \leq N_i \leq 50$) $V_{1i} = 80 \cdot N_i^{1/3}$ T_i : 表層地盤の固 有周期	ガス導管耐震設計指 針と同じ
見 かけ の 波 長	$L = \frac{2L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$ $L_1 = T \cdot V_{1i}$ $L_2 = T \cdot V_0$ T, V_{1i} : 上欄に規定 するもの V_0 : 基盤面せん断 弾性波速度	$L = \frac{2V_s \cdot V_0 \cdot T_G}{V_s + V_0}$ V_s : 表層地盤の平均 せん断弾性波速度 V_0 : 基盤面のせん断 弾性は速度	$L = V \cdot T$ V : 地震動見かけ伝播速度	$L = \frac{2L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$ $L_1 = V_{DS} \cdot T_s$ $L_2 = V_{BS} \cdot T_s$ $V_{DS} = 4 \cdot H / T_s$ T_s : 上欄に規定す るもの V_{BS} : 基盤面せん断 弾性波速度 H : 表層地盤の厚さ	$L = \frac{2L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$ $L_1 = T \cdot V_s$, 表層で の地震動の波長 $L_2 = T \cdot V_B$, 基盤で の地震動の波長 V_B : 基盤せん断弾 性波速度 T, V_s : 上欄で規定 するもの
単 位 震 度 当 り	 固有周期 T (sec)	石油パイプライン 耐震要綱と同じ	 固有周期 T (sec)	石油パイプライン 地震対策要綱と同じ	ガス導管耐震設計指 針と同じ
表 層 地 盤 変 位	波動の変位振幅： $U_A = 2/\pi^2 \cdot S_v \cdot T \cdot K_{0A}$ S_v : 応答速度規準値 (T と相関) T : 表層地盤固有周 期 K_{0A} : 設計基盤面水 平震度	地表から深さ X の水平 変位振幅： $U_A(X) = 2/\pi^2 \cdot S_v \cdot T_G \cdot K_A' \cdot \cos(\pi X/2H)$ S_v : 単位震度当りの 応答速度 T_G : 表層地盤固有周 期 K_A' : 地盤面設計水平 震度 H : 表層地盤の厚さ (m)	表層地盤変位： $U_A = 2/\pi^2 \cdot S_v \cdot T \cdot K_{0A} \cdot \cos(\pi Z/2H)$ S_v : 単位震度当り の応答速度 T : 表層地盤固有周 期 K_{0A} : 地盤面設計水 平震度 H : 表層地盤の厚さ (m)	地表から深さ Z の水 平変位振幅： $U_A(Z) = 2/\pi^2 \cdot S_v \cdot T_s \cdot K_A \cdot \cos(\pi Z/2H)$ $U_s(Z) = 1/2 U_A(Z)$ S_v : 単位震度当り の応答速度 T_s : 表層地盤固有 周期 K_A : 地盤面設計水 平震度 H : 表層地盤の厚さ (m)	ガス導管耐震設計指 針と同じ

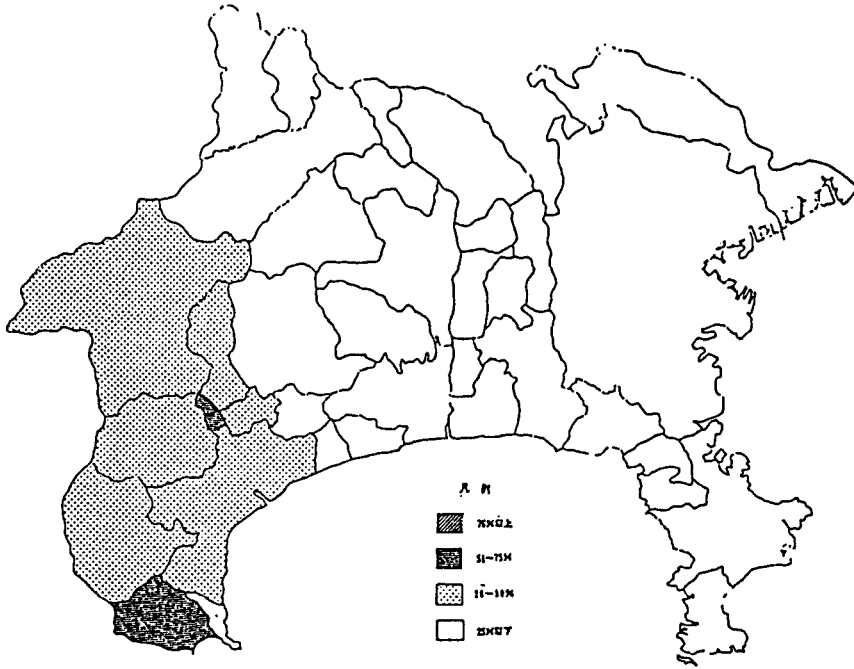
表1のつづき

<p>地盤ひずみ</p>	$\epsilon_G = \frac{\pi U_A}{L}$ <p>U_A, L: 上欄に規定するもの</p>	<p>石油パイプライン地震対策要綱と同じ</p>	$\epsilon_G = \frac{2\pi U_A}{L}$ <p>U_A, L: 上欄に規定するもの</p>	<p>水平面内に地盤振動 $\epsilon_A = \frac{\pi U_A}{L}$ 鉛直面内に地盤振動 $\epsilon_v = \frac{\pi(U_A + U_v)}{2L}$</p>	<p>共同溝耐震設計要項と同じ</p>
<p>地盤変化</p>	<p>構造対策細目</p>	<p>規定なし</p>	<p>地盤ひずみ $\epsilon_{G2} = \sqrt{\epsilon_{G1}^2 + \epsilon_{G3}^2}$ ϵ_{G1}: 一様地盤ひずみ, ϵ_{G3}: 基盤傾斜角による地盤ひずみ変化量 $\epsilon_{G3} = k \frac{K_{0A}}{V_s} \tan \theta \cdot \cos \frac{\pi Z}{2H}$ K_{0A}, T, V_s: 上欄規定するもの θ: 基盤傾斜角</p>	<p>急変部の管路断面力 $F_T = F_{TR} + F_{UNI}$ F_{UNI}: 表層地盤の固有周期の長い方の一様地盤における断面力 F_{TR}: 地盤急変部の地盤の変位振幅の差に基づく断面力</p>	<p>規定なし</p>
<p>地盤変状</p>	<p>規定なし</p>	<p>規定なし</p>	<p>1) 地すべり, 崩壊, 液状化のおそれのある地盤が別途検討 2) 標準設計地盤変位 $U_0 = 5 \text{ cm}$ 3) 埋設条件区分 I, II, III a, III b 管種区分 中圧 A, B, 本支, 供給管 4) 設計地盤変位 i) 地域別補正 α_1 ii) 管種・埋設条件別補正 α_2 水平方向 $U = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot U_0$ 鉛直方向 $V = 1/2 \cdot U$ 5) 管材料の基準ひずみ, 継手類の基準変位を規定し 6) 地盤変位吸収能力 $\Delta U, \Delta V$ i) 簡易計算 (計算式を与え) ii) 数値解析 iii) 実験 7) 耐震性の評価 $\Delta U > U, \Delta V > V$ 安全</p>	<p>1) 液状化検討対象地盤の調査 2) 液状化発生の可能性の評価 3) 浮上りに対する検討 $F_* = \frac{W_s + W_{B+}}{U_s + \frac{Q_s + Q_B}{U_d}}$ W_s: 上載土重, W_{B+}: 自重, Q_s: 上載土のせん断抵抗, Q_B: 共同溝側面の摩擦力, U_s: 静水圧による揚圧力, U_d: 過剰間隙水圧による揚圧力 4) $F_* < 1.0$ の場合は現場, 室内実験および地盤応答解析による液状化の判定 5) 液状化対策を講じる</p>	<p>1) 液状化による浮上検討共同溝設計要項 2) 液状化による側方流動量 $D = 0.75 \cdot F_*^3 \cdot \theta$ 3) 軟弱地盤の沈下量最大軟弱層厚の0.5% 4) 盛土沈下, 崩壊の検討 5) 液状化地盤における対策マンホール: グラベルドレーン管路: 金属管路を使い, 継手を適切に設置 6) 盛土における耐震対策 i) 崩壊面を避ける ii) 金属管路を使い継手を適切に設置, マンホール側壁に防護コンクリート 7) 軟弱地盤における対策 地盤変位を吸収できる継手を設置</p>

片山が中心となって神奈川県が行った『神奈川県地震被害想定調査報告書(ライフライン)』, 神奈川県, 1986. では前述の東京都の考え方がさらに発展して検討されている。図1にその成果の1例を示す。メッシュは500mになり, 水道, ガスおよび電力を対象とし, また被害の復旧過程にまで検討が進めら

れている。現時点で考えられ得る地震災害想定技法を駆使しきっていると評価できる。しかしながら被害の予測の根底にあるのはやはり過去の地震における被害率とパラメータであり, 具体的な地盤と地中埋設管の力学的な挙動には言及されていない。

供給支障率（東海地震）



供給支障率（南関東地震）

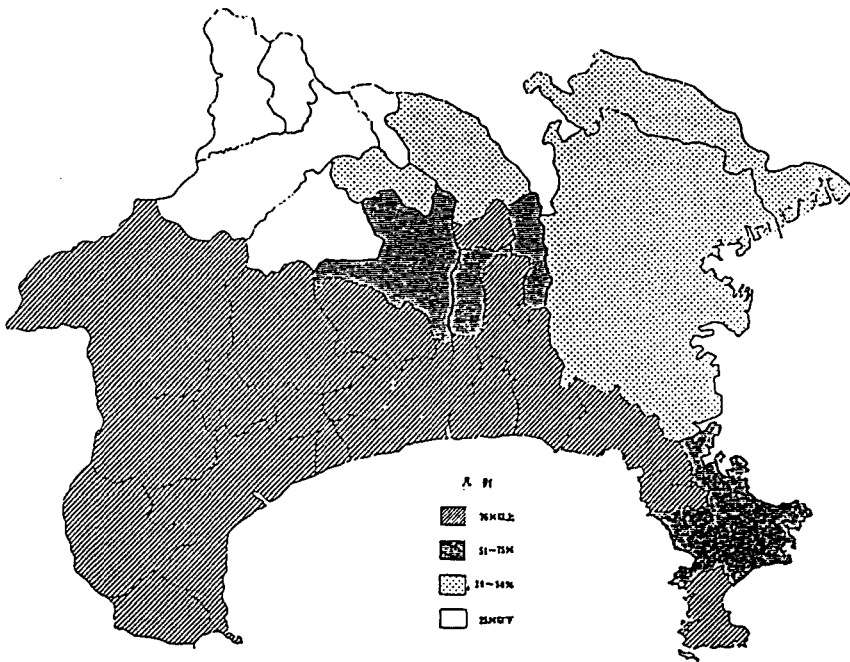


図1 供給支障率（神奈川県）

被害危険度ランク

- | | |
|---|--------|
| 1 | } ○非破壊 |
| 2 | |
| 3 | |
| 4 | } ●破壊 |
| 5 | |

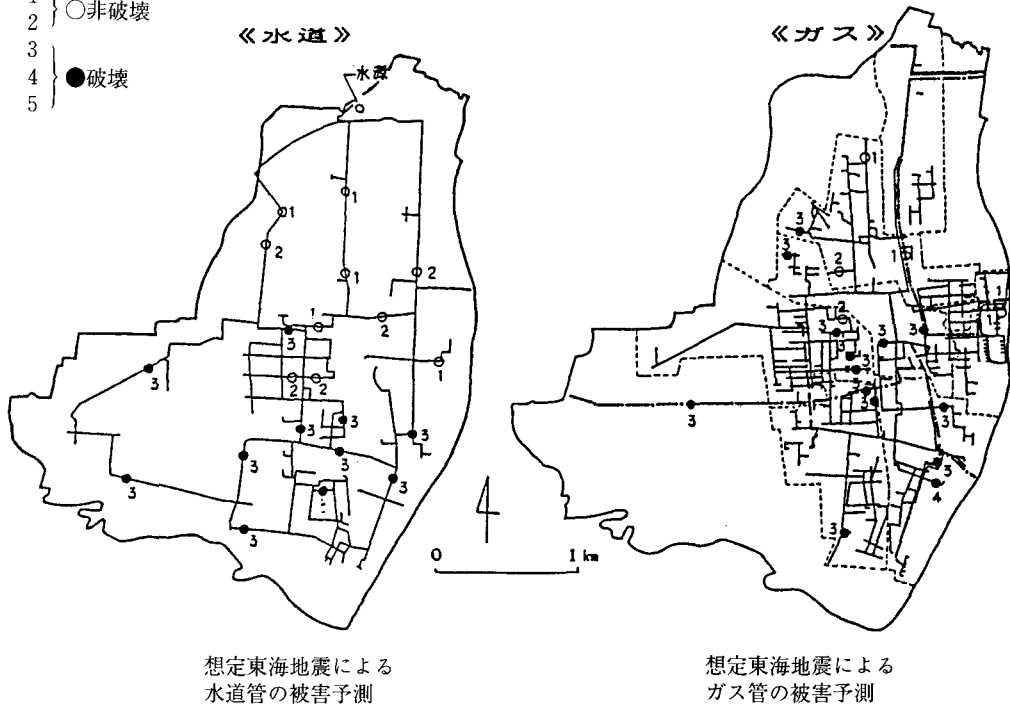


図2 水道とガス管の被害予測（岩倉市）

岩倉市においては

『岩倉市地震対策基礎調査報告書』, 岩倉市, 1989.

の中でライフラインの被害想定として都市供給施設の被害を考えている。ここでは地中埋設管の力学的検討が応答変位法によって行われていると共に、ネットワーク理論によるシステムの復旧を取り扱っている点に注目される。また砂地盤の液状化の判定に新しい手法を取り入れ、その成果をライフラインの被害想定に適用している。図2に成果の一部を示す。最新の報告であり、これまでの検討に新しい考え方を導入している事から十分に評価できる。

3. 不整形な表層地盤のための手法の提案

ここでは、地中埋設管に関する地震災害想定技法に重要な課題の1つである管路に生じるひずみ

に対して筆者が試みている手法を提案したい。本論で用いる不整形な表層地盤とは、水平な地表面に対してこれと平行でない見なせる基盤面、および表層地盤を有する地盤形態である。具体的に都市部におけるこのような地盤は、中小河川に沿って形成された平地あるいは台地から海岸に続く平低地に見られる。

不整形な表層地盤では、基盤と表層地盤の境界あるいは表層地盤内での異質な層の境界が地表面と平行でないため、通常は地表面とほぼ平行に設置される地中埋設管が被害をうけやすい事は明らかである（佐藤, 1985; Akiyosi, 1988）。応答変位法はその理論の基本の1つが地震波の重複反射にある。したがって立脚点が地表面と平行な表層地盤層および基盤にある。この仮定が応答変位法の残された課題である。

筆者は以前に不整形な表層地盤に注目して、世田谷区を対象に、FEMを用いた地中埋設管の被害予測手法を提案している（国井, 1985）。この

方法はマイクロゾーニングを目的としたもので、500mメッシュにおいて実施している。図3は対象地域の地盤特性であり、図4は応答変位法による例、図5がFEMによる結果である。この両者の大きい方を採用して両者を合成し、地盤の危険度ポテンシャルの予測を試みたのが図6である。参考のため前述した東京都防災会議で行われた成

果を図7に示す。両図は尺度が同じではないがある程度は類似している。

前述した世田谷区の例は、ごく簡単な地盤モデルで行われた。実際の地盤条件により適合したモデルによる解析が要求される。そこで地盤モデルの形態が地震動特性に及ぼす影響を検討する事が必要であると考えられる。最近になり不整形な表

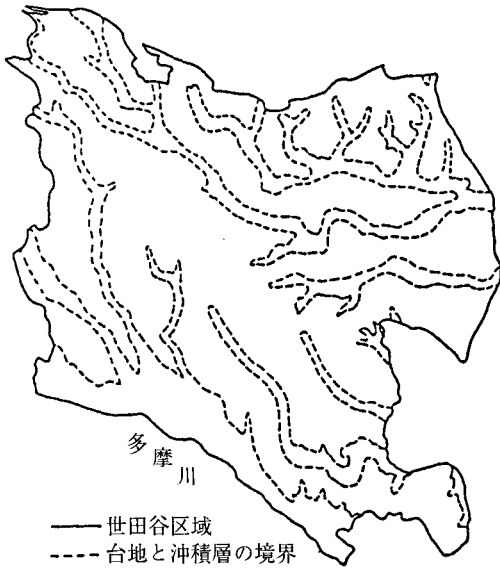


図3 世田谷区の台地と沖積層

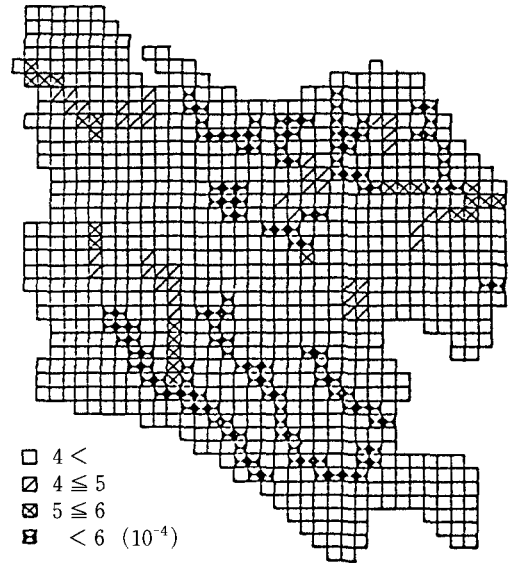


図5 FEMによる地表面のひずみ

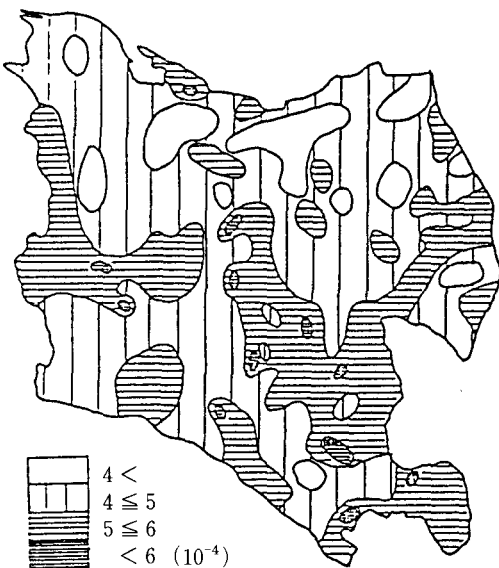


図4 応答変位法による地表面のひずみ

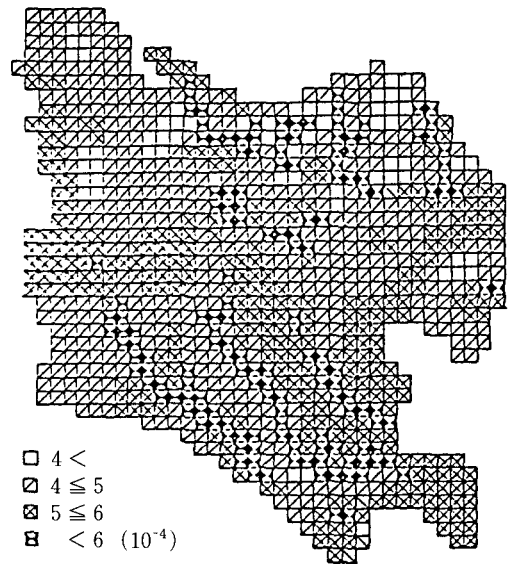


図6 応答変位法とFEMを併用した地表面のひずみ

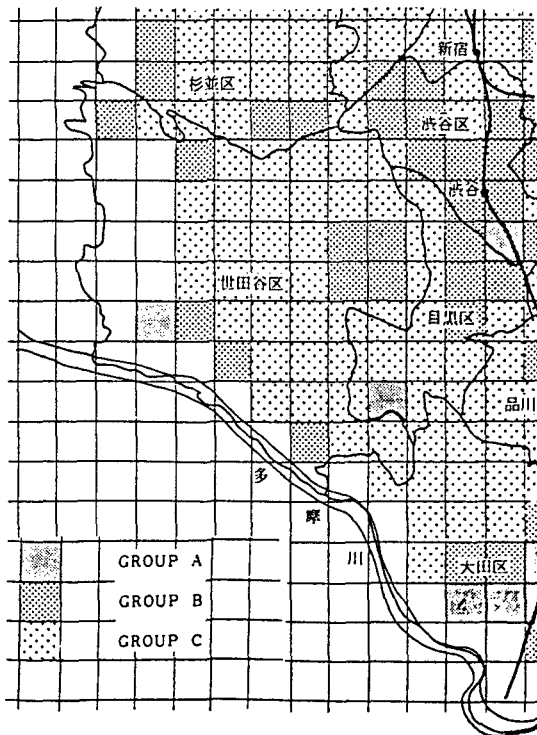


図7 東京都23区の地盤条件の分類(都防災会議の図から世田谷区を中心に複写)

層地盤の地震動特性に関する研究は近かなり精力的に行われている。この種の研究は、3次元地震入力による3次元解析を、地盤のひずみレベルに対応した剛性の低下および減衰能力の向上を評価した非線形応答によって実施されるのが理想である。しかし現在の研究現状では、1次元入力による2次元解析が限界であり、非線形応答はほとんど行われていない。しかも現在のコンピュータの可能演算時間以内で、実際に存在する各種の地盤条件を例えばマイクロゾーニングとして取り扱える手法が明かにされていない。今後の課題であろう。

本論ではこの課題に取り組んだ結果、ある程度の展望を得たので、その結果をごく簡単に説明したい(国井他, 1989)。結論から述べれば、1部地中の基礎構造物の地盤との相互作用解析に用いられるFEMプログラムFLUSHを、逆の発想で構造物を表層地盤に置き替える手法を開発した。これにより1次元入力による疑似3次元解析が可

能となり、同時に非線形応答解析が等価線形解析手法ながら可能となった。またこのプログラムは周波数領域を利用した応答解析であるので、コンピュータの演算時間が非常に早い(FFTを実行)事から各種の地盤パターンに対応できる可能性がある。詳しくは(国井他, 1989)によるが、今後の都市研究センター発行の『総合都市研究』に論文を掲載したい。

4. 結び

都市供給施設とライフラインの共通した施設として、水道・ガス管(地中埋設管)について注目し以下に列記する事項に言及した。

- 1) 地中埋設管の耐震設計における歴史および地震災害想定技法の開発の流れを説明した。
- 2) 不整形な表層地盤に対する地震災害想定技法の必要性を述べ、具体的な解析例を示して新しい手法の可能性を示した。

引用文献

国井隆弘

1985 「マイクロゾーニングを目的とした地中埋設管の地震時被害予測」『総合都市研究』第26号。

国井隆弘・萩原智寿

1989 「不整形な表層地盤が地震動に及ぼす影響に関するパラメータ解析」『表層地質が地震動に及ぼす影響』シンポジウム(日本学会会議主催)論文集。

建設省総合技術開発プロジェクト

1977 「新耐震設計法(案)」。

佐藤紘史・石川隆

1985 「信設管路の地震時挙動に関する一考察」『構造工学論文集』Vol. 31A,。

高田至郎

1989 「地中ライフラインの耐震設計」『土木技術』Vol. 44, No. 8。

Takasi AKIYOSI and Kunihiko FUCHIDA

1988 SEISMIC RESPONSE OF PIPELINE SYSTEMS BURIED IN DIPPING SOIL LAYERS. Proc. of the 9th WCEE, Vol. VII, 1988.

Key Words (キー・ワード)

Life Line (ライフライン), Urban Supply Equipment (都市供給施設), Buried Pipeline (地中埋設管), Seismic Deformation Method (応答変位法), FEM (Finite Element Method) (有限要素法), Damage Estimation (被害予測), Surface Layers Having Irregular Base Shape (不整形な表層地盤)

URBAN SUPPLY EQUIPMENTS (LIFE LINES)

Takahiro Kunii*

*Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University

Comprehensive Urban Studies, No. 38, 1989, pp.65-74

This paper reports on the technical estimation of damage to underground "life lines"—water supply and gas pipelines—which are part of "urban supply equipments" (i.e. water supply systems, sewerage, gas pipes, transmission systems, electricity, etc.) . In a strong earthquake, underground pipelines will presumably be damaged at many points. In view of the loss of life faculty, such damage will have to be promptly repaired.

The study of the loss of faculty of these underground pipelines is classified as follows:

- a) strain of pipeline
- b) liquefaction of sand layers
- c) emergency systems
- d) network theory
- e) backup systems.

Here we are concerned with the study of a) by means of FEM analysis. Problems b) through e) are referred to in the report of Kanagawa prefecture.

Since about 1970, researchers in Japan have analyzed seismic deformation design processes in search for ways of making oil pipelines aseismic. In 1977, this concept was defined as Displacement Response Method (DRM) . An earlier aseismic examination method for underground pipelines was considered insufficient, since it was based on the assumption that ground surface, surface layers and base are parallel, while in many urban regions they are in fact irregular.

A report of the Tokyo Disaster Prevention Conference dealt with this irregular condition by calculating separate predominant frequencies for every 1 km of mesh. Damage evaluations from several past earthquakes were also introduced. My paper reports on FEM and DEM analysis of a 500 m mesh in Setagaya Ward and compares the results with those of the Disaster Prevention Conference report. There is agreement in region, but not in the scale of mesh.

My next report will be on "FEM analysis based on the FLUSH program," published under the title "Effect of Surface Layers with Irregular Bases on Seismic Waves" in the 1989 symposium report of the Science Council of Japan.