

○株式会社パスコ システム技術事業部 村田 雅彦
技術開発室 佐藤 亮

1. はじめに

水道・ガス・電力等のライフラインは都市における市民生活にとって欠くことのできない重要な施設であり、その機能低下は都市機能の致命的な障害となりうる。ライフラインを構成する施設の機能低下の要因としては様々なものが考えられるが、中でも最も深刻・重大なものとして地震が挙げられるであろう。地震被害を最小に抑える上で、施設の持つ情報を管理し、被害の予測を行い、施設の強化・被災時の対応計画を常時用意しておくことが重要である。ここではこうした観点から、ライフライン施設の地震による被害を考察する一つのアプローチとして水道管ネットワークを取り上げ、地震時の機能低下をシミュレートするためのコンピューターシステムを構築した。このシステムの最大の特徴は、基本となるソフトウェアとしてGIS (Geographic Information System : 地理情報システム) を用いていることである。GISとは通常地図に記載される地理情報をコンピューターで保持・管理し、操作・解析等を行うソフトウェアであり、ライフラインのような地理的な情報を持った対象を取り扱うに際して強力なツールになると考えられる。本研究では、米国ESRI社の開発したGISパッケージであるARC/INFOを用いた。以下、このシステムの機能について概説し、あわせて、米国テネシー州シェルビー郡メンフィス市の水道管ネットワークを対象に行った、ケーススタディについて述べる。

2. システムの構成

このシステムの構成を図-1に示す。この図からわかるように、本システムは幾つかの機能単位から構成されている。以下、各機能単位についてその概要を述べる。

(1) ネットワークデータ作成・編集

水道管ネットワークはパイプ・バルブ・供給ノード・取り出し口等様々な設備で構成されているが、ここではノードとリンクの2種類の構成要素に単純化したモデルを採用した。ノードは供給ノードと需要ノード(取り出し口)の2種類からなり、後述する流量解析では、供給ノードでの水頭値を固定して各需要ノードでの水頭値を計算する。リンクはノード間を繋ぐパイプに対応し、ここではその形状は考慮せずノード間の直線としてモデル化した。ノード・リンクの位置情報はGIS

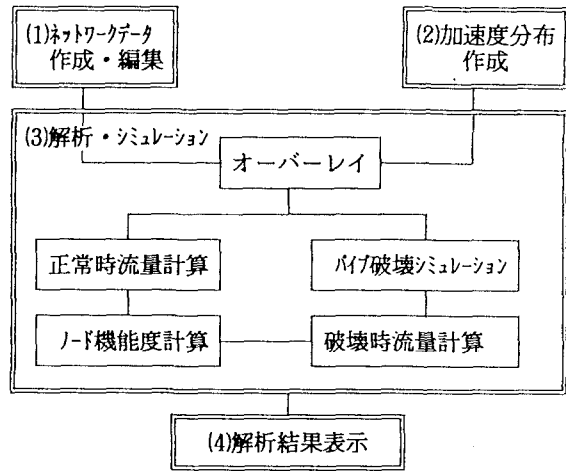


図-1 システム構成

のデータ入力機能を用いてコンピューター上のデジタル地図として登録され、データベースに格納されている属性情報と1対1で関連付けられている。このシステムは、上述の図形情報・属性情報を編集・更新する機能を備えており、ユーザーはコンピューター上で仮想的に改良もしくは破壊を加えたネットワークを作成し、その変更の効果を評価することが可能であり、設備改良や災害対策を計画する上で有用な機能である。図-2にケーススタディでこのモジュールを用いて入力したメンフィス市の水道管ネットワークを示す。このネットワークは962個のノード、1312本のリンクから構成されている。

(2) 加速度分布の作成

本研究では、パイプ破壊の要因として、地震動を考えており、その強度を表す尺度として地表面最大加速度を用いた。ケーススタディの対象地域については、メンフィス市の北西50 kmを震源としたマグニチュード7.5の想定地震に対して462か所での地表面最大加速度を計算した研究結果があり、ここではその計算値を使用した。点データとして計算された加速度を対象地域全域にわたって補間・外挿し、GISのオーバーレイ機能を用いて、ネットワークと重ね合わせ、各リンクにおける加速度を与えた。図-3に加速度の計算結果及び補間結果を示す。図から分かるように、対象地域の北西部で大きな加速度が期待される。

(3) 解析・シミュレーション

ここでは、(1)で作成されたネットワークデータ及び(2)で作成された加速度分布を基にしてシミュレーションを行い、ネットワークの機能度を求める。まず、加速度分布をネットワークデータとオーバーレイし、各リンクにその位置での加速度を与える。続いて、エネルギー法を用いて流量計算を行い、正常時の各ノードでの水圧・水量を計算する。次に与えられた加速度をもとに、モンテ・カルロ法を用いてパイプ破壊をシミュレートする。ここでは加速度から経験則に基づいて各パイプの破壊確率を計算し、0から1までの一様乱数と破壊確率を比較して、その大小関係に応じてパイプの破壊・非破壊を決定した。ネットワークの全リンクに対し破壊状況を決定した後、破壊されたリンクをネットワークから取り除き新ネットワークを構築する。この新ネットワークに対して流量計算を行い、破壊を受けた状態での各ノードでの水圧・水量を求める。このシミュレーションと流量計算の過程は指定された回数分繰り返して実行され、その結果を平均して、想定された地震発生時にネットワークの各ノードで期待される水圧・水量とし、機能度評価を行う。

図-4に本研究において用いたノードにおける機能度の定義を示す。ここではシミュレーションによって求められた破壊時のノードにおける水圧・水量について、正常時の場合の値との比をもとに、ノードの機能度を定義した。メンフィスの水道管ネットワークに対して行ったシミュレーション結果に基づいたノードの機能度を図-5に示す。図から対象地域の北部で機能の低下が著しいのが見てとれる。これは図-3の加速度分布からわかるように、想定された地震に対しては北部で震度が大きくなっているためと考えられる。また、ネットワークの構成からわかるように、北部ではパイプの構

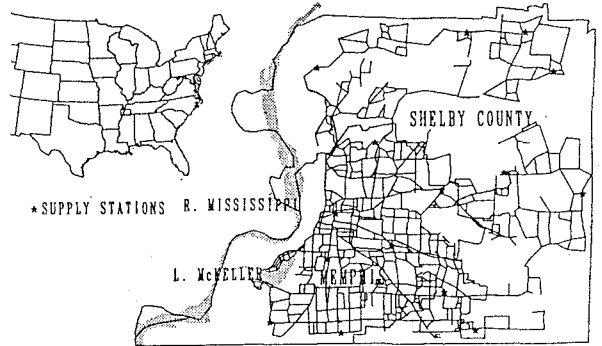
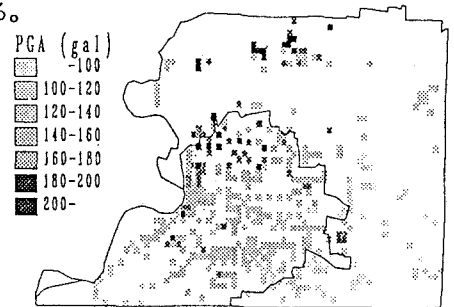
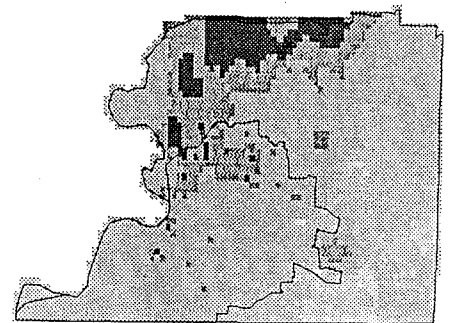


図-2 ケーススタディ対象地域



a) 計算結果



b) 補間後

図-3 地表面最大加速度

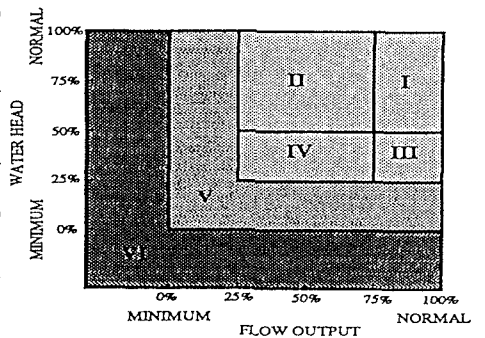


図-4 ノード機能度の定義

成がまばらであり、地震による破壊に対して脆弱であることも要因の一つであろう。この地域のネットワークの強化は地震による機能の低下を防ぐ上で重要と考えられる。

各ノードについて求められた水量をもとに計算した国勢調査区域（センサストラクト）毎の水供給状況を図-6に示す。この図から分かるように対象地域の中心部では水供給は需要をほとんど満足しているが、北西部においては供給不足が著しい。また南東のトラクトにおいても水の供給不足が発生しているのがわかる。このような表現法を用いることでどの地域で水供給不足が発生するかを分かりやすい形で示すことができる。

図-7には、各ノードでの水頭値をGISの機能を用いて補間して面的な分布として表現したものを示す。水頭値として100m以下の地域がメンフィス市北部に存在しているのが分かる。こうした面的な表示を行えば、水圧の地理的な分布を効果的に表すことができ、水供給状況の把握がより容易なものとなる。

(4) 結果表示

GISの機能として大きな位置を占めるのは視覚化の機能である。地理的な情報を様々な形式の地図として表示し、意思決定支援に有効な役割を果たすことができる。本システムではこの視覚化の機能を用いて、様々な形式の地図表示を行えるようになっており、管理者の意思決定の重要な手助けとなりうる。

3. ネットワークの改良計画の評価

ケーススタディの対象地域の水道管ネットワークを管理・運営しているMemphis Light Gas and Water Division (MLGW)では今後1996年までのあいだに、水道管ネットワークの強化・改良を計画している。この計画は増大する水需要に対応するための改良を目的としており、地震に対する機能強化を目的としたものではないが、地震被害に対する改良の効果を評価するために、解析を行ってみた。

図-8に1996年までに計画されているネットワークの改良計画の概要を示す。ここでは、供給ステーションの機能強化、新ステーションの建設、パイプの交換・追加等を含んでいるが、図からわかるようにメンフィス市の郊外を中心としたネットワークの改良に重点が置かれている。

改良計画にある供給ノードやパイプの追加・機能強化は本システムのデータ編集機能を用いて既存のネットワークデータに追加され、新しいネットワークデータとして作成された。既存のネットワークの場合と同じ加速度分布を用いてシミュレーションを行った結果のノードの機能度の分布を図-9に示す。これを図-5の既存ネットワークにおける機能度

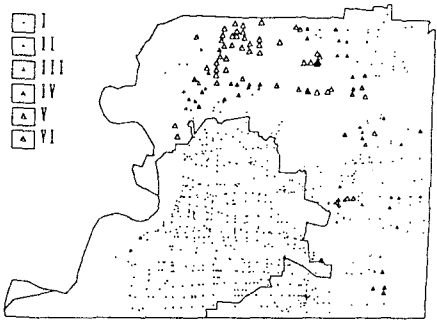


図-5 ノード機能度クラスの分布

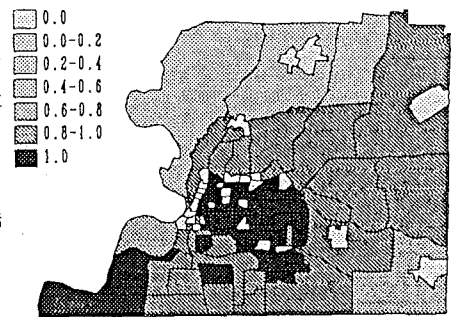


図-6 センサストラクト内の水需給状況 (破壊時水量/正常時水量)

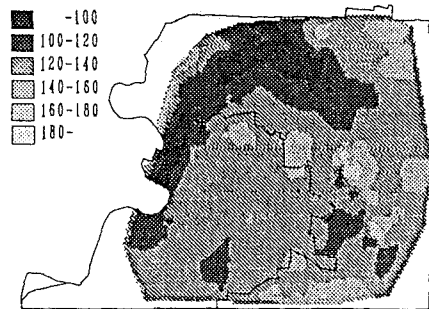


図-7 水頭値分布 (m)

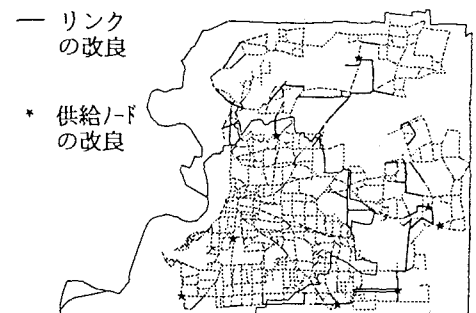


図-8 ネットワーク改良計画 (1996年まで)

分布と比較すると、東部に存在していた機能度VIのノードが大幅に改善されているのがわかる。また北部の機能低下の著しかった地域でも大きな改善が見られる。同様に、図-10には補間された水頭値の面的分布を示す。図-10からは、図-7において明らかだった水頭値100m以下の地域が著しく縮小しているのが見て取れる。これらの結果から、計画されているネットワークの改良・強化は地震に対する機能強化の点からも、有効であるということが言える。

4. むすび

GISの機能は、ライフラインにおける地震による機能低下の評価において、画期的な有用性をもっている。ネットワークのもつ地理的情報および属性情報を管理し、解析を行い、結果を効果的に表示することで、管理者の意思決定のための支援システムとして十分機能すると考えられる。

今後は、異なった想定地震に対してもシミュレーションを行い、さらには液状化等、他の被害要因も考慮に入れたシミュレーションを行うことで、より現実的な解析が行えると考えている。

本研究においては、メンフィス州立大学 H. Hwang 教授に対象地域での想定地震に対する加速度の計算結果を提供して頂いた。また、本研究は米国地震工学研究所(NCEER)の援助のもとプリンストン大学にて、同大学篠塚正宣教授の指導・示唆を受けつつ行われたものである。ここに心から深謝いたします。

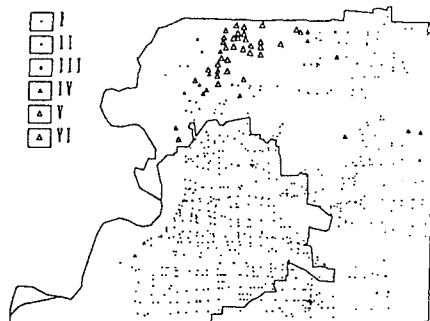


図-9 ノード機能度クラスの分布(改良後)

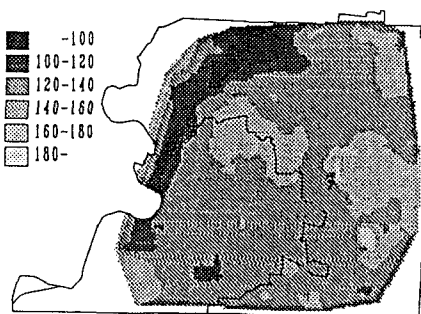


図-10 水頭値分布(改良後:m)

参考文献

1. H. Hwang, C. S. Lee, K. W. Ng and T. S. Chang, "Soil Effects on Earthquake Ground Motions in the the Memphis Area", Technical Report NCEER-Grant No. ECE 86-07591, Center for Earthquake and Information, Memphis State University, Memphis, Tennessee, 1990
2. T. koike, R. Y. Tan and M. Shinozuka, "A Comprehensive Computer Program for Calculating the Failure Probability of Underground Water Pipeline and Serviceability of Systems under Seismic Risks", 1986
3. R. Sato and M. Shinozuka, "GIS-Based Interactive and Graphic Computer System to Evaluate Seismic Risks on Water Delivery Network", Princeton University, Princeton, New Jersey, 1990
4. M. shinozuka and T. Okumura, "A Computer Code for Reliability Analysis of Water Delivery Systems", Princeton University, Princeton, New Jersey, 1990