京都大学防災研究所年報　第39号 B-2　平8. 4
Annuals, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 39 B-2, 1996

地理情報システムを用いたライフラインシステムの地震時挙動評価

田中　聡・河田　恵昭

Lifeline Seismic Performance Analysis Utilizing Geographical Information Systems

By *Satoshi* TANAKA and *Yoshiaki* KAWATA

Synopsis

Along with the recent progress in earthquake engineering, a bulk of technical information is now available pertaining to seismic resistant design, analysis, construction and retrofit of buildings and lifeline physical systems. At the same time, well developed methods are in place to evaluate the system's seismic performance not just from physical but also from functional points of view. This paper presents a quantitative method of evaluating the lifeline seismic performance analysis for water and electric power systems utilizing Geographic Information Systems. Taking new damage models and system redundancy into consideration, the performance degradation due to earthquake is clearly characterized visually. In addition, lifeline system interactions which have been observed under earthquake conditions are evaluated quantitatively. It indicates that designing effective retrofitting and/or restoration strategy, the interaction effect should be taken into account.

1. はじめに

地震時におけるライフラインシステムの機能性能は，地震によるそのシステムの物理的な被害の影響のみならず，同じ地域にサービスを供給する他のライフラインシステムの地震時挙動にも大きく影響されることが知られている。例えば水道システムの場合，配水所のポンプは（予備電源を持っていない場合）地震による停電のため電力の供給が停止すると，配水所そのものは地震で無被害であっても，その機能を停止してしまう。また，高速道路のような道路交通システムの場合，道路の応急修理，埋設管の修理，周辺の建物の補修工事等のために著しくその機能が損なわれることがある。このような通行障害は，消防・救急などの緊急車両の通行を阻害し，新たなる災害の拡大へと結びつきうる。事実，このような事例は阪神・淡路大震災でも数多く見受けられ，その対策が緊急の課題として浮かび上がっている。

このような現象は一般にライフライン間の相互作用問題と呼ばれ，いくつかの先駆的な研究がある。例えば，星谷・大野[1]らはFSM（Fuzzy Structural Modelling）を用いてライフラインの機能被害の影響を構造化し，SD（System Dynamics）を用いて復旧予測を行なった。能島・亀田[2]らはET（Event Tree）を用いてシステムの構造化を行ない，重要度係数を算出して外部システムの影響を考慮したリスク評価を行なっている。これらの解析によって，システム間の相互関連が定性的に記述され，地震時におけるライフラインシステムの相互関連構造がしだいに明らかになってきた。

本研究ではこれらの先駆的な研究をふまえて，ライフラインシステムの相互関連構造の定量的把握を目指

し，実際のシステムの改修計画等に役立つ防災支援システムの開発を目的とする。具体的には，実際の水道・電力システムを対象に地震時の挙動解析を行ない，電力システムの機能低下が水道システムにあたえる影響を定量的に評価する。さらに，地理情報システム（GIS）を利用することによって，平面的に分布する多種多様な情報を効率的に処理し，地図上に表現することによって，平面的な特性を明らかにすることができる。解析には，米国テネシー州メンフィス市の電力・水道システムを用い，想定地震時における機能障害を評価する。

2.　メンフィス市の地震ハザード

メンフィス市は北米大陸の中東部テネシー州のシェルビ郡にあり，またニューマドリッド地震帯（NMSZ）の南端に位置している（**Fig. 1**）。このNMSZは，ロッキー山脈以東では最も地震活動の活発な地域であり，小規模な地震がほぼ毎日観測されている。1811-1812年の冬には，北米大陸最大の地震（$M = 8.2$, 8.09, 8.3：推定[3]）が発生しており，この地域の潜在的地震危険度はきわめて高い。

本研究に用いる想定地震は，過去の歴史地震の震源の一つであるマークドツリー（メンフィス市の北西約50 km）を震源とし，その規模はM＝7.0，7.5とする。地震動の計算にはBoore-Atkinsonモデル[4]を採用し，最大地盤加

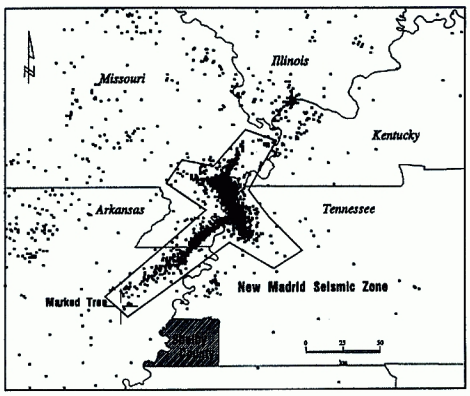

Fig. 1　New Madrid Seismic Zone

Soil Profile	Site Coefficient
S_2(Stiff Soil)	1.2
S_3(Medium Stiffe Clay)	1.5
S_4(Soft Clay)	2.0

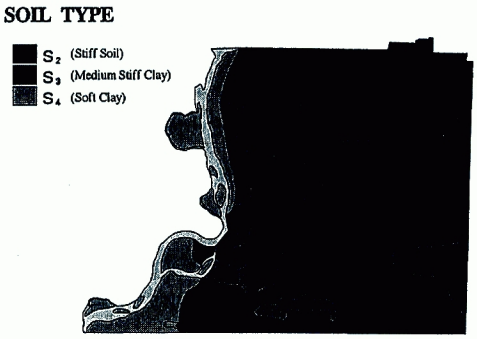

Fig. 2　Soil Profile of Shelby County

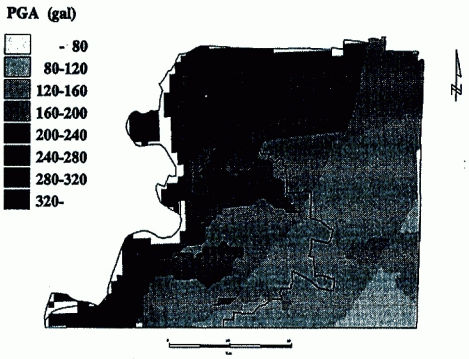

Fig. 3　Peak Ground Acceleration with M＝7.0

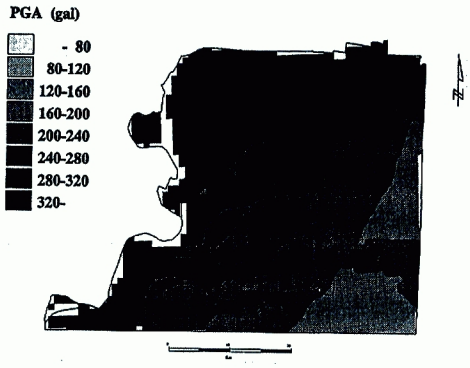

Fig. 4　Peak Ground Acceleration with M＝7.5

速度（PGA）を地震被害の評価パラメータに用いる。シェルビ郡の地盤条件を **Fig. 2** に，地盤増幅率を **Table 1** に示す。想定地震によるシェルビ郡の PGA 分布を **Fig. 3**，**Fig. 4** に示す。

3. 水道システムの地震時信頼性解析

3.1 メンフィス市の水道供給システム

メンフィス市の水道システムを **Fig. 5** に示す。このシステムは，中心部の低圧部と郊外の高圧部によって構成され，およそ1300のリンクと960のノードから成り，埋設管の総延長は約1370 km，パイプの径は16 cm から122 cm である。このシステムには9つのポンプ所と9つの昇圧ポンプがネットワーク上に配置され，安定した水道供給が行なわれている。

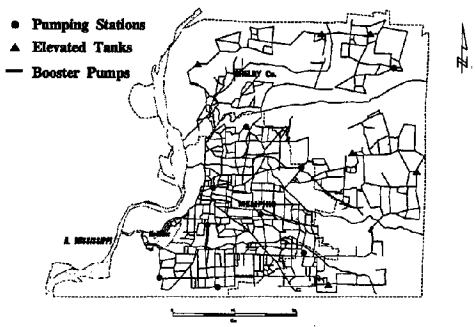

Fig. 5 MLGW's Water Delivery Network

3.2 流量解析

配水管ネットワークにおける流量解析にはさまざまな研究がある。特に，KYPIPE[5] は広く利用されているコンピュータコードではあるが，本研究では地震時におけるパイプの破壊を導入するために，高桑によって開発されたコード[6] を改良した。さらに，昇圧ポンプ，亀裂の入ったパイプからの漏水，ネガティブプレッシャー問題を扱えるような機能を追加した。

配水管ネットワークの流量解析は，水圧に関する連立方程式を解くことにより，それぞれのパイプの流量が得られる。あるパイプ ij の水の流量 Q_{ij} は，

$$Q_{ij} = R_{ij} \cdot |E_i - E_j|^{a-1}(E_i - E_j) \quad \cdots\cdots (1)$$

ここに，E_i：ノード i の水頭圧，R_{ij}，a：係数

Hazen-Williams 方程式によると，

$$R_{ij} = 0.27853 \cdot C_H D^{2.63} L^{-0.54} \quad \cdots\cdots (2)$$

ここに，C_H：パイプ ij の粗度係数，D：パイプ ij の直径，L：パイプ ij の長さ

ノード j がノード i に接続していると仮定すると，ノード i に関しては，次のような保存則が成り立つ。

$$\sum_j Q_{ij} + p_i = 0 \quad \cdots\cdots (3)$$

ここに，p_i：ノード i より取り出される水量

式（1）に式（3）を代入すると，各ノードの水頭圧に関する連立方程式が組み立てられる。この連立方程式は非線形方程式のため，Newton-Raphson 法を用いて解をえる。また，パイプの完全な気密性保持の仮定のため，ネガティブプレッシャーノードと呼ばれる，ノードの水頭圧が標高よりも低くなる現象が数値計算中に発生することがある。実際の水道システムはそれほど厳密な気密性を保持しておらず，パイプに空気が入る。そこで本研究では，ネガティブプレッシャーノードが発生した場合，その水頭圧は標高と等しくなるように設定してある[7]。また，パイプの損傷による漏水は，損傷パイプにオリフィスを設け，このオリフィスの開口を制御することにより，損傷の程度を再現し漏水をモデル化している。本研究で開発されたコンピュータコードは，実際のネットワークにおける水頭圧の測定値とよい一致を見た[8]。

3.3　地震時シュミレーション

まず，地震発生前の水道の供給状況を計算し，データベースに格納する。次に，GISのオーバーレイ機能を用いてPGAの分布図を水道供給ネットワークの上に重ね合わせることによりそれぞれのパイプにPGAの値を割り当て，モンテカルロ法を用いて地震時におけるパイプの損傷を推定する。本解析では，パイプ破壊率r（breaks/km）はPGAの関数として，次式のように表される。

$$\log(r) = a \cdot \log(PGA) + b$$

ただし，aとbは，地盤条件とパイプ材質に関する係数。

鋳鉄管の場合，これらの係数はKatayamaら[9]によって提案された係数をもちい，ダクタイル管に関しては，Craigら[10]によって提案された係数を用いる。パイプの破壊をポアソン過程と仮定すると，パイプi（長さL_i）にxケ所の破壊が発生する確率$P(X=x)$は，

$$P(X=x) = (rL_i)^x e^{-rL_i} / x!$$

となる。

これらの損傷確率を基にモンテカルロシュミレーションをおこない，想定地震時のパイプの損傷程度を推定する。同様のシュミレーションをネットワーク内の全てのパイプに対して実行し，ネットワークの物理的被害状態を再現する。本解析で用いたコンピュータコードでは，配水施設，高架水槽，昇圧ポンプに対しても破壊確率をあたえ，同様にその損傷を推定できる[11]。配水施設のフラジリティカーブは，Hwang[12]によって提案され，高架水槽のフラジリティカーブは，HarounとMobarek[13]によって提案されたものを用いた。シュミレーションは各想定地震に対してそれぞれ100回おこない，1回ごとの流量計算で各ノードの水

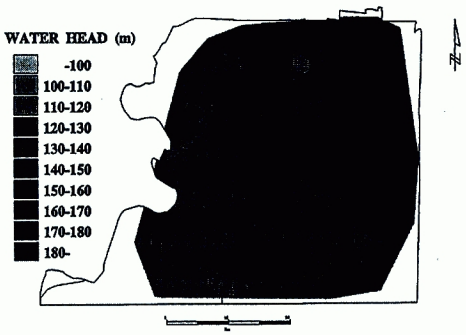

Fig. 6　Interpolated Water Head under Intact Condition

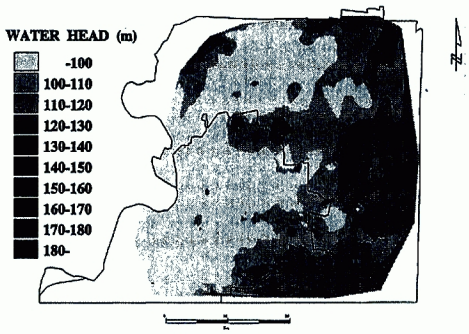

Fig. 7　Interpolated Water Head under Damaged Condition (M = 7.0)

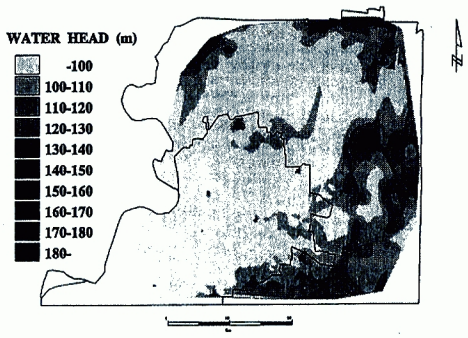

Fig. 8　Interpolated Water Head under Damaged Condition (M = 7.5)

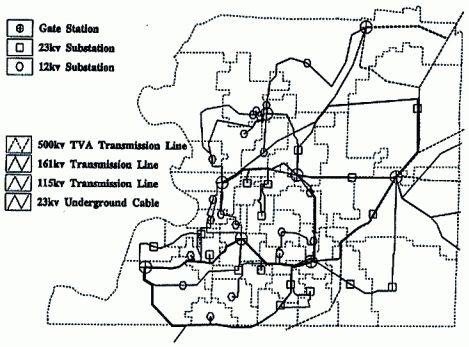

Fig. 9　MLGW's Electric Power Transmission Network

頭圧ならびに出口流量を算出し，全サンプルで平均した。**Fig. 6** は地震前の，**Fig. 7**，**Fig. 8** は地震後の水頭圧の平均値を示している。$M=7.0$，7.5共に中心部分における著しい落ち込みが観察される。水頭圧は消火活動に大きな影響をおよぼすパラメータであり，現状では想定地震と同規模の地震が発生した場合，著しい消火活動の低下が予想される。

3. 電力システム

3.1 メンフィス市の電力システム

メンフィス市の電力システムを**Fig. 9** に示す。このシステムには，TVA（Tennessee Valley Authority）より 500 kv の電力が供給され，45 個の変電所で受電された後，より低電圧の変電所で 161 kv，115 kv，23 kv，12 kv に変換される。500 kv の送電線および変電設備は TVA によって運転されている。一方，その他の送電線および変電設備は MLGW によって運転されている。それぞれの変電所は，原則としておのおの一つづつのサービスエリアを受け持っている。

3.2 電力潮流解析

あるノード i の電力量はそのノードの有効電力 P_i，無効電力 Q_i，電圧 V_i で表される。それぞれのノードにおける電力方程式は，

$$P_i + jQ_i = \sum_{k=1}^{n} \overline{Y}_{ik} \cdot \dot{V}_i \cdot \overline{\dot{V}}_k$$

ただし，Y_{ij} はノード i，k 間のラインアドミタンス。

電力ネットワークでは，ノードを (1) 基準ノード，(2) P-V ノード，(3) P-Q ノードの 3 つに分類する。基準ノードは，電力ネットワークに一つだけ存在し，電圧の大きさと位相角が指定される。P-V ノードは有効電力 P と電圧の大きさ V が指定される。P-Q ノードは，一般に需要ノードを呼ばれ，有効電力 P と無効電力 Q が指定される。潮流解析における連立方程式は非線形方程式であり，本研究では，Electric Power Research Institute（EPRI）[14] によって開発されたコンピュータコード，IPFLOW を計算に用いる。

3.3 変電所のモデル化

変電所は一般にいくつかの電圧の異なったノードより構成されている。これらのノードは，お互いに変圧器を通して接続され，電圧を変換し，需要者に電力を供給する。それぞれのノードはサーキットブレーカー，ディスコネクトスイッチ，バスといったさまざまな機器で複雑に構成されている。地震によってこれら変電所の機器に損傷が生じるが，変電所の機能的な地震時挙動は比較的よいことが知られている。この理由として，第一に，高電圧の基幹送電線網は緊急時のシステム操作を考慮して，十分に冗長性の高いシステムとして設計されている点，第二に，変電所自体に関しても，十分な冗長性を保持したシステムとして設計されている点などが挙げられる。この変電所の複雑な構成を，その機能性能を損な

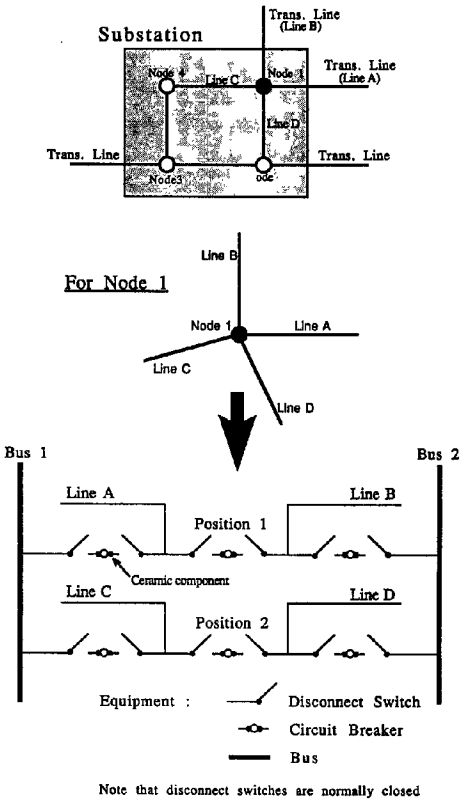

Fig. 10 Substation Configuration Model

わずに単純化したモデルを**Fig. 10**示す。このモデルにおいて，例えばサーキットブレーカーCB11のみが地震により被害を受けた場合でも，そのノードに接続される全てのラインの連結性が保たれているために，このノードは機能的には無被害であるとされる。ところが，サーキットブレーカーCB11とCB13の両方が同時に被害を受けた場合，Line AとLine Bの両方がこのノードから切りはなされてしまうため，このノードは機能的被害を受けたことになる。以上のようなしくみによって，機器に多少の損傷を受けても，変電所の機能は維持できる。

3.4　地震時シュミレーション

水道システムの地震時シュミレーションと同様に，まず地震発生前の電力供給状況を計算し，データベースに格納する。つぎに，GISによって，電力ネットワークと想定地震のPGAマップを重ね合わせ，モンテカルロ法を用いて想定地震時における変電所の損傷状況を推定する。

サーキットブレーカーの破壊確率$F(a)$は，Shinozukaら[15]，Angら[16]の研究より，対数正規分布であたえられ，その中央値と相関係数はそれぞれ0.45 gと0.38である。

変電所の地震時における機能的な信頼性を解析するために，次のような破壊モードを検討した。

（1）連結性の損失

（2）変電所の主要機材の破損

（3）異常潮流

連結性能の損失とは，あるノードが地震時に無被害であるにもかかわらず，発電ノードからそのノードにいたる全ての経路が途絶してしまったために，機能損失におちいる状況をさす。

異常潮流とは，本来的に電気的なバランスに敏感な電力システムに，ある値域以上の負荷あるいは電圧がかかったために制御不能におちいる状況を指し，(a) 安定性異常，(b) 異常電圧の2つがある。安定性異常とは，通常ネットワーク内の全発電量と全需要量の比は1.0から1.05の間にあり，この状態が崩れたときには，発電所の操作員は発電量を調整して，安定値域内に戻す操作をする。しかし，発電量の調整が需要量の変動に追いつかない場合（本研究では現発電量の20％以上の場合）システムがダウンすると仮定している。異常電圧に関しては，ノードの電圧が許容値（±20％）を外れた場合，システムがダウンすると仮定している。

送電線に関しては，MLGWのほとんどの送電線は高電圧送電鉄塔によって保持されており，地震による損傷は十分に考えられるが，本研究では解析の単純化のために，これら送電鉄塔の地震による破壊モードは考慮していない。

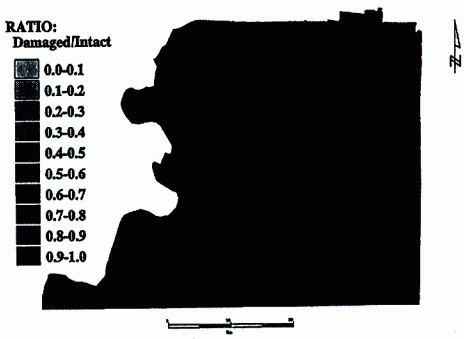

Fig. 11　Ratio of Averaged Power Output under the Damaged Condition to the Intact Condition for Service Areas (M = 7.0)

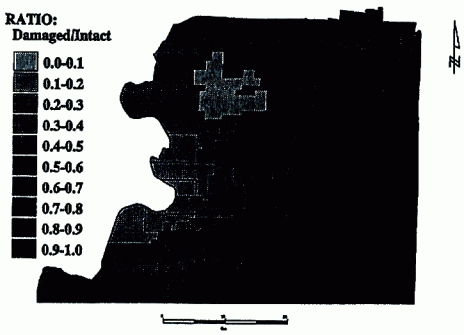

Fig. 12　Ratio of Averaged Power Output under the Damaged Condition to the Intact Condition for Service Areas (M = 7.5)

以上のような破壊モードを用いて，水道システムと同様な地震時シュミレーションを行ない，システムの物理的な損傷状況を推定する。さらに潮流解析を行ない，サービスエリアごとの地震前後の供給電力量の比を求め，その結果を **Fig. 11**，**Fig. 12** に示す。$M = 7.0$ の地震においても物理的にはかなりの被害が出ているが，機能的障害はほとんど出ていない。これは，電力システムの冗長性の効果をよく示しているものと言える。$M = 7.5$ の地震においては，地震前に比べ 50 % 程度の供給低下が見込まれる。

4. 地震時におけるシステム間の相互作用

電力システムの機能性能の低下が同じ地域にサービスを提供する水道システムにおよぼす影響を評価する。具体的には，水道システムにおいて電力を消費する機器（例えば，配水ポンプ，昇圧ポンプなど）の機能停止が水道システムにどのような影響をあたえるかを定量的に求める。

ある電力サービスエリア m 内に配水施設 j が存在した場合，配水施設 j が機能停止する確率 P_j は，

$$P_j = 1 - (1 - P_{W_j})(1 - P_{E_m})$$

ただし，P_{W_j} は，想定地震で配水施設 j が機能停止に陥る確率，P_{E_m} は同じ想定地震でサービスエリア m が停電になる確率。これらの確率は，前述の水道，電力システムの解析よりえられる。昇圧ポンプの機能停止確率は，そのポンプがサービスエリア m 内にあった場合は P_{E_m} とする。

以上のような機能停止確率を用いて，水道・電力システムに想定地震の際のシュミレーションを行なう。

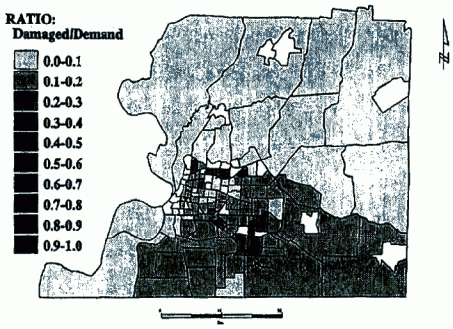

Fig. 13 Ratio of Output under Damaged Condition against Demand in Census Tracts without System Interaction (M = 7.5)

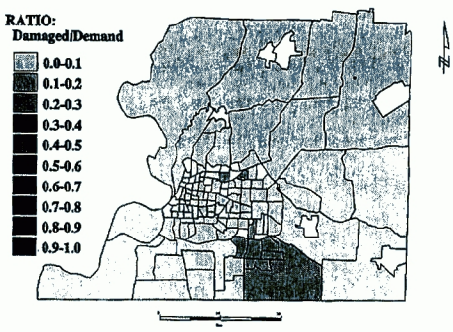

Fig. 14 Ratio of Output under Damaged Condition against Demand in Census Tracts with System Interaction (M = 7.5)

Fig. 13 には相互作用を考慮しなかった場合の，想定地震（$M = 7.5$）後における国勢調査地域ごとの平均出口流量と需要量の比を示す。実際には，配水ポンプ，昇圧ポンプなどのような電力を消費する機器は，停電の場合機能損失状態におちいる。**Fig. 14** は相互作用を考慮した場合の結果である。**Fig. 13** と **Fig. 14** を比較すると，特に南部地域に落ち込みが見られ，電力システムから水道システムへの影響による機能低下が大きいことが観察される。

5. 結　論

本研究では，地理情報システムを利用して水道・電力ライフラインシステムの地震時挙動解析および電力システムが水道システムへあたえる影響を評価した。本研究で得られた成果は以下のとおりである。

(1) 水道システムの地震時挙動解析では，パイプの破損による漏水等をモデル化し流量解析に取り入れることにより，定量的かつ実際的な評価法を提案した。

(2) 電力システムの地震時挙動解析では，変電所を機器レベルでモデル化することにより，電力システムの冗長性が表現され，定量的な地震時の電力供給低下が評価可能となった。

(3) 地震時におけるライフライン間の相互連関では，電力システムと水道システムを例に，その影響度が定量的に確認された。

(4) 地理情報システムを利用することにより，平面的に広がりをもつ多種多様な情報を効率的に処理でき，ライフラインシステムのサービス低下の地域的な分布の把握，効果的な減災対策の策定に有効である。

参考文献

1) 星谷勝・大野春雄：震災時ライフラインの相互影響を考慮した復旧過程の機能評価法，土木学会論文集，第386号/Ⅰ-8，1987，pp.387-396.

2) 能島暢呂・亀田弘行：地震時のシステム間相互連関を考慮したライフライン系のリスク評価法，土木学会論文集，No.507/Ⅰ-30，1995，pp.231-241.

3) Nuttli, O.W. : The Mississippi Valley Earthquakes of 1811 and 1812 : Intensities, Ground Motion and Magnitudes, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.63, No.1, 1973, pp.227-248.

4) Boore, D.M. and Atkinson, G.M. : Stochastic Prediction of Ground Motion and Spectral Response Parameters at Hard-Rock Sites in Eastern North America, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.73, No.2, 1987, pp.440-467.

5) Wood, D.J. : Computer Anlysis of Flow in Pipe Network including Extended Period Simulation-User's Manual, Univ. of Kentucky, 1980.

6) 高桑哲男：配水管網の解析と設計，森北出版，1978.

7) Ayala, G. and Liggett, J.A. : Flow in Damaged Networks, J. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.117, No.2, 1991, pp.230-239.

8) Okumura, T. and Shinozuka, M. : Serviceability Analysis of Memphis Water Delivery System, Proc. of 3th U.S. Conf. on Lifeline Earthquake Eng., 1991, pp.530-541.

9) Katayama, T., Kubo, K., and Sato, N. : Earthquake Damage to Water and Gas Distribution System, Proc. of the U.S. National Conf. on Earthquake Eng., 1975, pp.396-405.

10) Craig, E.T. (Ed.) : Seismic Loss Estimates for a Hypothetical Water System, ASCE Technical Council on Earthquake Engineering, Monograph, No.2, ASCE, 1991.

11) Tanaka, S., Nishitani, A., and Shinozuka, M. : Lifeline Seismic Reliability Analysis Utilizing Geographical Information Systems, J. of Struct. Constr. Engng., AIJ, No.465, 1994, pp.27-36.

12) Hwang, H.H.M., Ch'ng, A.L., and Hsu, H-M. : Seismic Fragility Analysis of Memphis Sheahan Pumping Building, Technical Report, CERI, Memphis State Univ., 1992.

13) Haroun, M.A. and Mobarek, H.I. : Fragility Curve for Elenated Tanks, 1994.

14) Electric Power Research Institute (EPRI), Interactive Power Flow Version 1.0 Users Manual, 1992.

15) Shinozuka, M., Mizutani, M., Takeda, M., and Kai, Y. : A Seismic PRA Procedure in Japan and Its Application to a Building Performance Safety Estimation, Part 3 Estimation of Building and Equipment Perfornamce Safety, Proc. of ICOSSAR '89, 1989, pp.637-644.

16) Ang, A.H-S., Pires, J., Villaverde, R., Schinizinger, R., Yoshida, I., and Katayama, I. : Seismic Probabilistic Reliability Assessment of Electric Power Transmission Systems, Proc. of 10 WCEE, Vol.9, 1992, pp.5583-5589.