

# 地震時の病院への水供給の信頼性と対策効果

鋤田泰子<sup>1</sup>・高田至郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>神戸大学大学院自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail:994d838n@y01.kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>神戸大学工学部建設学科教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail:takada@kobe-u.ac.jp

地震時に病院へのライフラインの供給機能を維持することは重要な課題である。病院外部からの供給系と病院内にある供給系の相互の地震安全性と機能維持、そして緊急対応の面から考慮していく必要がある。本研究は外部から病院への水供給系の機能に焦点を当てた。まず兵庫県南部地震時における病院への水供給系の被災と復旧状況について分析し、その評価手法を提案した。そして、神戸市域の病院ごとの信頼性と供給停止による患者への影響度を示した。また水供給管路耐震化の対策を実行した場合に供給停止による影響度の低減効果について検討した。

**Key Words** : *hospital-lifeline, water supply system, malfunction impact, pipe upgrading strategy*

## 1. はじめに

地震時において病院のライフライン機能が維持されることは、院内患者の生命を保持する上でも、地震被災者への医療処置を行う上でも必要不可欠である。院内医療機器が機能しない状況、または患者のニーズに応じた医療処置が行えない状況では、迅速に被災地以外の病院に患者を搬送することが必要となってくるが、病院内部で予めライフラインの地震安全性を検討することは地震時災害対応計画を立てる上で重要である。

ここで、医療活動に関わる供給系(上下水道、都市ガス、電気、通信)及び交通輸送系を含めたライフラインを病院ライフラインと位置づけた時、これらは地震災害時に以下の機能を維持することが期待される。(1)各ライフラインの病院内外における供給機能の信頼性(ライフラインの供給特性により異なるが、一般に通常時のライフライン供給は病院外が供給源となるため、病院外部施設の地震安全性とシステムの冗長性も病院内部のライフライン機能低下に影響を及ぼす)、(2)ライフライン及び他施設との相互依存機能(医療活動に関わる施設の機能は相互に関連したライフライン機能に支えられているため、ある一つのライフライン停止が他のライフラインの機能損傷を誘発する)、(3)緊急時の代替機能(バックアップ施設や応急措置)。

兵庫県南部地震では、病院ライフラインの中で交通渋滞や情報通信網の寸断以上に水供給停止が医療活動に最も甚大な影響を与えた。水供給が復旧するまでに長期間を要したことは、上述の相互依存機能の面からも他のライフラインの機能低下に影響を及ぼした。

本稿では、病院ライフラインの中で上水道施設、とくに病院外部の水供給系施設、の地震安全性について検討を行う。また、これらの施設の信頼性向上のための水供給管路耐震化対策を提案し、耐震化の投資費用とそれによる患者への影響度の低減効果を評価する。

## 2. 兵庫県南部地震時の病院への給水系被害

神戸市の東灘、灘、中央、兵庫区内の病院内医療施設の被害調査報告<sup>1), 2)</sup>をもとに、病院への通水日(ここでは、病院内での市水による供給再開日とする)と病院が含まれる地域の給水再開日を比較したところ、該当地域の給水再開以前に病院内で通水した場合と、地域の給水再開後に病院内で通水した場合に分かれた。これは、一部の病院へは重要施設への供給ラインの再開が優先されたことを示していると言える。しかし、東部センターが管轄する東灘、灘区内の病院では、給水再開までに早くとも地震後 20 日間経過しており、一方中部センター管轄内の病院では、地震後 4 日後に通水している病院もあることが知られた。これには、各水道事業所によって異なる戦略で復旧が進められた背景がある。中部センターでは多くの商業顧客を有していたため、不断水で下流の重要地域への供給ライン復旧活動が行なわれた。一方、東部センターでは、上流管路の復旧を確認しながら徐々に供給地域を広げていった経緯がある。これは、復旧日数に関わる一つの人為的要因と言える。

神戸市域にある救急病院で比較的病床数の多い 10

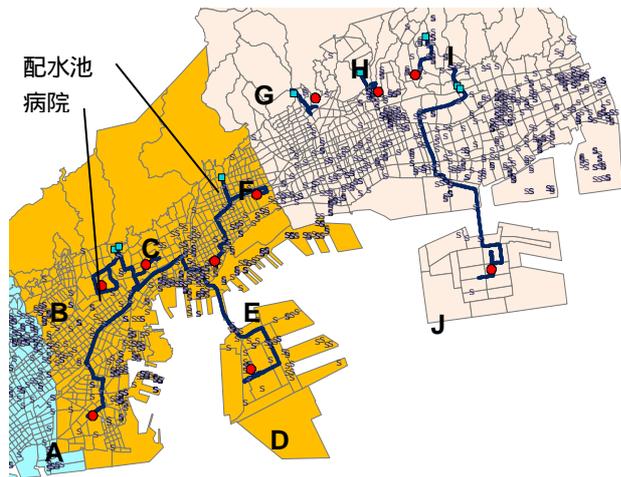


図1 10病院の管路水供給系

病院(図1)を対象に兵庫県南部地震の際の病院への管路水供給系の被災要因を数量化 類を用いて検討した。従属変数には院内の給水再開までの日数をとり、以下の説明変数のアイテムを用いた。ダミー変数を導入して各アイテムを表現し、重回帰モデルに組み込み、推定されるアイテムのカテゴリスコアによって管路水供給系被災に関わる要因を検討した。説明変数のアイテムには、配水管轄事業所(東部センター1, 中部センター0), 配水層(特層・高層, 低層(人工島を除く)), 人工島(2個のダミー変数を使用し人工島を0)), 病院までの配水管被害件数(5件以上1, 未満0), 受水槽の利用可否(不可1, 可0), 多量自然水源(井戸水, 海水)の利用可否(不可1, 可0)を用いた。

図2は、重回帰分析による各アイテムのカテゴリスコアを示している。病院外部における被災要因では、管轄事業所よりも配水層, 配水管被害件数などの要因の影響が大きいことが知られる。配水層別では人工島のスコアが0であるのに対して特層・高層, 低層では正のスコアを示し, 人工島は他の配水層地域よりも被災の影響度が小さく評価されている。人工島への供給ライン上に配水管被害件数がとくに多かったため, 人工島にある病院への管路水供給系の被災要因は配水管被害件数のアイテムで説明されたものと考えられる。

対象病院内では, 少なくとも受水槽が高架水槽, 屋内配管などで損傷を受けている。しかし, 受水槽が損傷後も利用可能であった病院では, 給水再開までの日数の短縮化だけでなく, 給水車が到着するまでの間の残留水の利用や, 給水車による応急給水の貯蓄に受水槽は有効であった。一方, 損傷がひどく水槽そのものの復旧が必要な場合は非常に時間を要することが知られる。これは, 図2に示すように外部の配水管路被害とほぼ同様の影響度を持っている。また, 通常時から井戸水を使用している病院では, 他の配水系を有しているためそれが災害時に効果を発揮したといえる。

地震時に管路水供給系の給水再開までの日数を短くするには, 事業所の有効な復旧戦略, 特層高層配水域に属すること, 病院へのルートで管路被害が少ない

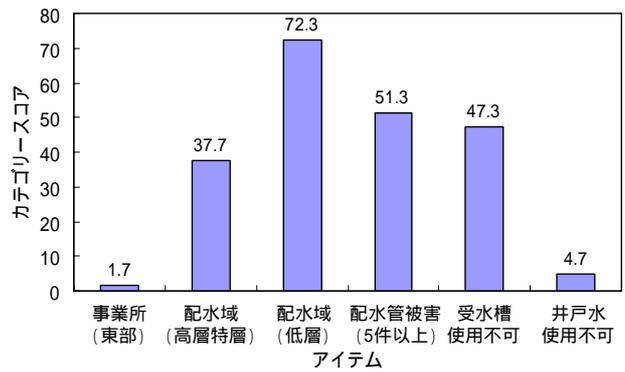


図2 院内通水日数を従属変数とする時の各アイテムのカテゴリスコア (平均-68.3, 自由度修正済寄与率95.5%)

こと, 受水槽が利用可能であることが条件であるといえる。

### 3. 管路水供給系の被災リスク

#### (1) 評価方法

病院への水供給系は主に配水池, 管路, 病院内部供給系の三つの要素で構成されている。過去の地震時被災事例からみても配水池より上流の水供給施設ではある程度耐震性が確保されているので, 配水池より下流の水供給施設について考慮した。ある地震発生によって地震動が与えられた場合の管路水供給系の信頼性確率  $F_W$  を配水池, 管路, 病院内部施設の信頼性確率  $F_R, F_P, F_{IN}$  の積で評価する。

$$F_W = F_R * F_P * F_{IN} \quad (1)$$

さらに, 管路水供給系の供給停止による患者への影響度  $MI$  を, 水供給停止時にサービスを受けられない院内の患者の期待値で示した。本研究ではこの入院患者数  $B$  を病院の病床数と同じであると仮定している。

$$MI = B(1 - F_W) \quad (2)$$

#### (2) 適用例

先に分析した図1中の病院の管路水供給系の信頼性について検討した。水道管路網では多くの経路を通じて供給が可能であるが, 地震後の緊急時にそれらの系統切り替えることは難しい。そこで, 緊急時の水供給経路が通常時のものと同一であるとして, 直列した管路の連結性を評価する問題に帰着させた。また, 該当地域の水供給は自然流下式によって給水されているため, 病院外部の供給施設は管路のみを考慮した。

本研究では, 入力地震動は兵庫県南部地震の折に推定された震度分布と同じであるとして, それらの推定値を加速度あるいは速度に換算したものをを用いた。配水池および病院内部施設には最大加速度値を, 外部管路には最大速度値を用いて信頼性の評価を行なった。

配水池の信頼性確率は, 施設が被害を受けない確

表1 管路水供給系の信頼性確率と患者への影響度

病院	$F_R$	$F_P$	$F_{IN}$	$F_W$	$B$	$MI$
A	0.97	0.81	1.00	0.79	242	52
B	0.97	0.76	1.00	0.73	920	246
C	0.97	0.90	1.00	0.88	126	16
D	0.97	0.77	1.00	0.75	1,000	251
E	0.90	0.83	0.99	0.74	151	39
F	0.90	0.64	0.99	0.57	325	139
G	0.97	0.94	1.00	0.91	222	20
H	0.97	0.71	1.00	0.69	178	56
I	0.90	0.94	1.00	0.84	400	63
J	0.90	0.56	1.00	0.50	307	153
合計					3,871	1,034

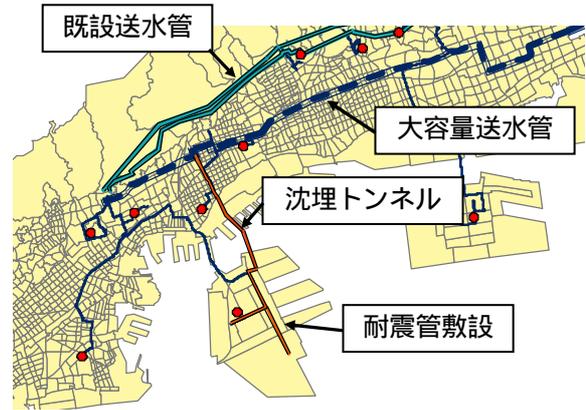


図3 大容量送水管と病院Dへの水道管路

率とし、被害確率はHAZUS99<sup>3)</sup>の推定方法を適用した。検討対象とした配水池はRC造で直接基礎形式である。

管路の信頼性確率は、管路系の連結性で評価できるものとして著者ら<sup>4)</sup>による管路被害予測式を適用した。本式は地震動から推定される標準管路被害率  $S_{di}$  に管種、口径、液状化の程度に関する補正係数  $C_{pi}, C_{di}, C_{li}$  を乗ずることで管路被害率  $S_i$ (件/km)が算出される。

$$S_i = S_{di} * C_{pi} * C_{di} * C_{li} \quad (3)$$

管路の連結性を評価するため管路損傷確率を導入する必要がある。管路の単位長さが5mであることと、単位管路長さあたり被害は最大1箇所発生することを仮定すると、単位管路長さ  $l$  あたりの損傷確率  $d_{ui}$  は式(4)で算出される。対象とする管路網が直列であることから、管路長さ  $L_i$ m ある管路  $i$  の信頼性確率はそれを構成する単位管路の被害を受けない確率の積として式(5)により管路の信頼性確率が算出される。

$$d_{ui} \cong S_i / 200 \quad (4)$$

$$F_p = \prod_i (1 - d_{ui})^{L_i} \quad (5)$$

病院内部施設は、多くの水槽や内部配管で構成されておりさらに複雑である。本研究ではRC建物の被害関数を用いて算出される被害率で内部施設の被害確率を代替して評価した。

表1は、10病院の建物と管路水供給系の信頼性確率を示している。病院内部施設の被害率を建物の被害率として代替しているため、 $F_{IN}$ は高く評価される傾向にある。そして、管路の信頼性確率が水供給系全体の確率に対して支配的となっている。病院Fには小口径の管路が高震度階域を通過して給水されていること、病院Jには液状化の影響が大きかったことが確率  $F_p$  を低くする要因となった。山手にある到達管路長の短い病院は比較的高い確率を示した。

患者への水供給停止の影響度を検討する場合、必ずしも供給停止の確率のみで評価できるわけではない。病院BやGのように多くの患者を抱える病院では信頼性確率が高くても供給停止の影響を受ける患者が多く、またこの影響度の期待値は最も影響度の低い病院CやGの10倍程度となることが知られる。

表2 取替え費用

管径(mm)	取替え費用(千円)
- 150	350
200 - 300	500
300 -	1,100

#### 4. 水道管路耐震化対策と期待影響度への効果

##### (1) 対策方法

先に示した管路水供給系の信頼性確率は、病院内施設の被害率を建物の被害率として評価したために管路の信頼性確率に大きく依存される結果となった。しかし、院内蛇口から給水されないとしても病院の受水槽から取水できることを考慮すれば、やはり病院外部の供給系の耐震性が全体の信頼度を左右する。本研究では地震時の患者への水供給停止の影響度を考慮し、以下に示す二つの水道管路耐震化対策について検討した。

まず、現在神戸市域で進められている大容量送水管敷設による管路の耐震性および冗長性の向上対策である(対策1)。図3に示すように六甲山麓にある既存送水管に平行して、阪神域の海岸線沿いに送水管路を敷設する計画が進められている。さらに病院Dへは沈埋トンネル内を通して新たな耐震管路が敷設される。二つ目は、脆弱な管路の取替えによる耐震性の向上対策である(対策2)。神戸の地震では、CIP(鋳鉄管)に被害が集中した。そこで、DIP(ダクタイル管)に取替えた場合の信頼性確率と機能損傷影響度の低減効果について検討した。取替え方法は、単位管路長さを5mとして、最大500本又は1,000本まで順次単位管路を一本ずつ取替える場合を考えた。取替え費用は、既往研究<sup>5)</sup>から表2に示す値を用いた。取替えるCIPの選定方法は、以下の二つの方法を用いた。

ケース1: 管路水供給系の信頼性確率  $F_w$  が最も低い病院への管路網の中で、その管路網内の管路で最も被害率  $d_{ui}$  の高いCIPの単位管路  $ui$  をDIPに取替える。

$$\text{Maximum } d_{ui} (i \in \text{route}) | \text{Minimum } F_{w_j} \quad (6)$$

表3 取替え敷設費用と期待影響度人数

対策	備考	総取替え費用(億円)	影響度MI(人)
0	対策前	--	1,034
1	大容量送水管敷設	500	783
2-ケース1	500*単位管路	5.5	961
	1,000*単位管路	11.0	926
2-ケース2	500*単位管路	4.5	781
	1,000*単位管路	8.8	718

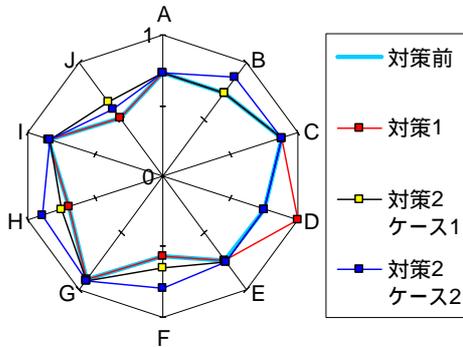


図4 対策後の管路水供給系の信頼性確率

ケース2: 式(7)に示すように取替え費用に対する取替え後に患者への影響度MIを最も低減させるCIPの単位管路 $ui$ を選定する。

$$\text{Max} \frac{MI(ui^{CIP} \in A) - MI(ui^{DIP} \in A)}{\text{cost}(\text{diameter}(ui))} \quad (7)$$

前者は、各病院への水供給系の信頼性のあるレベル以上に向上させることに着目しており、一方後者は地域全体の影響度を最小化することを目的としている。一単位管路を取替えるごとに全体の信頼性確率を再計算し、次の管路選択を繰り返す手続きを踏んでいる。

## (2) 対策効果

表3はこれらの対策を遂行した場合の全地域における取替え敷設費用と水供給停止による影響度を示している。対策1については、ここでは病院Dに着目したが他の病院や一般地域の水道復旧に大きく貢献するものと期待できる。対策2の取替え費用は対策1と比較して明らかに投資費用が少ない。しかし、対策によってもたらされる影響度を比較した場合、管路の取替え方法により対策2は対策1と同様かそれ以下の取替え投資により患者への影響度を低減させることができる。図4は、対策後の各病院への管路水供給系の信頼性確率を示している。信頼性確率 $F_w$ を指標にして比較した場合、対策1によって病院FやGの信頼性は向上する方へ働き、対策2では患者数の多い病院Bの信頼性確率が高くなることが知られる。図5は対策2についての取替え費用と影響度の低減効果の関係を示している。ケース2では、最初の6億円までの取替え費用の投資によって、患者への影響度に大きな低減効果をもたらす。また20億円程度の費用を投資すると取替え方法に大きな差異は見られなくなる。

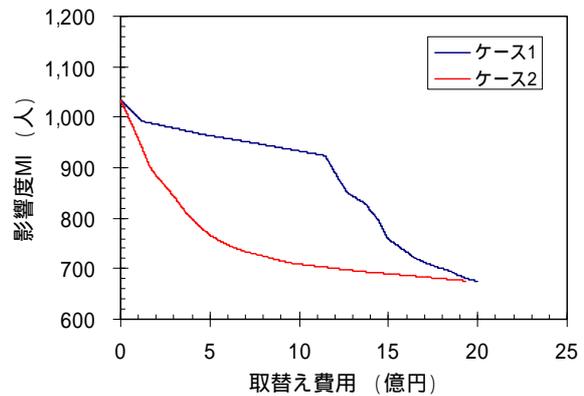


図5 対策2の取替え費用と影響度の関係

本研究は、ある病院を対象とした水供給系の信頼性評価と提案対策方法の適用例を示した。実際にはさらに多くの病院を対象として分析した結果に基づいて水道事業者側と病院管理者側での状況に応じて防災戦略を立てていく必要がある。

## 5. 結論

本稿では病院への管路水供給系の地震安全性について検討した。病院の被災と水供給復旧には各水道事業者の復旧戦略、病院外部の地理的、構造的要因が大きく関わっており、病院内では被災しても受水槽の水利用の可否が大きく影響していることが知られた。管路水供給系のリスク評価では、患者への影響を考慮した場合、その影響度は物理的被災リスクよりも病院の患者数が大きく反映される。また、管路耐震化対策を行なった場合の信頼性向上、機能損傷の低減効果の検討を行なった結果、対策の方法によっては少ない投資で同様の信頼性を確保できることが知られた。

謝辞：研究遂行にあたり、神戸市水道局松下真氏に多くの助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 河口豊：阪神・淡路大震災による病院被災に関する調査研究報告書，国立医療・病院管理研究所，1996。
- 2) 小堀鐸二研究所：1995年兵庫県南部地震医療機関とその救急医療活動に関する調査報告書，被災地における聞き取り調査，1995。
- 3) FEMA:HAZUS99,Technical Manual.,1999.
- 4) 高田至郎，藤原正弘，宮島昌克，鈴木泰博，依田幹雄，戸島敏雄：直下型地震災害特性に基づく管路被害予測手法の研究，水道協会雑誌，第798号，pp.21-37，2001。
- 5) Takada, S: Direct and indirect economic losses of Kobe water systems during the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake”, Proc. of Third China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering, Kunming, pp.291-300,1998.

(2003.9.9受付)