

# 地震被災後の管内水圧を考慮した配水管網の復旧方法に関する研究

細井由彦・城戸由能・大村康弘\*

鳥取大学工学部社会開発システム工学科・\*大分県庁

## Restoration Method of Water Distribution Pipe Network Damaged by Earthquake Considering Water Pressure

Yoshihiko HOSOI, Yoshinobu KIDO, Yasuhiro OMURA\*

Department of Social Systems Engineering, Faculty of Engineering  
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan

E-mail: hosoiy@sse.tottori-u.ac.jp

\* Oita Prefectural Office

**Abstract:** The water supply pipe network system must be restored quickly after being damaged by an earthquake. The breakages of the pipeline are detected by the leakage of water. Therefore it is necessary that there is enough water pressure to leak water. It is preferable to cut off the water supply downstream to raise the water pressure upstream. However, people downstream will not be supplied with water. In this study, the restoration strategies with and without cutting off the water supply to some parts of the supply area were comparatively examined. The numerical model of a water supply pipe network was used in various types of pipeline damage to simulate the restoration stages. The restoration strategy to cut off the water supply was advantageous in the case of being heavily damaged. In contrast, when there were light breakages, the water supply should not be stopped during the restoration.

**Keywords:** Earthquake disaster, Pipe breakage, Pipeline restoration, Water supply system

### 1. まえがき

地震で被災した送配水システムを効率的に復旧するための方法については、これまで種々の方面からの検討が行われてきている。

磯山・片山は大規模水道システムの送配水管網の地震後の機能評価を、埋設管の被害率と被災後の配水調整供給戦略をもとに行っている [1]。星谷・小池・宮崎は上水道管路の地震後の構造的復旧過程と、それにとまなう機能的復旧過程を予測するモデルを提案している [2]。星谷・大野は上水道以外のライフラインの影響も組み込んだ機能復旧過程の検討を行っている [3]。これらはいずれもシミュレーションを行っているが、能島・亀田はシミュレーションを用いずにマクロにライフラインの特性を考慮して、震災後の復旧戦略に関する理論的な検討を行っている [4]。

実際に配水管網の復旧を進めていく場合、限られた人員でできるだけ効率よく復旧を行うことが重要

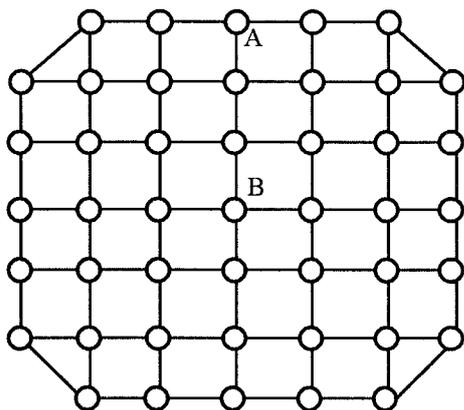
である。被害箇所が多い場合には漏水が激しいために水圧が低下し、破損個所の発見に支障を来すために、区域を分割して通水し、順序復旧を進めていく方法が採用される。一方で断水区域を設定すると、そこには全く供給が行われなくなり、住民に対して大きな生活上の支障となる。したがって断水を行うかどうかの決定は、復旧及び応急給水に重要な影響を及ぼすことになる。

ここでは、モデル管網により種々の破損条件下で、各種の復旧戦略の違いが機能の回復にどのような影響を及ぼすかを、数値シミュレーションにより検討した。

### 2. 研究方法

#### 2.1 配水シミュレーションモデル

できるだけ単純な管網形状で特性を検討するために、図1のような管網モデルを用いた。いずれも自



管網 A: 節点Aが配水池

管網 B: 節点Bが配水池

図1 検討対象としたモデル管網

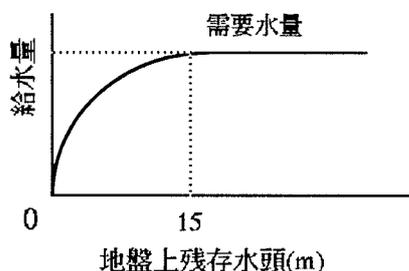


図2 水圧が不足する場合の給水量

然流下により配水されているが、管網Aは配水池が配水区域の端にあり、管網Bは中央に位置している。44の節点を持ち各節点は延長500m、口径200mmの配水管で格子状に連結されている。各節点からの取り出し水量は5L/sで、これは432m<sup>3</sup>/dayになり、1000人程度の需要に相当する。すなわち人口約45000人、人口密度4000～5000人/km<sup>2</sup>の配水区域を考えている。

需要水量は節点のエネルギー位が地盤上15m以上ある場合に給水されるように設定している。15mに満たない場合には図2に示すように地盤上エネルギー位の無理関数で、エネルギー位に対応する水量が供給されるようにした。

配水池の水位は管網Aでは43.0m、管網Bでは31.0mとした。これは配水区域の末端の節点における水圧が20m（地盤上15m）をやや越えるようにしたためである。すなわち管網内の水圧条件をやや厳しいものにしておき、破損による漏水発生の影響を受けやすくしたものである。

最初に所定の破損を発生させ、決められた方法で修理が行われるものとし、1日の修理が終了したところで修理済の破損箇所からの漏水は無いものとして管網計算を行う。これを全ての破損箇所の修理が終了するまで繰り返す。

## 2. 2 破損及び漏水の設定方法

### (1) 漏水量

破損はすべて節点より先につながっている配水支管で発生するものとした。それらの破損を全て節点に集中させ、破損箇所のエネルギー位は節点のものを与える。

破損箇所*i*における漏水量 $Q_i$ は次式で表される。

$$Q_i = c s_i a_i (E_i - G_i)^k \quad (1)$$

ここで $E_i$ 、 $G_i$ はそれぞれ破損箇所*i*におけるエネルギー位と破損箇所の地盤高である。 $a_i$ は管の断面積で口径を40mmとして計算した。 $c$ はオリフィスの流量係数その他を含めた係数で2.88 (m-sec単位)である。 $s_i$ が破損箇所*i*の破損度を与える。0の場合は破損が無く、1の場合は管の断面積と同じ流出孔があいている場合を示す。 $k$ については、オリフィスと考える扱いと浸透流的な扱いがあって、それぞれにより値が異なるが、ここではオリフィスの扱いによる0.5とした。

### (2) 被害条件

破損箇所数は兵庫県南部地震の被害データ [5]等を参考に配水管1kmあたり9.5箇所とし、全体で380箇所とした。被害の程度を重度から軽度まで3段階に分けて考えた。重度は破損度 $s_i$ の平均値を0.13として0.10, 0.13, 0.16の3種の値を与えた。中度は同様に平均値0.10で0.07, 0.10, 0.13を、軽度は平均0.07で、0.04, 0.07, 0.10を与えた。これらの値は設定した管網条件で試行錯誤的に種々の破損度を与えて計算を行い、得られた漏水量をこれまでの報告値と比較する事によって設定した。破損度の値を複数にしたのは、全ての破損を節点に集中しているために、1つだけの破損度では、結局は節点エネルギー位の高い順にしたがって修理を行う結果となってしまうからである。

被害箇所の配置については、各節点に均一な分布と、図3に示すような管網A、Bそれぞれに3種類ずつの分布を設定した。全被害箇所数を380を、図

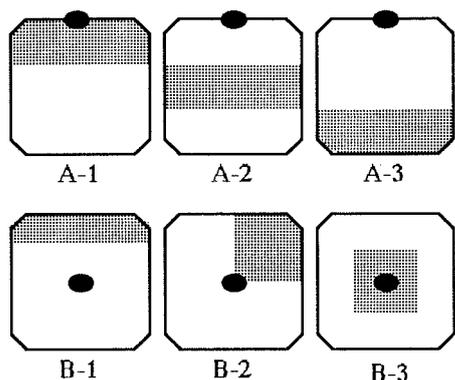


図3 被害の集中区域のパターン

3中の影で示した破損集中区域に2/3を、残りの1/3をその他の地区に配分した。

## 2. 3 復旧活動の設定方法

### (1) 作業時間

断水を設定する効果を見ることを目的としているので、漏水の発見と修理は同時に行われるものとし、1箇所当たりの作業時間を漏水の発見のための時間と修理及び移動の時間の和とする。漏水の発見のためには管内に水があることが条件になる。大量の漏水が発生している場合、十分な水圧が得られずに発見効率は低下するが、その要因としては、送水量の限界と漏水発生による損失水頭の増加とが考えられる。このことを数値シミュレーション上でモデル化するために、現実とはやや異なるかも知れないが、総作業時間と破損発見時間を次のように仮定した。

1班あたりの総作業時間を1日12時間とする。作業班は3班とし、確保可能な最大延べ復旧作業時間は36時間とした。通常時の配水量が $Q$ であるのに対して、破損が存在する場合には漏水により配水量が $Q'$ に増加する。送水能力の制約により、配水量が増加すると作業に十分な水が確保できず、作業効率が低下する。断水を行うのはこのような事情も関係している。そこで漏水による配水量増の影響は、作業可能時間の短縮によって現れると考え、送水量の限界による効率の低下を最大延べ復旧作業時間の減少として次式のように仮定する。

$$T = \min(36, 36 Q/Q') \quad (2)$$

ここで $T$ は1日当たりの延べ作業可能時間(単位は時間)である。

破損の発見は漏水量に関係している。地上にまで

表1 修理の進捗と通水率の関係を調べるための復旧戦略

復旧戦略	内 容
戦略Ⅰ	漏水量の多い破損箇所から修理
戦略Ⅱ	上流にある破損箇所から修理
戦略Ⅲ	下流にある破損箇所から修理

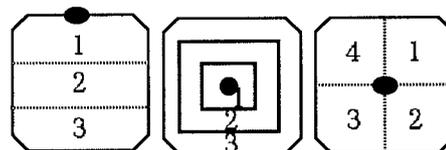


図4 断水区域設定を行う復旧のパターン

流出しているものは発見も容易であるが、地下で発生しているものは漏水音を何らかの器具によって探知することによって発見される。漏水音の探知も漏水量によりその容易さは異なる。これまでの報告等[5]、[6]を参考にして、漏水量0.5L/s以下の場合には別途本格的な調査が必要となり、漏水量が1.5L/s以上は地上に漏水しており、発見時間は0であるとし、その間は発見時間は次のような漏水量の関数となるものとした。

$$T_i = 4.5 - 0.833Q_i \quad (0.5 \leq Q_i \leq 1.5) \quad (3)$$

ここで $T_i$ 、 $Q_i$ はそれぞれ破損箇所 $i$ における発見時間(時間)と漏水量(L/sec)である。

作業班数は既述のように3班、移動と作業に要する時間は合わせて1箇所当たり3時間とした。

漏水量が0.5L/s以下の破損箇所のみとなった場合には、修理作業を一時停止してその地域全体の漏水調査が実施され、その後は1カ所あたり3時間の作業時間で修理が進むものとした。実際は本研究のシミュレーションの範囲では、そのようなケースは現れなかった。

### (2) 復旧方法

最初に破損の減少と通水率の変化の様子を調べるために、発見や修理に要する時間を無視して、修理箇所数と通水率の関係を求める。この場合復旧方法として表1に示す3通りの方法を考える。この結果については第3章にて述べる。

つぎに復旧戦略として断水を行う場合の効果について検討する。断水を行わない場合(無断水復旧と名付ける)には、漏水量の多く発見時間の短いところから順に修理を進める。断水区域を設定する場合

(断水復旧と名付ける)には、図4に示すように、管網Aについては全体を上・中・下流区域に3分割し、まず中流以下を断水させて上流域を修理し、それが終了後中流域に通水して修理を行い、さらに下流域へと順次進めていく。管網Bについては、配水池を中心として年輪状に3分割し、先と同様にまず最も配水池に近い上流域のみに通水して修理を行い、順次下流に進んでいく方法と、パイカッター状に4分割して、1/4ずつ通水しながら修理を進めていく方法を検討対象とした。

ここでは地震被災後も通常の水量需要が発生し、たとえ破損箇所からの漏水が発生していても給水が続けられると仮定している。現実的には漏水の発生

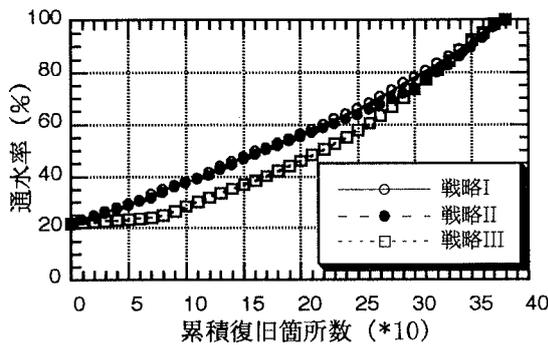
が著しい場合には止水栓を閉めて給水を遮断することが考えられる。そこで地盤高エネルギー位が8m以下になるような破損の著しいところでは、給水を停止するような、給水制限を行う場合も検討に加えた。

以上の結果については第4章で述べる。

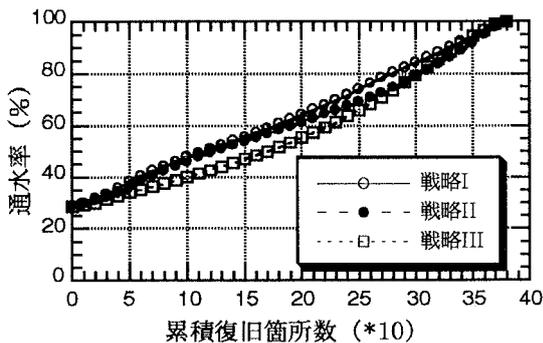
2.4 評価指標

システム全体での給水可能水量を需要水量で割ったものを通水率と定義し、これを用いて日々の通水状況を示す。全ての復旧が終了するまでの日数を復旧終了日数と名付け、復旧の速さを示す指標とする。

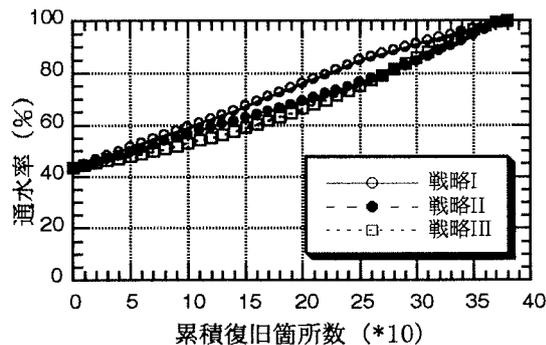
また次式で示されるように、復旧終了までの日々



a) 被害程度-重度

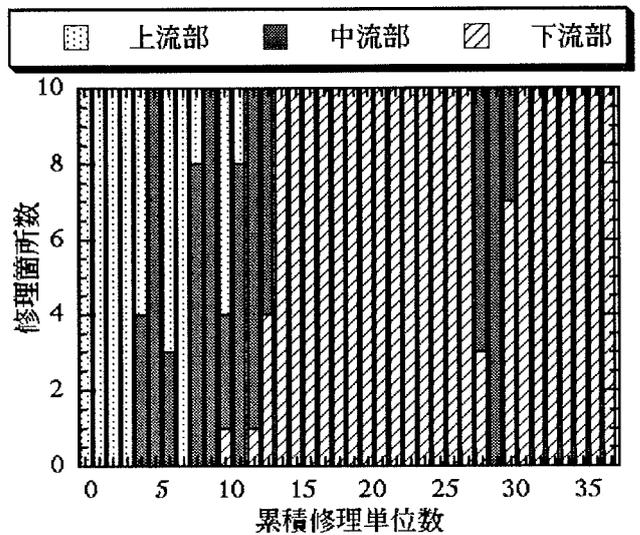


b) 被害程度-中度

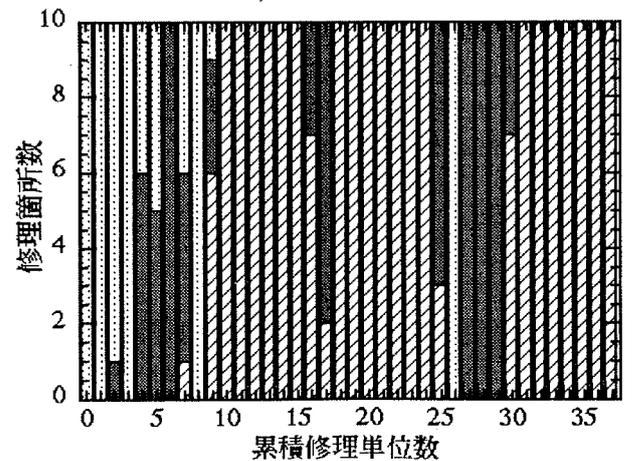


c) 被害程度-軽度

図5 通水率の回復状況 (被害分布A-3型)



a) 重度被害



b) 軽度被害

図6 戦略IによるA-3形被害の修理箇所の分布

の非通水率を加えたものを困窮度と定義する。

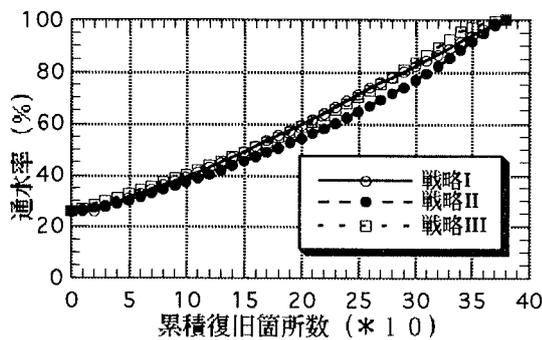
$$D = \int_0^{t^*} (1 - f(t)) dt \quad (4)$$

ここで $f(t)$ は $t$ 日における通水率，積分の範囲は初日から復旧終了までである。

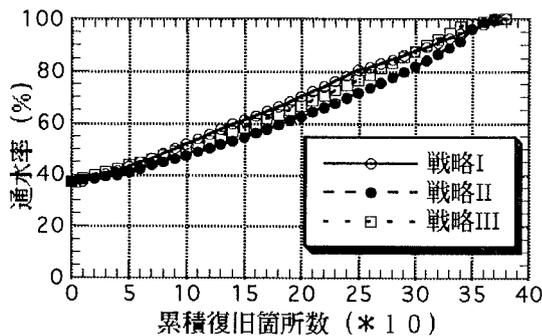
### 3. 修理件数と機能の回復

#### 3. 1 管網 A

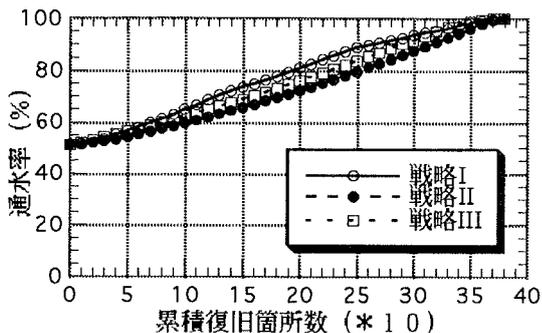
破損が均一及び図3のA-1,A-2,A-3の形に分布する場合に表1の3種の戦略を適用して，通水率の変化を求めてみた。その結果，破損の分布が均一及び



a) 被害程度-重度



b) 被害程度-中度



c) 被害程度-軽度

図7 通水率の回復状況 (被害分布B-3型)

A-2, A-3形るときには戦略IIの方がIIIよりも復旧途上における通水率が高い値を示した。すなわち上流から修理を進めていく方が有利であるという結果になった。とくに破損状態が重度になるほど両戦略による差が大きく，軽度の場合はわずかであった。

その一例として，A-3形の場合の通水率曲線を図5に示す。破損が重度から軽度に移るにつれ戦略II及びIIIの通水率曲線は差が小さくなる。戦略Iは他の2戦略より高い通水率を示すが，破損が重度の場合には戦略IIとの差はわずかである。図6は10箇所単位で漏水量の多いところから修理を進める戦略Aにおいて，選ばれた破損個所がどこに位置するものであったかを図示したものである。被害が軽度の場合の方が重度の時に比べて上中流部の修理が後まで持ち越される傾向にある。すなわち重度の場合には下流まで水圧が上昇するのは遅れ，大きな漏水は上流から順に発生する。これに対し軽度の場合には上中流部の修理が進むと下流からも漏水が発生し，下流部の破損の大きいところで上中流部より大きな漏水が発生するようになる。

被害の分布がA-1形の場合には被害程度がいずれの場合にも戦略IIIの通水率曲線がIIを上回っていた。すなわち下流から修理を行う方が有利な結果となった。

#### 3. 2 管網 B

被害の分布が均一及びB-1,B-2のいずれの場合にも戦略Iの通水率曲線が最も上にあり，つづいて戦略III戦略IIの順であったが，戦略III,IIの両者の差異は小さかった。被害の分布がB-3の場合の通水率曲線を図7に示す。この場合にもわずかではあるが戦略IIが最も低い通水率曲線を示した。

### 4. 漏水探知・復旧活動と機能の回復

#### 4. 1 管網 A

断水をした場合としない場合の復旧の状況を比較したものが図8である。図中には図3にしたがって破損の分布形の番号を付記した。被害が軽度で水圧低下地域での給水を制限する場合を除いて，断水を行って復旧する方が復旧日数は短くなる。

低水圧地区に対する給水の制限を行わない場合，断水を行わずに復旧をする場合には，被害が軽いほど低水圧地区の給水制限を行う効果が大きくなる。

被害が軽度の場合は漏水を見つけにくいために、無断水で復旧を行った場合には、他の被害程度と比べて復旧日数が大きくなる。断水を行った場合の復旧効率の改善は、他の被害程度と比べて最も著しいが、日数自身は他の場合よりもやや大きい。これに対し低水圧地区に対する給水制限を行うと、漏水の発見が容易になり、無断水で復旧効率が改善される。断水による復旧では、復旧対象地域の全ての破

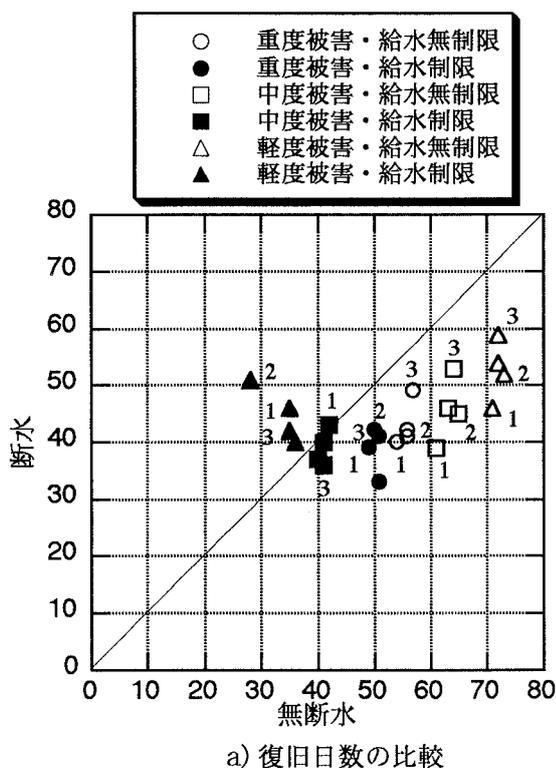
損を修理の後、次の地区へと進んでいくものとして、低水圧地区のみ給水を止める方法に比べてかえって効率が悪くなったものと考えられる。

低水圧地区に対する給水制限を行わない場合の方が断水復旧による効果が大きくなる傾向があるのは、給水制限を行うことはすでに一部断水させることになっているからである。

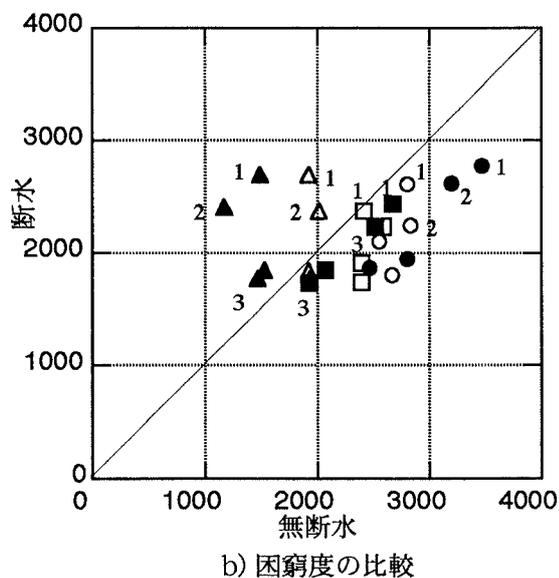
給水制限を行わない場合の断水復旧による復旧日数の短縮は、破損の分布が上流側にある場合の方が顕著である。下流を断水させることで上流の破損を早く修理することができるためと考えられる。

困窮度から見た場合は、軽度の被害の場合、給水制限に関わらず断水をしない方が有利な結果となった。これは被害が軽度であるため、水を得ることが可能な地域が多く、断水戦略をとることによってそれらの地域への供給を止めてしまうことになるためである。断水復旧をする場合はいずれの場合にも被害分布がA-1型の場合に最も困窮度が高くなる。

断水復旧の効果を見るために、無断水の場合に対して断水を行った場合に、復旧日数と困窮度がどの程度低減するかを求めた結果を図9に示す。すでに述べたように、被害が中・重度の場合は断水を行う方が、軽度の場合は給水制限のみで復旧することが有利になることが、本図においても示されている。



a) 復旧日数の比較



b) 困窮度の比較

図8 断水と無断水による復旧の比較

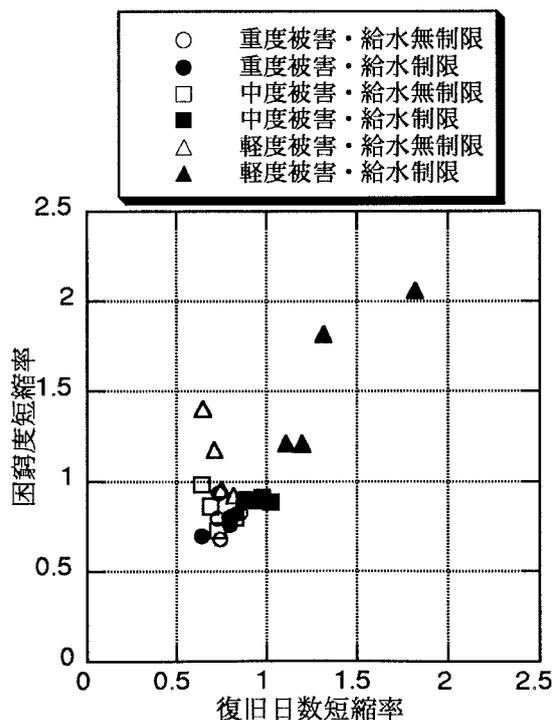


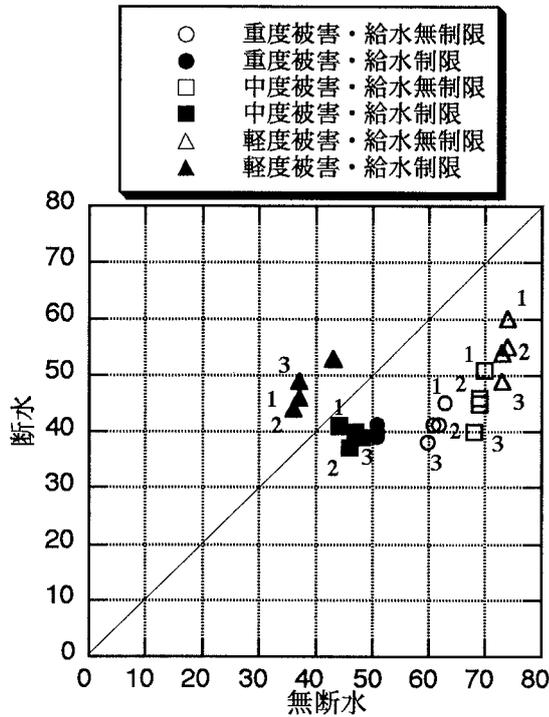
図9 断水による復旧効率の改善率

4. 2 管網B

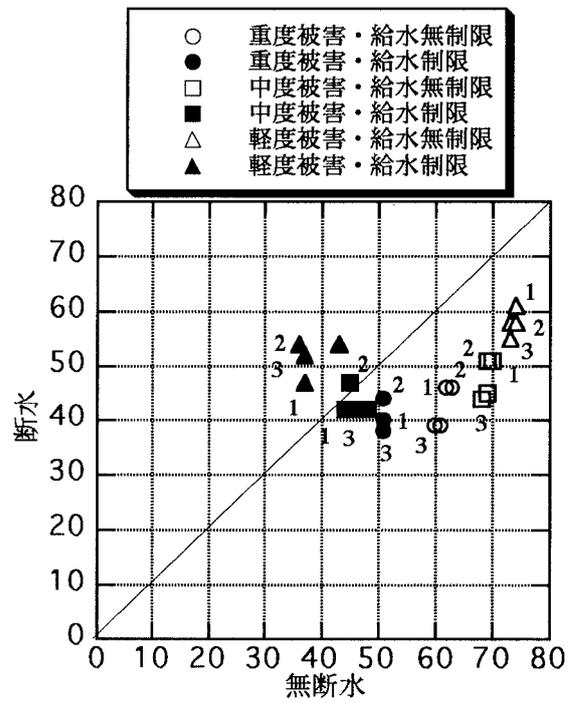
管網Bにおいて、断水区域の区割り設定を年輪型にした場合とパイカット型にした場合の、断水と無断水による復旧の比較をそれぞれ図10、図11に示す。管網Aの場合と同様に、無断水復旧の場合、低圧区域の給水を制限する軽度被害において復旧日数

は最短で、つづいて中度被害、強度被害、給水制限を行わない重度被害、中度被害、軽度被害の順となっている。また軽度被害で給水制限を行う場合に、断水を行うとかわって復旧日数が長くなるのも、いずれの場合においても同様である。

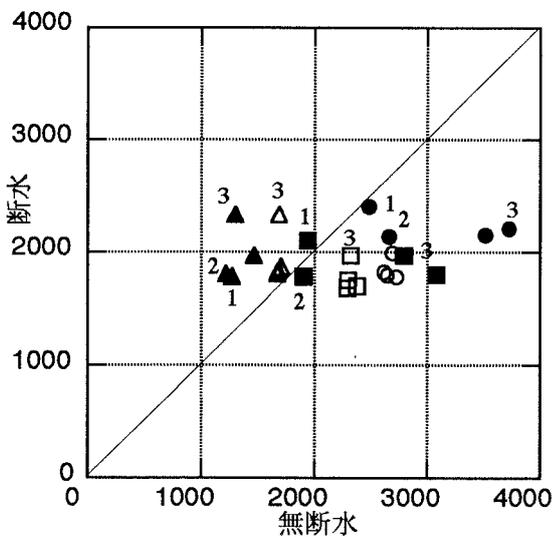
被害の分布と復旧日数の関係では、図10a)、図11a)ともに給水制限を行う軽度及び中度被害を除い



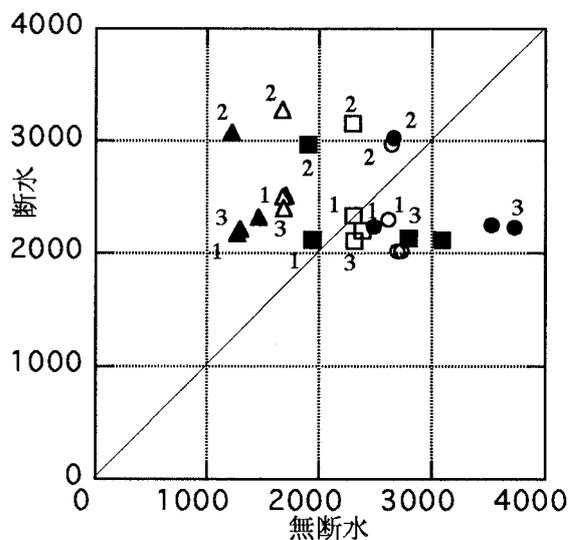
a) 復旧日数の比較



a) 復旧日数の比較



b) 困窮度の比較



b) 困窮度の比較

図10 断水と無断水による復旧の比較 (管網B 年輪型断水区域設定)

図11 断水と無断水による復旧の比較 (管網B パイカット型断水区域設定)

て、B-3型が断水復旧による復旧日数が最短となっている。管網Aの場合も併せて考えて、被害の程度が激しく、配水池に近いところに分布している場合ほど、断水を行って復旧していくのが効率的であるといえる。

困窮度から見た場合にも管網Aの場合と同様、給水制限のあるなしに関わらず断水を行った場合の方が困窮度が高くなる。無断水復旧の場合の困窮度は、復旧日数に比べて、給水制限の有無の影響より

も被害強度の影響をより受ける傾向にあり、被害が重度になるほど高くなる。断水復旧の場合、年輪型に設定した場合には被害の集中がB-3型が、パイカット型に設定した場合にはB-2型が、困窮度が高くなる。管網Aの結果とも合わせて、被害集中地区から修理を始める方法が、断水復旧の場合最も困窮度が高くなると言える。

図12は2つの断水区域の設定の仕方による復旧の比較を示している。復旧日数、困窮度いずれの観点からも、年輪型に区域を分割する方が有利に復旧が進められることがわかる。

5. あとがき

地震被災後の配水管網の復旧戦略を考えるために、モデル的な管網を設定し、数値計算を行って、復旧作業の進捗状況を検討した。被害の程度が重い場合には区域を分割して全面的に断水を行って復旧する方が有利であるが、軽度の被害の場合には、漏水の著しいところのみ給水制限を行う方法が有利であった。復旧の特性を検討するために、やや現実とは異なった極端な場合も取り入れて検討を行った。今後はより現実に近い方法と、実際の管網例による検討が必要である。

参考文献

- [1] 磯山龍二, 片山恒雄: 大規模水道システムの地震時信頼度評価法, 土木学会論文集, 第321号, pp.37-48, 1982.
- [2] 星谷勝, 小池精一, 宮崎正敏: 上水道システムの震災復旧過程の予測, 土木学会論文集, 第322号, pp.25-35, 1982.
- [3] 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, pp.387-396, 1987.
- [4] 能島暢呂, 亀田弘行: 幹線・支線の階層性を考慮したライフライン系の最適震後復旧アルゴリズム, 土木学会論文集, 第450号/I-20, pp.171-180, 1992.
- [5] 豊中市水道局: 阪神大震災被害状況・復旧業務等の中間検証, pp.1-99, 1995.
- [6] 斎藤宏, 亀田弘行: 1978年宮城県沖地震による水道管網の破損と漏水量の推定, 土木学会第37回年次学術講演会講演集 I, pp.625-626, 1982. (受理 平成10年8月24日)

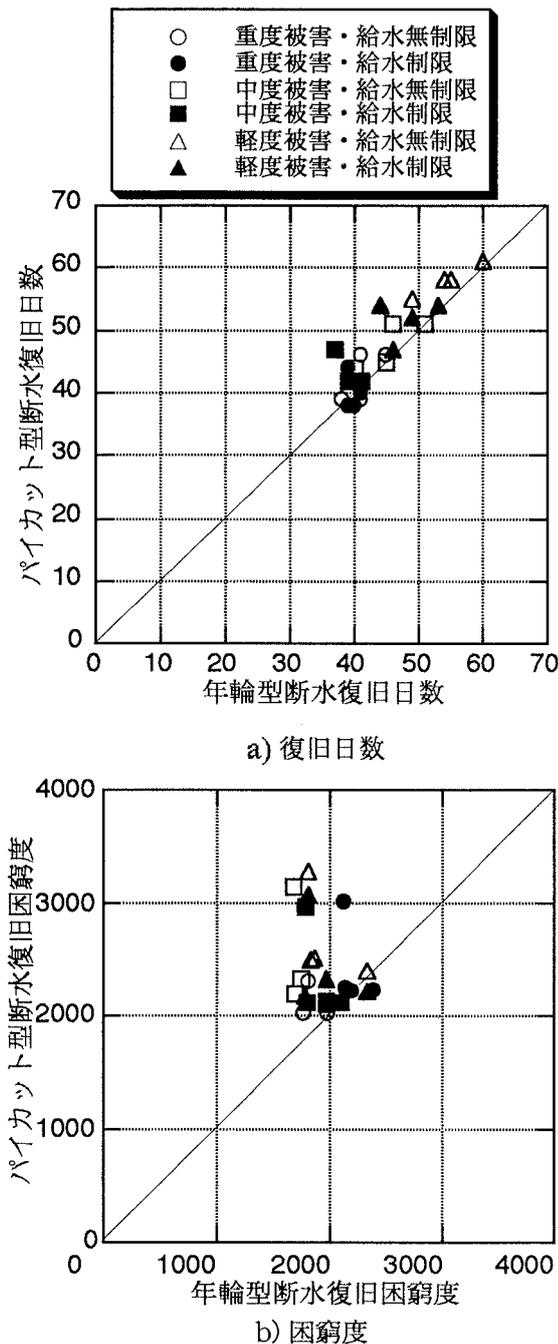


図12 断水区域の設定法による復旧の比較