

冗長性指数を用いた上水道ネットワークの 地震時応急復旧予測手法

山本欣弥¹・永田 茂²

¹ 攻玉社工科短期大学教授 (〒141-0031 東京都品川区西五反田 5 - 14 - 2)

E-mail:yamamoto@kogyokusha.ac.jp

² 鹿島技術研究所 (株)イー・アル・エス リスクマネジメント部 部長)

(〒107-0052 東京都港区赤坂 3 - 11 - 15 桔梗ビル 3F)

E-mail:nagata@ers-co.jp

上水道システムの復旧には、被害特性、ネットワーク形状、復旧資機材および作業人員等のさまざまな要因が影響する。さらに、上水道ネットワークを構成する管路の多くは、複数の不確定要因に支配される地盤に埋設されているため、震災直後の復旧戦略の検討では埋設管路網の被害状況を確率事象として取り扱う必要がある。そこで、本研究では、ネットワーク形状および管路の被害発生確率を考慮すると共に、情報エントロピーを用いて定義した冗長性指数を指標とする復旧戦略の評価手法に関する提案を行った。また、数値計算例では、神戸市水道の低層配水地区の主要配水管路網を用いた復旧戦略の評価事例を示した。

Key Words : earthquake, water supply system, network, restoration, redundancy index

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では、大きな被害を受けた水道施設が完全復旧までに約2.5ヶ月を要し^{1),2),3)}、住民に多大な影響を与えている。上水道システムをはじめとするライフラインに対して、耐震補強等により、被害の発生を最小限に食い止めることは重要な地震対策の一つである。しかし、どのような構造物であっても、絶対に壊れないようにすることは事実上不可能である。そのため、住民への影響を軽減するために、停止した機能を速やかに回復することに着目した対策をとることも重要である。地下埋設管路網によって構成される上水道システムの、地震による被害を全て予測^{4),5)}することは困難であるが、あらかじめ適切な復旧戦略を検討しておくことは、地震に対する備えとして必要である。

上水道システムの復旧には、ネットワーク形状および被害特性、地域特性、復旧資機材および作業人員等のさまざまな要因が影響する。さらに、地震は不確定要因を持つため、その発生および地震による被害等は確率事象

として取り扱う必要がある。一方、上水道システムの復旧戦略をどのように評価するか、つまりどのような復旧が最適であるかを検討しておかなければ、この問題を解くことは不可能である。

そこで、本研究では、ネットワーク形状および被害特性を考慮すると共に、一つの考えとして冗長性指数^{6),7),8)}に着目した復旧戦略を検討する。

2. 冗長性指数を用いた復旧戦略の考え方

(1) 上水道システムのモデル化

復旧戦略の検討を行うために、現実の上水道システムを解析用ネットワークにモデル化する。

現実の上水道システムの主要な配水管等をリンクとし、浄水場、配水池等のソースを供給ノード、そして下層の小口径配水管路網を簡略化して給水量あるいは給水人口を持つ受給ノードとする。また、地震による被害は、リンクにのみ発生するものと仮定して、延長方向にポアソ

ン確率過程^{9),10)}にしたがって発生するものとする。

この解析用ネットワークモデルを用いて、モンテカルロシミュレーション法¹¹⁾により、上水道ネットワークシステムの破壊事象を算出し、冗長性指数を受給ノードごとに求める。

(2) 冗長性指数

地震による被害が、リンクにのみ発生するものと仮定し、 m 本のリンクをもつ上水道ネットワークシステムの破壊事象のベン図^{9),10)}を図-1に示す。

母集合 U は、式(1)、式(2)および式(3)で表される。

$$U = \{D_0, D_1, D_2, \dots, D_{m-1}, D_F\} \quad (1)$$

$$U = O \cup NO \quad (2)$$

$$U = D \cup ND \quad (3)$$

ここで、式(2)中の O はシステムの機能が保たれている事象の部分集合 (operational), NO はシステムの機能が破壊した事象の部分集合 (non-operational) である。システムの機能が保たれているということは、受給ノードが任意のリンクによって供給ノードと連結されている状態を示している。そして、システムの機能が破壊しているということは、受給ノードが供給ノードと連結されなくなる状態を示す。この連結の有無は、ネットワーク上に存在する受給ノードごとの状態であるため、図-1に示したベン図は、受給ノードの個数存在する。

O および NO は、それぞれ次式で表される。

$$O = \{D_0, D_1, D_2, \dots, D_{m-1}\} \quad (4)$$

$$NO = \{D_F\} \quad (5)$$

また、式(3)中の D は、任意のリンクに何らかの被害が発生する事象の部分集合 (damage), ND はすべてのリンクが破壊しない事象の部分集合 (non-damage) で、それぞれ次式で表される。

$$D = \{D_1, D_2, \dots, D_{m-1}, D_F\} \quad (6)$$

$$ND = \{D_0\} \quad (7)$$

また、 O はシステムの機能が保たれている事象の部分集合 (operational), NO はシステムの機能が破壊した事象の部分集合 (non-operational) である。また、 D_0 は、リンクが1本も破壊しない事象である。 D_1 は、リンクの任意

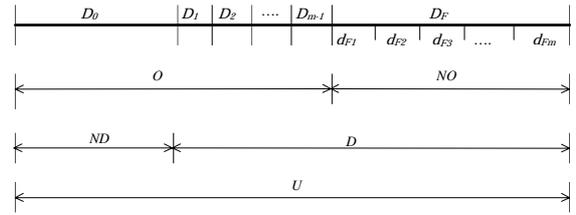


図-1 上水道システムの破壊事象のサンプル場

の1本のみが破壊しシステムの機能が維持されている事象、同様に、 D_{m-1} は、1本を残してほかの要素がすべて破壊した状態でシステムの機能が維持されている事象である。 D_F は、システムの機能が破壊した状態の事象である。ここで、事象 $D_0 \sim D_F$ は、互いに排反で全てを尽くしている。また、 D_F には式(8)で示すように、 d_{F1} から d_{Fm} の事象が含まれている。

$$D_F = \{d_{F1}, d_{F2}, \dots, d_{Fm-1}, d_{Fm}\} \quad (8)$$

ここで、 d_{F1} は、リンクの任意の1本のみが破壊してシステムの機能も破壊した事象である。同様に、 d_{F2} は、リンクの任意の2本のみが破壊してシステムの機能が破壊した事象、 d_{Fm-1} は、1本を残してほかのリンクがすべて破壊してシステムの機能が破壊した事象である。 d_{Fm} は、 m 本すべてのリンクが破壊してシステム機能が破壊した事象である。

冗長性指数は、情報エントロピーを用いて次式で定義される^{6),7),8)}。

$$R_E = H_D / \log_2(m)$$

$$= \frac{\{-\sum_{i=1}^{m-1} P_{D_i} |_D \log_2 P_{D_i} |_D - P_{D_F} |_D \log_2 P_{D_F} |_D\}}{\log_2(m)} \quad (9)$$

ここで、式(9)の分子 $H_D |_D$ は、被害の発生事象 D の条件下で、少なくとも1本以上のリンクが破壊する事象の部分集合の条件付情報エントロピーである。また、同様に分母 $\log_2(m)$ は、 $H_D |_D$ の最大値である。したがって、 R_E は、0から1の間の値をとるように基準化されており、その値が0のとき冗長性が最小となり、1のとき最大になる。

(3) 冗長性指数と復旧戦略

図-2に上水道システムの模式図を示す。ここでは、図-2(a)のように n 本のリンクが並列に配置されているものとする。水は、左のノードから右のノード(受給ノード)へ、リンクの矢印の方向に供給されるものとする。

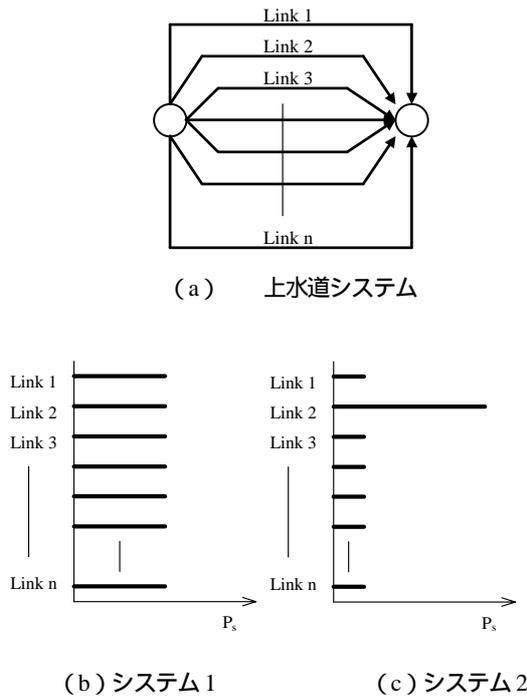


図-2 上水道システムの模式図

このとき、それぞれのリンクの非破壊確率を P_{Si} ; $i=1 \sim n$ とすると、2つのノードの連結確率は、 $1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{Si})$ で定義される。ネットワークシステムの場合、この連結確率を信頼性として用いる場合が多い^{12),13),14),15),16),17)}。

連結確率で定義される信頼性が等しい2つのネットワークシステムの、リンクの非破壊確率 P_s の分布を図-2(b) および(c)に示す。システム1の各リンクの P_s は、あまり高くないがほぼ同様の値である。一方、システム2では、1本のみ P_s の値が非常に高く、他のリンクでは低い値となっている。これらを詳しく見ると次の事がわかる。

システム1は、全てのリンクの非破壊確率がほぼ同じ値をとっているため、地震が発生した場合でも任意の1本以上のリンクが破壊しないで残る可能性がある。一方、システム2は、地震が発生した場合、リンク2以外は、ほぼ確定的に破壊する。したがって、システム2の信頼性は、リンク2によってのみ保たれているといえる。この2つのシステム間の相違は、連結確率によって定義される信頼性では区別ができない。しかし、式(9)によって定義される冗長性指数を用いると、システム1の冗長性が高いことがわかる。

以上より、冗長性の低いシステム2では、地震によってリンク2が破壊したという条件下において、他のリンクが破壊しない可能性は極めて低いため、システムの機能停止に直結する。しかし、冗長性の高いシステム1では、任意のリンクが破壊したという条件は、他のリンク

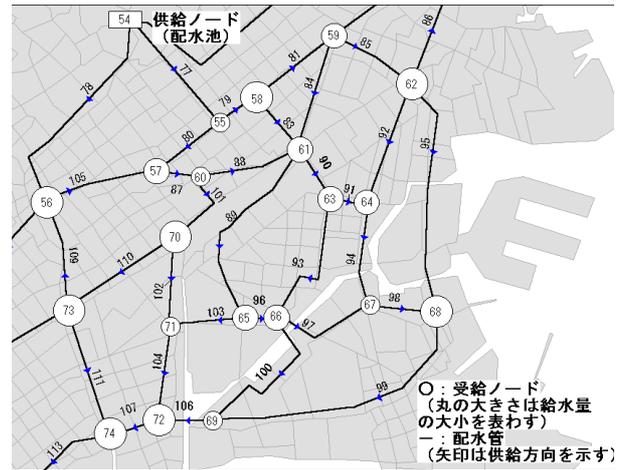


図-3 解析対象の上水道ネットワークの例

の破壊を表すものではなく、何本かのリンクが破壊しない可能性が高い。そのため、機能が停止した場合であっても、システム1のように冗長性指数の大きい受給ノードは、システム2と比べて供給ノードとの間に被害の軽微な経路が複数存在する可能性があると考えられる。

したがって、水道システムの機能が供給ノードと受給ノードがリンクによって連結されていれば保たれているものとする。冗長性指数の大きい受給ノードにつながるリンクを優先して復旧した場合、機能の回復がより効率的に行えるものとする。

3. 数値計算例

神戸市の水道ネットワークの市街地区における低層配水地区の一つを解析対象として^{18),19)}、復旧シミュレーションを行う。リンクの被害率(箇所/km)の推定には、磯山ら⁵⁾が提案した地表面最大加速度(PGA)による水道管路の被害推定式を用いる。

図-3および表-1に、主要配水管路網のモデルを示す。復旧シミュレーションを行う時には、次の条件を設ける。

- 同時に複数のリンクの復旧作業は行わない。
- 水の供給方向は、リンクの矢印で表され、被害発生後も変化しない。
- 配水池側、つまり上流側から矢印方向に順次復旧する。
- 受給ノードは供給ノードと連結されれば、所定の給水量を得られる。
- 復旧にかかる時間は、リンクの被害箇所数に比例する。そのとき、リンクの被害形態の区別はしない。
- 復旧作業を行うとき、作業場所間の移動時間は考慮しない。

表-1 水道ネットワークのノード・リンクデータ

リンク番号	ノード Start	ノード Eed	平均被害箇所数	距離 (km)	ノード番号	給水量 (m ³ /日)
77	54	55	0.36	0.780	54	171
78	54	56	1.09	1.358	55	599
79	55	58	0.10	0.269	56	314
80	55	57	0.18	0.508	57	456
81	58	59	0.23	0.610	58	399
83	58	61	0.94	0.411	59	200
84	59	61	0.43	0.728	60	285
85	59	62	0.21	0.557	61	570
87	57	60	0.16	0.270	62	257
88	60	61	0.43	0.607	63	314
89	61	65	1.16	1.246	64	257
90	61	63	1.08	0.359	65	285
91	63	64	0.19	0.223	66	200
92	62	64	0.68	0.788	67	570
93	63	66	0.78	0.911	68	228
94	64	67	0.69	0.652	69	570
95	62	68	2.11	1.473	70	228
96	65	66	0.16	0.180	71	599
97	66	67	0.54	0.613	72	599
98	67	68	0.63	0.403	73	599
99	68	69	1.81	1.744	74	570
100	66	69	0.84	1.014	総給水量	7,670
101	60	70	0.33	0.480		
102	70	71	0.47	0.532		
103	65	71	0.41	0.443		
104	71	72	0.51	0.560		
105	56	57	0.90	0.701		
106	69	72	0.26	0.311		
107	72	74	0.30	0.311		
109	56	73	0.39	0.682		
110	70	73	0.45	0.789		
111	73	74	0.62	0.810		
			総延長	21.323		

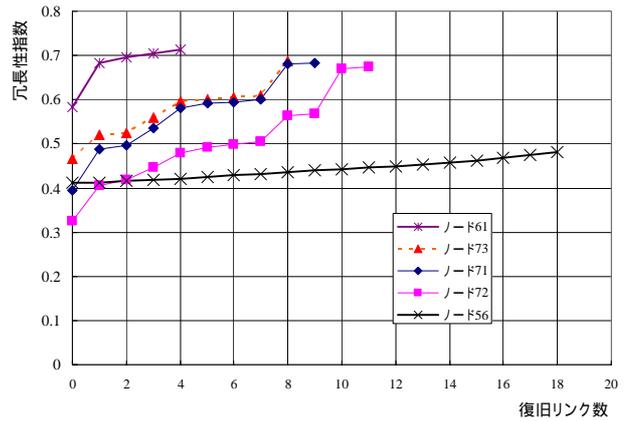


図-5 冗長性指数の値の変化

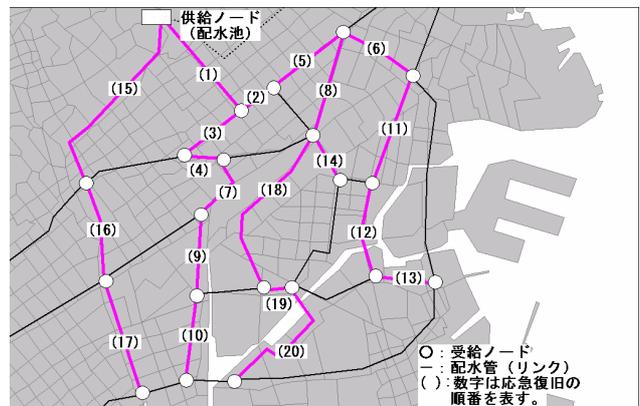


図-6 数値計算例



図-4 数値計算例

すべての受給ノードが供給ノードと連結された時点まで復旧完了とする。

以上の解析条件の下で、3種類の復旧戦略(数値計算例～)を設定し、数値計算を行う。

数値計算例 (図-4) は、冗長性指数の値が大きいノードを優先して復旧する戦略である。まず、供給ノードと他の受給ノードを経由せずに直接つながる受給ノードの中で、冗長性指数が最大の受給ノード(図-3のノード55)を選択し、その受給ノードと供給ノードを結ぶリン

ク(図-3のリンク77)を復旧する。つぎに、復旧したリンク77の被害発生確率 P_i を0として、再度、各受給ノードの冗長性指数を算出する。供給ノードあるいは受給ノード55と直接つながる受給ノードの中で、冗長性指数が最大のものを選択し、その受給ノードへつながるリンクを1本復旧する。その後、復旧したリンクの被害発生確率 P_i を0として、再度、各受給ノードの冗長性指数を算出し、次に復旧するリンクを選択する作業を、復旧完了まで繰り返す。

5箇所のノードに着目して、それぞれ供給ノードと連結されるまでの、冗長性指数の値の変化を図-5に示す。ネットワーク上のすべての受給ノードが供給ノードと連結して、復旧が完了するために必要なリンク数は、20本である。各ノードの冗長性指数は、供給ノードと連結された後は、計算していない。ノード61は、復旧の初期段階で供給ノードと連結する。ノード71, 72, 73は、復旧の中期の段階で供給ノードと連結する。そしてノード56は、復旧の最終段階まで供給ノードと連結しない。早く復旧するノードは、復旧直前になると冗長性指数の上昇が急激になっている。

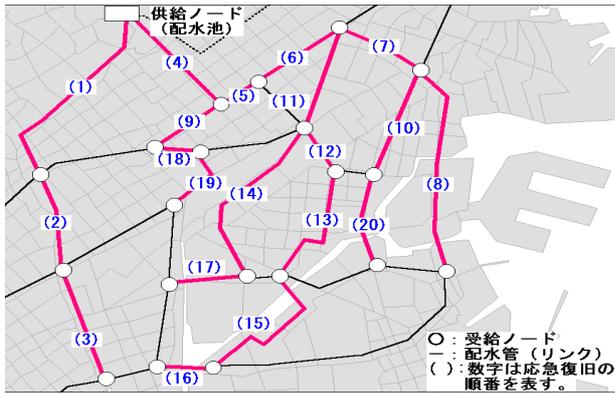


図-7 数値計算例

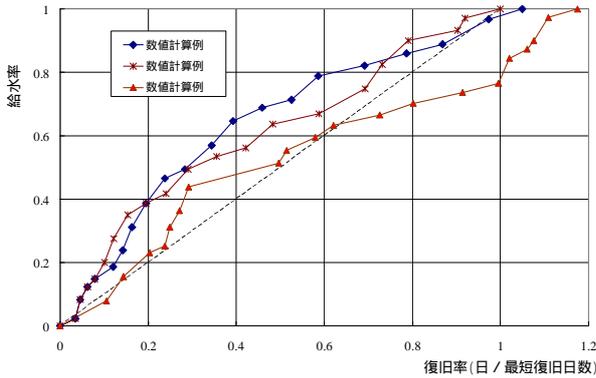


図-8 復旧曲線

数値計算例（図-6）は、各受給ノードに関して、供給ノードからの平均被害箇所数の累積が最小となるルートを決し、そのルート上で、平均被害箇所数が最小であるリンクを優先的に選択し、復旧する戦略である。

数値計算例（図-7）は、供給量の大きな受給ノードが供給ノード側と接続するようなリンクを選択しつつ、供給量が同じ場合は、平均被害箇所数が最小であるリンクを選択して復旧する戦略である。ただし、システム中の最大給水量を有する受給ノード等を早く復旧しようとするものではなく、復旧方向を選択するとき、給水量の大小を比較して大きい受給ノードを目指して復旧していくものである。

図-4、6および7のリンクにつけられた括弧内の番号は、リンクの復旧順序を示す。

計算結果より求めた復旧曲線を図-8に示す。横軸は、数値計算例で求めた復旧完了日数を基準として、復旧日数の比率を表した復旧率である。縦軸は、上水道システム全体の給水量を基準として、復旧作業により供給が再開された累積給水量の比率を表した給水率である。また、図-8中の破線は、座標(0,0)と(1,1)を直線で結んだもので、復旧評価のための基準とするために描いたものである。

数値計算例で求めた復旧曲線は、復旧初期の立ち上がりが高く、復旧率0.3の段階で給水率が0.5程度まで回復している。しかし、その後は少し緩やかな曲線となり、給水率が0.5から0.8までは比較的時間を要しており、復旧率が約0.7となっても給水率が0.8を下回っている。

数値計算例で求めた復旧曲線は、逆S字曲線を描いている。また、給水率0.6を超えるあたりから復旧のスピードが落ちて破線を下回り、完全復旧にも数値計算例の中では最も時間がかかっている。

一方、冗長性指数を指標としている数値計算例の復旧曲線は、上に凸状の曲線を描いており、復旧の中期段階での給水率の立ち上がり早い。しかし、給水率が0.75を超えるあたりから、数値計算例の値に越されて、完全復旧(給水率100%)までに時間がかかっている。しかし、復旧の終期では、特に被害が大きいために、最後まで手がつかずに残された地区の復旧作業を行う場合が多い。また、この段階の作業は、住宅等が倒壊したり、焼失したりして地震発生以前の状態に復旧することは困難である場合が多い。このため、給水率0.9程度までを復旧の評価対象とするという考えもある。この考えにしたがって、給水率0.9までの復旧曲線を評価するならば、数値計算例が比較的優れているといえる。

今後は、復旧曲線の優劣を示すことのできる定量的指標の導入を図る。

4. おわりに

上水道システムの復旧戦略と評価方法について検討を行うための試案として、3題の数値計算例を行った。その結果、単純に、最短経路に沿って行う復旧が、必ずしも最適ではなかった。また、順次、給水量の大きい受給ノードを目指して復旧する、いわゆる場当たりの戦略は、効率が悪い結果となった。そして、本研究で提案した、冗長性指数を指標とする復旧戦略が、今回行った3つの数値計算例の中では、比較的優れている結果となった。

今後は、管路の復旧率、作業人員・資機材の最適配置、復旧作業場所間の移動等の問題を考慮した復旧戦略と、住民の感じる迷惑度等を加味した評価方法の検討を行う予定である。

謝辞：解析モデルの作成には、神戸市水道局より提供していただいた資料を用いている。また、本研究は、文部科学省が推進している大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環として行ったものである。

参考文献

- 1) 社団法人日本水道協会：1995年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析，平成8年5月。
- 2) 亀田弘行，岩井哲，碓井照子，能島暢呂，坪井健次，古藤智子，小川安雄，松下眞，藤田裕介，橋上重弘：阪神・淡路大震災におけるライフラインの復旧過程と生活支障のGIS分析，総合防災研究報告第6号，京都大学防災研究所総合防災部門，1998.3.
- 3) 神戸市水道局：阪神・淡路大震災 水道復旧の記録，1996.2.
- 4) 社団法人日本水道協会：地震による水道管路の被害予測，平成10年11月。
- 5) 磯山龍二，石田栄介，湯根清二，白木暢：水道管の地震被害予測に関する研究，水道協会雑誌，第67巻，第2号（第761号），pp.25-40，1998.2.
- 6) 山本欣弥，星谷勝，大野春雄：冗長性指数によるライフラインシステムの地震時リスク解析，土木学会論文集，No.682 / -56，pp.373～382，2001年7月。
- 7) 星谷勝，山本欣弥：情報エントロピーを用いたシステムの信頼性と冗長性の検討，土木学会論文集，No.654 / -52，pp.355～366，2000年7月。
- 8) Masaru Hoshiya and Kinya Yamamoto：Redundancy Index of Lifeline Systems, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.128, No.9, pp.961-968, September 1, 2002.
- 9) Ang, A. H-S. and Tang, W. H.，伊藤学，亀田弘行 訳：土木建築のための確率・統計の基礎（Probability Concepts in Engineering Planning and Design），丸善株式会社，1977.
- 10) 星谷勝：確率論手法による構造解析，鹿島出版会，1973.
- 11) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986.
- 12) 高田至郎：ライフライン地震工学，共立出版株式会社，1991.9.
- 13) 磯山龍二，片山恒雄：大規模上水道システムの地震時信頼性評価法，土木学会論文報告集，No.321，pp.37-48，1982.5.
- 14) 篠塚正宣，小池武：埋設ライフラインシステムの連結性能に関する地震危険度解析，土木学会論文報告集，No.311，pp.13-24，1981.7.
- 15) 星谷勝，宮崎正敏：上水道システムの地震災害復旧の戦略と予測，土木学会論文報告集，No.331，pp.45-54，1983.3.
- 16) 星谷勝，小池精一：ライフラインの地震災害における復旧予測モデル，土木学会論文報告集，No.308，pp.25-35，1981.4.
- 17) 星谷勝，小池精一，宮崎正敏：上水道埋設管システムの震災復旧過程の予測，土木学会論文報告集，No.322，pp.25-35，1982.6.
- 18) 神戸市水道局：神戸市水道一般平面図，平成12年（2000年）4月作成
- 19) 神戸市水道局：平成12年度 事業概要

(2003. 6. 30 受付)

STRATEGY OF WATER SUPPLY NETWORK RESTORATION WITH REDUNDANCY INDEX

Kinya YAMAMOTO and Shigeru NAGATA

It is important that the strategies of earthquake damage restoration of water supply network system are discussed before the earthquake occurrence and the method to evaluate which is the optimum strategy will be established.

In this study, we will propose the strategy of water supply network restoration with redundancy index, which is defined via Shannon's information entropy, because the demand node, whose value of redundancy index is high, has a lot of paths with non or a few damages from the supply node, even if a system is damaged. And the numerical examples are conducted for the Kobe water supply system on the downtown area to evaluate the effectiveness of an assessment method for restoration strategies.