

安全性による大都市域水循環圏ネットワーク の震災リスク評価

西村和司¹・萩原良巳²・清水康生³・阪本浩一⁴

¹正会員 工修 日本工営(株) (〒102-8539 千代田区麹町5-4)

²正会員 工博 京都大学 防災研究所教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 博(工) (株)日水コン (〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1 新宿スクエアタワー)

⁴正会員 工修 八千代エンジニアリング(株) (〒153-8639 東京都目黒区中目黒1-10-23)

本研究では河川、水道、都市活動、下水道の4つのネットワークから構成される大都市域の水循環ネットワークに影響する震災リスクを分類する。そして、この震災リスクを安全性から評価するための到達可能性と損傷度の2つの指標を作成する。これらの指標はリンクが破壊することなくネットワークとして機能する可能性と、管にどの程度の破壊が生じるかを評価することを目的としている。最後に、大阪府の北摂地域を対象としてこれらの指標を用いて安全性の評価を行ったのちに、水循環ネットワークの再構成のための代替案の1つである下水処理水を用いた水辺創生を行った場合の安全性と比較し、同評価指標の有効性を検討する。

Key Words : earthquake risk, waterfront recreation, evaluation index of safety

1. はじめに

大都市の上下水道の整備率は高く、都市生活者は快適な生活環境の中で活動している。都市生活者は蛇口をひねるだけで無尽蔵に利用できる浄水を、無限に存在する資源であると認識し、汚水による伝染病等の脅威にさらされることが少なくなった現在をあたりまえのように感じている。

しかし、大都市に集中し複雑化した上下水道は災害に対し脆弱であり、ひとたび大きな災害が発生した場合にはその機能を失い、甚大な被害を発生させる。

災害の中でも地震は上下水道に多大なる影響を及ぼす。阪神・淡路大震災では、兵庫県の導・送・配水管の約4300箇所が破壊され、このため約130万戸で断水した。また水道管の破損による水圧減少で消火用水の確保が困難となり多くの家屋が延焼した。下水道では管渠、マンホール、取り付け管の破壊、閉塞をあわせて約1万件の被害が発生し、下水が流出した¹⁾。下水の流出は土壌汚染、水環境汚染を引き起こすことが考えられ²⁾、地下水の利用が制限された。

このような巨大災害である地震に起因する上下水道

施設の機能停止は常時懸念され、その対策が検討されてきたにも関わらず、阪神・淡路大震災のように広範囲にわたる大きな被害が発生した。

震災リスクへの対策を考えるためには、震災が水循環に与える被害の評価を行わなければならない。なぜなら、現状の上下水道のみを対象とした整備は既に考えられており、例えば1000年に1度という長い再来期間の地震のみに対して行う整備をこれ以上行うことは、経済的に限界があるためである。このようなことから、上下水道システムを水循環という大きなシステムの中のサブシステムとして考え、水循環システム全体の震災対策を行うことによる上下水道システムに及ぼす地震リスクへの対策を考えることが必要となる。

本研究では、上下水道と河川、都市活動により構成される水循環システムを4階層システムとしてモデル化し³⁾、そこに存在する地震被害を明らかにするため安全性を表現する震災リスク評価指標を作成する。そして、この指標を用いる事により、水辺創生という代替案の意義を水辺のない場合とある場合の効果を示して考察する。

2. 大都市域水循環ネットワークの震災リスク

(1) 水循環再構成ネットワークのモデル化

図-1に示すように、大都市域の水循環は都市活動を中心として河川、水道、下水道により構成される。この水循環の要素を河川レイヤー、水道レイヤー、都市活動レイヤー、下水道レイヤーとして考え、4階層システム構造で表したモデルが大都市域水循環システムモデルである。階層構造により水循環を表すことで、複雑に関係する事業体を水循環の中で位置づけることができ、各レイヤーが持つ目的とレイヤー間の関連を明らかにすることができる。

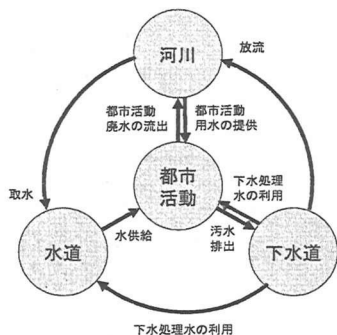


図-1 大都市域の水の流れ

水循環システムモデルをネットワークとしてとらえ、震災リスクに対して強い水循環システムを再構成することを考慮したモデルが、図-2に示す水循環再構成ネットワーク⁴⁾である。再構成のための代替案としては、水道水の施設内貯留や、水道連絡管、新たな水源の開発、下水処理水の利用、工業用水及び農業用水の転用・施設利用が考えられる。図中には、水道連絡管、貯留、水辺創生を記している。

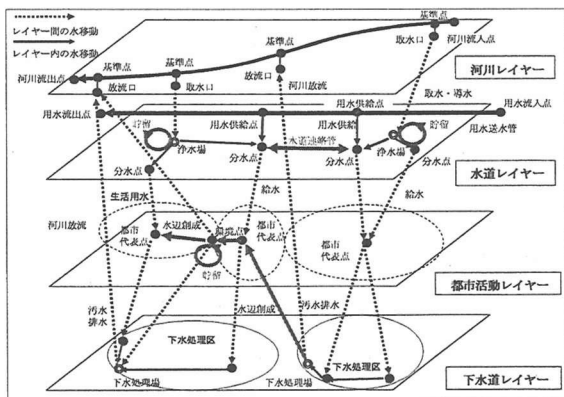


図-2 水循環再構成ネットワーク

水循環再構成ネットワークの各レイヤーは取水口、浄水場、下水処理場などの要素により構成されており、これらの構成要素は水の循環を記述するために、貯留、水質変換(浄化、処理)及び輸送(圧送、自然流下)のいずれかの機能を有している。このネットワークは人工系水循環を考慮しており、雨水、地下水を考慮せず、水循環を簡便に表すためにデータの収集や取り扱いが困難な農業用水、工業用水を対象としていないことを断っておく。また、本研究では年平均の1日水量($m^3/日$)を単位として用いることとする。

(2) 水循環システムに関わる震災リスク

震災リスクを水循環の枠組みで考えた場合、都市活動に関わるリスク、水道に関わるリスク、下水道に関わるリスク、河川に関わるリスクと、それぞれの要素に複合的に関わるリスクの5つが考えられる。図-3に震災リスクがレイヤー間に与える影響をまとめる。

	河川	水道	都市活動	下水道
河川	・河川構造物の破損 ・利水、治水機能の低下	・河川構造物の破損による取水の停止	・河川構造物の破損による都市の治水機能の低下	・雨水排除の支障による浸水
水道	・取水施設破損による河川の利水、治水機能の低下	・水道施設の破損・浄化機能の停止・低下	・水供給の停止 ・火災の延焼 ・都市活動の低下	・水利用に伴う汚水流入と、処理機能低下時の汚水の漏洩
都市活動	・有害物質流出による水環境汚染	・有害物質の流出による取水の停止	・都市構造物破損 ・火災の発生 ・有害物質の流出	・有害物質の汚水や雨水への流入
下水道	・汚水の流出による水環境汚染 ・雨水排除機能の低下による治水機能低下	・流出汚水の下水道水への混入	・汚水流出による公衆衛生の悪化 ・汚水管の閉塞が引き起こす環境汚染	・下水道施設の破損・処理機能の停止、低下

図-3 震災リスクがレイヤー間に与える影響⁵⁾

3. 安全性による震災リスクの評価

本研究では、大都市域水循環ネットワークの震災リスクを安全性から簡便に評価を行うための指標の定式化をおこなう。

本研究での安全性の定義は、「何らかの外力がネットワークに加わった場合にもネットワークが初期の機能を保つ」こととする。安全性の評価ではネットワークを構成するユニットの震災による破壊がネットワークの機能に及ぼす影響を評価する。水道ネットワークの機能とは水供給であり、下水道ネットワークの機能とは下水排除をいう。

安全性の評価指標は到達可能性と損傷度の2つから成り、それらを想定被害箇所数を用いて定式化する。

(1) 想定被害箇所数の算定方法

被害率とは過去に発生した地震が引き起こした地下埋設管被害を基に算出された 1km あたりの平均破壊箇所数である。この被害率は地震動に対する標準被害率に、地盤の特性による地震動の伝搬の違いや、管種・管径の違いによる耐震性の違いを表す補正係数を乗じることにより求めることができる。被害率を算定する式として、

$$R_{jm} = R_f \cdot C_g \cdot C_p \cdot C_d \quad (1)$$

が提案されている⁶⁾。

ただし、

R_f : 標準被害率(箇所/km)

$$R_f = 1.7 \times A^{6.1} \times 10^{-16}$$

A : 地表最大加速度(gal)

R_{jm} : 想定被害箇所数(箇所/km)

C_g : 地盤・液状化係数

C_p : 管種係数

C_d : 管径係数

とする。

この想定被害箇所数を用いて安全性の評価指標である到達可能性と損傷度を定式化する。

(2) 到達可能性の考え方とその定式化

到達可能性とは、リンクが破壊することなくネットワークとして機能する可能性を判断する指標である。想定被害箇所数が 1 よりも低い値の場合、これを管路が破壊する可能性の大きさと考える。そして、信頼度のアルゴリズムの考え方を用いて到達可能性を定式化することで、経路の冗長性や複雑さを考慮する。

まず、ネットワーク内にブリッジが含まれるかどうかを判断し、これが含まれる場合には加法定理を用いてネットワークのブリッジを縮退させる。

次に並列接続された管路が含まれているか判断し、含まれている場合には、次式の計算を行いネットワークの並列部分を縮退させる。

$$R_p = 1 - \prod (1 - R_{jm}^i) \quad (2)$$

ただし

R_{jm}^i : 管路 i の想定被害箇所数

R_p : 並列ネットワーク縮退部分の想定被害箇所数とする。

最後に、ネットワークに残った直列接続の管路を、次式を用いて求める。

$$R_s = \prod R_{jm}^i \quad (3)$$

ただし、

R_s : 直列ネットワーク縮退部分の想定被害箇所数とする。

(3) 損傷度の考え方とその定式化

損傷度とは、リンクが損傷することを想定したうえで、その損傷がどれだけ大きなものであるかを判断する指標である。想定被害箇所数が 1 以上であればリンクは損傷すると想定して、その損傷箇所数に重みをつけて累積することで損傷度を次のように定式化する。

$$D_s = \sum_{i=1}^n w^i R_{jm}^i \quad (4)$$

$$w^i = \frac{q^i}{\sum q^i} \quad (5)$$

ただし

D_s : 終点 s の損傷度

w^i : 管路 i の重み

q^i : 並列関係にある管路 i の管路の太さとする。

この指標は、ネットワーク内のリンクの想定被害箇所数が 1 つでも 1 以上である場合に用いる。

(4) 上・下水道ネットワークの合成安全評価の方法

前節で定式化したように、ネットワークの安全性には、リンクが破壊することなくネットワークとして機能する可能性を評価する到達可能性と、管にどの程度の損傷が生じるかを評価する損傷度の 2 つの指標がある。これらの指標はリンクの想定被害箇所数が 1 以上であるかどうかにより判断して用いる。図-4 に到達可能性と損傷度を求めるアルゴリズムを示す。

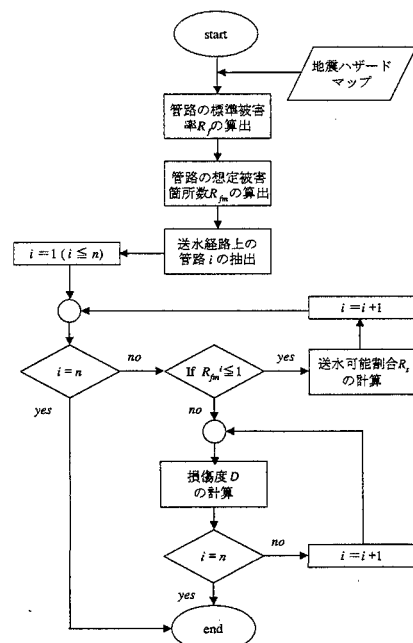


図-4 到達可能性と損傷度を求めるアルゴリズム

水道ネットワークと下水道ネットワークの安全性を、到達可能性と損傷度の指標により評価すると、組み合わせは4通り存在する。この組み合わせと意味を図-5に示す。この図においてⅡは、上流の下水管に被害が発生し、下流の水供給に影響をもたらす可能性があることを示す。これは、下水の流出により下流で取水不可能になる間接被害である。

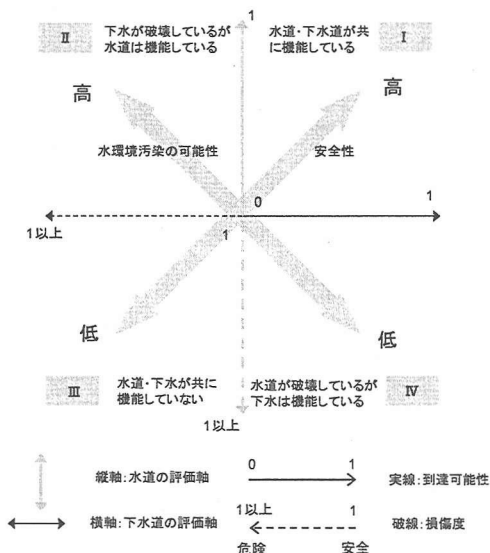


図-5 安全性の総合評価の意味

4. 安全性による大都市域水循環圏ネットワークの評価

本章では、大阪府の淀川右岸の北摂地域を対象地域として、前章で定式化した安全性の指標を用い、大都市域水循環圏ネットワーク(以下、淀川水循環圏ネットワークとする)の震災リスク評価を行う。

(1) 研究対象地域の概要と対象地震

北摂地域は大阪府の吹田市、高槻市、摂津市、茨木市、豊中市、池田市、箕面市、島本町の8つの市町から構成されている。この地域は西部の山間部と東部の淀川に挟まれた狭い地域に約170万人が密集して住んでおり、六甲山と瀬戸内海に挟まれた狭い地域に約150万人が密集して住んでいる神戸市と地理的状況が似ており、阪神・淡路大震災と同様に大きな被害が集中発生すると考えられる⁷⁾。北摂地域の淀川水循環圏ネットワークを図-6に示す。

(2) 淀川水循環圏の震災ハザードマップ

ここでは浄水場、下水処理場等の管路以外の施設は

震度7で機能が停止すると仮定をおく。淀川水循環圏ネットワークにおいて震度7が発生すると想定される活断層系地震を図-7に示す⁸⁾。これらは上町、生駒、有馬高槻、花折、西山、六甲の活断層系である。このうち、震度7が発生すると想定される活断層系は西山、生駒、上町、有馬高槻の4つである。



図-6 北摂地域の淀川水循環圏ネットワーク

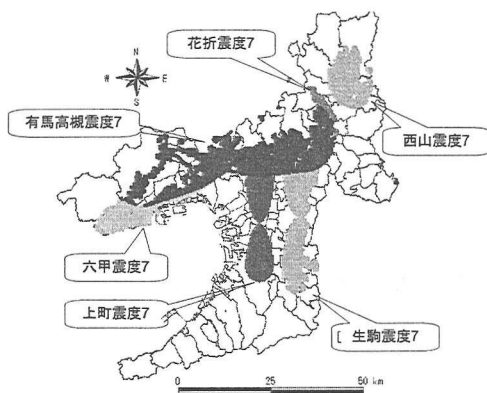


図-7 活断層地震の震度7の分布

(3) 現状の水循環圏ネットワークの安全性評価

安全性の評価を行うために、式(1)を用いて同地域の想定被害箇所数を求める。このときの、水道ネットワークの管種・管径係数は最悪の被害を想定して最も大きい値を用いた。地盤・液状化係数に関しては地表最大加速度を想定するときに既に考慮されているため式(1)に影響しないような係数である1とした。下水道ネ

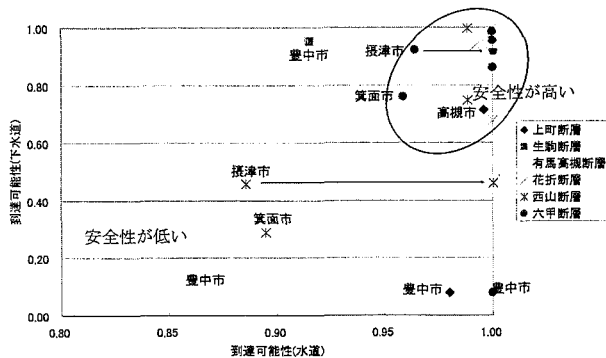


図-8 水辺創生前後の安全性(1)

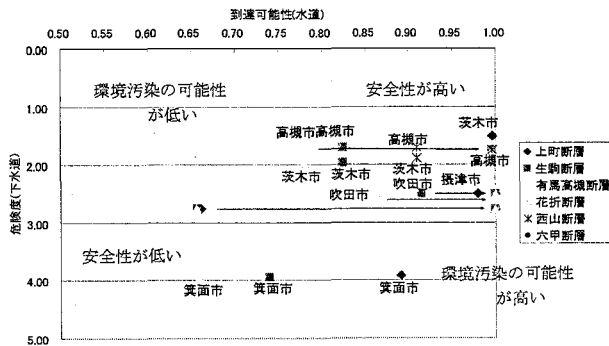


図-9 水辺創生前後の安全性(2)

ネットワークの管種係数については、データを手でできなかったため同様に1とした。

この結果、想定被害箇所数が1を超える水道管は無く、下水道管では1を超える管路が存在した。このため、評価指標として水道ネットワークでは到達可能性を用い、下水道ネットワークでは到達可能性と損傷度を用いて評価を行った。安全性による評価の結果を図-8、9に示す。図-8は図-5の総合評価の意味のⅢ、図-9はⅡに位置する。

図-7の○で囲まれた部分に示すように、花折、六甲断層系では地震が水道、下水道ネットワークに与える影響が少ないことが分かる。これは、北摂地域にこれらの地震による7以上の震度が発生しないためである。そして、豊中市は図-8にしか示されていないことから6つの活断層系地震に対して北摂地域の中で最も地震の影響を受けない地域であるといえる。

図-9に示されている市町は下水を流出させる恐れがある。特に箕面市は上町、生駒、有馬高槻断層系地震に対しての損傷度が高く、環境汚染に注意する必要がある。

(4) 水辺創生による水循環圏ネットワークの再構成

本研究では、水循環圏ネットワークの再構成の代替案の1つとして、清水らにより数理計画モデルとして定式化された水辺創生モデル⁹⁾を適用する。同モデルは、下水処理水を用いて水辺を創生することをモデル化したものであり、平常時の水辺空間創生によるアメニティの向上と震災時における用水の確保という2つの側面を考慮している。

大地震に代表される低頻度でリターンピリオドの長い災害に対する単一目的のインフラ整備は、財政の制約等から容易でなく、平常時における利用も想定し、日頃から利用できるようにインフラ整備を行う必要がある。本モデルで想定する水辺は、平常時には周辺住民の憩い空間としてアメニティ向上に寄与するとともに、震災時には身近な水辺の水を消火用水やトイレ用水として活用することが出来るなど、地域の震災リスク軽減に役立つものとなる。このような都市内における水辺創生は、平常時と震災時の双方の場面において有用なインフラであると考えられる。

水辺創生モデルでは、震災時における必要用水に対して下水処理場の処理水を確保し、その水を水辺創生水路に流す。その際に流す下水処理水は、平常時のアメニティが最大になるように周辺の市町村に配分する。このとき、平常時のアメニティの最大化を目的とした配分水量と震災時における必要水量との乖離が大きくなるものにならないように、乖離の割合を0.1以内に抑えることを制約条件として設けている。本研究では、震災時における必要用水として、消火用水とトイレ用水を対象とする。消火用水の必要水量は消防水利により定められている1家屋を消火するのに必要な貯留の水40m³とし、トイレ用水の必要水量は、1人当たり1日40lとする。また、火災発生件数は、阪神・淡路大震災のデータに基づき、震度7の区域において1km²につき1.8件発生すると仮定する。そして、誘致距離は水辺が都市生活者をひきつける距離であり、萩原ら¹⁰⁾により提案されている500mを仮定する。

以上の仮定に基づき、研究対象地域の水辺創生水路へ配分水量を求める。

表－1 北摂地域の火災を想定した下水処理水の配分水量

処理場→市町村	アメニ ティ効果 (人)	消火用 必要水量 ($\text{m}^3/\text{日}$)	地震時を想定した場合		平常時を想定した場合	
			送水量 ($\text{m}^3/\text{日}$)	充足率	送水量 ($\text{m}^3/\text{日}$)	充足率
正雀処理場→高槻市	400,018	8,875	8,875	1.00	8,976	1.01
正雀処理場→摂津市	159,148	1,011	1,011	1.00	910	0.90

表－2 北摂地域の水供給停止を想定した下水処理水の配分水量

処理場→市町村	アメニ ティ効果 (人)	トイレ用 必要水量 ($\text{m}^3/\text{日}$)	取水停止を想定した場合		平常時を想定した場合	
			送水量 ($\text{m}^3/\text{日}$)	充足率	送水量 ($\text{m}^3/\text{日}$)	充足率
正雀処理場→高槻市	400,018	8,875	13,467	0.93	12,445	0.86
正雀処理場→摂津市	159,148	1,011	3,246	0.93	2,897	0.83
正雀処理場→吹田市	453,290	13,710	6,371	0.34	7,742	0.56
原田処理場→吹田市	408,645		7,340	1.00	7,340	0.54

(5) 水辺創生モデルの適用結果

研究対象地域において、震災リスクが最も大きい有馬高槻断層系地震については下水処理場が機能停止すると想定されるため、下水処理水の利用ができない。

このため、次に震災リスクの大きい生駒断層系地震を対象とした水辺創生を考える。

モデル適用の結果、震災時には高槻市、摂津市に、さらに、環境汚染物質が流出して水道の取水が停止した場合には高槻市、摂津市に加え吹田市にも下水処理水を配分することができる。下水処理水の配分水量は表－1、2に示す通りである。8市町内の3市町にしか下水処理水を配分することができない理由は、水辺創生経路を自然流下としたこと、ならびに下水処理場が地盤高の低い河川流末に位置しているためである。

水辺創生の結果、高槻市、摂津市、吹田市においては生駒断層系地震が発生した場合の消火用水量を補う事ができるという結果を得た。淀川流域の大都市では消火栓への依存度がきわめて高く、震災により消火栓が使用できない場合に消火活動に著しい支障を生じることが予想される。この様な状況において、下水処理水を利用した水辺の創生は有効であるといえる。

取水停止時に対しては表－2に示した通り、充足率が0.93となりトイレ用の必要水量がやや不足するという結果を得た。取水停止時には水辺創生も1つの代替案であるが、これと貯留や水道連絡管といった多様な代替案を同時に考える必要がある。

前述のように、有馬高槻断層系地震が発生した場合には、下水処理場が機能停止しているため下水処理水を送ることができない。そこで、生駒断層系地震を想定して創生した水辺創生水路の水をせき止めることを考える。これにより、水路の水は貯留水とみなすことができる。例えば、正雀処理場から吹田市代表点までの延長24.5kmの水辺創生水路の断面0.25m×2mを流速0.5m/sで流れていると考えた時、水路をせきとめることにより1日送水量の0.5倍にあたる約1.2万 m^3 の

は、水を確保できる。水辺創生経路の断面・流速の設定は萩原らにより分析された好感度の高い水辺の諸元¹⁰⁾を参考に行った。

北摂地域を対象とした場合には、生駒断層系地震を想定して水辺を創生することにより、その他の活断層系地震にもその有効性を発揮できることが明らかとなった。さらに、水路の経路に隣接する公園などのオープンスペースを創生し、その地下に多くの貯留施設を建設すれば、更なる被害の軽減を図ることが可能となる。

(6) 水循環の再構成後の安全性の評価

水辺創生後の北摂地域の水道ネットワークと下水道ネットワークの安全性は図－8、9の矢印で示す位置に変化する。

水辺創生により、消火用水やトイレ用水が確保されるため吹田市、高槻市、摂津市の水道ネットワークの安全性は高くなる。しかしながら、豊中市と箕面市には水辺創生ができず安全性が低位にとどまるため、他の再構成の代替案を用いて高める必要がある。

また、図－9から、水辺創生により水道の安全性が上がる反面、下水道ネットワークの安全性は増加しないため環境汚染が発生するという新しい問題が生まれることがわかる。そのため、環境汚染を減らす下水道整備についての代替案を考える必要もある。

5. おわりに

本研究では、大都市域水循環圏ネットワークの河川、水道、都市活動、下水道とそれらに複合的に発生する震災リスクを分類した。そして、リンクが破壊することなくネットワークとして機能する可能性を評価する到達可能性と、管にどの程度の破壊が生じるかを評価する損傷度の2つの安全性評価指標を作成した。さらに、北摂地域の水循環圏ネットワークを対象に安全性

を評価して、それらを再構成する代替案の1つである下水処理水を用いた水辺創生前後の安全性を比較することで、指標の有効性を確認した。

今後の主たる課題としては、以下のようなことが挙げられる。

- ①下水処理水を用いた水辺創生のみを考えているが、水道連絡管や下水道連絡管といった事業体間の協力、公園などにおける貯留等を組み合わせた水循環再構成の代替案も考えなければならない。
- ②震災時の環境汚染問題を考慮して、環境面からみた水循環ネットワークについて考えることが必要である。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 ライフライン施設の被害と復旧，土木学会，1997.
- 2) 中瀬有祐・清水康生・萩原良巳・酒井彰：震災時を想定した大都市域水循環システムの総合的診断，環境システム研究論文集 Vol.29, pp.339-345, 2001.
- 3) 清水康生・秋山智広・萩原良巳：都市域における人工系水循環モデルの構築に関する研究，環境システム研究，Vol.28, pp.277-284, 2000.
- 4) 清水康生・萩原良巳・西村和司：グラフ理論による大都市域水循環圏ネットワークの構造安定性の評価環境，環境システム研究論文集 Vol.30, pp.265-270, 2002.
- 5) 清水康生：震災リスクの軽減を目的とした大都市域における水循環システムの再構成に関する研究，京都大学博士学位論文，2002.7.
- 6) 損害保険料算定協会：地震保険調査報告 28 地震被害想定資料，損害保険料算定協会，1998.
- 7) 神谷大介・萩原良巳：都市域における環境創生による震災リスク軽減のための計画代替案の作成に関する研究，環境システム研究論文集 Vol.30, pp.119-123, 2002.
- 8) 西村和司・清水康生・萩原良巳：大都市域での下水処理水利用による水辺創生と地震被害の軽減に関する研究，地域学研究，第 32 巻 1 号, pp.101-113, 2002.
- 9) Yasuo SHIMIZU, Yoshimi HAGIHARA : Reconstruction of Urban Water Circulation Systems by Considering Water Reuse for Earthquake Disaster Mitigation, Third International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER), pp.126-130, 2002.
- 10) 萩原良巳，萩原清子，高橋邦夫：都市環境と水辺計画，勁草書房，1998.

A Study of Evaluation of Earthquake Risk in Water circulate Network by Safety

In this paper, earthquake risks in water circulate network are classed. Two earthquake risk evaluation indexes by safety are made. One index is considering possibility of arrival and the other is considering danger degree.

These indexes are applied to right area of the Yodo River as a case study. Finally actual condition is compared with alternative applying condition, in order to show validity of indexes. This alternative is waterfront recreation model utilizing of reclaimed water in sewage treatment plant.