

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

清水康生¹・萩原良巳²・西村和司³

¹正会員 工博(株)日水コン 環境事業部 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿 6-22-1 新宿スクエアタワー)

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

³学生会員 京都大学大学院 工学研究科土木システム工学専攻 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

本研究では、大都市域における水循環圏の概念を提案し、圏域の河川網、水道施設網、都市活動による水質変換及び下水道施設網から構成される水循環をネットワークとして一体的に捉えることの重要性を述べる。そして、同水循環ネットワークをモデル化する方法を示す。さらに、ネットワークの構造安定性を評価するためにグラフ理論を援用した14の評価指標を提案する。適用事例として、大都市域に下水処理水を利用した水辺創成水路を導入した場合を対象とした水循環ネットワークの構造安定性の向上について検証する。

Key Words : a water circulation sphere, network model, graph theory, structural indexes, water circulation system

1. はじめに

阪神・淡路大震災では、水道システムが甚大な被害を受けたため、震災直後に消火栓を使用することができず延焼被害が拡大する一因となった¹⁾。このような大規模地震時の際の水確保は、その影響範囲が広範囲に及ぶため単独の行政体や事業体だけでは対応が困難となる。このため、従来の個別的な水管理の枠組みを超えて広域的かつ河川、上下水道システムを総合的に捉えた水循環システムとしての認識のもとで対策を講じることが求められる。さらに、このような水循環システムに対しては水管理者が個別に評価するのではなく、全体をひとつの水循環ネットワークとして捉えた評価が必要となる。

本研究では、大都市域水循環システム²⁾の空間的なまとまりをひとつの水循環圏³⁾として捉えることの重要性を述べ、次いで、同システムを施設の構造特性(点的か面的か)に注目し、管理の枠組みを超えたひとつのネットワークとしてモデル化する方法を示す。さらに、グラフ理論を適用した評価指標によりネットワークの構造安定性を評価する方法を提案する。最後に、下水処理水を利用した水辺創成水路⁴⁾を導入した場合の水循環ネットワークの構造安定性の評価事例を示す。

2. 大都市域における水循環圏の概念

(1)大都市域水循環システムモデル

大都市域では、河川から取水された水が水道により浄化・配水され、都市生活者の水利用、下水道の処理を経て河川や海域へ放流される。この一連の水の流れを水循環として、河川レイヤー、水道レイヤー、都市活動レイヤー及び下水道レイヤーから構成される階層システムとして表したモデルが図-1に示す大都市域水循環システムモデルである。同図には本研究で提案する水循環システムを再構成するための代替案である水辺創成水路の位置付けを都市活動レイヤーに示している。各レイヤーは取水口、浄水場、下水処理場、そして主要な管路・管渠などの要素により構成されており、それらは輸送、水質変換及び貯留のいずれかの機能を有している。

(2)大都市域における水循環圏の概念

大都市域において河川流域・水道給水区域・下水道処理区域から構成される水循環圏という空間的な概念を提案する。これは従来の河川流域という捉え方をすると、河川管理者には理解し易いものの、人工的な水循環システムを形成している水道や下水道の管理者に

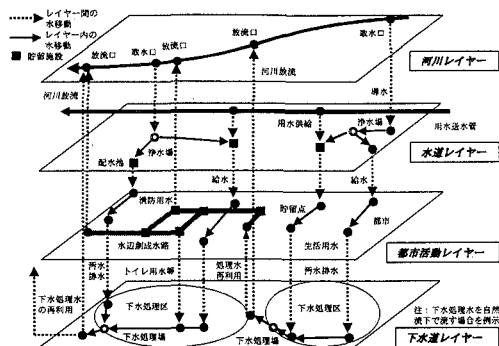


図-1 大都市域水循環システムモデル

としては管理の対象である給水区域や污水处理区域が必ずしも水源河川の流域内に存在しないため、自らの管理する部分的な水循環システムが全体の水循環システムにおいてどのような位置付けのものか認識することができない。このことは都市生活者も同様である。結果として大都市域における水循環システムとしての一体的な水管理が阻害されていると考えられる。この問題は、平常時の水資源計画の空間的な不整合をもたらすだけでなく、震災・環境汚染・渇水など、災害時の水確保を困難にし被害の拡大を招くことになる。水循環圏は、災害が発生した時に、必要となる水を確保するために対策を講じる空間単位（ユニット）でもあり、そのような空間単位として水資源計画を立案することが必要であろう。具体的には、河川管内図（河川図）、水道給水区域図（配水管網図）、処理区域図（幹線管渠図）といった管理者の図面上に個別に記述されている施設や水循環経路を一連のネットワークとして取り扱うことにより、平常時や災害時の水確保のマネジメントを有効に行なうことができると考える。このような一体的な水管理は、制御可能性の高い大都市域の水循環で有効であると考えられる。

3. 水循環システムのネットワーク化

(1) 大都市域水循環ネットワーク

水循環システムの有する構造を点的か面的かに注目して、グラフ理論⁹⁾を適用したネットワークとしてモデル化する。この際、水循環の状態量は空間スケールを考慮して年間平均値程度とする。

図-1に示した大都市域水循環システムをネットワークとして表す方法を以下に述べる。

① 水質変換機能を有する施設

浄水場や下水処理場はノードとして記述する。都市生活者の水利用は、水道水（浄水）を汚水に変換するという意味で給水点と称するノードで表す。

② 輸送機能を有する施設

送水管や污水管渠などの水輸送機能を有する施設はリンクとして記述する。ただし、管路の結節点とシステム境界上にはノードを設けるものとする。

③ 貯留機能を有する施設

配水池や施設内貯留施設、都市内貯留施設といった貯留施設は、グラフ理論のループ（self loop）を用いて表す。すなわち、ループ管に貯留容量に相当する太さ（断面積）と長さを与えて表現する。

④ その他の施設

水道取水口、処理水放流口の表現は、河川横断方向の中央に基準点を仮定し、堤内地にある取水場と放流施設をノードと考える。

図-1に示した大都市域水循環システムのネットワークは、ノードとそれらを結ぶリンクおよびループから構成される。図中の貯留点とは、水辺創成水路を通じて都市に送られてきた下水処理水を消防用水や生活用水として利用する貯留施設である。

図-1の水循環システムモデルをネットワークモデルとして表すと図-2となる。同図において、ノードは河川流入点、基準点、河川流出点、取水口、浄水場、配水池、用水流入点、用水流出点、用水供給点、給水点、貯留点、下水処理場、放流口である。そして、リンクは導水管、送水管、用水供給管、主要配水管、水辺創成水路、污水管渠である。これらのノードの内、貯留機能を持つ配水池、都市内貯留施設はループにより表している。

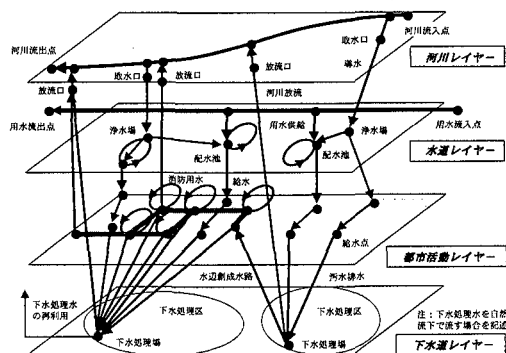


図-2 大都市域水循環ネットワークモデル

(2) マトリクスによるネットワークの記述

大都市域水循環ネットワークのノードを行と列にとり、各セルに結びつきの有無、水量、距離を示す数値を入力する事により、大都市域水循環ネットワークの経路、管路容量、水の流れる経路の長さを整理することができる。本研究では、このマトリクスを連結行列（connected matrix）と呼ぶ。

そして、網掛けがなされているセルはレイヤー内のリンクを表し、網掛けがないセルはレイヤー間のリンクを表している。連結行列は大都市域水循環ネットワークの経路、管路容量、流水経路の長さを分かり易く表記するだけではなく、マトリクス表記であるため、数値演算を容易に行なうことができる⁹⁾。

[illegible]

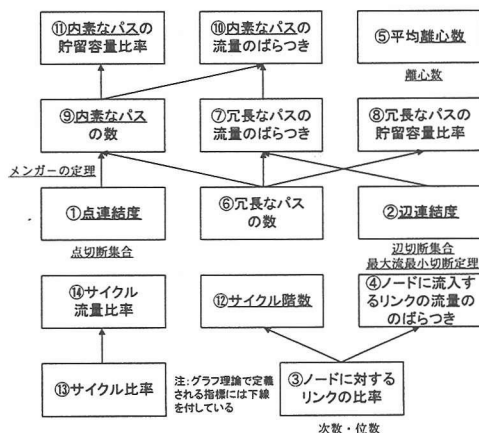
(1) 構造安定性と評価指標の提案

ノードに着目した場合には、そのノードの数やノードに何本のリンクが結ばれているかにより安定性を考えることができる。また、リンクに着目した場合にはリンクの太さによって安定性を評価することができる。例えば、取水した水を都市生活者に届けるまでを考えた場合には、同じ水量を輸送する場合でも、リンクの数が多くそれらのリンクの太さに偏りがない方が、災害の影響を受けにくく安定した水供給が可能である。また、水輸送の経路（パス：path）に着目した場合には、カスケード型よりもサイクル型の方が水の確保は安定である。このように、ネットワークの安定性を表す指標は、着目する構成要素により複数存在する。

(2) 評価指標の関連性

指標①②③⑤⑥⑬でネットワークの基本的な特性を把握し、総合的に評価を行う場合には上位にある指標④⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑭を適用する。そして、流量の観点から評価する場合には指標②④⑦⑩⑭を用い、接続構造により評価を行う場合にはそれ以外の指標を用いる。

評価指標は、上述のように各々の指標が独自の特性を有するため、複合して適用することで多角的な評価を行うことができる。ただし、ネットワーク境界の定義の仕方や適用する空間スケールの違いにより指標の有効性が異なる点に注意する必要がある。



- 267 -

表-2 水循環ネットワークの構造安定性の評価指標

番号	指標名	式	定義	解釈	指標の対象			
					数	距離	容量	経路
①	点連結度	$k(N) = \min A $	ネットワーク N の点集合 V の部分集合 V' が $N-V'$ を非連結とする最小の点切断集合 A における点 (ノード) の個数。	点切断集合はネットワークを非連結とする。点連結度が大きいほどネットワークの連結が強く構造が安定となる。	○			
②	辺連結度	$k_1(N) = \min K $	ネットワーク N の辺の集合 E の部分集合 E' が $G-E'$ を非連結とする最小の辺切断集合 K の辺 (リンク) の個数。	辺連結度が大きいほどネットワークの連結が強く構造が安定となる。なお、辺の数でなく容量でも辺連結度を定義できる。この場合には、最大流最小切断の定理を用いて最小容量を与える切断集合を求めることが可能である。	○		○	
③	ノードに対するリンクの比率	$r(N) = \frac{\sum d_v(x)}{ V(N) }$	ネットワーク N の各ノードに接続するリンクの個数 $d_v(x)$ (次数) の総和を全ノードの数 $ V(N) $ (位数) で除した値。	ノードに対するリンクの比率が高いほどネットワークは密となり、連結が強く構造が安定となる。	○			
④	ノードに接続するリンクの流量のばらつき ^甲	$Vx = \frac{\max(f_x^h) - \min(f_x^h)}{\sum f_x^h}$	任意のノード x に流入するリンク h の流量の最大と最小の差をノード x に流入する全水量で除した値。	ノードに流入するリンクの流量のばらつきが低いほど、複数の水供給経路から同程度の水が送られてくることになり、当該ノードへの水供給は構造的に安定であると考えられる。	○		○	
⑤	平均離心数	$\Sigma e(x) / V(N) $	ネットワーク N の任意のノード x から測られる最大距離である離心数 $e(x)$ の総和を位数により除した数。	ノード・リンク数が同じ時、平均離心数が小さいほどネットワークは空間的に相対的な構造が密であり、管路延長密度が高いことを意味する。	○	○		
⑥	冗長なパスの数	$P_r(x, y) = \Sigma(x, y)$	x, y をネットワーク N 内の隣接しないノードとしたとき、可到達な経路 (x, y) の総数を冗長なパスの数とする。	任意のノード x から、他の任意のノード y までの経路を考えたとき、複数の経路 $x-y$ が存在し、その数が多い程、水循環は構造的に安定している。				○
⑦	冗長なパスの流量のばらつき ^甲	$Vpr = \frac{\{\max q_p(x, y) - \min q_p(x, y)\}}{\sum q_p(x, y)}$	冗長なパス $p(x, y)$ を流れる水量 $q_p(x, y)$ の最大と最小の差を冗長なパスを流れる全水量で除した値。	同程度の流量が流れる冗長なパスが存在する時には、被害が分散されるため水供給は構造的に安定であると考えられる。	○		○	○
⑧	冗長なパスの貯留容量比率	$Vrs = \frac{\sum S_j(x, y)}{\sum q_p(x, y)}$	冗長な経路 (x, y) 上にある貯留施設 j の貯留量 S_j の総和を冗長なパスの全容量で除した値。	パス上のリンクが切断された場合でも、貯留水を利用することにより水供給が可能である。貯留比率が高ければネットワークの構造は安定であると考えられる。	○		○	○
⑨	内素なパスの数	$P_p(x, y) = \Sigma(x, y)$	x, y をネットワーク N 内の隣接しないノードとしたとき、 x, y 以外にノードを共有しない可到達な経路 $p(x, y)$ の総数を内素なパスの数とする。	内素なパスが多いことは、水供給システムの独立経路が多いことを意味する。内素なパスの数が多いほど水供給は構造的に安定である。連結度と内素なパスの存在の関係をメンガーの定理を利用して知ることができる。	○			○
⑩	内素なパスの流量のばらつき ^甲	$Vp_p = \frac{\{\max q_p(x, y) - \min q_p(x, y)\}}{\sum q_p(x, y)}$	内素なパス $p(x, y)$ の流量 $q_p(x, y)$ の最大と最小の差を内素なパスを流れる全流量で除した値。	内素なパスの送水量のばらつきが小さければ被害が分散されるため水供給は構造的に安定であると考えられる。	○		○	○
⑪	内素なパスの貯留容量比率	$Vis = \frac{\sum S_i(x, y)}{\sum q_p(x, y)}$	内素な経路 (x, y) 上にある貯留施設 i の貯留量 S_i の総和を内素なパスの全容量で除した値。	パス上のリンクが切断された場合でも、貯留水を利用することにより水供給が可能である。貯留比率が高ければネットワークの構造は安定であると考えられる。	○		○	○
⑫	サイクル階数	$Cr(N) = \sum d_v(x) - V(N) - 1$	ネットワーク N において、サイクルが残らないように除去しなければならないリンクの最小数をサイクル階数という。	サイクル階数が多いほど、当該ノードを中心として水を循環利用していることを意味する。従って、サイクル内を流れる水量を利用することができる。サイクル階数が大きいほどネットワークの水供給は構造的に安定であると考えられる。	○			○
⑬	サイクル比率	$\gamma = \Sigma c(x, y) / \Sigma(x, y)$	任意のノード x から、他の任意のノード y までの経路数がサイクルを有するパス $c(x, y)$ である比率。	水供給が困難となった場合でも、サイクル上のリンクが切断されない限り、サイクル内の貯留水の利用が可能であるため、サイクル比率が高いほど水供給は構造的に安定であると考えられる。	○			○
⑭	サイクル流量比率 ^乙	$\beta = q_c(x, y) / q_r(x, y)$	サイクルを有するパスに流れる流量 $q_c(x, y)$ と全経路を流れる流量 $q_r(x, y)$ の比率。	水供給が困難となった場合でも、サイクル上のリンクが切断されない限り、サイクル内の貯留水の利用が可能であるため、サイクル形態で供給される流量の割合が高い程、水供給は構造的に安定であると考えられる。	○		○	○

注) ④⑦⑩⑪⑬で用いる流量は断面に流速を仮定することにより与える。

5. 構造安定性評価指標の実地域への適用

(1) 現状の水循環システムの評価

人口が集中し、かつ複数の活断層の影響を受ける大阪府淀川右岸地域を事例研究の対象とする。給水点は都市代表点（市役所）で代表させるものとする。

本稿では、基本となる①②③⑤⑥⑬の指標を対象として総合的なネットワークの構造安定性の評価を行う。ただし、現状の同地域にはサイクルが存在せず、また、本稿では簡単のためにネットワークの空間スケールの評価を行わない。このため指標③⑤については、適用しないものとする。同地域は水道用水供給事業により水供給が行われるため、ネットワークは用水流入点と用水供給点の端点を持ち①②の指標の値は1となる。現状のノードの数は47本で総リンク数は130個であるため、ノードに対するリンクの比率（指標③）は、2.77となる。そして、冗長なパスの数（指標⑥）は、高槻市、摂津市が1、茨木市、吹田市、豊中市、池田市、箕面市が2となる。さらに、内素なパスの数（指標⑨）も同様の結果となる。2経路のパスを有する市町は1経路の市町よりも水供給の構造安定性が高いと言える。

同地域のネットワークは冗長なパスの数（指標⑥）と内素なパスの数（指標⑨）が同じとなっている。このことより、現状の水循環ネットワークは冗長性が少なく、リンクが短絡的に結ばれているといえる。

(2) 水循環システムの再構成後の構造安定性評価

下水道レイヤーの下水処理水を都市活動レイヤーに送水して再利用する水辺創成水路は、平常時のアメニティを向上させると共に水路の水を消火用水やトイレ用水として利用することにより災害時の水確保も可能にする。清水・萩原ら²⁾により数理計画モデルとして定式化された水辺創成モデルを現状の水循環ネットワークへの対策として同地域に適用する。

水辺創成モデルでは、まず、震災想定時の必要水量を確保するよう各下水処理場での再利用量を決定する。次いで、平常時のアメニティを最大化するよう処理水を各都市に配分する。この配分処理水是水辺創成水路により送水される。後者の配分では、各都市における震災時の必要水量との乖離が大きくならないよう、必

要水量に対する乖離の割合を調整定数の範囲内に押さえるよう制約を設けている。

本研究では、震災時の必要用水をトイレ用水とし、水辺創成モデルのパラメーターである誘致距離、調整定数をそれぞれ500mと0.1に設定する。誘致距離とは、水辺が都市生活者をひきつける距離であり、萩原らにより考えられた物理的距離⁹⁾を用いた。そして、トイレ用水は一人当たり一日40¹⁰⁾使用すると考え、処理水は地震の被害を受けない下水処理場から被災した都市へ送水すると考える。さらに、①水辺創成水路は自然流下で送水される、②水辺創成水路は地震時においても断たれることは無い、③下水処理場から送水される処理水は高度処理が行われ水質レベルは一定である、と仮定する。また、同地域に影響を及ぼす活断層系は西山、有馬高槻、生駒、上町の各断層系であるため、これら活断層系を対象とする。

(3) 現状と再構成後の構造安定性の比較

モデルを適用した結果、高槻市、吹田市、摂津市に水辺創成水路が設定できることが分かった。配分下水処理水量を表-3に、水辺創成水路を図-4に示す。同表から下水処理水の利用によりトイレ用水の必要水量は全量が確保されるが、平常時のアメニティ向上を目的として各都市へ配分することにより充足率は調整定数限度までばらつきを有する結果となった。

水辺創成水路を考慮したネットワーク構造安定性の評価結果をみると、ノードの数は現状と変化せず47であるが、総リンク数は130→140に増加する。そのため、ノードに対するリンクの比率（指標③）は2.77→2.98となり現状と比べて0.21増加する。また、冗長なパスの数（指標⑥）の数は高槻市が1→3、吹田市が2→11、摂津市が1→3に増加し、内素なパスの数（指標⑨）は高槻市が1→2、吹田市が2→4経路、摂津市が1→2に増加する。吹田市における冗長なパスの数が大きく増加しているのは、処理水の水源である原田処理場が流域下水処理場であり、複数の都市からの汚水を処理しているためである。現状と比較して、内素なパスと冗長なパスの両方が増加し、かつ、指標⑥の値が指標⑨の値を上回っている。供給経路の安定性が増大し、冗長性も高まっていると解釈できる。

表-3 下水処理水の配分結果

活断層系	処理場→市	アメニティ 効果 (人)	トイレ用水必要		震災時を想定した場合		平常時を想定した場合	
			水量 (m ³ /日)	送水量 (m ³ /日)	充足率	送水量 (m ³ /日)	充足率	
西山	正雀処理場→高槻市	400,018	1,139	1,139	1.00	1,139	1.00	
有馬高槻	原田処理場（流域）→吹田市	408,645	9,542	9,542	1.00	9,542	1.00	
生駒	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	
上町	原田処理場（流域）→吹田市	408,645	8,245	8,245	1.00	8,245	1.00	

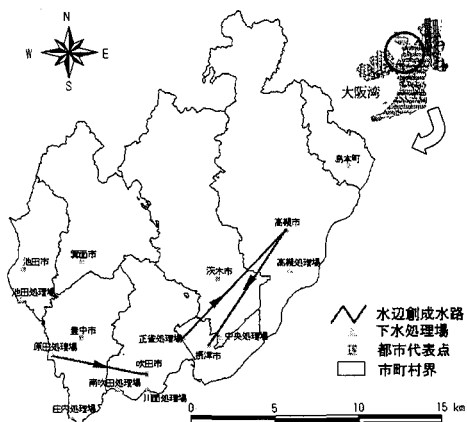


図-4 水辺創成経路

以上の結果より、水辺創成水路を導入することによる水循環ネットワークの構造安定性が向上した効果を定量的に示すことができ、評価指標の有用性が確かめられたと考える。ただし、本稿で具体的に示した数値は4。(2)でも述べたように、ネットワークの空間スケールの捉え方(対象とする管路のレベル)及び境界の取り方によって異なる値を示すものである。結果の解釈に関してはこの点に留意することが必要である。

6. おわりに

本研究では、大都市域における水循環圏としての考え方の必要性を述べ、水循環システムをネットワークとしてとらえるモデル化の方法を示した。さらに、グラフ理論を適用した14の水循環ネットワークの構造安定性評価指標を提案した。また、評価指標相互の関連性を考察し適用性に対する考察を行った。さらに、大阪府淀川右岸地域を事例地域として、活断層系による震災を軽減するための水辺創成水路の導入の効果を評価指標により評価し、指標の有用性を検証した。今

後の課題としては、以下の事項があげられる。

①水循環圏の概念を治水・利水・環境の側面から検証し、水資源計画における位置付けを明確にすることが必要である。

②大都市域の水循環システムとして、河川、水道、下水道を対象としたが、農業用水や地下水をも含めた場合の水循環システムのモデルとネットワーク化の方法について研究が必要である。

③水循環システムをネットワークとして捉えた構造安定性の評価指標を提案したが、ネットワークの信頼性に対する分析が必要である。

【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) 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システムモデルの構築に関する研究，環境システム研究論文集 Vol.28, pp277-281, 2000.
- 3) 清水康生，萩原良巳：水循環システムのネットワークモデルと評価指標，水資源シンポジウム，2002.
- 4) 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成と地震害の軽減に関する研究，環境システム研究論文集 vol.29, pp369-376, 2001.
- 5) 浜田隆資，秋山仁：グラフ理論要説，槇書店，1982.
- 6) 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), 2002.
- 7) 吉川和広：土木計画学演習，森北出版，1985.
- 8) 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.
- 9) 土木学会編：土木工学ハンドブック 第63編3章 水資源システム，技報堂，P.2562, 1999.

A STUDY OF STRUCTURAL STABILITY EVALUATION OF WATER CIRCULATION NETWORK IN URBAN AREA BY APPLYING GRAPH THEORY

Yasuo SHIMIZU, Yoshimi HAGIHARA and Kazushi NISHIMURA

In this paper, to regard a water circulation system as a network, a concept of water circulation sphere that consists of river basin, water supply area and sewage treatment area is proposed. The method of a network modeling of water circulation system in the sphere is shown. By applying graph theory, structural stability indexes, which imply the connectivity and redundancy of the network, to evaluate the network model are proposed. This methodology is applied to the case, which a waterway uses reclaimed water is introduced for waterfront recreation in great urban area.