

IV—17 災害時における道路網の交通処理能力について

苫小牧工業高等専門学校 正会員 榎谷 有 三
北海道大学工学部 加 来 照 俊

1. まえがき

道路、上水道、ガスなどのライフラインシステムは、各種の災害によるシステムの一部が損壊するとネットワーク全体の機能（都市機能）がマヒし、市民生活から産業活動に至るまで広範囲の分野に大きな影響を与える。したがって、各種ライフラインネットワークシステムの災害後における挙動を分析し検討することは防災対策上重要な課題のひとつである。この事は、道路交通システムにおいても、各道路区間（リンク）の有する防災上の役割を明確にし、道路管理者に事前にネットワークの弱点を把握するうえでも、また災害時の道路網の運用面から各種の交通規制を行ううえでも、さらにネットワークとしての特性をいかにして災害時の機能信頼度を高め、各種交通施設の計画設計を行ううえでも必要である。本研究は、降・積雪、風水害あるいは地震などの各種の災害に伴う道路施設の損壊、車線幅員の減少、走行速度の低下などが生じていわゆる各リンクの交通容量が低下したとき、道路網全体の交通処理能力がどの程度低下するかについて考察する。道路網の交通処理能力を求め評価要因としては、OD構成が一定のもと道路網全体で処理できる交通量を求める道路網容量と各OD交通の発生・集中交通量を与えて各OD交通の発生・集中可能交通量の和を求める発生可能交通量を取り上げた。そして、著者等が道路網の感度分析で考察したカット行列、OD-カット行列を基礎にこれらの評価要因を求める手法について考えた。

2. カット行列およびOD-カット行列の作成手法について

リンクの交通容量およびOD交通がそれぞれ個々に変化したとき道路網容量がどのように影響を受けるかを定量的に分析する道路網の感度分析については既に考察してきたが、このときこの分析を行うためにカット行列およびOD-カット行列を考えた。しかし、これらの行列は個々のリンクおよびOD交通が単独にそれぞれ変化する場合を対象としているので、面的な仮りをもつ数本のリンクの容量が同時に減少する場合には必ずしも適用することができない。また、発生可能交通量を求めるためにはカット行列のほかにOD-カット行列についても必要である。そこで、感度分析でのカット行列の作成手法と同様と考え、本研究のような問題にも適用できるカット行列の作成を決る手順で行う。(1)道路網容量増強問題をLP問題として定式化して、交通需要をパラメータとするパラメトリックLP問題を解いて、双対問題の双対変数の変化から基本的なカットを逐次探索する。(2)(1)で探索された基本的なカットの組合せから他のカットを求める。このとき、基本的な各カットに含まれているリンクを内部リンクと外部リンクとに分けて、グラフ理論の定理を応用して系統的に他のカットを求める。(3)(1)で探索された基本的なカットのいずれにも含まれていないリンクが存在するかどうかを調べる。もし、存在すれば(4)へ、存在しなければ(5)へうつる。(4)当該リンクを(2)と同様に内部リンクと外部リンクとに分けてグラフ理論の定理を応用して他のカットを求める。(5)(1)~(4)の過程で探索されたすべてのカットを対象にカット行列を作成する。手順(1)、(2)の内容については既に感度分析におけるカット行列の作成手法において詳しく述べられているが、手順(4)は新たに本研究のような問題に適用できるように考察を加えたものである。具体的には次の手順で行う。①当該リンクの外部リンクと手順(2)の基本的な各カットのいずれかに含まれている外部リンクとを同時に含むカットを求め、カット行列ベクトルを作る。②手順(1)、(2)において探索されたすべてのカットのうち、①で選ばれた外部リンクを含むカットをカット行列を作成する。③①のベクトルと②で作成された行列のすべてのベクトルに同じものをそれぞれ mod 2 で加えて新しいカットを求める。④当該リンクのすべての外部リンクに対して①~③を行う。⑤当該リンクの内部リンクのうち①~④の過程でいずれの

カットにも含まれていないものがあれば、その内部リンクと基本的なカットのいずれかに含まれている外部リンクとを同時に含むカットを求め②、③を行う。④当該リンクだけでカットを形成するかどうかを調べる。このように手順を通して数本のリンクが同時に容量減少を伴う問題に適用でき、カット行列を形成できる。なお、①・⑤の手順も「ループを含まぬスター(star)は極小カットである」というグラフ理論の定理を応用したものである。OD-カット行列はこれらの手順で求められたカット行列を用いて、各OD交通がいずれのカットを通過するかによって形成することが出来る。

3. 道路網容量および発生可能交通量の算定について

交通処理能力を表わす要因として道路網容量および発生可能交通量を取り上げだが、ここでは2.で考察したカット行列、OD-カット行列を通してそれぞれの評価要因の算定について考察する。

(1) 道路網容量の場合

道路網容量は前述のようにOD構成比一定の下での道路網で処理できる交通量を求めるものである。したがって、各種の災害に伴って各リンクが容量減少したときの道路網容量も、リンク交通量が交通容量に達したリンクの集合を求め最小カットを求めることとなる。いま、 n 個のノードと m 本のリンクからなる道路網上に q 個のOD交通が存在するものとし、 k 番目のOD交通の構成比を P_k とする。また、2.で求められたカットの本数を l 本とする。そして、各カットを通過するOD構成比の和 P_k は式(1)で求められる。道路網容量(最小カット)を求めるために、次のようなカット行列 C 、各カットを通過するOD構成比の和の逆数に関する行列 P 、各カットの交通容量に関する行列 M 、各カットのフロー水準に関する行列 F 、各リンクの交通容量に関する行列 L を考へる。そうすると、各カットの交通容量は式(7)で求められ、さらに各カットのフロー水準は式(8)となる。

$$P_k = \sum_{l \in P_k} P_k \quad \text{--- (1)} \quad P_k: \text{ カット } l \text{ を通過する OD 交通の集合}$$

$$C = \{C_{ij}\} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1m} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{q1} & C_{q2} & \dots & C_{qm} \end{bmatrix} \quad \text{--- (2)} \quad P = \{P_{ij}\} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1l} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{q1} & P_{q2} & \dots & P_{ql} \end{bmatrix} \quad \text{--- (3)}$$

$$C_{ij} = \begin{cases} 1; & \text{カット } i \text{ にリンク } j \text{ を含むとき} \\ 0; & \text{そうでないとき} \end{cases} \quad M = \{M_{ij}\} = [M_1, M_2, \dots, M_l]^T \quad \text{--- (4)}$$

$$F = \{F_{ij}\} = [F_1, F_2, \dots, F_l]^T \quad \text{--- (5)}$$

$$L = \{L_{ij}\} = [L_1, L_2, \dots, L_m]^T \quad \text{--- (6)} \quad M = C \cdot L \quad \text{--- (7)} \quad F = P \cdot M \quad \text{--- (8)}$$

したがって、各種の災害パターンに対する道路網容量は、式(6)の行列 M の要素に災害に伴って減少した各リンクの交通容量を代入して、式(8)で求められた各カットのフロー水準のうちの最小の値によって得られる。これらの計算は、あるリンクの容量減少は当該リンクを含むカットのフロー水準を低下させ、引いては道路網容量自体の低下を招くという事である。このように、交通量配分手法を用いることなく、カット行列を基に各種の災害パターンに対する道路網容量を求めることができる。なお、あるリンクが完全に通行不可能になるような場合には、OD交通によっては相当過酷なルートの走行を強いられることもある。また、この過酷なルートを行くOD交通によって、いわゆる同じカットを2度通過して当該カットのフロー水準を低下させる場合も考えられる。しかし、一般に閉塞したリンクを含むカットのフロー水準の低下によって道路網容量は大幅に減少するのに対して、各OD交通の発生可能交通量自体も減少する。したがって、迂回交通に伴うフロー水準の低下は道路網容量の大幅な低下に比べれば小さいものと思われる。

(2) 発生可能交通量の算定

発生可能交通量は前述のように各OD交通の交通量を与えて、各OD交通の発生可能交通量の和とするものである。したがって、この場合はまず各カットを通過するOD交通量の和とカット容量との比較によって各カットごとに発生抑制をすべき交通量を求めなければならない。さらに、OD交通によっていくつもの容量不足カットを通過するものもあるのど、発生可能交通量という面からは容量不足カットを通過するOD交通についても検討しなければならない。各ODの交通量を q_k とすると、各カットを通過するOD交通量の和 Q_k は式(1)と

同様に式(9)で求められ。また、 Q_k に関する行列を式(10)の Q とす。そうすると、式(7)と(10)の計算により式(11)の各カットの発生抑制量 R_k を求めることができる。この行列の要素が正値であるカットを通過するOD交通を対象に発生抑制を考慮しなければならない。前述のようにいくつかの容量不足カットを同時に通過するOD

$$Q_k = \sum_{i \in P_k} f_{ik} \quad \text{---(9)} \quad Q = \{Q_k\} = [Q_1, Q_2, \dots, Q_k]^T \quad \text{---(10)} \quad R = \{R_k\} = [R_1, R_2, \dots, R_k] = Q - M \quad \text{---(11)}$$

交通であるが、発生可能交通量を求める具体的な手順は次のとおりである。(1)式(11)により各カットにおいて発生抑制を受ける交通量を求める。(2)発生抑制を受けるカットだけを対象に、抑制を受ける交通量の大小順にOD-カット行列を並べ替える。(3)(2)で得られたOD-カット行列において、各列ごとに要素が1である数を求める。すなわち、各OD交通が通過する容量不足カットの数を求める。(4)抑制量が最も大きいカットを対象に、当該カットを通過するOD交通のうち(3)で求めた値の最も大きいOD交通量を当該カットの抑制量から差し引く。(5)(4)の値が負になるまで、順次(3)の値が大きいOD交通を対象に手順(4)を行う。(6)(4)、(5)の過程で発生抑制をされたOD交通の交通量を、(2)のOD-カット行列の2番目以降の各カットの抑制量から差し引く。(7)(6)の値が、負になるカットは通過するOD交通量が容量以下となるが、当該カットを(2)のOD-カット行列から除く。もし、正を取るカットがあれば、また発生抑制をしなければならないので新たな抑制量を求め手順(2)へ。(8)手順(2)~(7)を手順(6)の値が負になるまで順次行う。このとき、手順(4)、(5)の過程で順次差し引かれたOD交通量の和が発生抑制量で、発生可能交通量は交通需要からこの発生抑制量を差し引くことにより求められる。このように、道路網容量と同様に交通量配分手法を用いることなく発生可能交通量を求めた。ここでは、あくまでいくつかの抑制の方法(でさえ発生抑制を受けるOD交通量を小さくする)を通して計算手順を考えたもので、災害時においてこの手順が求められたOD交通が発生抑制を受けるものではない。したがって、 R_k が正のカットを通過するいずれかのOD交通を対象としなければならないが、発生抑制を受けるOD交通のパターンとしては数多く考えられる。

4. 計算例

簡単な計算例を通して、災害時の道路網の交通処理能力について考察する。図1の道路網(図中の数字はリンク番号、カッコ内はリンク距離(km))、表1のOD構成比(表の右上半分)、OD交通量(左下半分)を与えて行う。各リンクの車線数は1車線とし、交通

表1- OD 構成比と OD 交通量

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.095	0.077	0.095	0.084	0.104	0.056	0.014	0.017	0.005	
2	5700	0.038	0.022	0.012	0.013	0.006	0.0	0.024	0.001	
3	4820	2280	0.050	0.016	0.015	0.005	0.0	0.003		
4	5700	1320	3000	0.029	0.022	0.007	0.004	0.020	0.001	
5	5040	720	960	1740	0.068	0.013	0.003	0.0	0.0	
6	6240	780	900	1320	4080	0.032	0.003	0.004	0.002	
7	3360	360	300	420	780	1320	0.013	0.005	0.001	
8	840	0	300	240	180	180	780	0.011	0.001	
9	1020	1440	0	1200	0	240	300	660	0.004	
10	300	60	180	60	0	120	60	60	240	

容量は12000台とする。まず、カット行列およびOD-カット行列の作成について考える。手順(1)を行うと、図1の6本の基本的なカットが探索され、さらに手順(2)を通して図2の15本のカットが探索された。ここで、いずれのカットにも含まれていないリンクが5, 11, 12, 13, 15の5本なので、これら

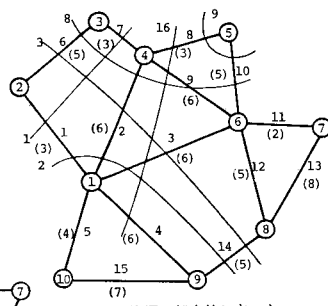


図1- 対象道路網と基本的なカット

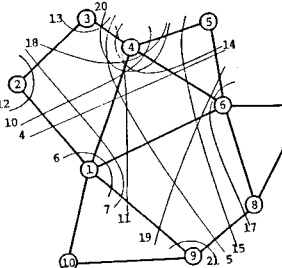


図2- 基本的なカットの組合せから得られた

カット

図4- 外部リンク/3を対象にカットを探索する過程

step1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
24	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
step2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
step3	(24+1)26	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0
(24+2)22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
(24+4)28	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
(24+6)23	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
(24+10)27	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
(24+12)25	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0

れる。ここで、リンク4も外部リンクとしていえるので、リンク5、15に対してはそれぞれカット36、37が求められ、また、当該リンクが何でカットを形成するものとして図5のカット38、39が求められる。なお、この例においては手頃(4)④に該当するリンクはない。とすると、図6に示されているカット行列Cが得られる。さらに、このカット行列と式(1)を基にOD-カット行列Kも求めると図7となる。なお、この行列は実際には(39x41)であるが、ここではノード1を中心とした行列を1部を示した。各カットの交通容量 m_k 、通過するOD構成比の和 P_k 、フロー水準 R_k はそれぞれ表2に示した。

次に、ある災害に伴って各リンクの交通容量が図8のように減少した場合も例に交通処理能力について考える。このとき式(4)、(8)を計算すると、表2に示すカット容量 m'_k 、フロー水準 P'_k を得る。そして、カット32が最小カットとなるため道路網容量は43876台となる。さらに、発生可能交通量を求める。各カットも通過するOD交通量の和 Q_k および式(11)から発生抑制量 R_k も求めるとそれぞれ表2となる。各リンクの容量減少に伴って発生抑制を受けやすくなるカットは3、4、7、8、25、32、33の7本のカットであるので、これら7本のカットを取り出したOD-カット行列を作る。次に、抑制量が一番大きいカット32を対象に抑制するOD交通を求めるとOD-1-3、1-4、1-5、3-10、4-10などであり、これらのOD交通の組合せで8820台を抑制すると他のすべてのカットも満足される。そして、表1の全発生・集中交通量は60000台なので、発生可能交通量は51180台となる。

5. あとがき

以上、本研究はある災害が発生して交通容量が減少したときの交通処理能力の算定手法について考察したが、評価要因として取り上げた道路網容量および発生可能交通量はいずれもカット行列、OD-カット行列を基礎に各種の交通量配分手法を用いることなく簡単な行列演算として求めることができる。今後は、確率的な現象を伴う地震時における交通処理能力の算定あるいは災害を受けた後の復旧過程のあり方などについて考察を進めて行く予定である。

参考文献

- (1) 柳谷 加寿：道路網感度分析の応用について、第6回交通工学研究会論文集、1982
- (2) 柳谷 加寿：カット行列の作成手法に関する研究、土木学会北海道支部論文報告集、第39号、1983
- (3) 柳谷 加寿：OD交通の変化が道路網容量に与える影響について、第38回土木学会年講要集、1983

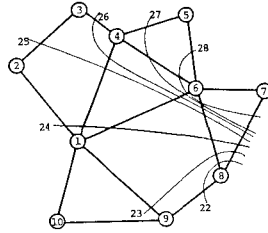


図-3 外部リンク/3を対象としたとき得ら

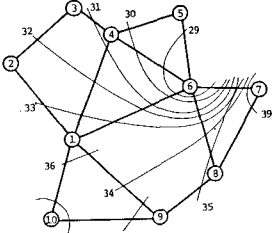


図-5 外部リンク/1を対象としたとき得

表-2 各カットの交通容量、通過するOD構成の和、フロー水準

	m_k	P_k	P'_k	m'_k	P'_k	Q_k	R_k
1	24000	0.344	69767	24000	69767	20640	-
2	48000	0.598	80267	36000	60200	35880	-
3	48000	0.569	84358	27000	47451	34140	7140
4	48000	0.561	85561	33000	58824	33660	660
5	48000	0.542	88561	36000	66420	32520	-
6	48000	0.554	86642	36000	64981	32240	-
7	48000	0.525	91429	27000	51428	31500	4500
8	48000	0.494	97166	24000	48592	29640	5640
9	24000	0.225	106667	15000	66666	13500	-
10	48000	0.450	106667	42000	93333	27000	-
11	48000	0.498	96385	36000	72289	29880	-
12	24000	0.211	113744	15000	71090	12660	-
13	24000	0.209	114833	15000	71770	12540	-
14	48000	0.417	115108	33000	79136	25200	-
15	48000	0.416	115385	42000	100961	24960	-
16	48000	0.392	122448	42000	107142	23520	-
17	48000	0.359	137705	33000	91922	21540	-
18	48000	0.359	137705	33000	58495	21540	-
19	48000	0.355	135211	33000	92957	21300	-
20	48000	0.250	192000	42000	168000	15600	-
21	24000	0.040	600000	24000	600000	2400	-
22	36000	0.054	666667	30000	555555	3240	-
23	36000	0.071	507042	30000	422535	4260	-
24	60000	0.600	100000	42000	70000	36000	-
25	60000	0.571	105079	33000	57793	34260	1260
26	60000	0.400	150000	42000	105000	24000	-
27	60000	0.534	112360	48000	98987	32040	-
28	60000	0.337	178042	39000	115727	20220	-
29	60000	0.263	228137	30000	114068	15780	-
30	60000	0.352	170454	39000	110795	21120	-
31	60000	0.500	120000	33000	66000	30000	-
32	60000	0.547	109689	24000	43875	32820	8820
33	60000	0.588	102041	33000	56122	35280	2280
34	36000	0.173	209302	21000	121387	10320	-
35	36000	0.156	216867	21000	126506	9960	-
36	24000	0.051	479589	24000	70588	3060	-
37	24000	0.046	521739	24000	521739	1080	-
38	24000	0.018	1333333	24000	1333333	1080	-
39	24000	0.138	173913	15000	108695	8280	-

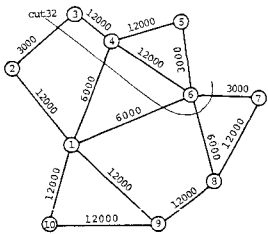


図-8 ある災害パターンに対する各リンクの交通容量と道路網容量を規定するカット

図-6 カット行列

カット	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1	0	0
3	0	1	1	1	1	1	0	0
4	1	1	1	1	0	0	0	0
5	0	1	1	1	1	1	0	0
6	1	1	1	1	1	1	1	0
7	0	1	1	1	1	1	1	0
8	0	1	1	1	0	0	0	0
9	0	1	1	1	0	0	0	0
10	1	1	1	1	0	0	0	0
11	0	0	1	1	1	1	1	0
12	1	0	0	0	0	0	0	0
13	1	0	0	0	0	0	0	0
14	0	1	1	1	0	0	0	0
15	0	0	1	1	1	1	0	0
16	0	0	0	1	1	1	1	0
17	0	0	0	0	1	1	1	0
18	0	1	1	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	1	1	1	0
20	0	0	1	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	1	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0
24	1	1	1	1	1	1	0	0
25	0	1	1	1	1	1	0	0
26	0	0	1	1	1	1	0	0
27	0	0	0	1	1	1	0	0
28	0	0	0	0	1	1	0	0
29	0	0	0	0	1	1	0	0
30	0	0	0	1	1	0	0	0
31	0	0	1	1	1	0	0	0
32	0	1	1	1	1	0	0	0
33	1	1	1	1	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	1	1	0
36	0	0	0	0	0	0	0	1
37	0	0	0	0	0	0	0	1
38	0	0	0	0	0	0	0	1
39	0	0	0	0	0	1	0	0

図-7 OD-カット行列