

予算と補強コストを考慮した道路橋の耐震補強順位決定法に関する研究

徳島大学大学院 学生員 ○小柏 健太
徳島大学大学院 学生員 源 貴志

徳島大学大学院 正会員 成行 義文
徳島大学大学院 正会員 三神 厚

1. はじめに 道路橋が大規模な地震により被災し、使用できなくなった場合、震後の避難、救援、応急復旧活動への支障が生じ、多くの人命が失われるとともに被災地内外の経済に長期間に渡り大きな影響を与えると考えられる。よって、旧耐震基準により設計された既設道路橋に対して耐震補強を施す必要がある。しかし、短期間にすべての対象道路橋に耐震補強を施すことは、予算的に困難である。また、地震は偶発的であるため、常に補強効果が最大になる道路橋を選定すべきである。成行らは人命優先の観点からまず孤立地区発生を防止し、その後道路ネットワーク効率を維持するという手順の耐震補強優先順位決定法¹⁾を提案している。また、その際に震後の各時期の時系列（避難期→救援期（医）→救援期（他）→応急復旧期）を考慮している。しかし、この方法には予算と補強コストという現実の選択を支配する重要なパラメータが考慮されていない。よって本研究では、予算制約下における道路橋の耐震補強順位を合理的に決定するための基礎的研究として、予算と補強コストを考慮した道路橋の耐震補強順位決定法について検討した。

2. 耐震補強順位決定法 本研究で提案する道路橋の耐震補強順位決定手順は次のようである。

①評価対象地域の道路ネットワークを構築し、耐震補強が必要な道路橋を選定するとともに各補強コストを見積もる。（本研究では全ての道路橋に対して耐震補強を施すこととする。）

②震後の各時期ごとに目的地の設定を行う。

③予算内で耐震補強可能な道路橋の組み合わせをすべて求める。

④補強が必要な道路橋を除いたネットワークにおいて、③の各組み合わせの道路橋（群）を復旧させた場合の耐震補強効果を後述の評価指標式(1), (2), (3)より算出し、図1に示すように、まず避難期の孤立地区発生防止に対して最も効果の高い道路橋（群）を選定する。

⑤図1に示されている順序で各段階における各時期の効果が100%になるまで③～④の手順を繰り返すことにより、すべての道路橋に対して耐震補強順位を決定する。

3. 評価指標 前出の2. の手順④において震後の各時期に対する道路橋の耐震補強効果の評価指標として用いる式(1), (2)と、全時期を通した総合的な評価指標式(3)は次のようである。

$${}_k I_c = \frac{\sum_{m=1}^{N_k} P_m}{\sum_{h=1}^{N_k} P_h} \times 100(\%) \quad (1)$$

$${}_k I_c = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_k} P_i \times \frac{{}_k X_{i,j}^2}{{}_k Y_{i,j}}}{\sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_k} P_i \times {}_k X_{i,j}} \times 100(\%) \quad (2)$$

$$I_c = \frac{\sum_{k=1}^{N_A} \sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_k} P_i \times \frac{{}_k X_{i,j}^2}{{}_k Y_{i,j}}}{\sum_{k=1}^{N_A} \sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_k} P_i \times {}_k X_{i,j}} \times 100(\%) \quad (3)$$

ここに、 k : 震後の時期番号（1: 避難期, 2: 救援期（医）, 3: 救援期（他）, 4: 応急復旧期）, ${}_k N_s$: 時期 k での孤立が解消されたノードの総数, ${}_k N_c$: 時期 k での孤立ノードの総数, P_m : 補強により孤立が解消した m 番目のノード人口, P_h : 孤立している h 番目のノード人口, ${}_k N$: 時期 k でのノード数, ${}_k N_i$: 時期 k でのノード i の目的地数, P_i : ノード i の人口, ${}_k X_{i,j}$: 健全なネットワークにおける i, j 間での最短経路距離, ${}_k Y_{i,j}$: i, j 間での最短利用可能経路距離, N_A : 時期の数（本研究の場合は4）である。 ${}_k I_c$ は、「補強を必要とする道路橋がすべて使用不可になった場合に孤立化する人口」に対する「ある道路橋（群）の耐震補強により孤立化を免れる人口」の比を表している。この指標により孤立化の解消度を適確に把握することができる。 ${}_k I_c$ は ${}_k Y_{i,j}$ が ${}_k X_{i,j}$ に近いほど100%に近くなり、これにより各時期ごとのネットワークがどれほど健全な状態に近いかを評価できる。 I_c は ${}_k I_c$ と同様にネットワークがどれほど健全な状態に近いを表し、この指標により全時期に対す

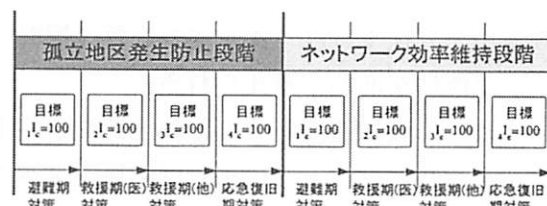


図1 補強を優先する時期の順序

る効果を総合的に評価できる。

4. モデルネットワークへの適用

4-1 適用条件 本手法を適用するモデルネットワークとして図2に示す道路ネットワークを用いる。これは徳島市中心部（5km×8km）の道路ネットワークを参考にして作成されており、図中の各主要拠点は実際の位置が比較的忠実に反映されている。本手法では、この各主要拠点を各時期の目的地とする。なお、時期と主要拠点の対応は図2（凡例）に示す通りである。ここで、応急復旧期に関しては各出発地が応急復旧期の主要拠点（重要）とのネットワークを確保できない限り、 μ_c は100%にならないとした。補強対象とする道路橋は図中のB1～B15の15橋である。各道路橋の補強コストを表1に示す。

また予算は同一年度における道路橋の補強数が多くならないように1500とした。なお、本研究は手法の作成を主目的としているため、各補強コストおよび予算は仮定であり、単位も無視している。また、簡単のため各ノード人口は一定であると仮定している。

4-2 シミュレーション結果と考察 表2は毎年度予算1500で補強する場合の累積補強効果を表している。ここで、〈〉内の数字は μ_c を表している。この表より、孤立地区発生防止段階では補強道路橋を決定する際に優先する時期（図1参照）の順番と効果が100%になる順番が一致していない。これは、優先する時期に対する補強が他の時期に対する効果にも影響を及ぼしており、結果的に救援期（他）に対する効果 μ_c が一番早く100%になったからである。一方、その後のネットワーク効率維持段階では、各効果が順番どおりに100%になっていることがわかる。このことから、人命に直結する時期に対する効果を優先した耐震補強順位決定ができていると考えられる。表3は予算制約を考慮せず、1橋ずつ補強する方法による結果と本法による結果を比較したものである。この表より、予算制約を考慮することで全体的に順位が変動しており、予算と補強コストが耐震補強順位決定に大きな影響を及ぼすことがわかる。

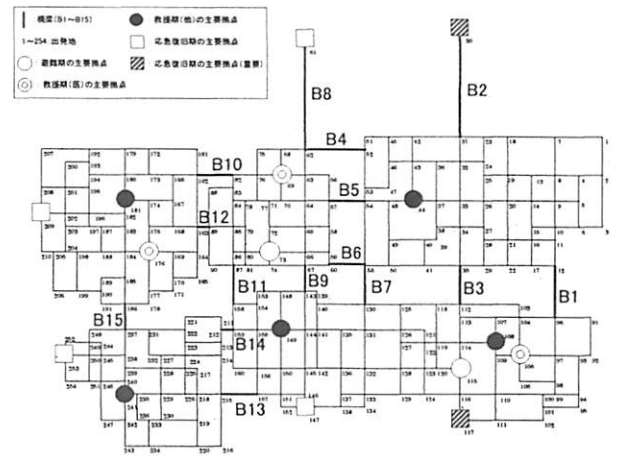


図2 モデルネットワーク

表1 各道路橋の補強コスト

橋梁番号	補強コスト	橋梁番号	補強コスト	橋梁番号	補強コスト
B1	550	B6	550	B11	1000
B2	1000	B7	800	B12	650
B3	850	B8	1450	B13	900
B4	450	B9	700	B14	350
B5	400	B10	500	B15	1000

表2 累積補強効果

対策期間(年)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
段階	孤立地区発生防止			ネットワーク効率維持					
コストの合計	1450	1500	1000	1500	1000	1450	1000	800	1450
μ_c (避難期)(%)	58.2	〈83.2〉	89.8	〈100.0〉	89.8	95.7	97.6	99.4	100.0
μ_c (救援期(医)) (%)	65.3	〈83.2〉	89.9	〈100.0〉	89.9	95.9	97.7	98.1	100.0
μ_c (救援期(他)) (%)	48.8	〈100.0〉	89.3	89.3	93.6	95.7	96.9	99.8	100.0
μ_c (応急復旧期) (%)	29.8	〈...〉	55.3	〈...〉	74.5	〈100〉	77.9	78.9	80.2
μ_c (全時期) (%)	44.5	74.7	83.1	87.4	89.0	90.1	92.4	92.5	100.0

*前出の適用条件より、100%になるまでの経過については具体的な数字を示していない。

5. おわりに 本研究では、各年度予算と対象道路橋の補強コストを考慮できるよう既往の研究の道路ネットワーク解析法を拡張した。本手法は既設道路橋の耐震補強対策予算に基づき、より合理的な耐震補強順位を決定する際に有用であると考えられる。なお、予算と補強コストの設定については前述のように大胆な仮定を行っているため、今後、現実的な値を設定する必要がある。

6. 参考文献 1)成行義文・源貴志・大木淳・平尾潔：震後の所要道路ネットワークの推移を考慮した道路橋の耐震補強順位に関する研究，第12回日本地震工学シンポジウム，pp1366-1369，2006.11

表3 耐震補強順位の比較

優先順位	予算制約無	予算制約有
1位	B12	B1 B5 B10
2位	B3	B4 B9 B14
3位	B15	B2
4位	B9	B3 B12
5位	B2	B11
6位	B13	B6 B13
7位	B6	B15
8位	B14	B7
9位	B11	B8
10位	B5	
11位	B10	
12位	B1	
13位	B4	
14位	B7	
15位	B8	