

道路施設の補修と取替の判定に関するシステムの考察

建設省 正会員 ○ 深井俊英

1 はじめに

施設の維持管理上、避けることの出来ない問題に、老化による機能の劣化と寿命の問題及び機能回復のために補修を実施するか、取替更新するか、の判定に関する意志決定の問題がある。従来迄の研究・報告においては、主として構造的な面からのアプローチが行われて来ており、それ等の成果による規準化への努力等によって、技術者が、施設の補修と取替の判定をするための情報は、相当程度充実にされて来ていると言えよう。

しかし、現場レベルにおいて機能劣化が生じている施設を、補修して更に一定期間供用するか、更新するかという重要な意志決定を、限られた時間内に、合理的に行なうことは、現在でもそれほど容易なことではない。その理由は、構造的には補修が可能であっても、施設に要求されている機能を、どの程度の期間充足し得るかという点の不確定であり、そのため補修工法や工事費の分析比較以外の、将来計画や経済性に関する総合的な判断を必要とするからである。

本論文においては、橋梁に欠陥が発生した場合における緊急時の対応から出発して、原因究明、欠陥の影響度の評価、補修のための代替案の比較、補修か取替かの判定、恒久的な対応措置 等に関する一連の検討において、従来迄の構造的な面からのアプローチに加えて、システム的なアプローチによって、問題解決と意志決定の面から考えてみた実例を通して、技術者としての取組み方について考察するものである。なお内容についてはあくまでも、現場レベルにおける一考察であり、建設者の見解ではないことを、おことわりさせて戴くこととする。

2. 道路橋の供用年数を決定する要因

図-1は、建設者の資料によって道路橋の架換・撤去の原因別構成比(%)を示したものである。この図からも知られるように、構造上の欠陥や耐荷力不足が原因で架換・撤去されたケースは約1/4と、比較的少なく、他の3/4は、橋梁を含む道

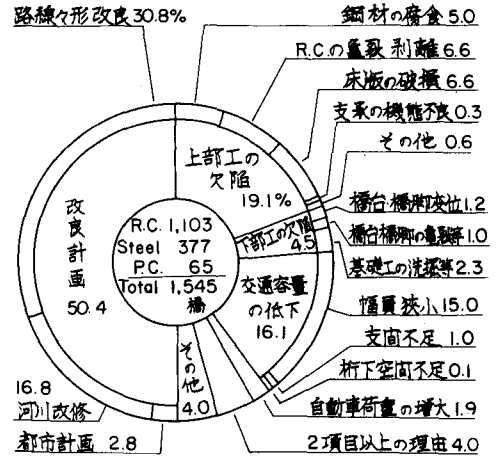


図-1 道路橋の架換の原因別構成比(%)

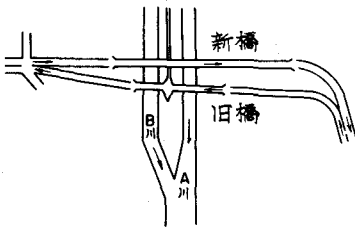


図-2 取付道路の状況

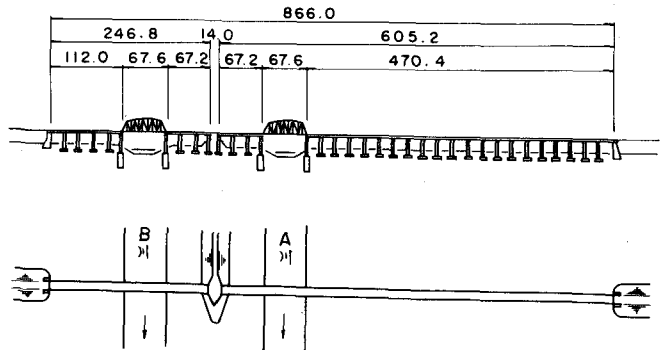


図-3 橋梁一般図

路全体の線形改良、河川改修等の計画上の必要性や、巾員狭小による交通機能の低下等の、いわば社会的経済的な要因によって占められている。このような原因別シェアが今後も継続するかどうかは、断定出来ないが、少なくとも、橋梁を架換更新するという意志決定をするにあたって、考慮の対象として技術者がとり挙げるべき要因の重要度を示唆するものと考えても、大きな誤りはないであろう。

すなわち、欠陥が発生し又は老化した橋梁を、補修して再生利用すべきか、架換更新して旧橋を撤去するか、という意志決定をするにあたっては、内部的構造的な要因に対する検討と同時に、社会的経済的な要因や道路計画との整合性等を含む外部的条件・環境条件に関する検討を、より重要な問題として認識することが、道路橋の場合においては、とくに必要であると考えられる。

具体的には(i)橋梁が、要求されている諸機能を、社会的経済的な面も含めて将来とも引続いて保持できるかどうかの判定 (ii)機能を回復・維持するための代替案の設定 (iii)代替案を実施した場合の結果の予測 (iv)コストと効果のバランスの評価という作業のプロセスを通じて、問題を多面的総合的に解決して行くということである。

これ等の問題解決と意志決定にあたっては、複雑にからみ合った、計量化しにくい多数の要因に関する分析と評価作業を必要とするため、システムズ・アプローチの立場から検討することが必要と考えられる。以下においては、実際の問題について、従来迄に提案されているシステム的な問題解決の技法の中から、KJ法、FTA、デシジョン・ツリーの3つの手法を選んで、適用性について考察する。

3. 問題の発生と講じた措置

(1) 橋梁を含む道路システムの概要

図-1に今回検討の対象とした道路区間の状況を、図-2に橋梁本体の一般図を示す。本区間に含まれる橋梁は、全長866m、巾員54mで、構造型式は、単純トラス橋と、コンクリート・ゲルバー桁部分から構成されている。設計荷重は、昭和14年の鋼道路橋設計示方書による2等橋(自動車荷重・9ton)で、架設後30年を経過している。本橋の上流側約100mには、新橋が昭和52年に完成しているが、両橋を一方通行でセパレートして供用していたため、新橋・旧橋共、取付部は一車線となっている。

(2) 欠陥の発生と応急処置

本橋の設計荷重が低いことに対応するため、一車線供用を行っていたが、床版にクラックが発生し、一部に陥没、抜け落ちを生じた。このため床組(縦桁・横桁)について詳細な点検を行なったところ、縦桁と横桁の取付部において、鋼材のワレが生じていることが発見された。欠陥を放置すれば重大な破損につながると判断されたため、直ちに旧橋の通行止を行ない、上流側の新橋を交互一方通行で利用しながら、取付部の局所的な抜巾と、鋼材の補強(ワレを生じた部分の連結板による補修)を実施し、さらに総重量10tonの重量制限を行なった。

(3) 長期的対応の考え方

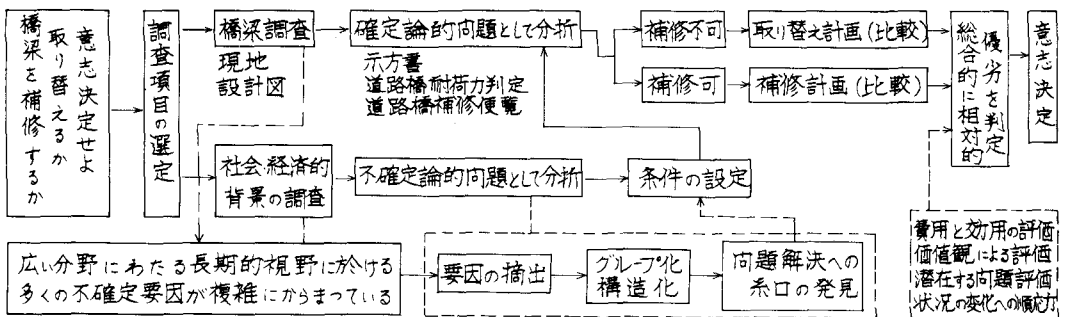


図-4 意志決定のプロセス

構造的な検討の前提としての、社会的経済的条件及び道路計画・河川計画との関連性について整理すれば、次
とおりである。

- 以上のような問題と、構造上の問題が複雑にからみ合っているため、問題の整理が必要である。

システムズ・アプローチによる問題解決と意思決定のプロセスの中では、(i)現象に発生している問題状況の確
定 (ii)システムを構成する要因の把握 (iii)要因相互間の因果関係の明示 がとくに重要である。従来迄の手法に
較して、システムズ・アプローチの手法の特色を挙げれば次のとおりである。

- (1) 要因の列挙と因果関係の明確化 (KJ法による手法)

橋梁の補修・架換の意志決定をするにあたって、技術者が、どのような情報を、どれだけの精度で集めるべきかという問題については、従来は、現場レベルにおいては、技術者の経験によって処理されて来たように見受

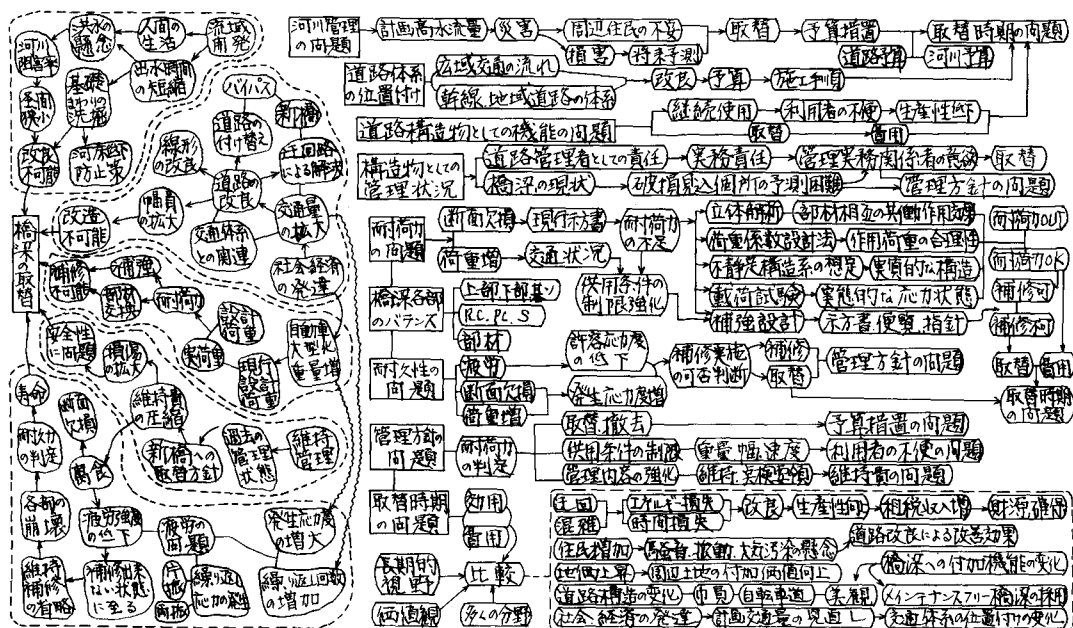


図-5 意志決定に関する発想図 (KJ法による)

けられる。しかし、複雑にからみ合った多くの要因を分類整理し、構造化するためには、すでに開発されている各種の技法を援用することが効果的であると考えられる。

以下本例においてはKJ法による構造化について考察することとする。図-5にKJ法の実例を示す。

KJ法はよく知られているように、川喜田による発想法・問題解決の技法である。図-5からも知られるように、問題を構成する要因は多くても、度連する要因を整理し、要因を項目別にグルーピングすることにより、問題の構造を的確に把握することが可能となり、必要とする情報、調査対象範囲、要因相互の関連性等を、モデル的な形で示すことが出来る。このことは、問題解決に対する発想の体系化と意志決定の合理性・説得性を高めるために効果的であると考えられる。

(2) 欠陥の原因究明と信頼性の評価 (FTAによる手法)

橋梁上部工に生じた欠陥が致命的な事象の発生に連なるかどうかの判定と、原因追求にあたって、FTAの適用を試みた。FTA (Fault Tree Analysis) は、1960年代にFMEAと並んで、米国において開発された信頼性評価の技法の一つであり、システムの欠陥事象の発生要因を解析することが出来る。

図-6にFT図を示す。FT図の作成にあたっては (i) 橋梁システムに発生する欠陥をトップ事象として選定し (ii) そのトップ事象に連なる中間事象 (サブシステム・レベル) を、床版・床組 (縦桁、横桁)・主構・支承部等の各部分毎に選定し (iii) トップ事象と中間事象との因果関係を論理記号 ($\square = \text{AND}$, $\triangle = \text{OR}$) 及び事象記号 ($\square = \text{event}$, $\bigcirc = \text{basic event}$, $\diamond = \text{Undeveloped event}$, $\Delta = \text{transfer symbol}$) を用いて表現する、という手順による。

本例においては、FT図によって、欠陥の原因追求、補修箇所及び補修の有効性の判定、欠陥が発生した場合の致命度・重要度の判定、維持管理と点検の重点のおき方 等に応用することが可能である。

FTAによる基本事象の重要度の評価の方法としては、定量的なデータを必要としない「構造重要度」によ

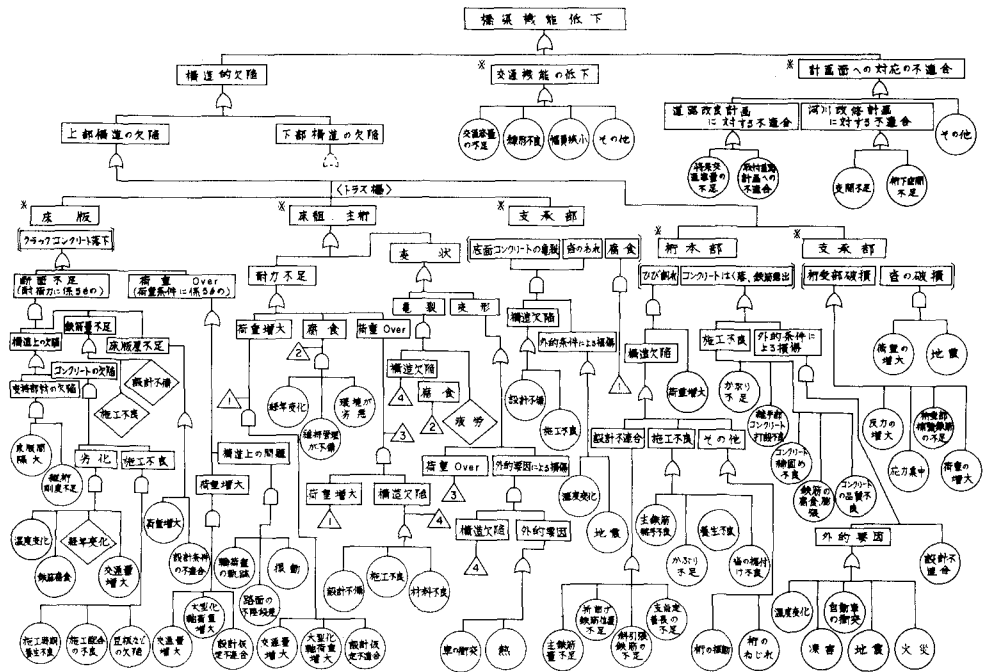


図-6 FT図

る評価を行なった。構造重要度の評価においては、FT図から、基本事象が発生した場合に、論理的構造的にトップ事象の発生に連なるかを判定する。このため基本事象の状態を、1（生起する）、0（生起しない）で表わし、すべての事象の組合わせを基本事象状態表にまとめる。

表-1に、床組・主構についての基本事象状態表を示す。基本事象（A=荷重増大、B=部材の腐食、C=構造欠陥、D=材料の疲労、E=外的要因）の構造重要度 $Is(i)$ 〔 $i=A,B,\dots,E$ 〕は次式で求められる。

$$Is(i) = \frac{1}{2^{n-1}} \cdot Ns(i)$$

ここに N :基本事象の数、 Ns :クリティカル・カット・ベクトルの数

表-1から構造重要度は、 $Is(A)=5/16$, $Is(B)=5/16$, $Is(C)=3/16$, $Is(D)=1/16$, $Is(E)=1/16$ となる。

この構造重要度は、作成されたFT図が正しくシステムをモデルとして表現しているとした場合の値である。

(3) デシジョン・ツリーによる方法

不確実な問題に対する意志決定の手法の一つに、デシジョン・ツリー（Decision tree）がある。

本例においては、意志決定者が操作出来ない要因が多数存在しているが、意志決定に際して何等かの決定選択を行なった場合に、それに続く行動及び行動の結果生ずる状態を整理し、最終的な結果を体系的に示すことにより、代替的行動案を選択する。

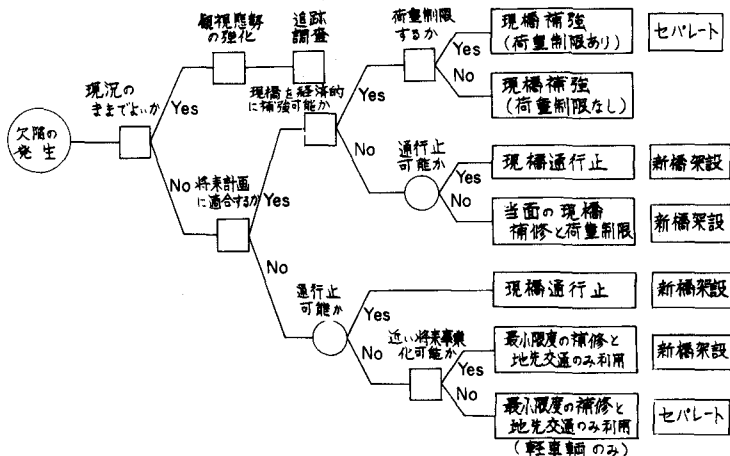


表-1 基本事象状態表

状態番号	事象	A	B	C	D	E	トップ事象
1		0	0	0	0	0	0
2		0	0	0	0	1	0
3		0	0	0	1	0	0
4		0	0	1	0	0	0
5		0	1	0	0	0	1
6		1	0	0	0	0	1
7		0	0	0	1	1	1
8		0	0	1	0	1	1
9		0	1	0	0	1	1
10		1	0	0	0	1	1
11		0	0	1	1	0	1
12		0	1	0	1	0	1
13		1	0	0	1	0	1
14		0	1	1	0	0	1
15		1	0	1	0	0	1
16		1	1	0	0	0	1
17		0	0	1	1	1	1
18		0	1	0	1	1	1
19		1	0	0	1	1	1
20		0	1	1	1	0	1
21		1	0	1	1	0	1
22		0	1	1	0	1	1
23		1	1	1	0	0	1
24		1	1	0	1	0	1
25		1	1	0	0	1	1
26		1	0	1	0	1	1
27		0	1	1	1	1	1
28		1	0	1	1	1	1
29		1	1	0	1	1	1
30		1	1	1	1	1	1
31		1	1	1	1	0	1
32		1	1	1	1	1	1

$Ns(A)=9$ $Ns(B)=9$ $Ns(C)=3$ $Ns(D)=1$ $Ns(E)=1$

1: 生起する 0: 生起しない

図-7 デシジョンツリーによる意志決定

表-2 補強工法の比較表

工法図	第1案	第2案	第3案
工法図			
床版補修工法	鋼板接着	床版打替と縦桁補強	床版打替と縦桁補強
対策荷重	TL-14	TL-14	TL-14
推定耐用年数	5~10年	20年	25年
概算工費	100百万円	90百万円	95百万円
総合判定	床版耐力に問題が残るから工費の割には効果が小さい	施工中の交通止めが出来れば有効な方法であり工費は安い	左に同じ
特記	縦桁と横桁連結部を補強し活荷重載荷幅を3Mとする	縦桁補強は内桁のみとする。その他は第1案に同じ。	左に同じ

工法図	第1案	第2案	第3案
工法図			
補修工法	ヒンジ部打替工法	天吊吊工法	定着桁増設工法
対策荷重	TL-14	TL-14	TL-14
推定耐用年数	10年	10~20年	15~25年
概算工費	70百万円	90百万円	145百万円
総合判定	交通止め期間が長く施工方法(コナト打替等)に問題あり	鋼構定着部を鋼板厚4cmの中におさめることが困難	工費は高いが、補修後の部材の信頼性は最も高い。
特記	床版の追跡調査を含む管理と強化する必要がある	左に同じ	左に同じ

図-7にデシジョン・ツリーを示す。

本例においては、欠陥の発生からスタートして、(i) 当面の緊急対策に関する意志決定 (ii) 将来計画への長期的対応に関する意志決定 (iii) 当面の対策及び将来計画の両方に適合し、経済的に実行可能な工法選択に関する意志決定 の3段階の決定が必要となる。

最終的な選択としては、(i) 現橋補強案Ⅰ (荷重制限あり) (ii) 現橋補強案Ⅱ (荷重制限なし) (iii) 現橋通行止 (新橋利用) の3案が比較の対象となるが、全体の意志決定プロセスの中では、部分的な問題の決定よりも、基本的な全体的な問題に対する方針決定の方が結果に対する影響が大きいため、より早い段階において十分な検討をしておくことが必要である。

デシジョン・ツリーによって、意志決定の流れを把握し、決定すべき事項とその影響とを知ることは、問題解決の作業の効率化に有効であると考えられる。

表-2に、現橋の補強工法 (TL-14の場合) の代替案を示す。

図-8は、取付道路の交通処理に関する代替案を示したものである。取付道路については (i) バイパス供用時の線形に合わせる。 (ii) 2車線の線形改良 (iii) 1車線の線形改良 (iv) 局部的拡巾 の4案を比較の対象にしている。

これ等の方針決定と工法選定にあたっては、先に述べたようなシステムのアプローチは、総合的に問題をとらえて解決に導くための基礎として、必要なものと考えられる。

5. あとがき

以上、欠陥が発生した橋梁を補修して更に利用するか、取替えるかという問題を例として、システムのアプローチの必要性について述べ、手法の一端をあてはめることについて考察した。

今回は、統計的なデータが得られていないため、具体的な問題について定量的に解析を進める迄には到っていないが、本例に類似した問題はこれからも生じて来ると考えられ、また他の構造物の舗装についても或程度共通した課題であると思われるので、今後における統計的データの収集が必要なることを認識するためにも、問題提起として提案したものである。

今後、より適切な手法の応用が可能となるよう、更に検討を加えて行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 川喜田二郎 : 発想法, 昭和57年8月 中央公論社
- 2) 鈴木順二郎 牧野鉄治 石坂茂樹 : FMEA・FTA実施法, 昭和57年3月 日科技連出版社
- 3) 国広哲男 太田 実 : 橋の耐荷力と寿命, 土木学会誌 55-11 P45~50
- 4) 成田信之 : サバイバルを目差した道路橋の在り方, 土木技術資料 24-10 P1~2
- 5) 宮川公男 : OR入門, 昭和56年1月 日本経済新聞社

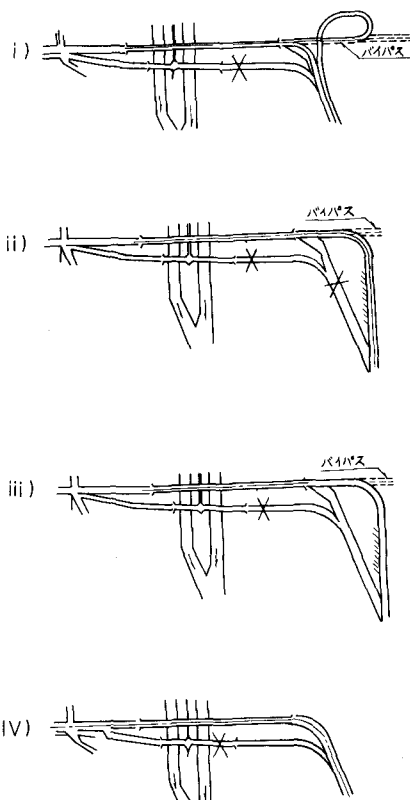


図-8 取付道路の代替案