

橋梁損傷の要因分析支援について

金沢大学大学院 学生員○川上直之
 金沢大学工学部 正会員 城戸隆良
 金沢大学工学部 正会員 近田康夫
 金沢大学工学部 正会員 小堀為雄

1. まえがき

本報告は、橋梁の定性的な損傷結果に至る原因、因果を探る方法や対策案検討について支援する手法として、損傷要因分析を支援する方法を試みる。方法論的には、ISM(Interpretive Structural Modeling)、FTA(Fault Tree Analysis)、およびSAD(System Accommodation & Design)やAHP(Analytic Hierarchy Process)などの適用を考える。これらの利用により、定性的な損傷問題の連関要因についてパソコンレベルで要因間の因果関係に関する構造図、階層図作成や分析の支援を試みようとしている。

2. 損傷要因分析の流れ

橋梁の損傷要因および損傷部位には種々あるが、多くの原因から損傷項目（例えば、ひび割れ）の結果に至る因果関係の構造を探る場合、原因から結果に至る要因間のつながりをたどるその過程には各種要因が内在していることが多い。

ある原因を頂上に置き、その結果生ずる種々の結果を探るFig. 1のイベントツリー、ある結果を頂上に置き、その原因に至る構図をand、orで示すのはFig. 2のフォルトツリー、ある結果を頭に置き、各骨部に原因系を分類して要因を配置するFig. 3のフィッシュボーンなどがある。これらは要因間の探索を目的によって使い分けるための代表的な要因分析手法である。

これらを有機的に関連付けて照会、探索を進めるには図的手法としてグラフ、チャート、パターン、演算にはマトリックスなどを使って分析が容易に進められるようにする必要がある。

橋梁の損傷要因分析の支援方法としての流れ (Fig. 4) は、まず、要因間の連関図を作成、支援する方法としてISMの利用を考える。ISMの作業は、結果となる要因、その中間的な要因群、そして原因となる原因系の抽出に始まる。この作業が最も基礎であり重要となる。その結果得られた各種主要な要因についてそれぞれ一対比較を行い、要因間の階層化構造を作り上げる。その構造図を基にして、FTAあるいはSAD、AHPのステップに進める。

FTAは結果に至る因果図がand、orで論理的に階層化されるように構築し、結果に至る原因系の中で最もクリティカルなパスを検索したり、原因に対する効果的な対策案を考え出すうえで利用が図られる。

SADは因果関係図の各要因間のつながりを矢印でつなぎ、最終目的に至る途中に内在する原因や要因群を内因、主な原因となるような要因を外因とする。外因は矢印が出るだけで、他から入り込まない要因とする。ある内因に向かって集中する各矢印に要因間の関連性の強さを影響度の数値として与える。

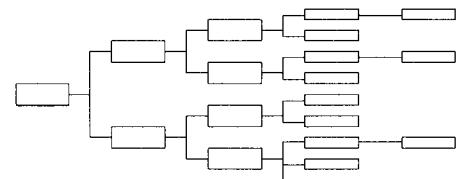


Fig. 1: ET

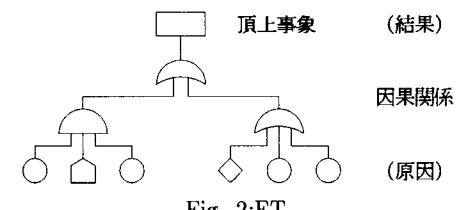


Fig. 2: FT

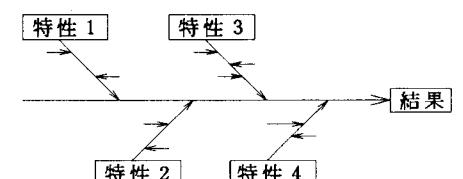


Fig. 3: 特性要因図

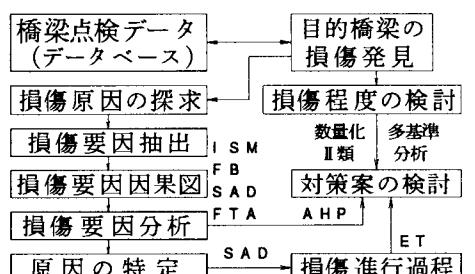


Fig. 4: 損傷要因分析の流れ

その矢印が集中するある内因への影響度の合計は 1.0 になるよう設定する。与えられた影響度を基に SAD の計算方法によって外因が最終目的に与える影響度、内因の内因に与える影響度、外因の内因に与える影響度などを調べる。これらはどの要因の影響が大きいかの探索に利用する。また、どの要因について対策案を設定し、最終目的に対してどの程度の改善が期待できるのかについて、数値的な序列化により模索する方法として利用を図る。この対策案の細部の検討にあたっては、さらに AHP の援用があげられる。

3. 分析の具体化の流れ

分析過程の一例として、Fig. 5 に示すような橋梁の床板の損傷においてひび割れが入っている問題について考える。

損傷要因に関する要因を抽出し、一対比較により因果図を ISM により作成する。矢印をつけ影響度を考えて序列化を行い、ウェイトを与えて SAD モデルを作成する。内因 y と外因 x に分かれ、外因 x は矢印のみが出ている要因である。外因が内因に与える影響度は $y = \Delta x$ の Δ の要素 δ_{ij} である。SAD の数理によるマトリックス計算の結果、たとえば Fig. 6 のように床板の損傷 y_1 への外因 x_j ($j=1, 2, \dots, 9$) による影響度 δ_{ij} は、順に、0.048, 0.072, 0.16, 0.12, 0.20, 0.12, 0.072, 0.048, 0.16 となり、 x_5, x_3, x_9, x_4, x_6 などが影響度が高い。点検結果などを基にして内因の重要度に対してウェイト w_i ($i=1, 2, \dots, 14$) を与え、ウェイトを与えた場合の個々の外因が最終目的に及ぼす影響度を検討する。各外因が最終目的に与える影響度の評点 $E = w^T \Delta$ が得られる。 E の要素は e_j である。合計 1.0 に基準化して各 w_i を与え、求めた e_j が順に 0.057, 0.086, 0.094, 0.071, 0.174, 0.177, 0.070, 0.047, 0.223 となったとすると、順に 22.3 % の影響度の x_9 、その他 x_6, x_5 などとなる。ウェイトを考えない影響度では断面不足や構造的な変位あるいは作用する荷重の外因が得られた。内因にウェイトを考慮した場合、床版断面不足や構造的な変位などの問題解決が必要であることを示唆していると考えられる。さらに主要要因に対する対策案の可能性は政策評価へ進める。ある内因以上の因果を追求しない場合には、その内因の外因化を行うことで内因を外因として扱い、検討する。

4. あとがき

損傷要因分析の援用手法には、判断のあいまいさを考慮するファジィ理論の応用、ニューラルネットワークを用いた学習型の構築手法、エキスパートシステムの構築などの研究アプローチがある。これらにおいても要因の因果構造の把握が基本的な事柄であろうと考えられる。

本報告は、点検や維持管理の専門家が損傷問題構造を図化し、あるいは数値化することによって橋梁損傷の要因分析を支援化するような基本的な方法を取り上げた。損傷因果の問題や損傷に関する対策案の検討など、どのように問題解決するかを検討する上で比較的容易な方法について検討した。そして橋梁損傷の問題構造や因果構造を図化して問題解決に役立てようとした。このように既存手法の利用を図り、各手法の有機的なつながりを考慮する支援ルーチンの作成を検討している。

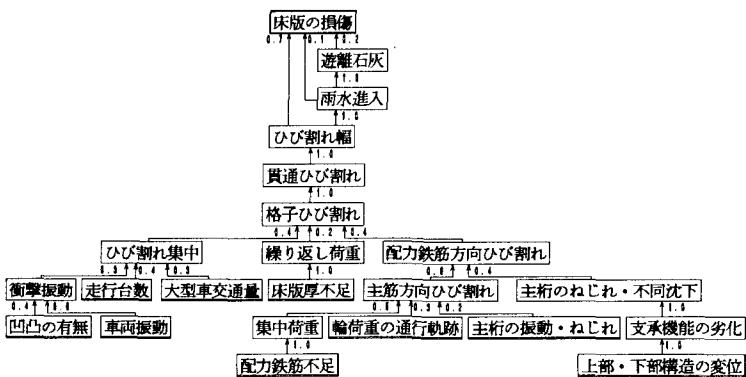


Fig. 5: 床版損傷に関する SAD モデル (例)

	外因	床版の損傷に与える影響度 (%)
1	凹凸の有無	4.8
2	車両振動	7.2
3	走行台数	16
4	大型車交通量	12
5	床版厚不足	20
6	配力鉄筋不足	12
7	輪荷重の通行軌跡	7.2
8	主桁の振動・ねじれ	4.8
9	上部・下部構造の変位	16

■ 内因重要度なし ■ 内因重要度を考慮

Fig. 6: 外因が最終目的に与える影響度 (例)

内因 y と外因 x に分かれ、外因 x は矢印のみが出ている要因である。外因が内因に与える影響度は $y = \Delta x$ の Δ の要素 δ_{ij} である。SAD の数理によるマトリックス計算の結果、たとえば Fig. 6 のように床板の損傷 y_1 への外因 x_j ($j=1, 2, \dots, 9$) による影響度 δ_{ij} は、順に、0.048, 0.072, 0.16, 0.12, 0.20, 0.12, 0.072, 0.048, 0.16 となり、 x_5, x_3, x_9, x_4, x_6 などが影響度が高い。点検結果などを基にして内因の重要度に対してウェイト w_i ($i=1, 2, \dots, 14$) を与え、ウェイトを与えた場合の個々の外因が最終目的に及ぼす影響度を検討する。各外因が最終目的に与える影響度の評点 $E = w^T \Delta$ が得られる。 E の要素は e_j である。合計 1.0 に基準化して各 w_i を与え、求めた e_j が順に 0.057, 0.086, 0.094, 0.071, 0.174, 0.177, 0.070, 0.047, 0.223 となったとすると、順に 22.3 % の影響度の x_9 、その他 x_6, x_5 などとなる。ウェイトを考えない影響度では断面不足や構造的な変位あるいは作用する荷重の外因が得られた。内因にウェイトを考慮した場合、床版断面不足や構造的な変位などの問題解決が必要であることを示唆していると考えられる。さらに主要要因に対する対策案の可能性は政策評価へ進める。ある内因以上の因果を追求しない場合には、その内因の外因化を行うことで内因を外因として扱い、検討する。

4. あとがき

損傷要因分析の援用手法には、判断のあいまいさを考慮するファジィ理論の応用、ニューラルネットワークを用いた学習型の構築手法、エキスパートシステムの構築などの研究アプローチがある。これらにおいても要因の因果構造の把握が基本的な事柄であろうと考えられる。

本報告は、点検や維持管理の専門家が損傷問題構造を図化し、あるいは数値化することによって橋梁損傷の要因分析を支援化するような基本的な方法を取り上げた。損傷因果の問題や損傷に関する対策案の検討など、どのように問題解決するかを検討する上で比較的容易な方法について検討した。そして橋梁損傷の問題構造や因果構造を図化して問題解決に役立てようとした。このように既存手法の利用を図り、各手法の有機的なつながりを考慮する支援ルーチンの作成を検討している。