

鋼道路橋の詳細設計業務を支援するための ファジィルールベースエキスパートシステムの開発

A FUZZY RULE-BASED EXPERT SYSTEM FOR SUPPORTING DETAIL DESIGN OF STEEL HIGHWAY BRIDGES

三上市藏* 田中成典** 黒田 護***

Ichizou MIKAMI, Shigenori TANAKA, and Mamoru KURODA

*工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564-80 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)

**工博 関西大学専任講師 総合情報学部 (〒569-11 大阪府高槻市霊仙寺町2丁目1番1号)

*** 関西大学大学院博士課程前期課程 (〒564-80 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)

Recently, there are some reports about the detail structures of steel bridges for preventing fatigue cracks. Many engineers have no knowledge concerned with the detail in design of new bridges. Therefore, they will have possibility to repeat the same danger of fatigue cracks.

In this study, we develop a fuzzy rule-based expert system for supporting civil engineers who design I-girder steel bridge detail using the hyper document model. This system is able to infer the desirable detail using fuzzy reasoning, and present the undesirable detail from past failure cases using function of intelligent case-based retrieval. The inference results obtained from this system are discussed, we can find that this system is useful.

Key Words : steel bridge, fatigue crack, desirable detail structure, expert system, fuzzy rule-based reasoning, function of intelligent case-based retrieval

1. まえがき

鋼道路橋の上部構造に発生する疲労亀裂に関する損傷事例が多数報告¹⁾⁻¹⁷⁾されている。一般に、疲労亀裂の多くは、橋梁の構造詳細を改良することによって防止できると考えられている。最近では、疲労亀裂を未然に防ぐためのディテールに関する研究報告¹⁸⁾⁻³⁶⁾が見受けられる。しかし、現段階では、推奨構造詳細に関する改良案は広く認められた知識としてマニュアル化されてなく、疲労亀裂が将来発生しない構造詳細を十分に理解している設計技術者は多くない。したがって、新設橋梁を設計する場合、不適性な構造詳細を採用して過去と同じように疲労亀裂を再発させる可能性が残っている。

著者らは、これまで鋼道路橋に発生した疲労亀裂の補修、補強方法の選定に関するエキスパートシステム³⁷⁾を構築してきたが、これは、疲労亀裂が発生した段階で適用することを考えているため、設計段階で、疲労亀裂を未然に防止することを目的としたシステムでなかった。

本研究では、橋梁の実施設計段階の詳細設計業務を対

象に、これまでに報告された構造詳細の推奨案を取り纏め、その知識を参照することで疲労亀裂の発生を未然に防止できる設計ができるように設計者を支援するファジィルールベースエキスパートシステムを開発する。

橋梁の設計を支援する知識ベースエキスパートシステムの研究開発³⁸⁾⁻⁵⁸⁾は多数行われている。橋梁設計には、橋梁の新設計画のための基礎計画段階、橋梁形式と支間割を決定するための予備設計段階、製作・施工に対応する実施設計段階がある。基礎計画段階(架設位置の決定と基本配置計画)には、知識ベースエキスパートシステムは今まで適用されていない。予備設計段階では、橋梁形式の一次選定、計画設計、比較設計、最適橋梁形式選定に関する業務内容があるが、一次選定を支援するためのシステムとして文献38)-51)が、計画設計を支援するためのシステムとして文献52)-53)が、比較設計を支援するためのシステムとして文献54)-55)が、最適橋梁形式選定を支援するためのシステムとして文献56)-58)がある。

実施設計段階では、橋梁の詳細設計と施工計画に関する業務内容がある。詳細設計を支援するためのシステムとして文献59)がある。また、施工計画には、知識ベ-

スエキスパートシステムは今まで適用されていない。文献 59)の詳細設計支援システムは、維持管理を考慮したシステムで、点検し易く、しかも補修・補強がし易いディテール構造の決定を支援するもので、疲労亀裂の発生を未然に防止することを目的とした構造詳細に対する支援は行っていない。

本研究では、実施設計段階で行われる詳細設計において、過去に発生した疲労亀裂と類似の損傷が再発しないような設計が可能のように、設計者に対して、専門家が検討した最適な構造詳細を推奨構造として提示するシステムを開発する。また、過去の損傷事例に基づいて亀裂の発生した構造詳細を損傷構造として設計者に提示し、学習を促すための補助システムも開発する。なお、本システムは、疲労等級や応力レベルを考えて行われる疲労設計のためのものではない。

第2章では、道路橋の鋼鈑桁橋の実実施設計段階の詳細設計を対象とした支援システムを構想し、第3章では、ファジィ推論と知的事例検索を適用したシステムの設計を行う。第4章では、そのシステムを構築し、実行して、システムの有効性を評価する。

2. システムの構想

2. 1 実施設計段階の詳細設計支援

近年、鋼道路橋において疲労亀裂の発生が見受けられるにもかかわらず、設計の段階では、「如何にコストをおさえた設計が可能か」という点が重要視され、疲労亀裂防止のための設計が軽視されてきた。その一方で、設計時に疲労亀裂を未然に防ぐための推奨構造ディテールが提案^{18)・36)}されようになってきた。そこで、これらの研究に基づいて推奨構造に関する知識を取り纏め、新設橋梁を設計する際に、疲労亀裂防止を意識した詳細設計が可能のように、設計者を支援するための知識ベースエキスパートシステムを構想する。

図-1に示す橋梁設計業務の流れ⁶⁰⁾の中で、システムを、実施設計段階における詳細設計に適用する。本システムは、道路橋の鋼鈑桁橋を対象に、過去に発生した疲労亀裂と類似した損傷が再発しない構造詳細を設計するために、専門家が検討した推奨構造詳細と、過去の疲労亀裂の損傷事例に基づく損傷構造とを設計者が容易に参照できるように考えた。

2. 2 システム化への概略設計

道路橋の新設鋼鈑桁橋を対象とした疲労亀裂発生防止に関する詳細設計支援ファジィルールベースエキスパートシステムの構想を図-2に示す。ここで、「推奨構造」は、専門家がこれまで研究してきた疲労亀裂を未

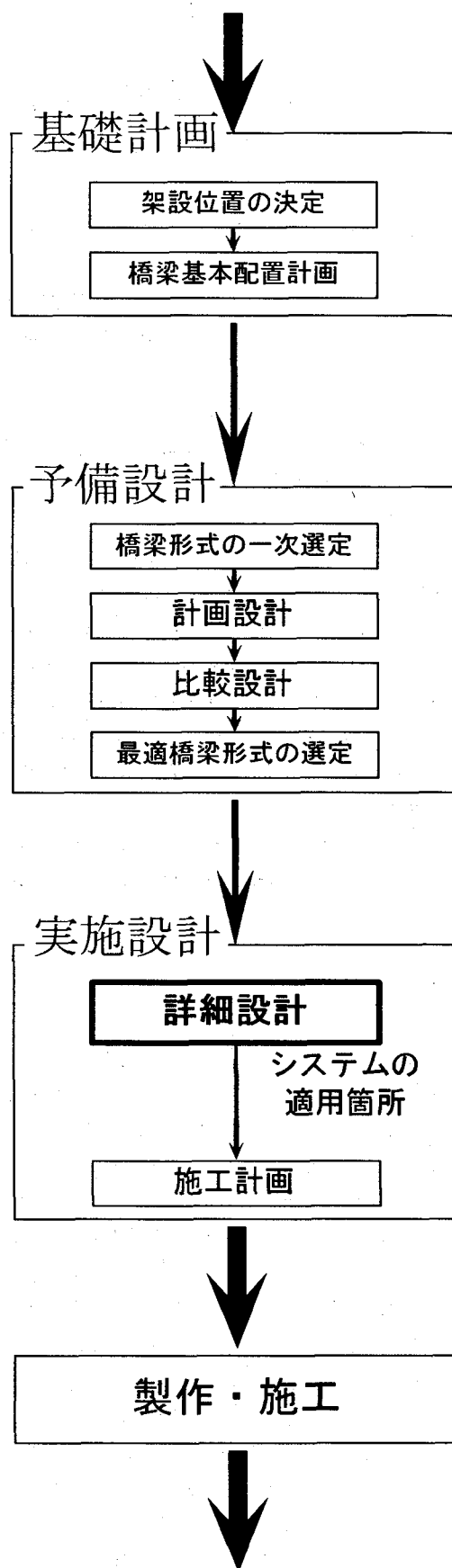


図-1 橋梁設計業務への支援システムの適用

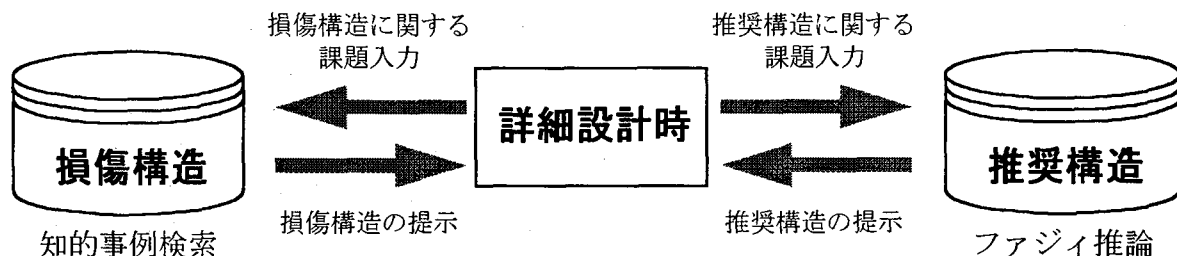


図-2 システムの構想

然に防ぐための推奨構造詳細に関する知識ベースで、「損傷構造」は、既設橋梁に発生した疲労亀裂に関する損傷事例データベースである。

詳細設計時に推奨構造詳細を参照する方法として、曖昧性を保持しながら問題解決が行えるファジィ推論を採用する。次に、過去の損傷事例から不適切な構造詳細の情報を参照する方法として、事例ベース推論の抽象化照合と部分照合を用いた知的事例検索を採用する。

2. 3 獲得した知識

2. 3. 1 推奨構造

構造詳細に関する知識を図-3に示す属性を用いて分類する。推奨構造詳細を提案している文献¹⁸⁾⁻³⁶⁾から、81件の知識を獲得した。

(1) 構造概要

構造形式、支間における位置、そして、部位を特定するブロックを考える。構造形式では、鈑桁橋の上部構造形式を対象とする。位置では、支点部、支点付近部、支間中間部を考える。ブロックでは、損傷部位に対して着目するため、カバプレート取付部、ソールプレート取付部、横桁と縦桁の交差部、主桁と横桁の連結部、主桁と横構の連結部、主桁と対傾構の連結部、主桁の継手部、主桁の切欠き部、垂直補剛材取付部、水平補剛材取付部を考える。

(2) 改良特性

構造詳細の改良特性として、作用力と将来予測による損傷要因を考える。作用力では、構造ブロックに卓越して作用する力（せん断、曲げ、ねじり）を考える。損傷要因では、疲労亀裂の発生要因として、ディテールの不適性、一次的作用（活荷重の作用、面外方向変形、剛性

推奨構造の属性

(1) 構造概要	(2) 改良特性	(3) 構造検討	(4) その他
構造形式 位置 ブロック	作用力 損傷要因	改良目的 改良案 改良図	特記事項 参考文献

図-3 推奨構造の属性

の変化）、二次的作用（二次的変形、横分配作用）、その他（支承機能低下、低温、風の影響など）を考える。

(3) 構造検討

疲労亀裂を未然に防止するための構造詳細に関して、改良目的、改良案、改良図を考える。改良目的では、強度の向上と溶接の改善を考える。改良案では、改良目的を基にした構造詳細の改良方法を考える。改良図では、改良案に即した構造図を考える。

(4) その他

改良案に関連した情報（特記事項）と改良案に関する文献資料（参考文献）を示す。

2. 3. 2 損傷構造

著者らが文献³⁷⁾で用いた疲労亀裂に関する損傷事例から、本研究の対象である鈑桁橋の事例を選び、図-4に示す属性を用いて127件の事例を整理し直した。

(1) 橋梁概要

損傷が発見された橋梁の概要として、橋梁名、国名、架設年、地域特性、交通状況を考える。架設年では西暦を、地域特性では、架設場所として都市、山間、河口（海岸、港）、水辺（川岸、湖畔）を考える。交通状況では、損傷発見時における大型車の一日平均交通量を考える。

(2) 上部構造

橋梁の設計に関する情報として、構造形式、平面形状、

損傷構造の属性

(1) 橋梁概要	(2) 上部構造	(3) 損傷箇所
橋梁名 国名 架設年 地域特性 交通状況	構造形式 平面形状 径間数 橋長(m) 車道幅員(m) 主桁本数	損傷位置 損傷ブロック 損傷構造 損傷部材 板厚(mm)
(4) 損傷状況		(5) その他
損傷種類 損傷図 作用力 損傷規模 損傷要因		特記事項 参考文献

図-4 損傷構造の属性

径間数、橋長、車道幅員、主桁本数を考える。構造形式では、鈑桁橋を、平面形状では、直橋、斜橋、曲線橋を考える。径間数では、橋梁全体の径間数を、橋長では、橋の全長（単位：m）を、車道幅員では、車線部の全幅員（単位：m）を、主桁本数では、鈑桁橋を構成する主桁の本数を考える。

（３）損傷箇所

疲労亀裂の発生箇所を特定するために、損傷位置、損傷ブロック、損傷構造、損傷部材、板厚を考える。損傷位置では、支間中の大まかな位置を指定することにして、支点部、支点付近部、支間中間部を考える。損傷ブロックでは、図－３の橋梁概要のブロックと同様に、カバプレート取付部、ソールプレート取付部、横桁と縦桁の交差部、主桁と横桁の連結部、主桁と横構の連結部、主桁と対傾構の連結部、主桁の継手部、主桁の切欠き部、垂直補剛材取付部、水平補剛材取付部を考える。損傷構造では、損傷ブロック中の損傷部位をさらに詳細に示す。損傷部材では、疲労亀裂の発生した部材を示す。板厚では、損傷部分の板厚（単位：mm）を考える。

（４）損傷状況

疲労亀裂による損傷状態を、損傷種類、損傷図、作用力、損傷規模、損傷要因で示す。損傷種類としては、疲労亀裂を考える。損傷図では、疲労亀裂の状態を図示する。作用力では、ブロックに最も卓越して作用した力（せん断、曲げ、ねじり）を考える。損傷規模では、疲労亀裂の発生規模を大、中、小で考える。損傷要因では、疲労亀裂の発生した要因として、ディテールの不適性、一次的作用（活荷重の作用、面外方向変形、剛性の変化）、二次的作用（二次的変形、横分配作用）、その他（支承機能低下、低温、風の影響など）を考える。

（５）その他

損傷事例に関する情報（特記事項）と、損傷事例を報告している文献資料（参考文献）を示す。

３．システムの詳細設計

システムの流れを図－５に示す。システムは、推奨構造を提示する支援プロセスと、過去に疲労亀裂が発生した損傷構造を提示する補助的な事例プロセスとから構成する。

支援プロセスでは、設計者が、新設橋梁の詳細設計を行う際に、設計している箇所の位置、ブロック、作用力、損傷要因を課題（図－５①）として入力し、構造詳細改良案に関するファジールールベースを使ってファジィ推論を実行し、疲労亀裂の発生を未然に防ぐための推奨構造詳細（図－５②）を提示する。

一方、事例プロセスでは、設計する部位の損傷事例を

参照するために、課題（図－５③）を入力し、事例データベースを基に知的事例検索が実行され、損傷図、作用力、損傷規模、損傷要因（図－５④）が提示される。このプロセスは、設計者の知識向上のための学習に適している。ここで得られた結果の一部（図－５、④の作用力と損傷要因）は支援プロセスの入力情報（図－５①）として活用する。

３．１ 支援プロセス

設計者がシステムに入力する課題として、設計部位の構造詳細を判断するための属性（位置とブロック）と、設計部位の改良を行う目的を導くための属性（作用力と損傷要因）を考えた。このうち、損傷要因を考慮するのは、支援プロセスの推論結果を洗練し、推論精度を向上させるためである。

位置に関する属性では、支点部、支点付近部、支間中間部を入力属性値とし、ブロックに関する属性では、カバプレート取付部、ソールプレート取付部、横桁と縦桁の交差部、主桁と横桁の連結部、主桁と横構の連結部、主桁と対傾構の連結部、主桁の継手部、主桁の切欠き部、垂直補剛材取付部、水平補剛材取付部を入力属性値とする。

作用力に関する属性では、損傷に対するせん断、曲げ、ねじりの影響度をそれぞれ５段階（①：０％，②：２５％，③：５０％，④：７５％，⑤：１００％）で入力する。これら３つの値から卓越する作用力を帰属度から判断し、ファジィ推論の属性値とする。損傷要因の属性においても、ディテールの不適性、一次的作用、二次的作用、その他の影響度をそれぞれ５段階（①：０％，②：２５％，③：５０％，④：７５％，⑤：１００％）に分類して入力する。ここで、最も卓越する損傷要因を帰属度から判断し、ファジィ推論の属性値とする。

改良目的に関する属性では、強度の向上と溶接の改善を考え、それぞれ必要性が有るか無いかを表現するファジィ集合を考えた。また、改良案は、位置、ブロックと改良目的に準じて関連付けた。たとえば、位置が「支点部」、ブロックが「ソールプレート取付部」、改良目的が「強度の向上」の時には、推論結果が「ウェブに補強リブを取り付ける」、「ソールプレートの形状を大きくする」などである。

３．１．１ ファジィ集合

作用力、損傷要因の属性は、予想も含んだ曖昧性があるため、条件部の各属性に対して、ファジィ集合を考える。作用力では、その影響度を「大きい」、「小さい」の２段階に分け、メンバーシップ関数をシグモイド関数（図－６(a)）で近似した。損傷要因においても、影響度

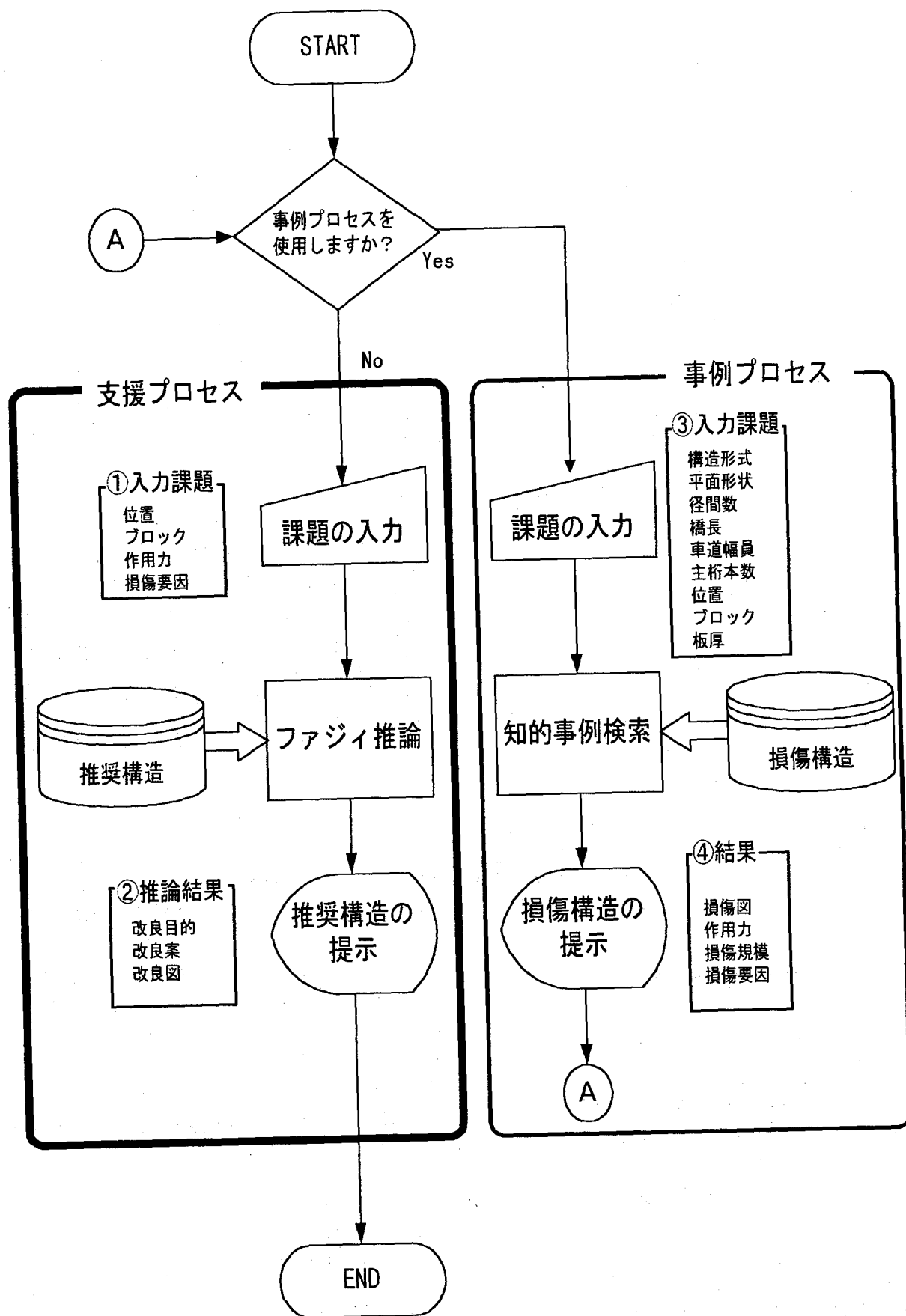
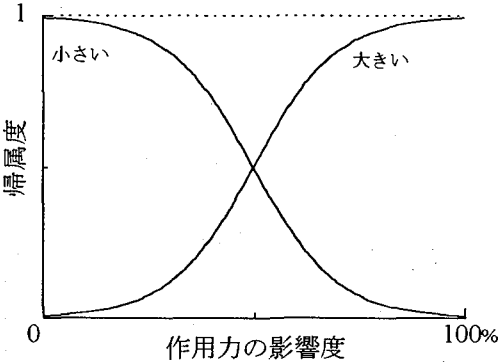


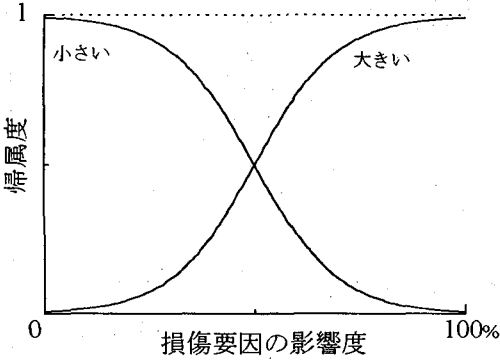
図-5 システムの流れ

を「大きい」，「小さい」の2段階に分け，メンバーシップ関数を，シグモイド関数（図－6(b)）で近似した．

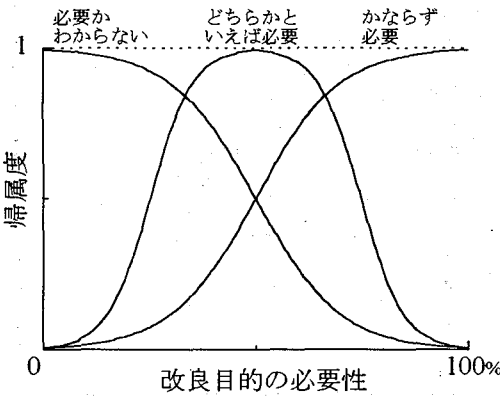
改良目的では，改良の必要性を「かならず必要」，「どちらかといえば必要」，「必要かわからない」，の3段階に分け，メンバーシップ関数をシグモイド関数（図－6(c)）で近似した．



(a) 作用力のメンバーシップ関数



(b) 損傷要因のメンバーシップ関数



(c) 改良目的のメンバーシップ関数

図－6 メンバーシップ関数

3. 1. 2 ファジィルール

属性と属性値から，条件部と結論部とをファジィルールベースで関連付け，改良目的2種類に対して各4個，計8ルール（表－1）を作成した．ファジィ推論の方法

としては，式(1)，(2)で表される Mamdani⁽⁵¹⁾の方法を採用する．

ルール_i（作用力_i，損傷要因_i，改良目的_i）
=（作用力_i×損傷要因_i）×改良目的_i (1)

$\mu_{\text{ルール}i}$ （作用力，損傷要因，改良目的）
= $[\mu_{\text{作用力}i} \wedge \mu_{\text{損傷要因}i}] \wedge \mu_{\text{改良目的}i}$ (2)

ここで， $\wedge$ は min 演算を表す．

ルール全体のファジィ関係は，次式の各ルールの or 結合で表わす．

ルール = ルール₁ $\cup$ ルール₂ $\cup \dots \cup$ ルール_n (3)

次に，改良目的の必要性をファジィ集合でなく帰属度として得るために，結論部の合成ファジィ集合の重心を解とする重心法を採用する．このとき，改良目的の必要性に対して順位付けが行われ，最終的に改良目的から改良案を導き，その改良図をシステムの推奨構造として設計者に提示する．

表－1 ファジィルール

改良目的	条件部		結論部
	作用力の影響度	損傷要因の影響度	改良目的の必要性
強度の向上	大きい	大きい	かならず必要
強度の向上	大きい	小さい	どちらかといえば必要
強度の向上	小さい	大きい	かならず必要
強度の向上	小さい	小さい	必要かわからない
溶接の改善	大きい	大きい	どちらかといえば必要
溶接の改善	大きい	小さい	どちらかといえば必要
溶接の改善	小さい	大きい	どちらかといえば必要
溶接の改善	小さい	小さい	かならず必要

3. 2 事例プロセス

入力された課題より損傷事例を検索する．手法としては，文献 37)で採用した抽象化照合と部分照合による類似度検索手法を用いた知的事例検索を行う．抽象化照合とは，課題の問題部の属性と事例の問題部の属性において，属性値が全く同じでなくてもある範囲に入っていれば，一致していると見做す照合手法である．部分照合とは，より多くの属性値が一致していれば類似度が高いと見做し，重要な属性が多く一致していれば類似度が高いと見做す照合手法である．

課題と事例データの間の属性の一致度（0～1）は，課題の属性値と事例データの属性値が一致している属性値の数をを用いて式(4)から算出する．

一致度_i = $\frac{\left(\begin{matrix} \text{一致している} \\ \text{属性値の数} \end{matrix} \right)}{\text{課題の属性値の数}}$ (4)

$-C \times \frac{\left(\begin{matrix} \text{事例データの} \\ \text{属性値の数} \end{matrix} \right) - \left(\begin{matrix} \text{一致している} \\ \text{属性値の数} \end{matrix} \right)}{\text{課題の属性値の数}}$

ただし、C は一致していない属性値の影響度を考慮するもので、任意の値 (0~1) とする。

式(4)から各属性の一致度が計算されると、事例データの課題に対する類似度は、全ての属性を考慮して式(5)から算出する。

$$\text{類似度} = \frac{\left(\frac{\text{属性値が既知の属性の数}}{\text{課題の属性の数}} \right)^2 \sum (W_i \times \text{一致度}_i)}{\text{属性値が既知の属性の数}} \quad (5)$$

ただし、W は各属性の重み (0~1 の任意の値) である。この類似度を用いて、類似度の高い事例を選び、それを検索結果とし、設計者に提示する。

4. システムの開発と検証

4. 1 システムの構築

操作性を重視したユーザフレンドリーなシステム (図-7) を実現するため、最近注目されている Hyper Document Model⁽²⁾ の概念を取り入れる。Hyper Document Model とは、Document Base と Navigation System からなり、Document Base は、Content (内容) と Hyper Tag (ポインタ) からなる。

Hyper Document Model を用いると次の利点がある。まず、Document Base によって、システムの利用者が理解できない技術用語または文章に対して、システムが用意してある情報 (説明) を利用者に提示し、システムと利用者との隔たりを少しでも縮めることができる。次に、Navigation System によって、入力や検索といった操作環境を容易にする。一方、利用者の判断で、システムの利用手順を変更できるため、熟練技術者は、不必要な操作を省略し、最短で得たい情報を獲得できる。

4. 2 実行例

システムを起動すると図-7に示すように、Main 画面 (図中①) が表示される。設計者は、支援プロセスか事例プロセスかを指定する。次に、着目するブロックを特定する画面 (図中②) が表示され着目ブロックを決定する。そして、Main 画面 (図中①) で指定したプロセスの課題入力画面 (図中③または⑥) が表示される。

支援プロセス (図中③) の場合、入力する属性は位置、ブロック、作用力である。損傷要因に関しては、事例プロセスを経由した時のみ、システムが自動的に属性値の値を決定する。図中③の項目を入力し終えたら、次に、ファジィ推論が適用され改良目的の結果 (図中④) が提示され、最終的に、推奨構造の画面 (図中⑤) が参照できる。

一方、事例プロセス (図中⑥) の場合、知的事例検索が適用された後、損傷事例の損傷構造を提示 (図中⑦)

するとともに、損傷要因 (ディテールの不適性、一次的作用、二次的作用、その他) の可能性の確信度を推論する。

これら一連の操作の中で、理解できない用語があれば、Hyper Document Model の機能を利用して、その文字または文章をクリックすると、説明ウインドウ (図中⑧) が表示される。

(1) 主桁の切欠き部 (Case1)

支援プロセスと事例プロセスを使用したときの結果を示す。表-2に示す支点部の主桁切欠き部に関するデータをシステムに入力した。支援プロセスを適用 (損傷要因を考慮せず) した結果では、表-3に示すように、強度の向上が 50.0%、溶接の改善が 50.7%の帰属度として推論された。一方、表-2の事例プロセス適用後に支援プロセスを実行 (各損傷要因の確信度の推論結果を利用) した結果では、表-3に示すように、強度の向上が 65.3%、溶接の改善が 57.8%の帰属度として推論された。両方の結果を比較すると、事例プロセスを併用することによって推論結果が洗練されたことが分かる。表-4に推論された改良案を示す。強度の向上が4案、溶接の改善が1案得られた。それらの改良案に基づいた推奨構造を図-8に示す。

表-2 入力データ

入力項目	位置	ブロック	作用力			要因			
			せん断	曲げ	ねじり	ディテールの不適性	一次的作用	二次的作用	その他
Case1									
支援プロセス単独	支点部	主桁の切欠き部	③	③	①	-	-	-	-
事例プロセス適用後 支援プロセスを実行	支点部	主桁の切欠き部	③	②	②	④	②	①	①

ただし、①: 0%, ②: 25%, ③: 50%, ④: 75%, ⑤: 100%

表-3 改良目的の推論結果

改良目的	強度の向上	溶接の改善
Case1		
支援プロセス単独	50.0%	50.7%
事例プロセス適用後 支援プロセスを実行	65.3%	57.8%

表-4 改良案

実行例	改良目的	改良案
Case1	強度の向上	a) 割込フランジを用いる
		b) 切欠き前面に横桁を設ける
		c) 切欠き前面に対傾構を設ける
		d) 腹板厚を増大させる
	溶接の改善	e) R部を完全溶け込み溶接にする

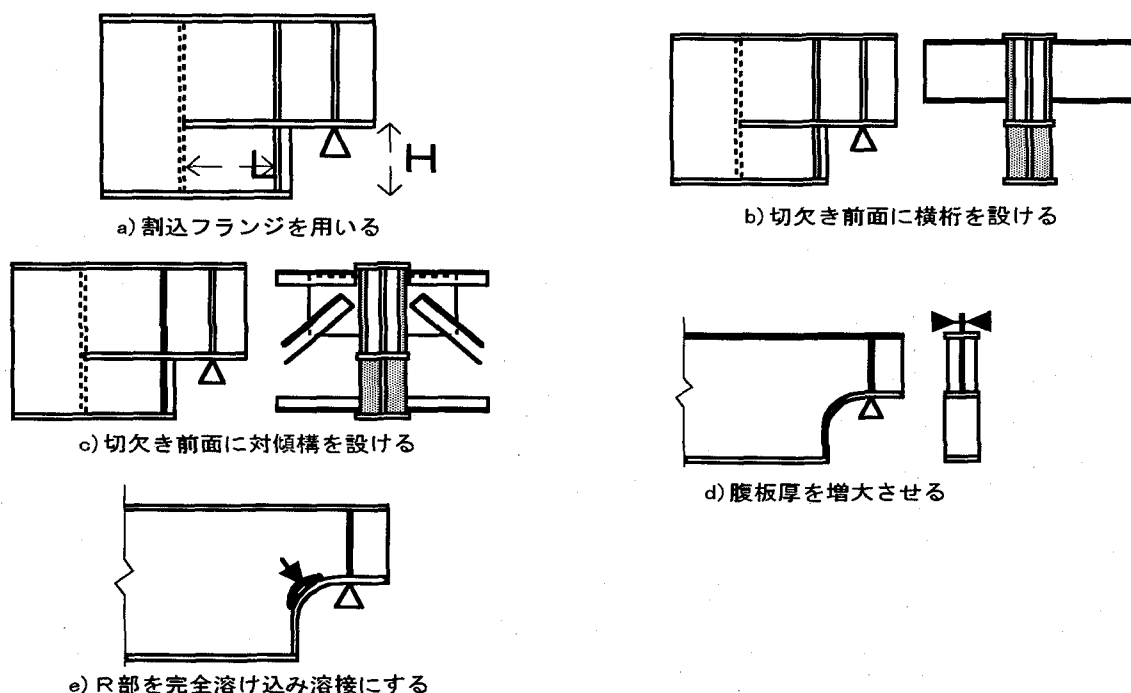


図-8 推奨構造

(2) ソールプレート取付部 (Case2)

表-5 (Case2) の支点部のソールプレート取付部に関する改良目的の推論結果を表-6 (Case2) に示す。強度の向上が 70.2%, 溶接の改善が 60.5%の帰属度として得られた。そして、改良案としては、表-7 (Case2) に示すように、強度の向上が 7 案、溶接の改善が 2 案得られた。

(3) 垂直補剛材取付部 (Case3)

表-5 の垂直補剛材取付部に関する推論結果を表-6 に示す。強度の向上が 51.4%, 溶接の改善が 51.7%の帰属度として得られた。そして、改良案としては、表-7 に示すように、強度の向上が 6 案、溶接の改善が 3 案得られた。

(4) 主桁と横桁の連結部 (Case4)

表-5 の主桁と横桁の連結部に関する推論結果を表-6 に示す。強度の向上が 51.4%, 溶接の改善が 51.7%の帰属度として得られた。そして、改良案としては、表-7 に示すように、強度の向上が 15 案、溶接の改善が 2 案得られた。

(5) 主桁の継手部 (Case5)

表-5 の主桁の継手部に関する推論結果を表-6 に示す。強度の向上が 70.2%, 溶接の改善が 60.5%の帰属度として得られた。そして、改良案としては、表-7 に示すように、強度の向上が 9 案、溶接の改善が 1 案得られた。

5. あとがき

本研究では、疲労亀裂の発生を未然に防ぐための詳細設計を支援する知識ベースエキスパートシステムをファジィ推論と知的事例検索の手法を用いて開発した。システムは、設計者(利用者)の疲労亀裂防止構造の知識レベルに対応できるように、支援プロセスと事例プロセ

表-5 事例プロセス適用後の支援プロセスの実行

入力項目 事例	位置	ブロック	作用力			要因			
			せん断	曲げ	ねじり	ディテールの不適性	一次的作用	二次的作用	その他
Case2	支点部	ソールプレート取付部	⑤	①	①	②	④	①	①
Case3	—	垂直補剛材取付部	①	⑤	①	②	③	①	②
Case4	—	主桁と横桁の連結部	①	②	④	②	③	②	①
Case5	支間中間部	主桁の継手部	④	②	①	①	④	①	②

表-6 改良目的の推論結果

	強度の向上	溶接の改善
Case2	70.2%	60.5%
Case3	51.4%	51.7%
Case4	51.4%	51.7%
Case5	70.2%	60.5%

表－7 改良案

実行例	改良目的	改良案
Case2	強度の向上	ソールプレート形状を大きくする ソールプレート端にテーパをつけることにより応力の流れをよりスムーズにする ウェブに補強リブを取り付ける 下フランジ下面に12mm厚の補強板を高力ボルトにより取り付ける ソールプレート厚を増大し、ソールプレート幅を下フランジ幅より大きくする 垂直補剛材厚を増大する 主桁下フランジ厚を最小20mm程度とする
	溶接の改善	ソールプレートと下フランジの溶接を測方のみ行う ソールプレートを上巻より長くし、上巻端部の直上に垂直補剛リブを溶接する
Case3	強度の向上	引張フランジと適当な間隔をあけて取り付ける 高力ボルトで取り付ける 引張フランジと垂直補剛材の間を無くす 主桁フランジ先端から15mmの位置で垂直補剛材端部に60°の角度を有する切欠きにする 垂直補剛材を2本にする 疲労亀裂の防止条件としてフランジと間隔を持たせる
	溶接の改善	スカラップの手前で溶接を止める スカラップを無くす（10C埋戻しを行う） 補剛材下端と下フランジを開先加工を施し完全溶込み溶接を用いる
Case4	強度の向上	スカラップ半径を小さくする 貫通部の隙間を小さくする ウェブギャップ板のコーナー中央を中心とした半円孔をあける 両方のフランジの交差部にRを付ける 垂直補剛材をフランジ幅までとり、上フランジとの溶接長を大きくする ウェブギャップ板を延長する 縦桁を考慮して、横桁を上下2段に分割する 垂直補剛材を16mmに増厚する 主桁上フランジと横桁上フランジを連結する 上フランジと垂直補剛材を高力ボルトを用いて添接する 垂直補剛材の一部を切り取りウェブギャップを大きくする ウェブギャップ板を19mmに増厚する 外桁の外側に高さ300mm、板厚19mmの補強リブを取り付ける 腹板厚を増大する スカラップ形状を変える
	溶接の改善	スカラップを溶接で埋め戻す 溶接先端近傍をTIG処理、またはグラインダー仕上げとする
Case5	強度の向上	下フランジに補強材を添接する 主桁腹板に垂直補剛材を取り付ける 上下フランジ幅は、原則としてそれぞれ桁全長にわたり同一とする 長い継手部の添接板を2枚化させる 板厚を中心に合わせ、フィレットRで変化(R>B/5)させる テーパプレートを採用し、フランジ断面の変化は現場継手位置で行う 断面変化は高力ボルト継手位置で行い、板厚差のあるフランジの継手部はフィラープレートを用いる スカラップ部に埋込鋼板を完全溶け込み溶接する 腹板の高力ボルト継手は、原則としてモーメント、シャーププレートを一体化した連結板を用いる
	溶接の改善	スカラップ部に廻し溶接をしない

スの2つに分けて考えた。システムの実行を通じて、支援プロセスでは、疲労亀裂が発生しそうな構造詳細に対して、望ましい構造詳細が提示できた。事例プロセスでは、過去の損傷事例から、疲労亀裂の損傷状況を学習できる損傷構造を提示できた。事例プロセスを実行後、支援プロセスを適用することで、改良目的に対する推論結果も洗練される。Hyper Document Modelを採用したため、設計者に対してユーザフレンドリーなシステムが実現でき、属性についての説明を簡単に参照したり、提示された改良案から自分の参照したい改良案だけを素早く選択することができる。なお、本システムは、Java言語を用いて、Windows95上で構築した。

最後に、本論文の作成に当たって、関西大学工学部土木工学科4回生 大久保昌英君から協力を得た。また、松尾橋梁株式会社の多田雅一氏、日本技術開発株式会社

の森川陽介氏から貴重なご意見を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1)三木千壽：米国における道路橋の破損と保守，道路，日本道路協会，pp.26-30，1982.11.
- 2)三木千壽：鋼構造の耐用年数，土木学会誌，Vol.68，pp.12-17，1983.10.
- 3)三木千壽：疲労からみた風，橋梁と基礎，Vol.23，No.8，pp.17-19，1989.8.
- 4)三木千壽，Fisher，J.W.，西川和廣：鋼橋の疲労損傷とその検査，橋梁と基礎，pp.17-21，1986.5.
- 5)三木千壽，舘石和雄，高木千太郎：鋼床版縦リブ・横リブ交差部の応力実測とその分析，構造工学論文集，

- 土木学会, Vol.37A, pp.1163-1168, 1991.3.
- 6)三木千壽, 中村賢造, 田中雅人: 既設鋼桁橋下フランジ補強ディテールの疲労強度, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.37A, pp.1123-1132, 1991.2.
 - 7)中井 博: 都市高速道路橋の疲労損傷事例とその防止対策に関する研究, 橋梁と基礎, No.2, pp.23-31, 1990.2.
 - 8)Fisher, J.W., 三木千壽: 米国の溶接橋梁に生じた疲労被害例, 橋梁と基礎, Vol.16, No.10, pp.18-24, 1982.10.
 - 9)三木千壽, Fisher, J.W.: 海外の橋梁における疲労問題と補修・補強, 橋梁と基礎, Vol.17, No.8, pp.30-34, 1983.8.
 - 10)三木千壽, 竹之内博行, 森 猛, 大川征治: 主桁と対傾構との取合部の疲労損傷に対する補修方法の提案, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.34A, pp.543-550, 1988.3.
 - 11)名取 暢, 深沢 誠, 寺田博昌, 寺尾圭史: 面外曲げを受けるすみ肉回し溶接部の疲労強度, 横河橋梁技報, No.19, pp.37-45, 1990.1.
 - 12)阪神高速道路管理技術センター: 損傷と補修事例にみる道路橋のメンテナンス, 阪神高速道路公団, 1993.
 - 13)菊池春海: 橋梁補強技術の現状, 土木施工, Vol.37, No.5, pp.4-7, 1996.5.
 - 14)鋼構造委員会鋼橋の余寿命評価小委員会: 鋼橋の劣化現象と損傷の評価, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.21-36, 1994.10.
 - 15)阿保 進: 鋼道路橋における補修例, 橋梁と基礎, Vol.5, No.10, pp.62-67, 1982.10.
 - 16)松本信二, 堀川浩甫, 北沢正彦: 合成 I 桁橋の主桁と横桁の取合部の疲労, 土木学会論文集, No.386/I-8, pp.247-255, 1987.10.
 - 17)岩崎雅紀, 名取 暢, 深沢 誠, 寺田博昌: 鋼橋の疲労損傷事例と補修・補強対策, 横河橋梁技報, No.18, pp.36-52, 1989.1.
 - 18)三木千壽, 館石和雄, 石原謙治, 梶本勝也: 溶接構造部材のスカルップディテールの疲労強度, 土木学会論文集, No.483/I-26, pp.79-86, 1994.1.
 - 19)館石和雄, 名取 暢, 三木千壽: プレートガーダー支承部の疲労損傷とそのディテール改良に関する研究, 土木学会論文集, No.489/I-27, pp.167-176, 1994.4.
 - 20)三木千壽, 妹尾賢一郎, 森 猛: 鋼橋支承部ソールプレート端に生じた疲労損傷と局部応力についての考察, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.36A, pp.949-958, 1990.3.
 - 21)中井 博, 三木千壽, 山田健太郎, 渡辺英一, 堀川浩甫, 北田俊行, 大塚久哲: 都市高速道路橋の疲労損傷の防止対策に関する調査・研究報告, 文部省科学研究費総合研究(A), 1989.3.
 - 22)大野 崇, 名取 暢: 現場溶接スカルップ部の疲労強度に関する研究, 横河ブリッジ技報, No.24, pp.35-43, 1995.1.
 - 23)鈴木博之, 関 惟忠, 西岡敬治, 岩崎雅紀, 羽子岡爾朗: 鋼桁橋の主桁一横桁取合い部の疲労に関する解析的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.42A, pp.919-926, 1996.3.
 - 24)中井 博(代表者): 鋼橋における高機能鋼の有効利用法に関する研究, 土木学会関西支部共同研究グループ報告書, 1996.7.
 - 25)田井戸米好, 是角行雄, 飯野 暢, 中西保生, 山下恵治: 鋼 I けた橋端部横構取付ガセット近傍の補修工事, 石川島播磨技報, 第 29 巻第 1 号, pp.29-33, 1989.1.
 - 26)道路橋調査研究委員会: 疲労・溶接小委員会報告書疲労グループ編, 関西道路研究会, 1994.3.
 - 27)菊池春海: 橋梁補強技術の現状, 土木施工, Vol.37, No.5, pp.4-7, 1996.5.
 - 28)鋼構造委員会鋼橋の余寿命評価小委員会: 鋼橋の劣化現象と損傷の評価, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.21-36, 1994.10.
 - 29)坂野昌弘, 三上市藏, 三木千壽, 安池寿夫: 垂直補剛材取付部の疲労実験, 土木学会第 46 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.388-389, 1991.9.
 - 30)館石和雄, 三木千壽, 石原謙治, 梶本勝也: 面内力を受けるスカルップ構造の疲労強度, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.602-603, 1993.9.
 - 31)明比幸造, 坂野昌弘, 三上市藏, 西村 剛: 縦桁貫通部を有する横桁の疲労強度解析, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.606-607, 1993.9.
 - 32)稲田育郎, 半野久光, 宇佐見健太郎: 実橋における鋼 I 桁の主桁と対傾構取合部の疲労補修に関する検討, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.432-433, 1994.9.
 - 33)館石和雄, 三木千壽, 梶本勝也: 疲労強度向上のためのスカルップディテールの改良方法, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.472-473, 1994.9.
 - 34)松居伸明, 大倉一郎: 垂直補剛材端ギャップと局部応力の関係, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.774-775, 1996.9.
 - 35)渡辺真至, 谷倉 泉, 西 浩嗣, 海野清司: 鋼桁支承ソールプレート溶接部の疲労損傷と補強効果, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.778-779, 1996.9.

- 36) 貝沼重信, 山田健太郎, 石井博典, 西岡敬治: ウェブギャップ板の上端部の応力緩和による疲労強度向上法, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.822-823, 1996.9.
- 37) 田中成典, 三上市蔵, 前田秀典, 小林篤司: 事例ベース推論と知識ベース推論を併用した鋼橋疲労損傷の補修方法選定システムの開発, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.41A, pp.575-586, 1995.3.
- 38) 西土隆幸, 前田研一, 野村国勝: 河川橋梁の上下部工形式選定のためのエキスパートシステム構築に関する一考察, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.35A, pp.489-502, 1989.3.
- 39) Leelawat, C., Niuro, T., and Kuribayashi, E.: Application of Expert System in Bridge Superstructure Selections, 土木学会論文集, No.416/I-13, pp.49-57, 1990.4.
- 40) Nishido, T., Maeda, K., and Nomura, K.: Study on Practical Expert System for Selecting the Types of River-Crossing Bridges, 土木学会論文集, No.422/I-14, pp.121-132, 1990.10.
- 41) 西土隆幸, 前田研一, 島田清明, 野村国勝: 橋梁形式選定エキスパートシステムにおける橋上走行時の運転者の感覚評価に関する研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.36A, pp.513-524, 1990.3.
- 42) 三上市蔵, 田中成典, 米田慎二: 事例ベース推論を用いた橋梁形式選定システム, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.40A, pp.593-604, 1994.3.
- 43) 西土隆幸, 前田研一, 磯光夫, 野村国勝: 橋梁形式選定エキスパートシステムにおける景観の評価方法に関する一提案, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.37A, pp.699-707, 1991.3.
- 44) 白石成人, 松本 勝, 谷川浩司: 新しいコンピュータ言語 Prolog の橋梁形式選定システムへの適用—基礎形式の場合—, 橋梁, Vol.21, No.5, pp.2-10, 1985.5.
- 45) 白木 渡, 松保重之: 色彩を考慮したアーチ橋の景観設計へのニューラルネットワークの適用, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.39A, pp.595-606, 1993.3.
- 46) 古田 均, 大谷裕生, 中林正司, 白石成人: ニューラルネットワークの橋梁景観設計への応用, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.37A, pp.669-675, 1991.3.
- 47) 白木 渡, 松保重之, 高岡宣善: ニューラルネットによるアーチ橋の景観評価システム, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.37A, pp.687-697, 1991.3.
- 48) 白石成人, 古田 均, 中林正司, 細谷 学: 学習機能を持った橋梁設計支援エキスパートシステムに関する研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.36A, pp.525-534, 1990.3.
- 49) 古川浩平, 古田 均, 中尾絵里子, 浅津直樹: ファジイ理論に基づく美観を考慮した橋梁設計に関する一考察, 土木学会論文集, No.410/I-12, pp.335-344, 1989.10.
- 50) 近田康夫, 城戸隆良, 小堀為雄: パーソナルコンピュータ上での橋梁景観シミュレーションシステムの構築, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.36A, pp.543-550, 1990.3.
- 51) 西土隆幸, 伊藤義人: 異なる形式の河川橋梁に対する景観の評価支援システム, 土木学会論文集, No.474/VI-20, pp.95-104, 1993.9.
- 52) 白石成人, 古田 均, 吉住先司: 構造設計へのファジイ意志決定理論の応用に関する基礎的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.33A, pp.819-828, 1987.3.
- 53) 白石成人, 古田 均, 中島裕之, 山本信哉: 橋梁計画設計のためのエキスパートシステム構築に関する基礎的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.34A, pp.667-675, 1988.3.
- 54) Adeli, H., and Balasubramanyam, K.V.: A Knowledge-Based System for Design of Bridge Trusses, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol.2, No.1, pp.1-20, 1988.1.
- 55) 岩松幸雄, 早川裕史, 原田隆郎: 橋梁の比較設計支援エキスパートシステムに関する研究, 土木学会論文集, No.453/VI-17, pp.51-57, 1992.9.
- 56) Rogers, J.L.: Simulating Structural Analysis with Neural Network, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol.8, No.2, pp.252-265, 1994.4.
- 57) Reddy, R.R., Gupta, A., and Singh, R.P.: Expert System for Optimum Design of Concrete Structures, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol.7, No.2, pp.146-161, 1993.4.
- 58) Soh, C.K., and Yang, J.: Fuzzy Controlled Genetic Algorithm Search for Shape Optimization, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol.10, No.2, pp.143-150, 1996.4.
- 59) 白石成人, 古田 均, 幸 和範, 大谷裕生: 維持補修を考慮した橋梁設計のためのコンサルテーションシステムの構築, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.35A, pp.503-510, 1989.3.
- 60) 二井 潤: 橋梁の計画, 日本橋梁建設協会, 1988.10.
- 61) 古田 均, 河村 廣: 建築・土木技術者のためのファジイ理論入門, 講談社, 1993.10.
- 62) Yabuki, N., and Law, K.H.: HyperDocument Model for Design Standards Documentation, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol.7, No.2, pp.218-237, 1993.4.

(1996 年 9 月 6 日受付)