

## I-24 設計基準の表現・処理・文書化のための統合化モデルに関する研究

## An Integrated Model for the Representation, Processing, and Documentation of Design Standards

矢吹 信喜<sup>1</sup>Kincho H. Law<sup>2</sup>

Nobuyoshi Yabuki

【抄録】設計作業および設計計算プログラム開発を合理的に実施するためには、設計基準に関する理論的なモデルが必要である。オブジェクト指向と論理プログラミングを融合したオブジェクト・ロジック・モデルと設計基準の条文と関連資料の文書化が出来るハイパードキュメント・モデルを統合化したハイパー・オブジェクト・ロジック・モデルを開発した。このモデルにより、理論的に設計基準の構成を決め、文書としての基準と条文を表現するプログラムを、コンピュータ上で両者をリンクさせながら、作成することが出来る。また、設計した部材の照査および自動部材設計が可能である。プロトタイプ・システムを開発するとともに、今後の研究課題についても論じた。

【Abstract】 A formal and theoretical model for representing design standards is required in order to automate design and to develop design software efficiently. We developed a Hyper-Object-Logic Model, which is an integration of an Object-Logic Model which object-oriented and logic programming paradigms are unified and HyperDocument Model for documentation of design standards and their related information. By using this model, one can systematically develop design software, linking provisions of design codes and their programs. This model can be used for conformance checking of design and automated design generation. This paper also discusses a prototype system and future research directions.

【キーワード】設計基準、設計計算システム、オブジェクト指向、論理プログラミング、情報の共有化

【Keywords】 design standards, design automation system, object-oriented programming, logic programming, information sharing

## 1. はじめに

コンピュータの黎明期より、土木分野では設計の効率化と高度化を図るべく、コンピュータの利用が盛んに行われてきている。例えば、構造物の設計作業は概略的には、構造解析、設計計算、図面作成というフローで進められるが、この中で、構造解析と図面作成においては、それぞれ有限要素解析 (FEM) と CAD システムが一般的に使用され、汎用コードや商用 CAD ソフトが広く利用されている。一方、設計基準等に基づく設計計算については、構造解析や図面作成ほど、コンピュータが標準的に利用され

るようなレベルには達していないのが実状である。そのため、設計作業全体としては、統合化された効率的なコンピュータの利用がなされているとは言い難い。

設計基準は、ある構造物あるいは部材について、適切なレベルの性能を保証するために守らねばならない必要条件 (要件) を記した文書であり、設計において構造物の安全性、品質、機能性等を確保するために重要な役割を担っている。

設計基準を基にした設計作業をコンピュータ・プログラム化しようとする試みは古くからなされてい

- 〒050-8585 室蘭市水元町 27-1 室蘭工業大学工学部建設システム工学科助教授 TEL: 0143-46-5219 FAX: 0143-46-5218 Email: yabuki@news3.ce.muroran-it.ac.jp
- Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA 94305-4020, U.S.A.,

るが、一般的には、条文を FORTRAN 等の手続き型言語によって、部材の照査専用か自動設計 CAD 専用のプログラムとして開発するに留まっている。こうした条文がプログラムと一体となったいわゆる hard coding されたソフトウェアは設計基準が改訂された時、プログラムを修正するのが非常に大変である。また、照査と自動設計の両方が同一プログラムで行えるようにすることも困難である。さらに、多くの設計基準プログラムは、構造物の CAD データモデル、工学データベースやドラフティング・システム等と統合化されていないため、データ入力に手間がかかるといった欠点もある。また、一旦プログラムを使い始めると、設計技術者が基準の条文や解説をよく理解せずに設計してしまうというブラックボックス化の弊害も出てくる。

一方、設計基準の構成の概念や条文の書き方は、各基準内では統一されているものの、理論的なモデルに基づいていないことから、ばらばらとなっている。そのため、基準のユーザーは基準毎に、使い方を学ばなければならず、基準のプログラム化を行う際にも障害となっている。

30 年以上にわたって、欧米、特に米国において、設計基準の構成や条文をコンピュータ化するための理論的なモデルに関する研究が盛んに行われており、多くの研究成果は上がっているものの、未だに普遍的といえるようなモデルは開発されていない。

本論文では、設計基準を表現し処理する統合化された理論的なモデルについて述べ、今後の課題と研究の方向性等について論ずる。

## 2. 既往の研究

設計基準の構成と条文処理に関する研究は、理論的なモデルの開発と文書としての基準のコンピュータ化に関する分野に分けられる。以下にその概要と評価を記す。

### (1) 理論的なモデル

設計基準処理のための最初の理論的なモデル<sup>1)</sup>は、デシジョン・テーブル(決定条件一覧表)に基づいたものであり、その後改良され、現在では SASE (Standards Analysis, Synthesis, and Expression) モデル<sup>2)</sup>と呼ばれている。

SASE モデルは、基準の全ての変数を表現するデータ項目; データ項目の値を決定するための論理を示すデシジョン・テーブル; どのデータ項目がどのデータ項目によって計算されるかという先行順序を示す情報ネットワーク; 基準の構成を論理的に表現

し、必要な条文にアクセスするための構成システム、の4つの基本的な要素によって構成されている。

その後、条文をプロダクション・ルールによって表現し、設計の照査は推論エンジンによってなされる設計基準処理技法が提案された<sup>3)</sup>。次に、フレームを用いて SASE モデルの構成システムを表現し、データ項目をオブジェクト指向技法により表現し、処理する方法が提案された<sup>4)</sup>。さらに、人工知能の知識表現方法の一つである述語論理に基づいて設計基準を表現する方法が提案され、設計の照査と部分的な自動設計が可能であることが示された<sup>5)</sup>。

そこで、筆者らはオブジェクト指向プログラミングは設計基準の構成を、述語論理は条文を表現するのに適していると考え、両者を融合させたオブジェクト・ロジック・モデル<sup>6)</sup>を開発した。

### (2) 設計基準の文書としてのコンピュータ化

設計基準は、条文間で互いに参照しあうことが多いという性質から、参照をリンクとして文書に埋め込むことが可能なハイパーテキストを用いて、設計基準の文書そのものをフロッピーディスクや CD-ROM を利用してコンピュータ化する例が見られた<sup>7)</sup>。しかし、これらは、現存の設計基準をそのままの形でコンピュータ化するに留まっており、設計基準の理論的な構成や作成モデルに考察を加えるまでは至っていない。

設計基準を作成する過程では、基準作成委員らによって大量の関連文献やデータが集められるが、議論の過程や根拠となる文献等は基準そのものには多くは載せられないため、基準のユーザーである設計者や技術者とこれらの深い知識が共有出来ない。こうした背後の知識を設計基準とリンクさせ、設計作業をサポートする、ハイパードキュメント・モデル<sup>8)</sup>を筆者らは開発した。このモデルは、HyperFile<sup>9)</sup>に基づいたもので、単に文書類のファイルのみならず、設計基準を表現するプログラムや関連するプログラムも統一的に貯蔵し、検索、実行が可能な一般性のあるモデルである。

### (3) 既往の研究成果の実用化への評価

過去 30 年以上にわたって、本分野では多くの研究論文が米国を中心に発表され、AISC の LRFD (荷重抵抗係数設計法) 設計基準<sup>10)</sup>を表現するプロトタイプ・システムも開発されたにもかかわらず、研究モデルが実用化された事例はあまり見当たらない。

なぜ FEM における汎用コード、図面作成における商用 CAD システムのように実用化されないの

あろうか。FEM のコードの場合は、大学の研究室で作られた解析プログラムに多少の工夫を加えることにより比較的容易に実用化出来たのだと考えられる。CAD の場合は、プロトタイプ・システムから実用化までには、相当なソフト開発が必要であったが、それにかかる費用と得られるメリットを比較すると、メリットが大きいことは誰の目にも明白であったと考えられる。

しかしながら、設計基準に基づいた設計作業は、設計技術者にとっては根幹となる作業であり、習得するためには相当の年数と経験を積みねばならない。それゆえ、外部のソフトウェア開発技術者にとっては、わかりにくく、それだけの時間と労力をかけて開発した設計基準ソフトウェアが、商品になり得るか判断が付きにくい。また、設計基準を表現する新しい理論的なモデルが次々に発表されるため、モデルが成熟するまで待つ、という判断をするのは不思議ではない。

一方、設計基準作成委員会のメンバーは、コンピュータ化の必要性は認識していながらも、設計基準の理論的モデルの研究には必ずしも精通しておらず、また、限られた時間、労力、予算を考慮すれば、コンピュータ化はソフト会社等の別組織が実施すべきだと考えたと推測される。

設計技術者が本来の工学的判断力を養い、発揮できるようにと、性能設計への移行の努力が盛んであるが、基本的な設計を行うためにはガイドラインや設計手順書がある程度は必要である。特に、中小規模の構造物では効率的に設計を行う必要があり、また何らかの理由で破壊や損傷があった場合のリスクヘッジを考慮すれば、設計基準は極めて重要である。要は、新技術を採用する際や特殊な場合に、より高度な方法で安全性や機能が確認されれば、基準そのものが邪魔をしないように条文を工夫しておけば良いと考えられる。また、設計技術者が高度な工学的判断を行うためには、時間と労力がかかる設計基準に基づく設計作業をコンピュータ化し、時間を生み出す必要があると考えられる。

### 3. ハイパー・オブジェクト・ロジック・モデル

既往の研究は、設計基準の理論的なモデルの研究と文書としての基準のコンピュータ化に関する研究が別々に実施されてきた。そこで、筆者らは、以下の項目を目的に、オブジェクト・ロジック・モデルとハイパー・オブジェクト・モデルを統合化したハイパー・オブジェクト・ロジック・モデルを開発した<sup>11)</sup>。

- 設計基準の構成と条文の両方が文書およびプログラムとして効果的に表現出来る、
- 構造部材の設計の照査と自動設計が同一環境下で実行出来る、
- 大量の関連文献やデータ（深い知識）を蓄えて設計基準作成委員と設計者が容易にアクセス出来る、
- CAD 環境に統合化出来る。

さらに、プロトタイプ・システムを AISC の LRFD（荷重抵抗係数設計法）設計基準<sup>11)</sup>を対象として、Apple Macintosh パーソナルコンピュータ上で、Prolog++<sup>12)</sup>、HyperCard、Oracle データベース等を用いて開発した。モデルの構成を図-1に示し、以下、モデルの構成要素についてプロトタイプ・システムの適用例とともに記す。

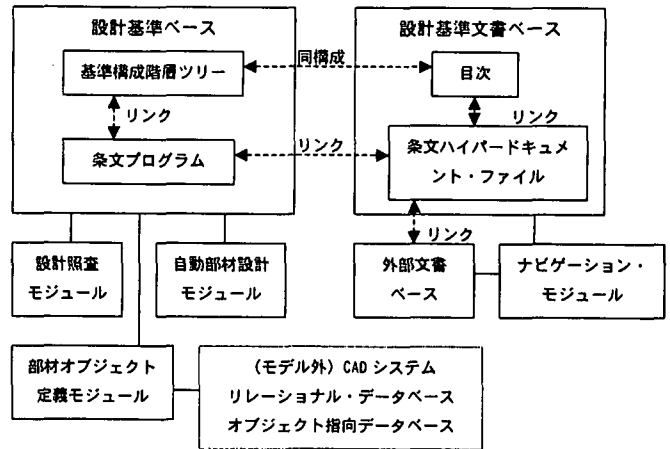


図-1 ハイパー・オブジェクト・ロジック・モデルの概要

#### (1) 設計基準ベース

設計基準の理論的なモデルとしては、適用されるべき全ての条文に容易にアクセス出来る、基準として、漏れ、重複、矛盾等なく項目を網羅できる設計基準の構成に関するモデル、および設計された部材の照査が出来るようにするために条文の論理を表現するモデルが必要である。従って、既存の設計基準をそのままプログラム化するためのモデルではなく、構成と条文を根本から再構築するためのモデルである。

オブジェクト・ロジック・モデルでは、構造設計基準の構成を、SASE モデルをベースに、部材（オブジェクト）、応力状態、限界状態の 3 つのツリー構造を持った領域を併合させた 1 つの大きなオブジェクト指向の基準構成階層ツリーとして表現し、最

下部のノード(節)に対応する一つの要件を付ける。簡単な例を図-2に示す。この構成は、設計基準がツリーの各階層において、漏れと重複がないことが確認出来、また、部材が与えられれば、必要な条文(要件)へのアクセスがツリーを根(ルート)から最下層のノードへたどることにより系統的に可能となる。

しかし、あるクラスの下へ進む際、強度と使用性のように両方のクラスへ進まなくてはならない場合があることから、各ノードはANDノードとORノードに分類されている。ANDノードの下は全て選択されるが、ORノードの下は唯一のクラスが選択される。プロトタイプ・システムの基準構成階層ツリーの一部を図-3に示す。図中のrequirementsは、要件に当たり、例えばreq\_short\_non\_slender\_y\_comp\_memは局部座屈を考慮する必要がない鋼製の圧縮材(柱)においてy軸回りの非弾性座屈に対して満足すべき条件である。また、図中の矢印はシステムがたどった軌跡である。

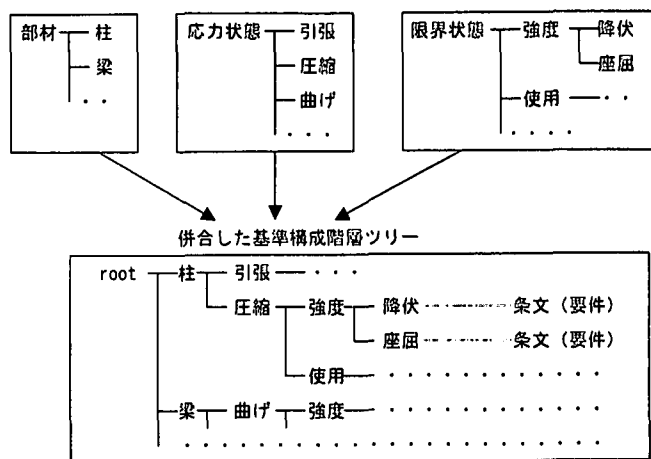


図-2 基準構成階層ツリーの作成の簡単な例

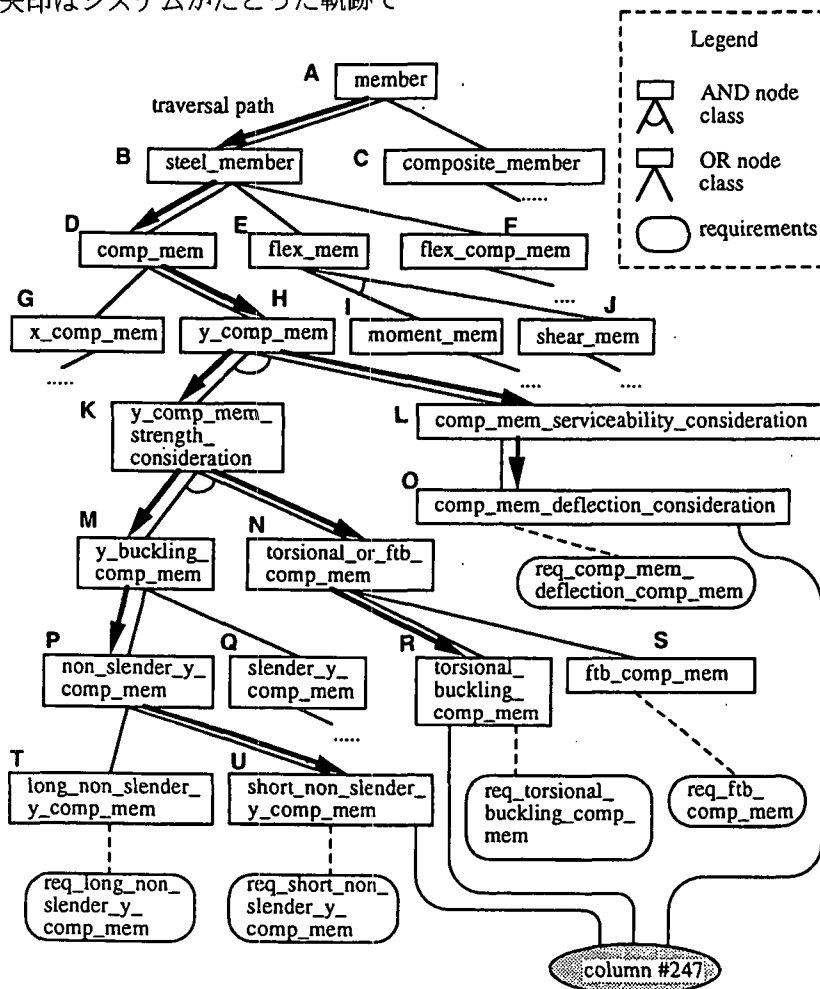


図-3 プロトタイプ・システムの基準構成階層ツリーの一部および軌跡の一例

条文を表現するプログラムはメソッド・オブジェクトとして記述され、各メソッド・オブジェクトは単一のデータに対応し、そのデータを計算するメソッドを所有する。メソッド・オブジェクトは、要件；ある他のデータを決定するために必要な決定要素；および部材のクラス分けを行う分類、の3種類がある。メソッドは、以下に示すオブジェクト・ロジック文で記述される。

$A :- C_1, C_2, \dots, C_n$ . または、 $A$ .

ここに、 $A$  は結論で、 $Method(Term_1, Term_2, \dots, Term_m)$ の形式である。 $C_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) は条件で、 $Mem::Method \leftarrow Message$  または  $self \leftarrow Message$  の形式または、算術式である。 $Term$  は定数、変数、または関数で、 $Message$  は  $A$  と同形式である。 $:-$  は、右辺が正しければ左辺は正しいの意で、 $\leftarrow$  は、右辺の  $Message$  が左辺の  $Method$  または自分自身を表す  $self$  に送られる (パスされる) の意である。

部材オブジェクトが与えられると論理学の導出原理が推論エンジンとして働いて、照査の結果を導く。メソッド・オブジェクトの一例として、柱の弱軸 (y 軸) 回りの非弾性座屈の要件を図-4 に示す。

```
open_object req_short_non_slender_y_comp_mem.

super = requirements.
class = short_non_slender_y_comp_mem.
provision = 'E2'.
reference = [pn_short_y,
            attr(load_comp)].
meaning = 'requirement for a non-slender compression
          member which y-axis inelastic buckling governs'.

req_short_non_slender_y_comp_mem(Mem, satisfied, Id) :-
  Mem:pn_short_y <- pn_short_y(Mem, Pn, Id),
  DS is 0.85 * Pn,
  self <- input_attr(Mem, load_comp, 1000),
  Mem:egless <- egless(Mem::load_comp, DS),
  self <- respond_satisfied.

req_short_non_slender_y_comp_mem(Mem, violated, Id) :-
  Mem:pn_short_y <- pn_short_y(Mem, Pn, Id),
  DS is 0.85 * Pn,
  not(Mem:egless <- egless(Mem::load_comp, DS)),
  self <- respond_violated.

close_object req_short_non_slender_y_comp_mem.
```

図-4 要件のメソッド・オブジェクトの例

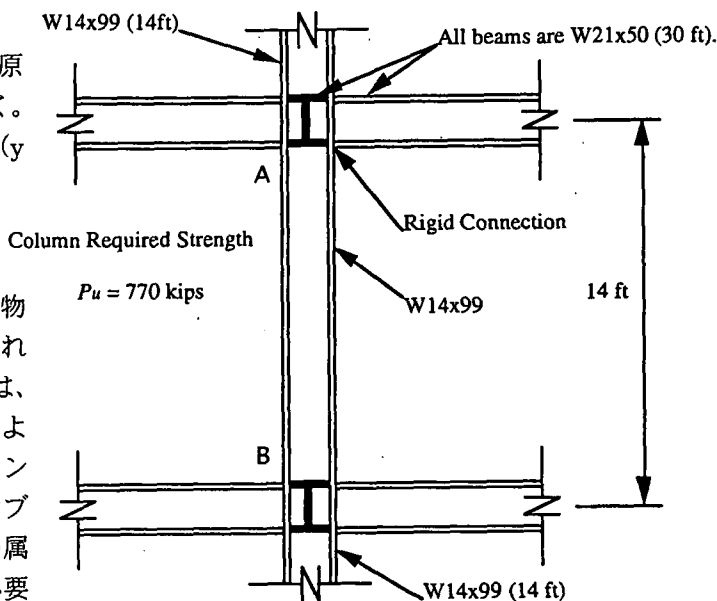


図-5 設計照査を行う柱 (column\_25)

(2) 部材オブジェクト定義モジュール

梁や柱等の設計部材のオブジェクトは、部材の物性や寸法といった属性とユーザーによって与えられる外部拘束条件によって構成される。本モデルでは、部材は鋼製柱、鋼製梁、鉄筋コンクリート梁等によって構成される階層ツリーのノード・クラスのインスタンス (オブジェクト) として定義される。オブジェクト指向の継承機能により、上位のクラスの属性はそのままオブジェクトに継承され、さらに必要な属性はその都度加えられる。一例として、ある構造物の中で column\_25 という名前を持つ柱 (図-5) の属性を図-6 に示す。

CAD 環境では、設計部材オブジェクトの属性情報は、3次元 CAD システムと連動するリレーショナル・データベースまたはオブジェクト指向データベースに蓄えることが出来る。部材オブジェクトの属性情報は、適当なインターフェースにより、こうしたデータベースから自動的に得られる。

(3) 設計照査モジュール

設計照査とは、設計した部材が設計基準で規定されている全ての適合する要件を満足しているか評価することである。本モジュールでは、部材オブジェクト定義モジュールを起動して、部材を定義し、システムは基準構成階層ツリーをたどりながら部材オ

Defining Compression Member  
Member Name : column\_25

Attribute	Value	Default	Unit
elastic_modulus	is 29000.	% 29000	ksi
shear_modulus	is 11000.	% 11000	ksi
yield_stress	is 36.	% 36	ksi
unbraced_length_x	is 168.	% 120	in
unbraced_length_y	is 168.	% 120	in
effective_length_factor_x	is unknown.	% 1	
effective_length_factor_y	is unknown.	% 1	
shape	= wshape.		
load_comp	is 720.	% 300	kips

図-6 柱 (column\_25) の属性データ

プロジェクトが適合する全ての要件を選択し、実行して、ユーザーにその結果を設計照査レポートとして提示する。

例えば、先の柱 column\_25 の例では、図-7 に示すように4つの適合する要件のうち1つは不満足で、残りは満足となった。

#### (4) 自動部材設計モジュール

設計は複数の回答が存在するので、通常は試行錯誤により最適な設計に到達する。本モデルでは、ヒューリスティクスを用いてまず正解に最も近いと思われる部材の設計を行い、その照査を行うという generate-and-test の手法を用いている。設計のヒューリスティクスは、適当な要件によって支配される一つのタイプの部材グループに適応する設計手法であり、そうした知識や周辺処理機能は、設計基準の内容とは明確に区別し、別モジュールとして開発することにより、システム全体の保守管理をしやすいとした。本モジュールはオブジェクト・ロジック文で記述される。

#### (5) 設計基準文書ベース

文章のみならず、図、表、グラフ等、条文を各々ハイパードキュメント・ファイルとして登録する。表、図、グラフもそれぞれ一つのファイルとして登録する。条文間の参照はハイパーリンクとして表現するとともに、設計基準ベースのプログラムと条文ファイルにも相互にハイパーリンクをはるようになる。これにより、照査によって満足されなかった条文があった場合は、図-7 に示すボタンをクリックすることにより、ユーザーが対応する条文を読むことが可能となる(図-8)。また、逆に条文から対応するプログラムを起動することも可能となる。

設計基準ベースの基準構成階層ツリーと設計基準文書ベースの目次は同構造を持つようにする。これにより、両ベースが統合化される。

#### (6) 外部文書ベース

設計基準が参照している他の設計基準の文書ベースや条文の解説や関連する文献等、基準の背後にある大量の情報もハイパードキュメント・ファイルとしてコンピュータ内に配置され、設計基準文書ベースからユーザーはハイパーリンクを介して自由に参照できる。

例えば、柱の設計照査を行う際、有効長さを求めるためには、係数  $K$  を求めることを考える。AISC の LRFD 設計基準には、両端の固定条件から  $K$  を求

めるグラフがあるが、非弾性座屈が支配的な場合は、他の論文を参照せよと記載されている。そのような時、設計基準の解説の中で参照されている文献<sup>13)</sup>の番号をクリックすれば、図-9 に示すように容易に画面上で読むことが出来る。

#### (7) ナビゲーション・モジュール

ナビゲーション・モジュールはハイパードキュメント・ファイルの検索を容易にするシステムで、ハイパーリンク、キーワード検索、全体あるいは部分を眺めるブラウザーの3つの基本的なナビゲーション機能を提供する(図-10)。

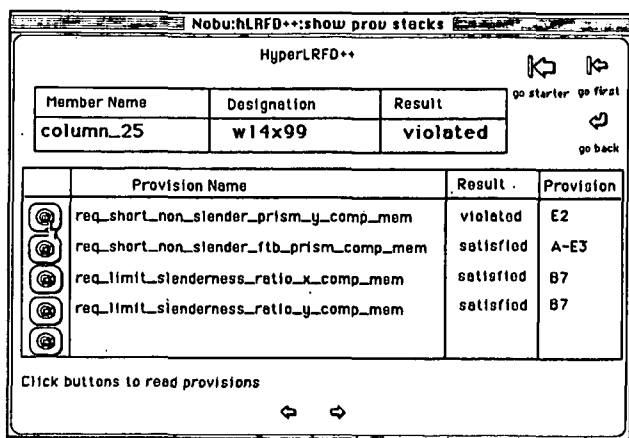


図-7 柱 (column\_25) の照査結果

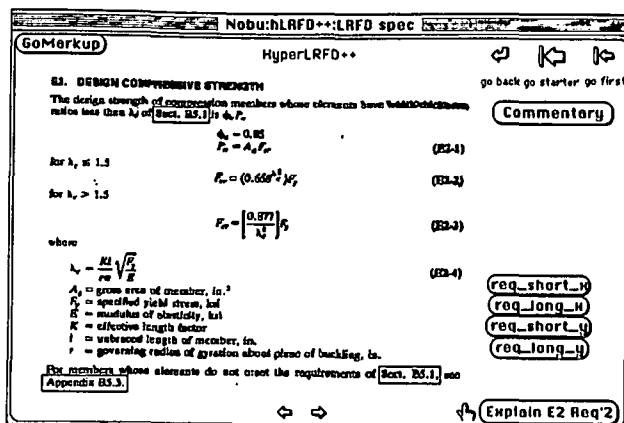


図-8 不満足だった条文 E2 の表示

れたとしても、システム間のデータを誤りなく、スムーズに行うためには、CORBA (Common Object Request Broker Architecture) のような標準化したルールを順守する必要がある。

また、参照される基準のプログラムが改訂され、ネットワーク上のアドレスやプログラムの引数が変わった場合はどのように対応するかは、今後の課題である。ネットワーク上を移動しながら、リンク先の変化の情報を管理者やユーザーに伝えるエージェントが有効だと考えられる。

本論で記したプロトタイプ・システムは Macintosh 上で作成したものであるが、Windows パーソナル・コンピュータ上においても開発している。その際、ハイパードキュメント・モデルのシステム化においては、モデルそのものとは若干異なるが、インターネット上での利用を前提に HTML (HyperText Markup Language) を利用した。また、XML (eXtensible Markup Language) の利用も検討している。

設計基準は、国、構造物、対象とする範囲等によって性質が大きく異なる。本来は全て同一の理論的モデルで表現されるべきだが、文章のような言葉がほとんどで、曖昧な記述しかされていないような基準へ適用し、実証していく必要がある。本論では汎用性の高いオブジェクト・ロジック文を用いて、条文をプログラム化する方法を採用したが、プログラミングの効率性や保守性を考慮すると、設計基準に特化したプログラム言語あるいは言語仕様を検討すべきだと考えられる。

最後に、本モデルでは条文の照査の結果は、満足と不満足のみしか想定していないが、両者の間にある「望ましくない」や「避けるべき」といった曖昧な評価を含む条文をどう扱うか、さらに、より高度な概念や解析手法により設計基準は満足しないが性能は保証出来るといった止揚する場合の対応等、今後の検討課題だと考えられる。

参考文献

- 1) Fennes, S. J.: Tabular Decision Logic for Structural Design, *Journal of the Structural Division*, Proc. of ASCE, Vol. 92, No. ST6, pp. 473-490, 1966.
- 2) Fennes, S. J., Wright, R. N., Stahl, F. I., and Reed, K. A.: Introduction to SASE : Standards Analysis, Synthesis, and Expression, National Bureau of Standards, Report No. NBSIR 87-3513, 1987.
- 3) Rosenman, M.A. and Gero, J.S.: Design Codes as

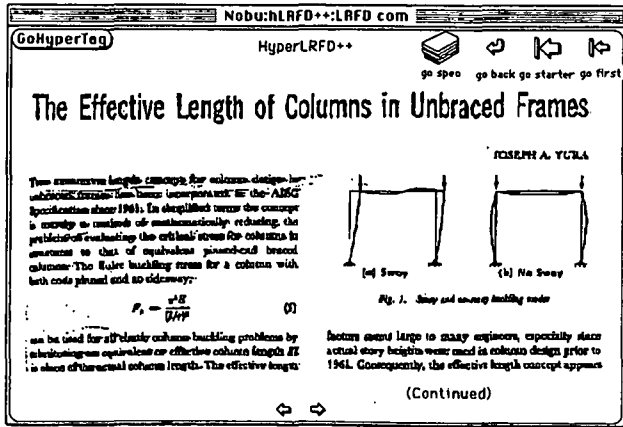


図-9 設計基準の解説から参照された文献

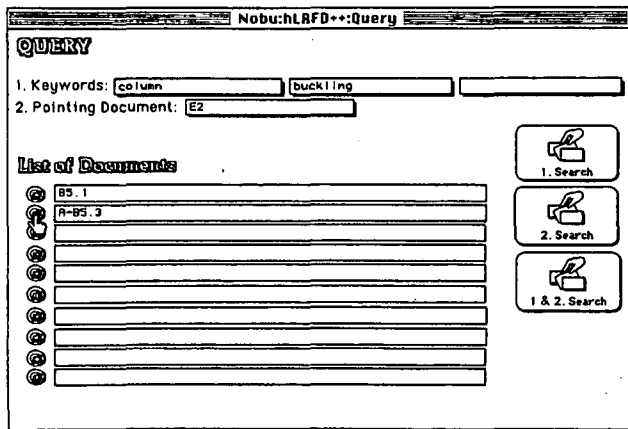


図-10 検索用画面および参照条文等のリスト

4. おわりに

本論では、設計基準をコンピュータ化するための理論的モデルに関する研究のレビューおよび評価をし、ハイパー・オブジェクト・ロジック・モデルおよびそのプロトタイプ・システムについて述べた。本モデルは、鋼構造物の部材の設計基準には適用可能であることが示されたが、今後以下の観点からさらなる改良が必要だと考えられる。

設計基準は1冊で閉じた世界ではなく、他の設計基準を参照し、そこからデータを引用したり、数値処理も行ったりする場合が多い。参照されている基準はさらに別の基準を参照していることがある。他の基準も同じモデルに基づいてプログラムが開発さ

Expert Systems, *Computer-Aided Design*, Vol. 17, No. 9, pp. 399-409, 1985.

- 4) Garrett, Jr., J. H. and Fenves, S. J.: A Knowledge-Based Structural Component Design, Report No. R-86-157, Dept. of Civil Engineering, Carnegie-Mellon University, 1986.
- 5) Rasdorf, W. J. and Lakmazaheri, S.: A Logic Based Approach for Processing Design Standards, *International Journal of Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol. 4, No. 3, pp. 179-192, 1990.
- 6) Yabuki, N. and Law, K. H.: An Object-Logic Model for the Representation and Processing of Design Standards, *Engineering with Computers*, Springer-Verlag, Vol. 9, No. 9, pp. 133-159, 1993.
- 7) Cornick, S. M.: HyperCode: The Building Code as a Hyperdocument, *Engineering with Computers*, Vol. 7, No. 1, 1991.
- 8) 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.
- 9) Clifton, C. and Garcia-Molina, H.: Distributed Processing of Filtering Queries in HyperFile, Technical Report No. CS-TR-295-90, Dept. of Computer Science, Princeton University, 1990.
- 10) Yabuki, N.: An Integrated Framework for Design Standards Processing, Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Stanford University, 1992.
- 11) Manual of Steel Construction – Load & Resistance Factor Design, Second Ed., American Institute of Steel Construction, Inc., 1993.
- 12) Moss, R.: Prolog++: The Power of Object-Oriented and Logic Programming, Addison-Wesley, 1994.
- 13) Yura, J. A.: The Effective Length of Columns in Unbraced Frames, *Engineering Journal*, Vol. 8, No. 2, pp. 37-42, 1971.