

自動設計とチェックシステム

山田 善一*・高久 達将**
和田 匡史***・前田 武夫****

1. 概要

コンピュータの発展に伴い、構造物の設計の自動化の度合いは強まるばかりである。すべての構造物はなんらかの規約を受けて設計されている。したがって、設計の自動化を行うとき、この規約をいかに上手に取り上げ、機械処理していくかが重要な課題となる。ここでは、その規約（設計示方書、設計規準、設計指針等）の持つ制約条件をわかりやすく表現する手法としてデシジョン・テーブルの紹介を行い、さらに機械処理上の手法について述べる。

自動設計の進歩に伴い、そのチェック業務の自動化も同時に発展させなければならない。急速に、しかも大量に自動的に設計されたものは、もはや人間のチェックの限界外にある。チェック業務の煩雑さについては、各人内心思いながらも、その必要性、システムとしての体系づけを明確に打ち出していない。ここでは、自動設計に対するチェックシステムの関係のみならず、チェックシステムのあり方について考察を加えてみた。

なお、本文は最適自動設計小委員会（関西道路研究会道路橋調査研究小委員会）内で行ってきた活動の成果の一部である。

2. 設計示方書の処理とデシジョン・テーブル

(1) 自動設計とその方向

構造物の設計は、それぞれの構造物に対して決められ

た設計示方書、設計規準、設計指針などに従って行われている。これらには、それぞれの構造物の設計に必要な条件、いわゆる制約条件が示されているが、それらの条件はきわめて多くの数にのぼり、また、設計で扱う設計諸量の数も、一般には、さらに多いのが普通である。構造物設計の過程は、次のように分類することができる。

① 計画、構造物形式の決定 (Planning, Decision of Geometry)

② 解析 (Analysis)

③ 寸法の決定 (Sizing of Components)

④ 制約条件のチェック (Checking of Constraints)

第一の計画段階では、構造物の配置、形状、断面等の決定または仮定を行う。

第二の解析は、構造物のモデル化、解析方法、外力の仮定などにより、構造力学、構造解析学などの分野に含まれる問題であり工学基礎科学 (Engineering Science) の分野に属する。

第三の寸法の決定は、設計の優劣を支配する最も大きい要素であり、上記の解析結果に従って構造物の寸法を決定するのであるが、例えば Fully Stressed Design であるとか、Minimum Weight Design であるとかなどの、設計の考え方により、かなり異なった構造物になる。

第四の設計制約条件に対するチェックは、上記方式によって決定された寸法をチェックするもので、制約条件を満足しないならば、解析あるいは寸法決定の段階から設計が繰り返されねばならない。

上記の設計過程を自動化するとき、現在われわれは次の2つのプログラムレベルを考えている。

㉔ 解析プログラム

㉕ 断面決定プログラム

自動設計の完成された姿としては、両者は一体構造として考えられるべきであるが、開発発展途上の姿として機能的分類がなされている。Integrated System である ICES¹⁾では、STRUDL I, BRIDGE のサブシステムで両者の結合を考えているが、実用面での成功は聞かれな

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科 (最適自動設計委員会委員長)

** 正会員 日本鋼管(株)第二重工設計部 土木設計室 係長 (最適自動設計委員会委員)

*** 正会員 滝上工業(株)設計部第二設計課 (最適自動設計委員会委員)

**** 正会員 (株)宮地鉄工所開発本部長大橋開発部 (最適自動設計委員会委員)

い。データの生成、受け渡し構造等、システム設計上非常に難しい問題を含んでいる。

解析プログラムは、諸外国の例をみると現在、汎用性を考慮した大型化の傾向にある。STRUDL II, ASKA, NASTRAN²⁾などがこの例である。

1973年11月開催された「有限要素法(FEM)による解析」に関する、東京セミナーの席上、ブラウン大学のP.V. Marcal教授は、汎用プログラム(FEMに関する)で要求されるシステム設計上の基本項目を次のようにあげている。

㉑ 構造物形状認識の機能 (Capability in handling structural geometry)

㉒ 構造物材料認識の機能 (Capability of dealing with materials)

㉓ 入力データのエラー検出の機能 (Capability for error control by numerical control)

㉔ グラフィック・ディスプレイへの結合機能 (Capability for graphics)

㉕ ユーザーによるプログラムの追加、修正が可能であること (Capability for further program addition and modification by user's)

㉖ プログラム開発者とユーザーとの意見交換が迅速に行われうること (Capability for rapid communication between user's and program developers)

以上のことは、FEMプログラム開発に限らずプログラムの汎用性を考えるとき、われわれが常に考えておかなければならない事項であろう。

一方、断面決定プログラムは狭義の意味で自動設計プログラムと呼ばれているもので、種々の制約条件のもとで構造物の寸法を決めていくものである。この過程は、高度な人間の判断(これが技術力の評価となる)を要するので、人間と機械との対話による Computer Aided Design (CAD) の考え方が有力である。設計の複雑性や日進月歩する技術力を考えるとき、プログラムに恒久性を与えるためにも、よい方法と考えられている。

さて、寸法の決定 (Sizing of Component) と制約条件のチェック (Checking of Constraints) とは関連が深い。したがって、両者のプロセスはそれぞれ独立に行われるよりも、同時に行われていることが多い。

ここでは、制約条件のチェックを明確に打ち出すことを提案しようとするものであるが、次に制約条件を形成している示方書の表現法として有効な、デシジョン・テーブル (Decision Table) の紹介を行う。

(2) デシジョン・テーブル

デシジョン・テーブルは、コンピューターを用いて種々の管理、決定、情報処理を行うのに広く用いられる方

法である。構造物の設計において、設計示方書をデシジョン・テーブルの形式にすることにより、設計における制約条件の記述を明確に行うことができる。この表現形式の歴史はかなり古く、一般的な参考書としては文献 4)、5) また構造設計への応用の参考文献としては文献 6) などがあげられる。

デシジョン・テーブルは、ある与えられた環境のもとでの論理的条件 (logical condition) に対してとるべき行動 (appropriate action) を表示したもので、表-1 のように4個の区分から成っている。

Condition Stub は、問題に含まれる論理的条件をリストしたものである。Condition Entry は Condition Stub に示された条件の組合せを示すもので、Y (YES), N (NO), I (Immaterial) の値で示されるのが普通である。Action Stub は、この問題で Condition Stub で示された条件によってとられる広い意味での行動 (action) が示され、Action Entry では、とられる特定の action が指示される。その例題を表-3 に示す。

エントリー (entry) が Y.N.I. (Condition Entry), X (Action Entry) のみで示されるものを limited entry と呼び、さらに広い entry の仕方として extended がある (表-2)。後者の場合、entry が明確に指示されている点、わかりやすい。

デシジョン・テーブルは、次の2つの使用に供される。

① 論理構成のドキュメンテーション。

表-1 デシジョン・テーブルの一般形式

Condition Stub	Condition Entry
Action Stub	Action Entry

表-2 Limited Entry と Extended Entry

(1) Limited Entry

Condition=A	Y	N	N	N
Condition=B	N	Y	N	N
Condition=C	N	N	Y	N

(2) Extended Entry

Condition=	A	B	C	other
------------	---	---	---	-------

表-3 デシジョン・テーブルの使用例

Rule	1	2	3	4
A IQ is 65-89 inclusive	Y	N	N	N
B IQ is 90-119 inclusive		Y	N	N
C IQ is 120-175 inclusive			Y	Y
D Grade Average above 86			Y	N
E Put in slow class	X			
F Put in regular class		X		X
G Put in exceptional class			X	

② コンピューターへの直接入力形式。

デジジョン・テーブルは、もともとコンピューター・プログラムに対する記述形式として考察されたものであるが、ドキュメンテーションの手法としても非常に有用である。その特徴は次のように要約できる。

Ⓐ 論理構成の二次元的表現である。したがって、一次元的表現法であるフローチャートと異なり表示が簡潔であり、論理条件の列挙が容易である。分岐条件の列挙に脱落、重複の誤りが少ない。

Ⓑ フローチャートによる論理性（アルゴリズム）のチェックは検視による以外に方策がないのに対し、デジジョン・テーブルでは互いに矛盾する論理、分岐条件の過不足の判定が可能である。

Ⓒ 修正、追加が容易である。

デジジョン・テーブルの特質は、一口にいえば、論理構成の二次元的表現である。これに対し、コンピューターの処理は一次元的であり、逐次処理である。したがって、デジジョン・テーブル形式で入力されたデータは、実行可能なように一次元への変換が必要である。この変換過程は種々の形式をとるが、コンピューターによる自動変換法としては、次の2つの方法が考えられている。

① プレコンパイラー (Precompiler) による処理形式

② 問題向け言語 (Problem Oriented Language) による処理形式

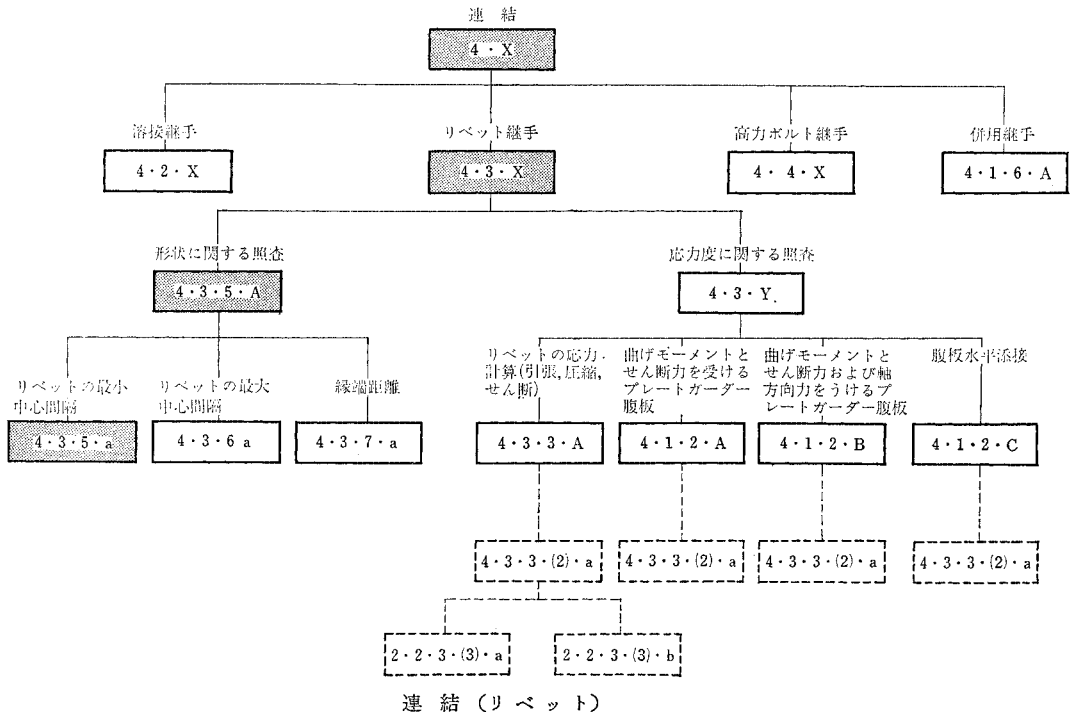
前者はデジジョン・テーブルを入力データとし、FORTRAN, COBOL, PL/I などのコンパイラー言語のステートメントを出力するものである。FORTRAN に対して、FORTAB, DLT (IBM), COBOL に対して DAT-AB-X, PL/I に対して PET などが有名である。一方後者の例としては、AISC (1967年版) のデジジョン・テーブル化に関するイリノイ大学の S.J. Fenves 教授らの研究⁷⁾があげられる。

(3) AISC のデジジョン・テーブル化の研究

この研究はアメリカ合衆国の AISC の委託研究としてイリノイ大学土木教室で試験的に行われ、1969年8月 AISC デジジョン・テーブル化計画の最終報告がなされている⁷⁾。その目的は、「示方書をデジジョン・テーブルの形に表わすと各条項の内容は理解しやすくなり、コンピューター・プログラムへの変換も容易になる。示方書条項が表形式に整理されているので、手計算での設計にも便利であり、さらに次の示方書の改訂の際にも役立つであろう」と述べられている。

ここでは、AISC のデジジョン・テーブル化を行うと同時に、その処理プログラムの作成も行っている。テーブルデータの読み込みから実行に至る経過、とくにデータの生成過程について、詳細なシステム設計を行っている。

AISC のまとめは、次の3つの表で整理しているのが



図一 道路橋示方書「リベット継手」に関するトリーチャート

特徴である。

① トリー・チャート (tree chart) : 示方書条項の互いの関係, 系列を世代別にまとめる。

② デジジョン・テーブル :

③ Switching Table; 示方書条項相互の関連づけを行うもので, 実行時の制御を行う。

④ Testing Table; 示方書条項の 規定を 満足するか否かを判定するテーブルで, 例えば “Spec 4. 3. 5 Satisfactory” の情報を打ち出す。

⑤ Working Table; Testing Table または上位の Working Table に必要な数値, あるいは論理データを作成する。

⑥ 参照表 (cross refence table) : 示方書条項とデジジョン・テーブルの橋渡しとなる対照表である。

(4) 道路橋示方書のデジジョン・テーブル化

最適自動設計小委員会 (前出) では, AISC のデジジョン

表-4 Table 4.X 連結

(1) 必要データ

溶接継手か	X	
リベット継手か	X	
高力ボルト継手か	X	
併用継手か	X	

(2) デジジョン・テーブル

溶接継手か	Y	N	N	N	E
リベット継手か	N	Y	N	N	
高力ボルト継手か	N	N	Y	N	
併用継手か	N	N	N	Y	
Table 4・2・X 実行	X				
Table 4・3・X 実行		X			
Table 4・4・X 実行			X		
Table 4・1・6 実行				X	
Else R1Rule					X

表-5 Table 4.3.X リベット継手

(1) 必要データ

形状に関する照査か	X	
応力度に関する照査か	X	

(2) デジジョン・テーブル

形状に関する照査か	Y	N	E
応力度に関する照査か	N	Y	
Table 4・3・5・A 実行	X		
Table 4・3・Y 実行		X	
Else Rule			X

ョン・テーブル化の研究の資料をもとに, 1971 年から道路橋示方書のデジジョン・テーブル化の仕事を行ってきた。その目的は AISC での目的と同じであるが, さらに後述するようなチェックシステムへの基礎となることにも力点を置いている。

ここでは, 参考例として, 道路橋示方書の「4.3 リベット継手」に関する条項のみを取り上げる (図-1, 表-4~7)。図-1 が全体のトリーチャートで, 表-4~7 がデジジョン・テーブルである。図-1 に示したトリーチャートに従い, 曲げモーメントとせん断力を受けるプレートガダー橋の腹板のリベット応力を照査する場合, 次のようにして行うことができる。

① 最初に Table 4.X をみる。これは「第4章連結」を総括する Switching table で, 例題の場合の条件コードは, Condition stab を参照すると

② 溶接継手か → NO ③ リベット継手か → YES

④ 高力ボルト継手か → NO ⑤ 併用継手か → NO

表-6 Table 4.3.5.A (Testing table)

(任意方向リベット中心間隔のチェック)

(1) 必要データ

変数名	内容	参照テーブル
Dist	リベット中心間隔 (mm)	
Dist A	許容最大リベット中心間隔 (mm)	D 4 350

(2) デジジョン・テーブル

Dist ≥ Dist A	Y	N
Satisfy C 4350	X	
Caution C 4350		X

注: サブルーチン名, C 4350 (Dist, Dist A).

表-7 Table 4.3.5 a (Working table)

リベットの最小中心間隔

(1) 必要データ

変数名	内容	参照テーブル
RD GRADE	リベットの呼び径 (mm) 示方書適用等級 { =1 (通常) =2 (特例)	C 4310

(2) デジジョン・テーブル

GRADE=1	Y	Y	Y	E
=2				Y
RD =25	Y			
=22		Y		
=19			Y	
85	X			
75		X		
65			X	
3・RD				X
Description Error				X

注: サブルーチン名 D 4350 (RD, GRADE).

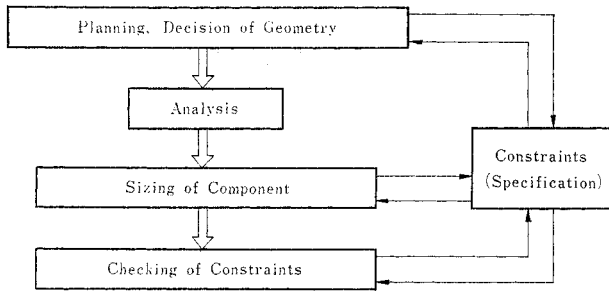


図-2 設計過程と制約条件

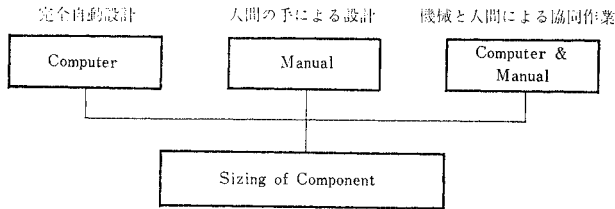


図-3 人間と機械による設計

すなわち、[NYNN]である。この条件コードはルール2の条件コードに一致しており、したがって、次に、Table 4.3.X を実行しなければならないことがわかる。

② Table 4.3.X はリベット継手に関する Switching table で、このテーブルでの例題に対する条件コードは[Y, N]であり、このコードはルール1に一致し、Table 4.3.5A を実行する。

③ Table 4.3.5A は Testing table で、Working table 4.3.5a を用いて示方書の照査を行う。

3. 自動設計とチェックシステム

(1) 自動設計とチェックシステムの関係

従来の自動設計プログラムでは、制約条件のチェック (Checking of Constraints) はその中に組み込まれた形で存在しており、寸法の決定 (Sizing of Component) と明確な区別がされていない。しかし、自動設計が高度に発達するに従い、チェックシステムの独立した確立が重要な問題となる。これは、民主主義社会における三権分立の司法権の独立に似ている。現在においては、まだ司法権としてのチェックシステムの必要性の意識は低いですが、今後の設計の自動化を考えると、明確にしておく問題と思われる。以下、自動設計との関係について言及してみたいと思う。

通常、構造物設計の過程は前節で述べたように4つの段階に分かれる。ここで、制約条件 (示方書) との関係を示すと図-2 のようになる。チェ

ックシステムの基本は、与えられた制約条件内で設計がなされているかどうかにある。

通常、設計は旧来の手法により手計算で、あるいは機械により自動的に、またはその両者の組合せで行われている (図-3)。

基本的には、設計諸量はいかなる過程を経て決められてもよい。極言すれば、経験的に計算なしで決めてもよい。最終的には設計諸量が示方書を満足していればよい。この意味でのチェックは、設計諸量の当然満足していなければならないという、機能性、安全性からみた下限値への評価である。

チェックシステムの全体的機能について言及するならば、次のつの機能を満足していることが必要である。

① 制約条件内からみた評価 (機能性、安全性からみた下限値のチェック)。

② 経済性からみた評価 (最適設計側からみた上限値のチェック)。

われわれが設計を行うとき、手計算であれ機械計算であれ、経済性を考えた最適設計を意識的に、あるいは無意識的に行っている。したがって、大部分の設計はバランスのとれた経済的な設計である。通常、われわれがチェックを行うのは、下限値のチェックのみである。しかし、さらに一步進めるならば、経済性のチェックも重要な意味を持つてくる。これは、単なる示方書に対する、YES, NO の判定以外に、提出された答案に対して点数をつけ、グレードを評価することを意味する。このグレードの評価は、構造物のもつ安全性、信頼性の評価につながると同時に、さらに次のような発展的機能を期待することができる。

① 自動設計 (Sizing of Component) への積極的利用 (Man-Machine System への利用)。

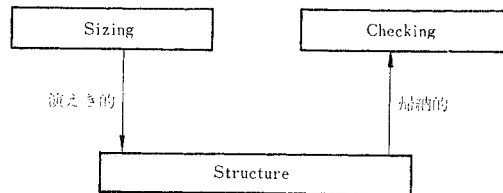


図-4 チェックシステムの論理性

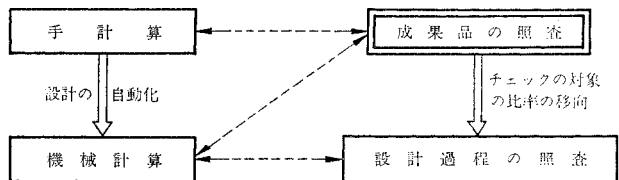


図-5 設計過程と成果品のチェック

② 部分的設計変更に対する評価への利用

一般に、われわれは、設計するとき設計計算書が先にあり、それを元に図面、その他が作成される。しかし、前述したように、断面を決めるためには、この過程を必ずしも通る必要はない。図面を描きながら、示方書を照査しながら設計していくことが可能である。すなわち、これが一般的にいわれている狭義の CAD としての利用法である。この場合、あらかじめ設定しておいた上限、下限値に入るように、若干の繰り返し作業が必要である。

次に、チェックシステムの持つ論理性について考えてみよう。一般に、チェックシステムは、自動設計に対して相反する論理構成を持たねばならない。これは、結論を導き出す過程の論理的相反性である。チェックそのものが出力される最終データの評価であると同時に、その生成過程へのチェックも含むからである。もし、両者ともに同じ論理構成なら、同じまちがいをおかす可能性があり、チェックシステムの独立性の意味がなくなってくる(図-4)。

(2) チェックシステムのあり方

現在のチェックは次の二者によっている。

- { 発注者側 (Inspector)
- { 設計者側 (Designer)

これをチェックする時期からみると、

- { 設計過程
- { 成果品

に分けられる。もし、設計の自動化が完全に(図面、材料表も含めて)なされているならば、その成果品に対するチェックは割愛することが可能である。これは、自動設計プログラムが完全に正しいものならば、その結果は完全に(局所的ではあるが)制約条件(示方書)を満足しているからである。したがって、チェックシステムとしては、次の2つの方法が考えられる。

- { 設計過程の照査(プログラム登録性)
- { 成果品のみ照査(結論のみのチェック)

最近、プログラムの登録性が盛んであるが、これは、通常、前述した設計過程における解析プログラムに限定されている。もし、すべての過程を含めた完全自動化の設計システムが完成されるならば、さらに、プログラム登録の範囲を拡張し、使用に供することが望ましい。広義のチェックシステムとして、最も望ましい形体であろう。

しかし、現実的には完全自動化への道は、非常に厳しい。単純な標準的構造を持つ構造物の設計の完全自動化はあり得ても、一般に今後、大部分の構造物はその形態をとり得ないであろう。もし、そこに若干人間の手が介入するならば、データの受け渡し過程で誤りが発生する

かもしれない。そういう意味では、プログラム登録性にも限界があり、全体的というより部分的である。

前述したように、設計作業の持つ複雑性からみて、設計業務とは高度の人間の判断業務であるという観点から人間が中間に介在する man-machine 方式の自動設計(CAD)の考え方が発展してきている。したがって、チェックシステムも、自動設計の方向に合わせて考えておくべきである。

設計過程がどのような形態をとるにしろ、最終成果品の照査が可能であることが基本である。図-5に示すように、機械化の比率が高まるに従い、その設計計算過程の照査(プログラムの登録)の比率を多くし、成果品に対する信頼性を高めていくことがチェックシステムとして望ましい形体であろう。

(8) サンプリングテストのためのチェックシステム

チェックシステムの基本は、その生成過程を問わない最終成果品に対するチェックにある。その成果品に対するチェックの一手法として、サンプリングテストの手法が有効である。いま、図-6に示されるようなプレートガーダー橋の添接板が道路橋示方書を満足しているかどうかを考えてみる。入力情報として、図形情報、使用材

設計外力が与えられたとする。このとき、前節で述べた添接に関するテーブル(図-1)に従い示方書の各条項に関するチェックが可能である。このとき、基本となるデジジョン・テーブルをもとにチェック専用のメインプログラムの作成が必要である。このようにしておくこと、任意の断面形状を必要数取り出しチェックすることが可能である。このような部材単位のチェックを複合化することにより、チェックシステムを体系づけることができる。

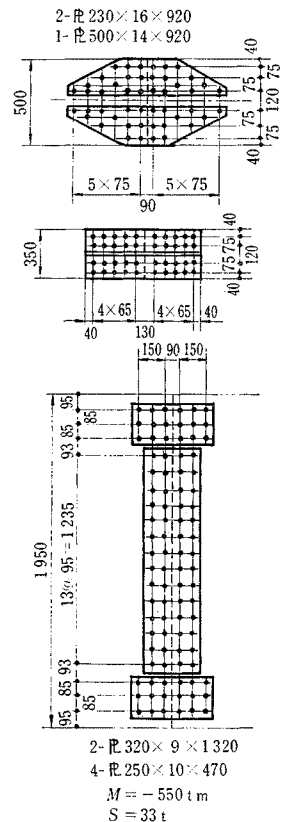


図-6 添接板

あとがき

構造物はもちろんの

こと、われわれ人間の行動までもがある社会的秩序の中に規定されている。われわれはこの規定（法）内での活動が許されている。ここでは、文章化された規定を機械化するときに生じる問題点を述べ、さらにその一手法としてデジジョン・テーブルの利用法、その有効性について検討を行った。

自動設計システムが高度に発展するに従い、相反する論理構成をもつチェックシステムの確立が必要である。これは、司法権の独立に似ている。この分野での機械化の方向は、これから非常に大きな比重を占めることにならう。これは、裁判所における法への適用にもあてはまるであろう。実際、コンピューター利用の分野で、法学の分野ほど、その利用面で立ち遅れているところはあるまい。コンピューターという小さい狭い独立した社会では、オペレーションシステム(OS)があり、そこでは監視プログラムと呼ばれるものが全体の秩序づけを行っている。

それはさておき、文章化された規定を機械化するには大変な労力を要する。当然、従来の規定はコンピューターによる再編集を念頭においてつくられていない。機械化が進むにつれ、その辺の見通しも当然なされてしかる

べきであろう。

示方書のコンピューターへの内蔵の問題とチェックシステムの必要性について検討を行ってきたが、その方面のこれからの発展に、本文が少しでも寄与することができれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) Jane C. Jordan : ICES Programmers Reference Manual, MIT, October 1967.
- 2) Caleb W. McCormick : The NASTRAN USER'S MANUAL, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., June 1972.
- 3) Proceedings of the 1973 Tokyo Seminar on Finite Element Analysis, pp. 585~596, University of Tokyo Press, November 1973.
- 4) McDaniel, H. : An Introduction to Decision Logic Tables, John Wiley, 1969.
- 5) Hughes, M. L., Shank, R. M., & Stein, E. S. : Decision Tables, MDI Publications, 1968.
- 6) Fenves, S. J. : Computer Methods in Civil Engineering, Prentice Hall, 1967.
- 7) Fenves, S. J., Gaylord, E. H. & Goel, S. K. : Decision Table Formulation of the 1969 AISC Specification, SRS No. 347, Univ. of Ill., Dep. of Civil Eng. 1969.
- 8) 日本道路協会 : 道路標示方書・同解説, 昭和43年2月。(1973.11.21・受付)

大学・高専向教科書・参考書

建設技術者のための

ボーリングポケットブック

社団法人全国地質調査業協会連合会編
(B 6・p. 370・¥2000・千140)

昭和41年地質調査技士試験を実施して以来、いままでに3,645名の合格者を世に送り出してきました。これらのフォアマンのかたがたの現場で実務に役立つ、わかりやすいポケットブックをつくってほしいという要望に応じて、連合会が編集したものです。岩盤ボーリングと軟弱地盤を対象とした土質ボーリングのどちらも含めて、フォアマンはもちろん、発注者のかたがた、地質調査に関連あるすべての人々の必携書として発刊されたものです。

大学課程 コンクリート工学(第2版)

日本セメント(株)研究所所長・工博 山田順治著 (A 5・p. 240・¥1500・千140)

土木学会のコンクリート示方書が近く改訂されますが、この改訂は本書の従来の内容に大きな変更はあまりありませんが、昨年コンクリートの規格が全面的に改訂され、新しい製造技術や新セメントの製造技術の急速な進歩がみられましたので、これらの部分は全面的に書き改め、従来にも増して教科書・参考書として適切な内容に改訂して第2版としました。

大学課程 土木構造力学

京都大学教授・工博 小西一郎 共著 (A 5・p. 250・¥1700・千140)
鳥取大学教授・工博 高岡宣善

構造力学は、橋梁・建築その他の土木建築構造物の構造計算の基礎となる大切な学科ですので、本書は構造力学の初歩を説くことに重点をおき、特に力学の「考え方」について詳述しています。さらに簡単な構造計算に必要な事項を十分網羅しています。

大学課程 橋梁工学(第2版)

東京大学名誉教授・工博 福田武雄 監修 (A 5・p. 306・¥1700・千140)
横河橋梁製作所常務取締役・工博 友永和夫

昭和42年初版発行以来、大学・高専で教科書として多数採用されてきました。近年、橋梁関係においてその理論、材料、製作技術、架設工法などが目覚しく進歩・発展しています。また示方書も改訂されました。本書は、この新示方書と橋梁技術の進展に対応して内容を一新すべく全面書き直しをし、「第2版」として出版するものです。

「価値ある本」創りつづけて60年



オーム社

101 東京都千代田区神田錦町 3
振替東京20018=電話(291)0912

橋梁工学別巻

大学課程 橋梁設計例

名古屋大学教授・工博 菊池洋一 共著
阪神高速道路公団 毎戸松二
(第2版) 5月下旬刊