

港湾防波堤等の最適設計

運輸省港湾技術研究所 正会員 山本修司

1. 緒言

数理計画法を用いた最適設計は特に構造設計の分野で発展し、現在では、部材の断面決定問題、形状決定問題及び両者を複合した問題の最適設計が可能となっており、種々の橋梁形式に対する実用的最適構造設計法が開発され、構造設計分野の最適設計は実用化の領域に達していると考えられる。

一方、港湾工学の分野においては、雑貨埠頭及びコンテナ埠頭の最適バース数及び荷役施設配置の決定に関し、待ち行列理論を適用した研究¹⁾やダイナミックプログラミングを適用した研究²⁾が行われてきた。しかし港湾構造物の最適設計に関しては、筆者の知る限りでは、ブロック式けい船岸の設計に非線形計画法を適用した研究³⁾や根入れ式鋼板セル護岸の最適設計に関する研究⁴⁾がなされている程度である。

このように港湾構造物の最適設計があまり進展をみていない理由としては、港湾の施設の技術上の基準⁵⁾が定められており、それに従えば従来の試行錯誤法によってもある程度満足できる「最適解」が得られるため、最適化手法を利用しても、顕著な利用効果が得られないと思われることが考えられる。その他、港湾構造物の設計における特別の事情としては以下の点が考えられる。

- 1) 波浪条件、土質条件等の設計条件が設置地点ごとに異なるうえ、石材の供給力や作業基地の条件等が構造形式に大きく左右するため構造設計がオーダメイド的なものとなる。
- 2) 港湾構造物に作用する波圧や土圧等の荷重は橋梁の活荷重のごとく一様に規定できないこと。特に、防波堤に作用する設計波圧は波高と水深の関係によっては急激に変化するため、最適化計算の過程において計算が困難になる場合が予想される。

本研究は、ケーソン式混成堤の工費最小化を目的とした最適化プログラムを作成のうえ、設計条件と工費の相互関係を明らかにするとともに、汎用的最適化アプリケーションプログラムであるADS⁷⁾を港湾工学の各種最適化問題に適用した事例を報告するものである。

なお、ADSの構成はStrategy、Optimizer、one-dimensional、searchの3つの基本部分からなっている。利用者はパラメーターを指示することによって、問題に応じた最適化手法を構築することができ、約100種類の組み合わせが可能である。ペナルティーパラメーター、収束の判定条件等の内部パラメーターの値は自動的に設定されるが、その一部を利用者が希望する値に変更することもできる。また、目的関数、制約条件式等の微係数(感度解析)の値は、利用者が解析的に与えることができるし、ADS内部で自動的に差分法で求めることもできる。

2. 港湾における最適化手法の応用

港湾計画、港湾構造物の設計・施工において最適化手法の適用が考えられる問題を列記すると表-1のとおりである。これらは、必ずしも工費のみで決定されるものではないが、最適化手法の適用により、合理的な計画、設計が可能となる問題である。

表-1 最適化手法の適用が考えられる問題

施設または工事	最適化の内容
防波堤	①所要の静穏度を満足し、工費が最小となる防波堤の配置計画。 ②各種防波堤の最適設計
係船岸	①さん橋、ドルフィン等の杭構造の杭配置と杭諸元 ②ケーソン式係船岸、セルラブロック式係船岸、ブロック式係船岸の最適形状 ③鋼矢板セル式及び鋼板セル式係船岸のセル径、根入れ長、セル肉厚の決定。
航路・泊地 その他	④所要のけん引力を有する係船浮標の沈鍾、沈鍾鎖、浮体の最適構成。 ①所要の静穏度を満足し、面積が最大となる航路・泊地の配置計画 ①土圧が最小となる裏込材の材質と構成（内部摩擦角 ϕ と高さ）。 ②コストが最小となるプレキャスト部材の配筋設計（有効高さ、鉄筋量）。 ③サンドドレーン工事において、所要の圧密度、圧密期間、目標強度増加量を満足し、工費が最小となるドレーンパイルの径と配置間隔及び盛土高の計画。 ④所要の安全率を満足し、工費が最小となる盛土材の構成。 ⑤維持管理費が最小となる鋼構造物の電気防食の計画（腐食代、電気防食期間、塗覆装厚）。

3. 最適化問題の定式化

最適化設計問題は次のように定式化できる。

$$\left. \begin{aligned}
 \text{目的関数} & : F(x) \rightarrow \min \\
 \text{制約条件式} & : G_j(x) \leq 0 \quad (j=1 \sim m) \\
 & x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \\
 \text{設計変数} & : x = [x_1, x_2, \dots, x_n]
 \end{aligned} \right\} (1)$$

ただし、設計変数は連続量であり、目的関数および制約条件式は x に関して連続である。

以下に示す適用例において、ケーソン式混成堤の最適設計では、独自に作成したSUMT (Sequential Unconstrained Minimization Technique) を用いた。その際、極値探索法は、可変計量法とPowellのDirect-Search法の2種類を選択可能とし、1次元探索法は2次多項式による近似法を用いた。また、その他の適用例については、前述のADSを利用した。

表-2 制約条件

4. 適用例

1) ケーソン式混成堤

ケーソン式混成堤の最適設計では、工費に与える影響が大きいと考えられる捨石マウンド厚 x_1 、ケーソンの法線直角方向長 x_2 、港内側マウンドのり肩幅 x_3 、ケーソンのフーチング長 x_4 、ケーソンの法線平行方向長 x_5 を設計変数とする（図-1参照）。目的関数は防波堤法線方向1mあたりの工費とする。

また、制約条件を表-2に示す。 $G_j(X)$ 、 $F(X)$ は X に関して非線形であるため、本問題は典型的な非線形計画法の問題である。

設計波高と工費の関係を図-2に、設計波高と最適断面形状の関係を図-3に示す。

項目	設計制約
直立部滑動安全率	≥ 1.2
直立部転倒安全率	≥ 1.2
偏心傾斜荷重に対する安全率	≥ 1.0
許容底面反力*	$\leq 50.0 \text{ tf/m}^2$
基礎地盤支持力安全率*	≥ 1.0
直線すべり安全率*	≥ 1.2
ケーソン浮遊時の安定条件**	$\overline{GM} \geq 0.05D$
ケーソンの最大空中重量	$W_c \leq W_{c_{max}}$
ケーソンすえ付け時余裕水深	$\geq 1.0 \text{ m}$

*最近の設計法では必ずしも必要ない。

** \overline{GM} : ケーソンの重心と傾心の距離, D : 喫水,

$W_{c_{max}}$: ケーソンの最大空中重量

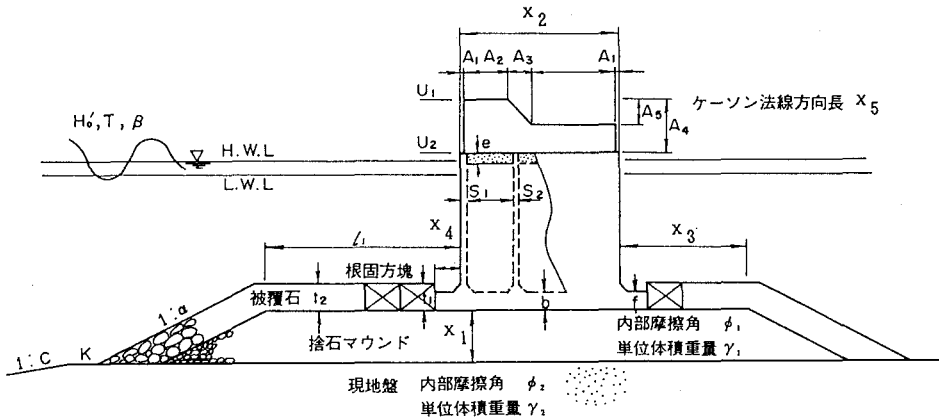


図-1 ケーソン式混成堤の断面諸元

最適解と設計条件については以下の傾向がある。

(1) 水深が浅く、波高が小さい場合には、ほとんどの場合滑動に対する制約条件がアクティブな制約条件となり、水深が深く、波高が大きい場合には、捨石マウンドの許容支持力がアクティブな制約条件となっている。その他の場合には、偏心傾斜荷重に対する安定条件がアクティブな制約条件となる傾向にある。

(2) 捨石マウンド厚については、波高の大小にあまり関係せずに、水深が -20 m 以上の場合、水深にほぼ比例して、捨石マウンド厚が大きくなる傾向にある。本計算例の範囲では捨石マウンド上の水深が -16 m ～ -18 m となるようなマウンド厚が最適解となっている。すなわち、捨石の許容支持力が 50 t f/m^2 程度で、かつケーソン製作単価と捨石単価の比が $10:1$ 程度の場合、捨石マウンドの天端高を水深 -16 m ～ -18 m とすることが経済的と考えられる。

(3) ケーソン幅については、設計波高が大きくなるに従って、堤体幅が大きくなるが、水深が波高に比べて大きい領域では、増加率が減少する傾向にある。これは、波高に比べて水深が大きい領域では、波の碎波変形の影響が小さいので、堤体幅を決定する最大波高 H_{max} (ほぼ $1.8H_0$) が水深の変化にかかわらずほぼ同程度となり、かつ前述のとおり捨石マウンド上の水深がほぼ一定となる傾向があるため、防波堤に作用する波圧の合力が同程度となる領域が存在するためである。

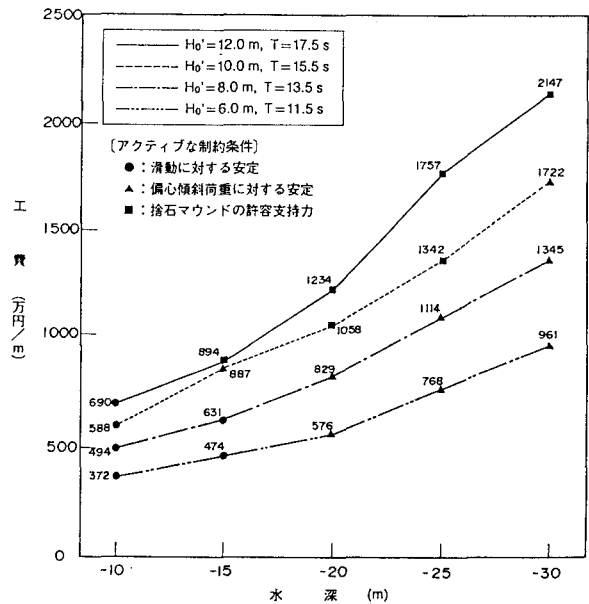


図-2 ケーソン式混成堤の設計波高と工費の関係

(4) マウンドのり肩幅については、全てのケースについて、下限値 (= 5.0 m) 付近で最適解が求まっている。のり肩幅を規定する制約条件は、偏心傾斜荷重に対する安定条件のみであるので、現地盤の内部摩擦角が 30° 程度 (ビショップ法を用いる場合の内部摩擦角 $\phi = 40^\circ$) の場合には、本制約条件の検討は必要ないといえる。

(5) 水深が浅く、波高が小さい場合には、フーチングは必要ないか、設けるとしても 1 m 程度が経済的である。水深が深い場合には、フーチング長が大きい方が有利であり、一概には言えないが 2~3 m 程度のフーチングを持つ断面が得られる。

2) 防波堤配置計画

所要の港内波高比、泊地面積及び港口幅を満足し、延長が最小となる防波堤の配置を検討する。簡便化のために、水深は一定とし、図-4に示す3本の直線で構成される防波堤を考える。外海から港口に到達した

波は、その一部は防波堤により反射されるが、港口から侵入した波は回折波として港奥へ浸入する。回折波の計算には、波の周期及び方向分散の不規則性を考慮した手法が通常用いられるが、ここでは簡便ながら実用的にも十分な精度を有する方向分散法を用いることとする。

設計変数：防波堤法線座標 $(0, y_1)$, (x_2, y_2) , $(1000, y_4)$

制約条件：点Pの回折係数 $K_D \leq 0.2$. . . (2)

港口幅 $L_E \geq 400$ m . . . (3)

泊地面積 $A \geq 8 \times 10^5$ m^2 . . . (4)

目的関数：防波堤全延長 L_B

$$L = y_1 + \sqrt{x_1^2 + (y_2 - y_1)^2} + y_4 \rightarrow \min \quad \dots (5)$$

本適用例では、上記の制約条件式がほとんど同時にクリティカルとなっている。

3) ドルフィン杭基礎の最小重量設計

鋼管杭の許容応力度 σ_{sa} 、杭の根入の安全率 f_s 、許容水平変位 u 及び杭の配置が与えられた場合に、図-5に示すドルフィンの鋼管杭の総容積 V が最小となる杭諸元を求める。

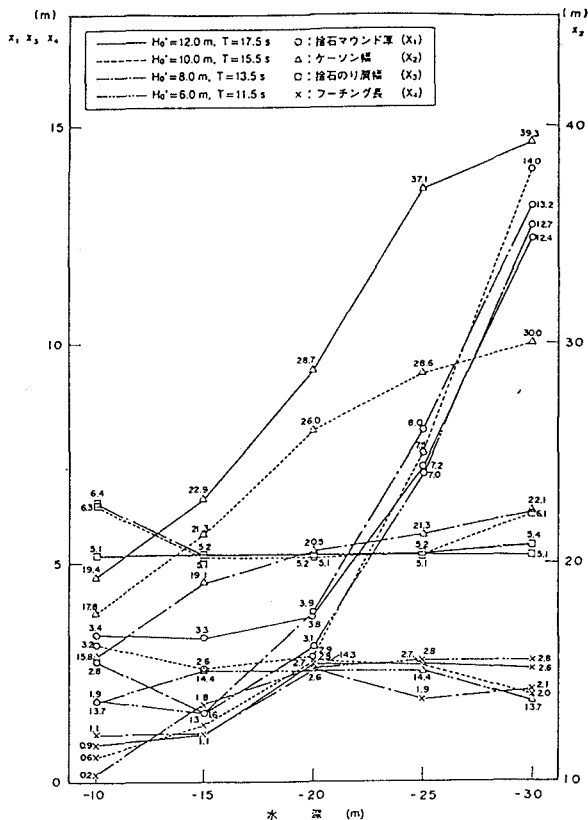


図-3 設計波高と最適断面形状

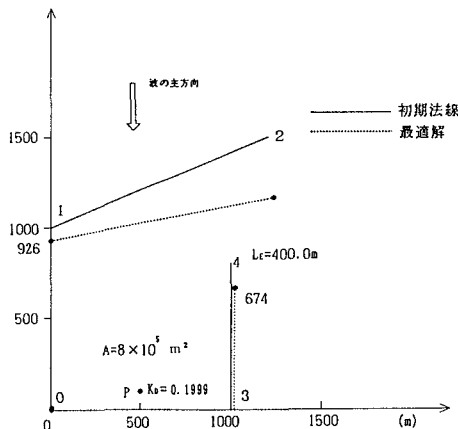


図-4 最適化の計算結果

設計変数：鋼管杭の径 D_1 肉厚 t_1 及び鋼管長 L_1

図-5の場合、杭の配置の対称性を考慮すると全設計変数は24となる。

制約条件：上部工の許容水平変位を5cm以内とすると

$$u \leq 0.05 \quad \dots (6)$$

杭頭部の応力度に関する制約条件として次式を用いる。

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}} \leq 1.0 \quad \dots (7)$$

ここに、

σ_c ：軸方向圧縮応力度

σ_b ：曲げモーメントによる最大圧縮応力度

σ_{ca} ：細長比を考慮した許容軸方向圧縮応力度

σ_{ba} ：許容曲げ圧縮応力度 (1900kgf/cm²)

根入れに関する安全率 f_1 を2.5以上とする。

$$f_1 \geq 2.5 \quad \dots (8)$$

設計変数 D_1 及び t_1 の側面制約条件

$$0.4 \leq D_1 \leq 2.0 \quad (\text{m})$$

$$0.006 \leq t_1 \leq 0.04 \quad (\text{m})$$

目的関数：鋼管杭の鉄の実容積 V を最小にする。

$$V = \sum_{i=1}^8 \pi t_1 (D_1 - t_1) L_1 \rightarrow \min \quad \dots (10)$$

最適化手法としては、表-3に示す手法の組み合わせを用いた。

表-3 最適化手法

ケース	変換法	最適値探索法	一次元探索法
CASE-1	無変換	可能方向法	囲い込み法と多項式近似
CASE-2	SLP	同上	同上
CASE-3	一次拡張内部罰金関数法	DFP法	同上

数値計算結果を表-4に示す。

表-4 ドルフィン計算結果

	V (m ³)	D_1 t_1 L_1 (cm) (cm) (m)	D_2 t_2 L_2 (cm) (cm) (m)	D_3 t_3 L_3 (cm) (cm) (m)
CASE-1	5.615	92.1, 0.6, 31.0	40.3, 0.6, 39.4	40.0, 0.61, 29.6
CASE-2	5.801	92.4, 0.6, 31.0	41.3, 0.69, 41.6	40.0, 0.6, 30.6
CASE-3	5.468	112.2, 0.6, 32.0	40.0, 0.6, 36.3	40.0, 0.6, 28.7

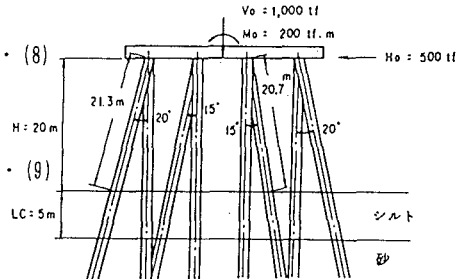
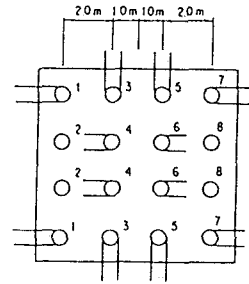


図-5 ドルフィン杭基礎

D_4 t_4 L_4 (cm) (cm) (m)	D_5 t_5 L_5 (cm) (cm) (m)	D_6 t_6 L_6 (cm) (cm) (m)	D_7 t_7 L_7 (cm) (cm) (m)	D_8 t_8 L_8 (cm) (cm) (m)
114.2, 2.1, 34.6	40.0, 0.6, 26.6	80.7, 0.6, 44.6	40.0, 0.6, 44.0	112.9, 8.0, 29.7
127.0, 2.0, 35.1	40.0, 0.6, 26.6	44.7, 0.8, 54.1	40.0, 0.6, 46.0	114.0, 8.0, 29.8
136.6, 1.5, 34.7	40.0, 0.6, 26.7	61.3, 0.6, 45.7	40.0, 0.6, 46.9	155.0, 7.3, 31.1

3種類の最適化手法において、アクティブな制約条件は、CASE-1の場合は杭-4の許容応力に関する制約であり、CASE-2の場合は上部工の水平変位に関する制約条件であり、CASE-3の場合は杭-8の許容応力に関する制約条件であった。目的関数である鋼管杭の容積にも多少のバラツキが見られる。以上のことから、ドルフィンのような高次の不静定構造物の最小重量設計を行う場合には、局所的な極値を求める場合があるので、初期値を慎重に検討するとともに、複数の最適化手法を用いて解析することが望ましいといえる。

4) バーチカルドレーンの配置

所要の平均圧密度 U 、圧密期間 t が与えられた場合に、工費が最小となるバーチカルドレーンの半径 r_w と有効半径 r_e を求める。

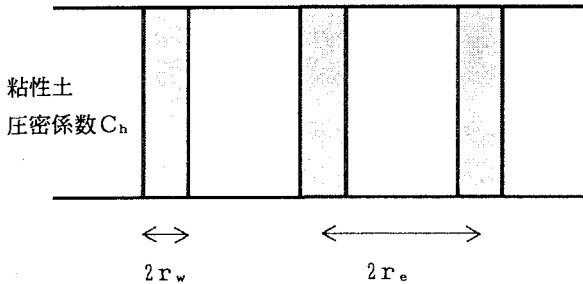


図-6 バーチカルドレーン

設計変数: r_w, r_e

制約条件: $U \geq 0.8$. . . (12)

ここに、 $U = 1 - \exp \left\{ - \frac{2 C_h t}{r_e^2 F(n)} \right\}$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \log n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

$$n = \frac{r_e}{r_w}$$

$$0.05 \leq r_w \leq 1.0 \quad (\text{m}) \quad \dots (13)$$

$$0.5 \leq r_e \leq 5 \quad (\text{m}) \quad \dots (14)$$

目的関数：単位面積あたりのドレーン打設本数を m ，打設単価を C_D ，ドレーン材の単価を C_S とすると，工費は次式の形で表される。

$$C = m (C_D + C_S \pi r_w^2)$$

$$= \frac{1}{\pi r_e^2} (C_D + C_S \pi r_w^2) \quad \dots (15)$$

最適値探索法として可能方向法を，1次元探索法として囲い込み法と多項式近似による補間法との併用法を用いる。 $C_D=10000$ 円/ m^2 ， $C_S=1000$ 円/ m^2 として計算した結果， $r_w=1.0m$ ， $r_e=1.844$ m， $C=1229$ 円/ m^2 の最適解を得る。本例の場合， C_D と C_S の差が大きいことと n が小さいほど圧密が促進されるため， r_w が制限条件の上限の値となっている。因みに C_D/C_S をパラメータとして最適計算した結果を図-7に示す。

計算結果は，所要の圧密度を満足する範囲で，できるだけ r_e を大きくした方が工費が安くなることを示しており，経験とも一致する。なお， r_w が r_e とともに増加しているのは所要平均圧密度に関する制約条件式を満足させるためである。本例は，変数が2，制約条件が1の簡単な例であるが，さらに，多段載荷の場合の盛土厚及び載荷期間を変数として，また，所要の強度増加量を制約条件として追加することにより，実際の工事の施工計画立案に最適化手法を応用することが可能である。

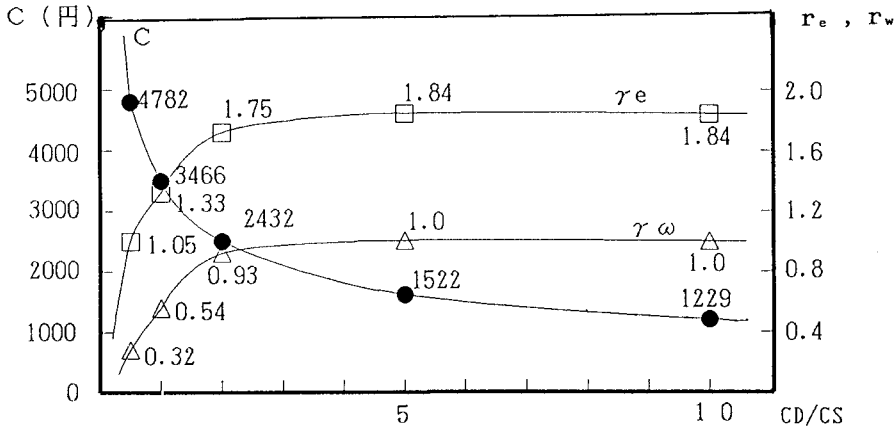


図-7 r_e ， r_w 及び C の変化

5. 結 言

以上の適用例は，港湾構造物の計画・設計の分野における部材レベルあるいは形状決定の最適化問題であり，ADS等の適切なアプリケーションの活用により，港湾構造物の最適設計が可能であることを示した。このように，最適化手法は港湾計画から構造物の設計にいたるまで有効であり，合目的に使用することにより，設計者の判断を助ける各種の情報を与え，計画・設計等の質を高めるうえで有効な手段となり得る。

参考文献

- 1) 奥山育英，口田登：待ち合わせ理論による最適バース数の決定，港湾技術研究所報告，Vol. 16，No. 3，1977，PP101~107.
- 2) 樗木武，黄文吉，姜元義：コンテナ埠頭における最適バース数と荷役機械台数の決定に関する研究，九州大学工学集報，第63巻，第2号，1990.

- 3) 稲村肇, S. Sritharan, N. Villamor: コンテナ埠頭における荷役施設配置の最適化, 土木学会論文集, No. 431/IV-15, 1991. 7, PP97~103.
- 4) 高力健次郎: ブロック式係船岸の設計について (非線形計画法による最適設計), 港湾技術研究所報告, Vol. 11, No. 3, 1972, PP. 167~188.
- 5) 古川浩平, 飯田毅, 高瀬幸紀, 森山彰: 根入れ式鋼板セル護岸の最適設計に関する研究, 土木学会論文集, No. 380/I-7, 1987. 4, PP. 419~427.
- 6) 日本港湾協会編: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 平成元年2月.
- 7) Vanderplaats, G. N. and Sugimoto, H.: General Purpose Optimization Program for Engineering Design, Journal of Computers and Structure, Vol. 24, No. 1, 1986, pp. 13~21.