

I-A66

ハイラーキ要素の薄肉構造解析への応用

函館工業高等専門学校 正会員 渡辺 力

長岡技術科学大学 正会員 林 正

1. まえがき

薄肉構造物の全体解析において、節点帯板法¹⁾では一方向に変位を級数展開する大型要素を用いて効率よく計算が可能であるものの、要素の横断面方向に多数の節点を設けているので、複雑な形状の構造物では要素の結合に不都合を生じる可能性がある。そこで、この短所を改良したハイラーキ要素法²⁾が開発されている。この解法では、変位を全方向に級数展開することによって全ての要素境界に自由度を持たせ、要素分割を最小限に抑えて極めて高精度な解を得ることができる。本研究では、ハイラーキ要素を薄肉構造物の立体解析に適用して、粗い要素分割を用いて全体解析を行うと同時に、精確な局所応力を求めることのできる全体解析法を開発する。ハイラーキ要素では平滑化を用いずに要素の任意点で応力を計算できるが、集中荷重や応力集中を受ける場合には従来の級数解法と同様に解が振動し収束性が悪くなる。この問題を克服するために特異要素を用いる。また、各節線の展開項数の採り方によって、任意の次数の遷移要素を容易に導くことができる。本報告では、集中荷重と応力集中を受ける構造に特異要素と遷移要素を適用して、解の安定性を検証した結果を報告する。

2. ハイラーキ要素

図-1に示すハイラーキ要素の変位成分には、 x, y, z 軸方向の並進変位 u, v, w と x, y 軸回りの回転変位 θ_x, θ_y を用いる。これらの変位を d とし、変位関数を次式で仮定する。

$$d(\xi, \eta) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N f_m(\xi) \cdot f_n(\eta) d_{mn} \quad (1)$$

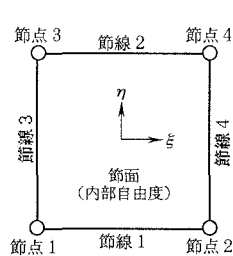


図-1 ハイラーキ要素

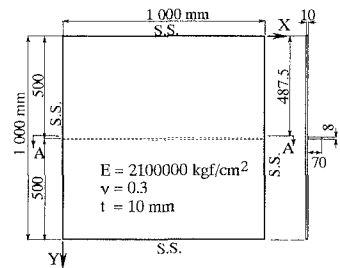


図-2 補剛板

式(1)の形状関数 f_m, f_n の節線と節面自由度に用いる級数には節点帯板法で用いた多項式の級数を用いている。なお、折板構造の数値計算においては面内回転 θ_z に仮想回転剛性を用いる。また、各節線の次数 m, n の採り方によって遷移要素を、親要素に数個の 1/4 写像点を用いて特異要素を容易に導くことができる。

3. 数値計算例

(1) 精度と収束性

満載等分布荷重が作用する周辺単純支持正方形板を計算して、ハイラーキ要素の精度と収束性を調べる。板の 1/4 領域を $1 \times 1, 2 \times 2$ 分割し、級数に 4~10 次式を用いたときの中央点のたわみと応力 σ_x の誤差を表-1に示す。表-1よりハイラーキ要素は、薄板と厚板において極めて良い精度と収束性を有していることが分かる。

表-1 周辺単純支持板の誤差 (%) ($\nu=0.3$)

$m=n$	板厚比 $t/b=0.01$				板厚比 $t/b=0.10$			
	無次元たわみ		無次元応力		無次元たわみ		無次元応力	
	1x1分割	2x2分割	1x1分割	2x2分割	1x1分割	2x2分割	1x1分割	2x2分割
4	-4.8E-02	-8.0E-04	-4.1E+00	-2.3E-01	-1.3E-02	-6.9E-05	-5.5E-01	2.0E-02
6	1.1E-04	9.8E-08	1.7E-02	-3.6E-04	1.6E-04	1.0E-07	-6.6E-03	-1.4E-05
8	3.1E-06	4.1E-10	3.2E-03	5.4E-06	3.0E-05	1.3E-08	7.0E-05	-1.8E-06
10	4.9E-07	1.2E-10	4.5E-04	-8.1E-08	8.9E-06	2.6E-09	-7.9E-05	-3.0E-07
解析解	0.4064485		0.2873183		0.4275623		0.2873183	

表-1よりハイラーキ要素は、薄板と厚板において極めて良い精度と収束性を有していることが分かる。

(2) 補剛板

図-2に示す単純支持された補剛板に満載等分布荷重が作用する場合について、対称条件を考慮して板の 1/4 領域を 1 要素、補剛材に 1 要素の計 2 要素を用いて計算する (MODEL-I)。級数には板に $m=n=6, 8, 10$ 次式、補剛材には $m=6, 8, 10, n=4$ 次式を用いる。図-3には A-A 線上の直応力 σ_x の分布を示す。満載等分布荷重を受ける補剛板では、補剛材取付け位置の端部付近で応力集中を生じる。このため図-3(a)に示す MODEL-

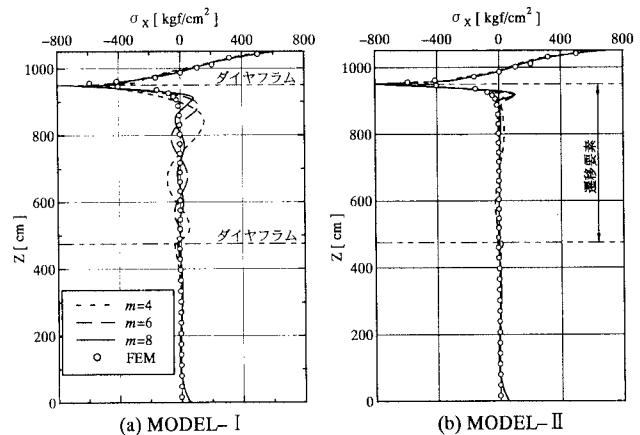
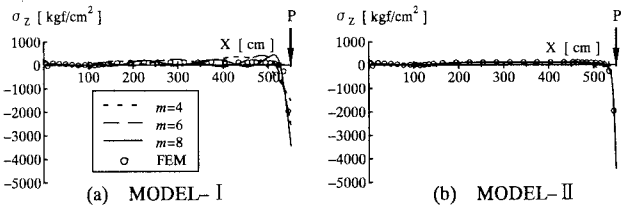
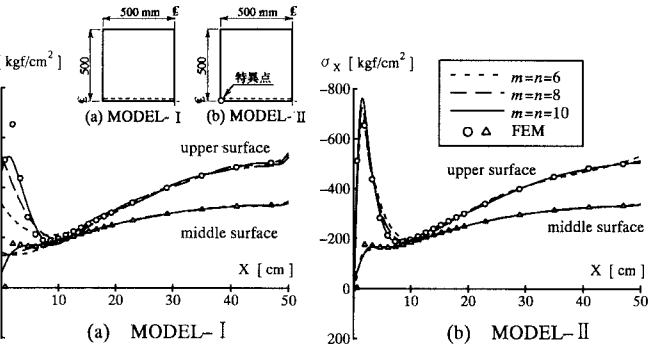
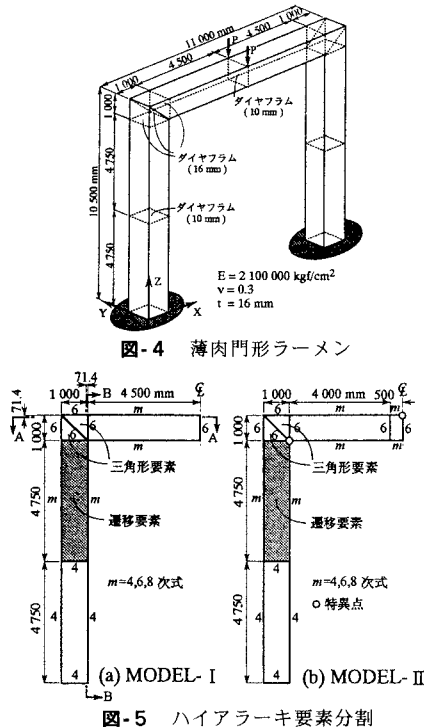
キーワード：ハイラーキ要素法、特異要素、遷移要素、薄肉構造解析
連絡先（函館市戸倉町 14-1・TEL/FAX 0138-59-6488）

I の板の上面の応力は端部付近で次数を上げて FEM 解と一致していない。そこで MODEL-I の補剛材取付け位置の端部に特異点を設けたのが MODEL-II である。図-3(b)では、細分割した FEM と応力集中部分も良く一致している。

(3) 薄肉門形ラーメン

図-4 に示す高さ 10.5m, 幅 11m, 奥行き 1m の門形ラーメンを計算して,

特異要素と遷移要素の効果を調べる。荷重は, はりの上フランジに 1tf/m^2 の等分布荷重を満載し, はり中央の端部 2 点に集中荷重 $P=100\text{tf}$ を載荷する。要素分割と次数は図-5 に示すように, 隅角部に三角形要素を, 柱に遷移要素を用いてダイヤフラムの取り付け位置でのみ分割した MODEL-I と, MODEL-I のコーナーに特異点を設け集中荷重作用点近傍で要素分割をした MODEL-II を用いる。図-6 にはりの A-A 線上の直応力 σ_z の分布を示す。MODEL-I では, 集中荷重の影響によりかなり振動しているが, 特異点を設けた MODEL-II では振動も収まり, $m=4$ 次式で収束している。図-7 に柱の B-B 線上の直応力 σ_x の分布を示す。図-6 と同様にコーナー部に生じる応力集中箇所に特異点を設けることで振動が収まっており, また, 遷移要素を用いても細分割した FEM と良く一致している。



以上の計算結果から特異要素を用いたハイラーキ要素法により全体解析と同時に精度の良い局所応力を求めることができることが分かった。なお, ハイラーキ要素の計算結果には平滑化の手法は用いていない。

参考文献 1) 林 正・渡辺 力: 節点帯板法による薄肉構造物の立体解析, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.435-442, 1995.
 2) 林 正・山中素直・加瀬部弘・佐藤敏亮: ハイラーキ要素による有限要素解析の効率化, 土木学会論文集, No.591/I-43, 1998.