

鉄筋コンクリート構造の有限要素解析と設計法研究委員会報告

—コンクリート構造物の設計にFEM解析を適用するためのガイドラインの概要—

鉄筋コンクリート構造の有限要素解析と設計法研究委員会

1. 委員会活動の概要

「鉄筋コンクリート（RC）構造の有限要素解析と設計法研究委員会」は、RC構造の有限要素法（FEM）による解析を設計へ適用していくための情報交換を行い、研究および設計の発展に寄与することを目的として、1986年6月に発足した。

本委員会は2つの作業部会から構成されており、第一作業部会は実務的な設計分野におけるRC構造へのFEM解析の適用の現状の把握と、FEM解析をRC構造の設計へ適用する際のガイドラインを作成することを目的としている。第二作業部会はFEM解析によりRC部材の既往の強度提案式やマクロモデルの物理的意味と問題点を明らかにして、より合理的なマクロモデルや設計式の開発に結びつけることを目的としている。

これまでに本委員会では、第二作業部会の活動の中間報告として、1988年1月に「RC耐震壁のマクロモデルとFEMマイクロモデルに関するパネルディスカッション」を開催し、その後も、RC構造部材全般のより合理的なせん断設計式の構築を目指して解析的な研究活動を進めている。その活動の総括として、来る1989年10月28日に「JCIコロキウム：RC構造のせん断設計法に関する解析的研究」を開催する予定である。また、第一作業部会の活動の成果として、1989年3月に「コンクリート構造物の設計にFEM解析を適用するためのガイドライン」の刊行と、これに関する講習会を開催した。本委員会報告では、上記「ガイドライン」の主な内容についてその概要を紹介することとする。

2. ガイドライン作成の背景と目的

コンクリート構造物の設計において、荷重作用により構造物に生じる変位や部材に生じる断面力あるいは応力度を算出する解析は、構造のモデル化を含めて、重要な作業の一つである。最近では、大型構造物や特殊構造物が多く出現するに伴い、構造物をフレーム構造や簡単な板構造にモデル化することが困難な場合が増加している。また、近年の電子計算機の普及と性能の向上に相まって、精度の高い解析が要求される場合も増えてきている。このため、コンクリート構造物の設計においてFEM解析が用いられる機会が増加してきている。

ところが、コンクリート構造物の設計へのFEM解析の適用の現状を見ると、いくつかの問題点に対して、統一された見解の無いまま、個々の設計者の判断に委ねられている部分がまだ多いのである。設計の実務技術者は、必ずしもFEM解析の専門家であるとは限らないため、FEM解析に関する問題点の対処方法について、明確な指示を与えるなんらかの目安、参考書等の作成が望まれるのである。

ここで紹介するガイドラインはFEM解析の専門家ではない設計実務技術者が、実際の設計においてFEM解析を実施あるいは利用する場合を対象としている。すなわち、FEM解析の実施あるいは利用の過程において生じる種々の問題点を提起するとともに、その対処方法を示したものである。そのため、本ガイドラインは問題点の対処方法の目安、判断材料の提示が主目的であり、基準としての強い性格を有するものではない。また、当然のことながら、FEM解析の専

専門家に対するFEM解析のためのガイドラインでもない。

3. ガイドラインの構成

紹介するガイドラインは以下に示すような章で構成されている。「§3. 解析モデル」および「§4. 解析結果の評価」が、本ガイドラインの中心的な部分となる、そのため他の章については、以下に概説するにとどめる。

§0. 用語の説明

本ガイドラインに用いられている用語を説明した。これは、必ずしも用語本来の意味を正確に定義しようとするものではなく、用語の意味が不明確なために生ずる誤解や、記述のわかりにくさを避けるために、実務設計技術者を対象にして作成したものである。

§1. 適用範囲

本ガイドラインの適用される解析手法および構造形式の範囲を示した。

FEM解析を適用されている構造の種類（骨組構造、シェルおよび板構造、マッシブな構造）ならびに、構造解析手法の種類（構造解析、熱伝導解析、地震応答解析）から分類し、本ガイドラインの範囲を静的な構造解析に絞ることを明記した。また、曲げ要素または梁要素のみでモデル化されるフレーム構造解析は適用の範囲外としたことを述べた。

§2. 解析計画

§2.1 FEM解析の必要性

一般的にFEM解析が必要とされる構造物の種類ならびに諸条件を示した。すなわち、①設計対象構造物の形状および荷重が複雑な場合、②設計対象構造物の力学挙動を詳細に把握したい場合、③温度荷重が卓越している場合、④終局耐力を精度良く算出したい場合。

§2.2 線形解析と非線形解析

今回のガイドラインでは線形解析のみを対象としているが、将来的な展望に立ち、鉄筋コンクリート構造における非線形解析の適用の実状を踏まえた上で、非線形解析の位置付けを明確にするため、以下の内容について概説した。

a) 非線形解析の必要性

非線形解析が必要になる場合を、以下のように例示した。

- ①非線形解析と線形解析結果が大きく異なると予想される場合
- ②線形解析が設計上危険になる場合
- ③設計に高い信頼性が要求される場合
- ④非線形解析を行うことにより、著しい設計の合理化・コストダウンが図れる場合。

b) 非線形解析の問題点

現在、非線形解析が設計に用いられない障害となっている点を列挙した。

- ①非線形解析手法の信頼性の評価が困難であること。
- ②解析結果の評価が困難であること。
- ③演算コストに制約があること。

④断面力の重ね合わせができないこと。

⑤直接的に断面設計を行うことが困難であること。

c) 線形解析による非線形性の評価

非線形解析によらず、線形解析によっても間接的に非線形性を考慮できる方法について概説した。

①一定の剛性低減率を用いる方法

②線形解析を繰返し行う方法

§ 3. 解析モデル (内容については後述)

§ 3. 1 解析領域と境界条件

§ 3. 2 要素の種類とその基本特性

§ 3. 3 要素の選択方法と要素分割

§ 3. 4 モデル化における問題点とその取扱い

§ 3. 5 荷重のモデル化

§ 4. 解析結果の評価 (内容については後述)

§ 4. 1 節点位置の断面力

§ 4. 2 配筋計算への反映

§ 4. 3 組合せ断面力に対する断面設計

【付録】

A：設計例 (5編)

B：有限要素法による鉄筋コンクリート非線形解析の数値計算上の特徴

本ガイドラインには、実際の設計に利用する際の参考として、次の5編の設計例を収めている。
①PC防液堤の設計、②形状の複雑な中空箱状構造物の設計、③重力ダムの設計、④原子炉建屋の構造設計、⑤PC鋼材定着用突起の設計。

また、研究分野における非線形解析手法の研究成果を、今後の実設計へ取り入れていく際の参考とするためのRCの材料非線形解析が持つ数値解析上の特徴を整理するとともに、非線形解析において留意すべき点と問題点について検討した解説も付録に加えている。

4. 解析モデルに関するガイドライン (§ 3.)

4. 1 解析領域と境界条件に関するガイドライン (§ 3. 1)

構造物の規模ならびに形式によっては、構造物全体を一度に解析すると、多大な労力と時間を要することから、適切な解析領域を設定することが重要となってくる。ここでは、ガイドラインで示したいくつかの特徴的な場合の解析領域の設定方法について説明する。

(1) 対称条件の利用

解析領域の設定方法として、基本的なものに、対称条件を利用して、構造物の一部分に着目する方法がある。

(2) 着目する領域を中心に解析領域を取り出す方法(ズームング手法)

この方法は大きく以下の2つに分類できる。

a) 境界部を変位完全固定（または、ピン、スライド）のような単純な境界条件とする方法

この方法は、ケースバイケースで統一的な指針を示すことは非常に困難である。また、この解析結果を用いることにより危険側の設計となったり、逆に過剰設計となったりする場合があるので、注意が必要である（図1参照）。

b) 構造物全体を粗いモデルで予備的に解析した後、解析領域・境界条件を定める方法

この方法は形状や荷重が複雑で、応力集中の生じる領域を予想することが困難な場合に適しており、次の2つの方法が一般的である。

①全体モデルの解析により得られた変位分布や応力分布に基づき、局所的な乱れの影響が無視できる範囲を選び、単純な支持条件を与える方法

この方法は、集中応力が発生する場合などに適している。例えば壁に開口を設けた場合などである。

②着目している領域を選び、境界部に全体解析より得られた応力や変位を節点荷重や強制変位として与える方法

この方法は全体的に変形が生じる場合に適しており、解析領域は着目する領域を中心に比較的小さく絞ることができる（図2参照）。

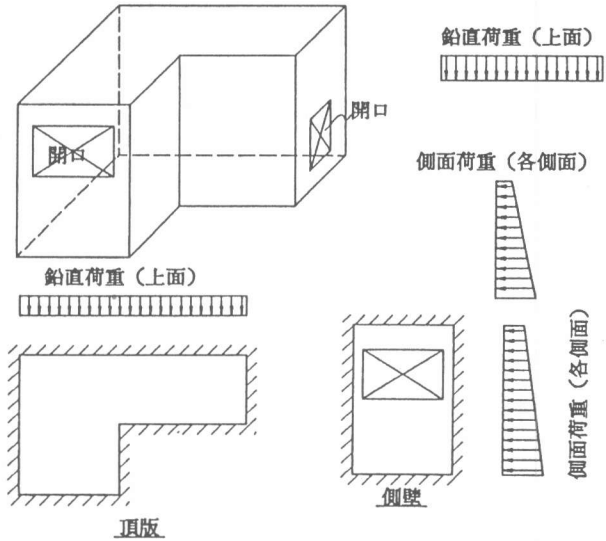


図1 中空立体構造物の平板を単独にモデル化する例

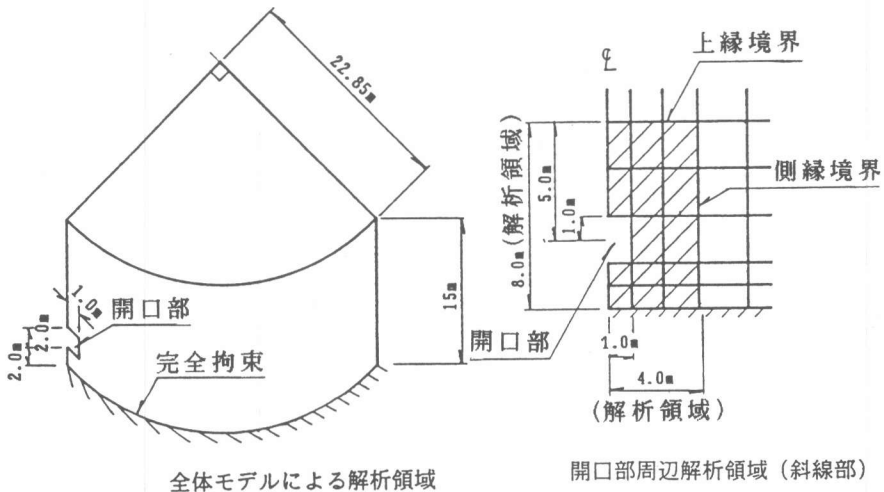


図2 全体解析結果を踏まえ局部解析を実施する例

4.2 要素の種類とその基本特性 (§ 3.2)

設計実務技術者がFEM解析を実施する場合には、解析プログラムで用意されている要素の特性を十分に理解し、高精度かつ合理的な解析結果が得られるように、使用要素を選択することが望ましい。少なくとも、要素の特性とその留意事項、あるいは高精度のFEM解析を実施するための留意事項を基礎知識として持っている必要がある。また、出力の方法も考えた上で要素を選択する必要がある。

このような観点から、ガイドラインでは要素の選択と結果の評価に最小限必要な、使用要素の特性とそれに関する留意事項を提示した。以下にその概要を示した。

構造解析で使用する要素に着目し、次のように分類し説明を加えた(図3、4、5参照)。

a) 変位成分による分類

- 1次元部材に使用する要素
(軸要素、梁要素)
- 2次元部材に使用する要素
(平面要素)
- 3次元部材に使用する要素
(板曲げ要素、シェル要素、
立体要素、軸対称要素)
- 特殊要素(パネ要素、
ジョイント要素、剛体要素)

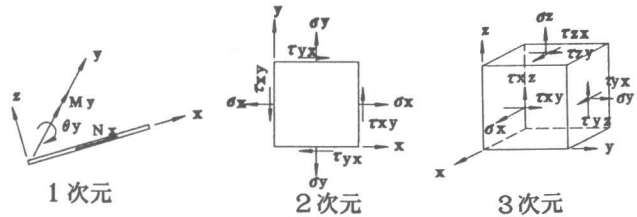


図3 変位成分による分類の例

b) 変位関数による分類

変位関数の定義方法、すなわち要素内の変位分布の仮定により、要素内で表現できる変位場が大きく異なり、解析精度、要素分割および結果の評価に大きく影響する。例えば、高次の変位関数を有する要素は少ない要素数で、複雑な曲げ変形を表現できる。このような観点から、変位関数の次数による要素の分類を行い、変位関数の次数の重要性について説明を加えた。

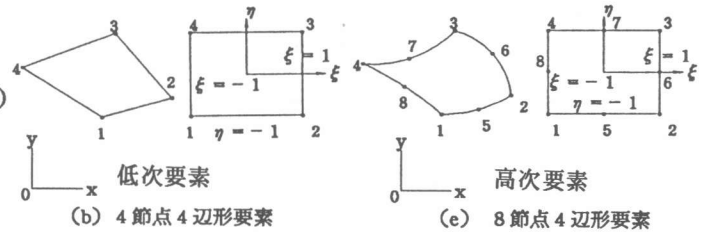
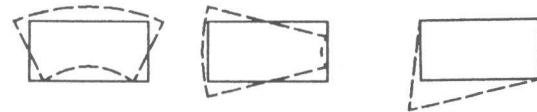


図4 変位関数による分類例(平面要素)



曲げ型面内変位(非適合モード) 線形変位(適合モード)

図5 変位の適合条件による分類例

c) 変位の適合条件による分類

非適合要素は、低次の要素で、ある程度複雑な曲げも表現できるため、精度の向上および演算時間の短縮が図れる。そのため、b)と同様の観点から、選択の際の参考となるよう説明を加えた。

4.3 要素の選択方法と要素分割 (§ 3.3)

4.3.1 要素の選択 (§ 3.3.1)

要素の選択に関しては、各種要素の特性を十分に理解した上で、解析を行う構造物の形状、着目すべき応力ならびに解析結果の使用目的を念頭において要素の種類を選択すべきである。

a) 解析対象構造物と要素選択

構造物の種類（壁・床版構造物、マッシブな構造物、長尺構造物、軸対称構造物）毎に、一般的な要素の選択基準について記述した。

b) 解析精度と使用要素

要素の種類の中でも変位関数の次数は、解析結果に与える影響が大きく、要素の選択、および要素分割の粗密にも深く関与する。一般に、低次と高次の要素で同じ要素数の分割を行うならば、高次の要素を用いることにより高精度の解析が可能である（図6参照）。

曲げが卓越する問題では、この傾向が顕著になるが、せん断、軸圧縮・引張のみが卓越する場合には低次の要素でも厳密解への近似が可能になる。このようなことを認識した上で、要素分割を行うべきである。

4. 3. 2 要素分割

(§ 3. 3. 2)

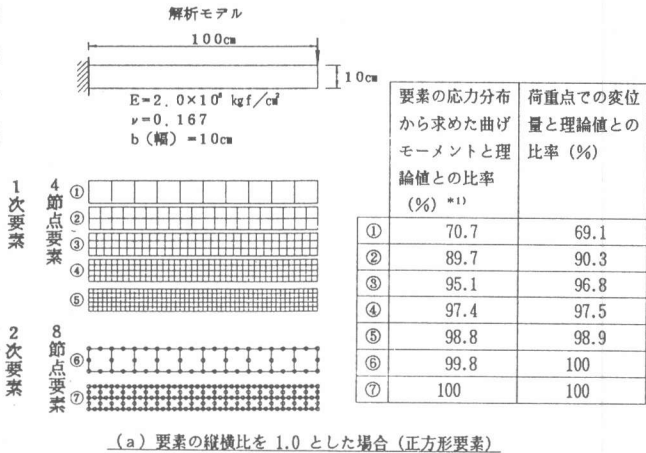
a) 要素分割と縦横比

四辺形要素の縦横比は原則的には1:1が望ましく、特に着目点近傍では1:1にするのが望ましい。応力解析で、応力勾配が急な場合のみならず応力の流れが一定となる場合でも、1:5程度を限度とするように心がけるべきである。やむを得ず縦横比の大きい要素を使用する場合は、解析結果の連続性のチェックを行うべきである。

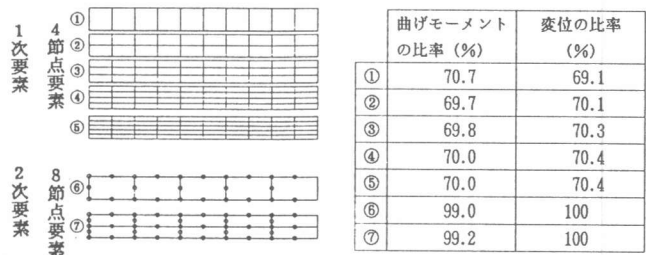
また、縦横比の問題として「SHEAR LOCK」があり、要素の分割および選択の段階で十分に注意すべきである。低減次数積分を用いれば、この問題は回避できる（図7、表1参照）。

b) 鉄筋コンクリートの特性を考慮した要素分割

これまでに述べてきたことは、あくまでも数値解析上の精度向上に関する一般論である。鉄筋コンクリートの場合、その耐力に比して低い荷重域で非線形性が現われることから、局所的な応力集中が生じればすぐに応力の再配分が行われるため、応力が平滑化されることを認識した上で、要素分割する必要がある（図8、9参照）。



(a) 要素の縦横比を1.0とした場合(正方形要素)



(b) 高さ方向のみを密に要素分割した場合(長方形要素)

注：*1) 拘束点に最も近い要素の断面高さ方向の各ガウス点の応力分布から、平面保持を仮定して、曲げモーメントを算出した。その際には、拘束点に最も近い断面とその次の断面の平均値を示した。

図6 アイソパラメトリック低次要素と高次要素の計算結果の比較

例えば、面外荷重を受ける床版、壁などの2次元部材を解析する場合、弾性理論に近い値を求めようとするならば、かなり細かく分割する必要がある。しかし、面部材の破壊はある幅に対する平均的な曲げモーメントに対応するという実験的な事実もあり、断面の設計を考えた場合は、各構造物毎に再配分可能な領域を見きわめて、ある程度粗く要素分割の方がよい。

c) 応力値から断面力を算出する場合の要素分割

平面要素あるいは立体要素を用いて構造解析を行い、結果として出力された応力値をそのまま使用するのではなく、断面力に換算して用いる場合がある。その際には、断面力に換算することを念頭において、要素分割する必要がある。

換算の方法としては、高さ方向の各層の応力値に図心からの距離を乗じ、それらを積分して断面力を求める方法がある。この方法は、

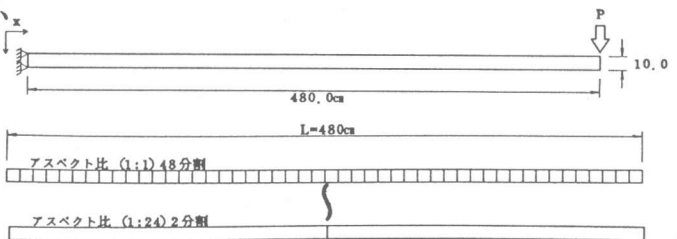


図7 SHEAR LOCKの影響をみるための解析モデル

表1 アスペクト比と解析結果の比較

要素当りのアスペクト比 (縦:横)	理論値に対する変位の比率		理論値に対する応力の比率	
	高次積分	適次積分	高次積分	適次積分
1 : 1	100.0	100.0	100.0	100.0
1 : 2	100.0	100.0	99.8	100.0
1 : 4	99.9	100.0	98.1	100.0
1 : 6	99.7	100.0	96.3	100.0
1 : 8	99.4	100.0	94.4	100.0
1 : 12	98.6	100.0	90.6	100.0
1 : 16	97.3	100.0	87.0	100.0
1 : 24	93.8	100.0	79.5	100.0

ただし、理論値を100%とする。

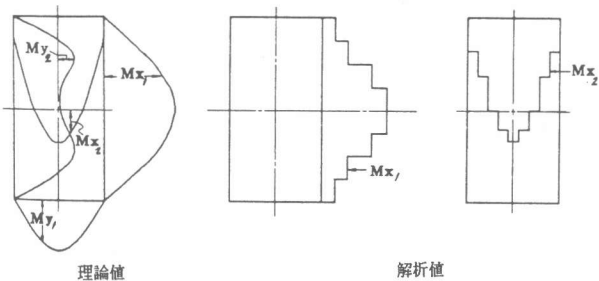


図8 等分布荷重下の四辺固定の長方形版の曲げモーメント分布図

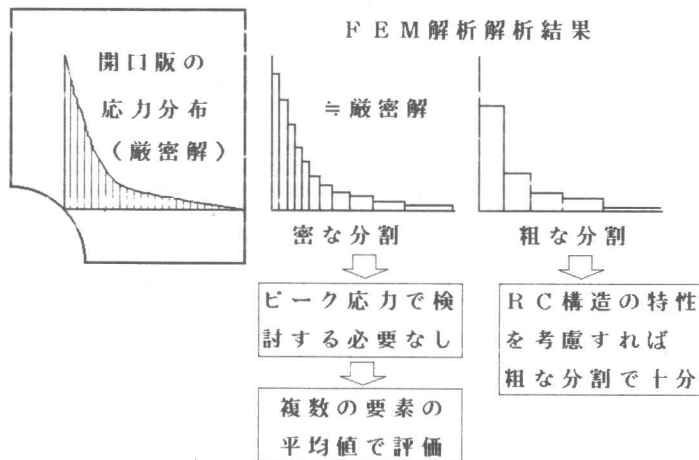


図9 RC構造の特性を考慮した要素分割

その精度が高さ方向の分割数に依存するため注意が必要である（図10参照）。但し、応力分布から平面保持を仮定して応力勾配を求める方法を用いれば、分割数は問題とならない。

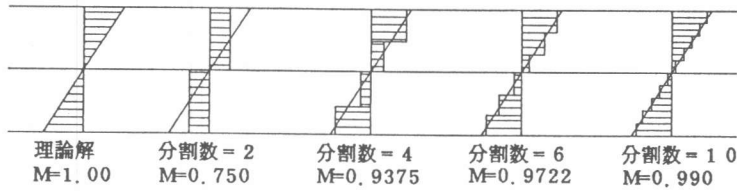


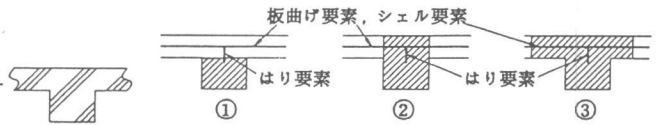
図10 要素分割と求められる曲げモーメントの関係

4.4 モデル化における問題点とその取扱い

モデル化に際しての具体的な問題を列挙してその対処方法について言及した。

① シェル要素と梁要素の併用

床版に梁が接合されたような構造においては、床版はシェル要素に、梁は梁要素にモデル化することとなる。その場合、いくつかのモデル化の方法が考えられる（図11参照）。このような場合は、剛性を二重に評価しないように注意すべきである。いずれの方法を用いる場合でも、各要素の図心にずれが生じるため、注意を払わなければならない。モデル化の違いによる比較の一例を図12および表2に示した。



注) 斜線部は、はり要素の剛性に評価した部分を示す

図11 はり要素とシェル要素の併用時の
はり要素の剛性の評価方法

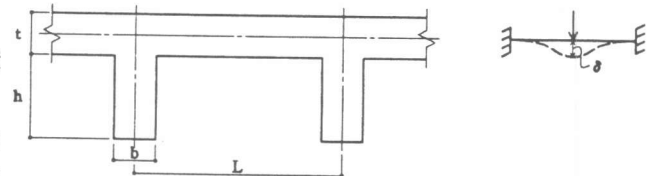


図12 はりのモデル化の違いによる影響をみるための解析モデル

表2 はり間隔とはり幅の比 (L/b) がはりのモデル化の違いに及ぼす影響 ($h/t = 2.0$)

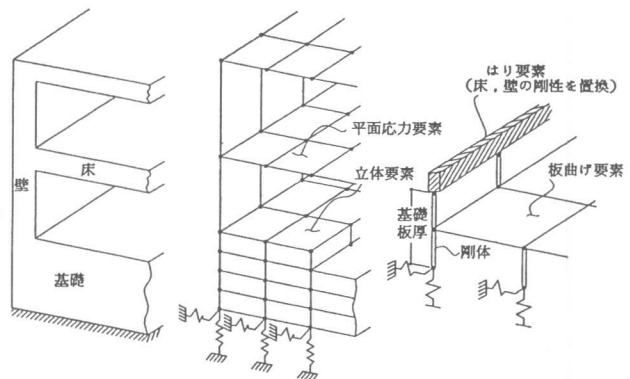
L/b	応力*	変形 δ
	②/①	②/①
3.0	0.96	0.86
5.0	0.97	0.88
10.0	0.99	0.90

* スパン中央における下面の応力

② 板曲げ要素と立体要素の併用

建物の基礎に着目して応力解析を行う場合、基礎スラブの剛性に対して壁の剛性が無視できない場合には、図13に示したように、壁および床を平面要素または梁要素によってラフにモデル化して剛性を評価するのがよい。

また、板厚が急変する部分、特に薄い部分と厚い部分の中心軸が一致しない場合には、シェル要素のみで



(基礎板厚が不均一な場合)

(均一な場合)

図13 基礎スラブの応力解析における壁の剛性の評価方法

は十分に表現できない。そのような場合には、急変部分の内、マッシブな断面を立体要素で分割し、シェル要素との接合部では平面保持を仮定する方法、あるいは立体要素で詳細にモデル化する方法等が考えられる。また、自由度の異なる要素を直接つないだ場合、注意しなければならない。例えば、シェル要素とソリッド要素をつなぐ場合、両者を直接接合するとソリッド要素に回転の自由度が無いために固定端としての計算となる。これを避けるためには、図14のように曲げに対して剛性の高い要素をはさむ方法がある。

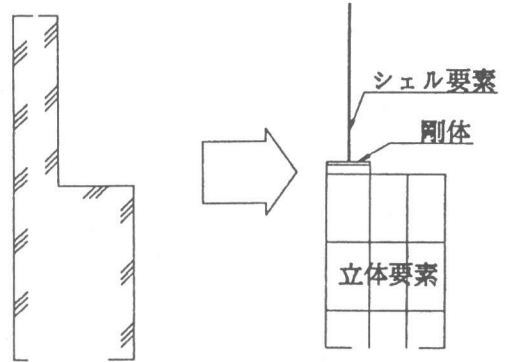


図14 シェル要素の立体要素の接合

③開口を有する壁体のモデル化

配管、ダクト等による開口が部分的に多数存在するような壁体をモデル化する場合、開口の全てを要素分割において考慮するのは容易ではない。局部応力および変形を問題にしない場合は、近似的に無開口の壁として解析することが多い(図15参照)。

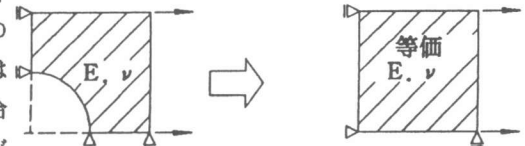


図15 等価な無開口版への置換

5. 解析結果の評価 (§ 4)

5.1 節点位置の断面力 (§ 4.1)

FEM解析で算出される断面力や応力度は、一般に要素図心と節点あるいはガウス積分点での値である。一般に、要素の辺あるいは節点近傍の値は精度が落ちる。特に、断面厚さの急変部や境界部などでは不合理なものとなる場合がある(図16参照)。従って、単純に節点位置の計算結果を採用することは避けるのがよい。さきに述べたように、鉄筋コンクリートでは応力の再分配が可能な範囲で平均的な曲げモーメントを求めることが必要であるため、要素図心の値から求めるべきである。

境界あるいは接合部付近の断面力が必要になる場合には、要素図心位置での値を外挿近似して推定する方法がある(図17参照)。

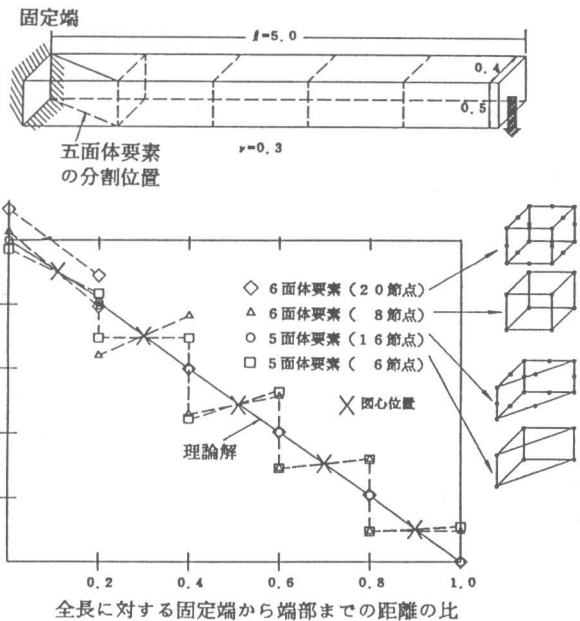


図16 要素タイプの違いによる解析結果の差

5.2 配筋計算への反映 (§4.2)

FEM解析結果を断面力に換算する場合は、さきに述べたように換算方法あるいは分割数に留意して評価することが必要となる。

また、ソリッド解析では、応力値から直接補強鋼材および配筋位置を合理的に決定することができ、有効である。具体的な計算方法には、定まったものがないのが現状である。例えば、必要鋼材量は、全引張力あるいは許容引張力を超過する引張力に対応させて決定される。また、鋼材の配置位置についても、図18に示すように、応力分布に合わせて配置する方法、あるいは引張縁に集中させる方法等が考えられる。

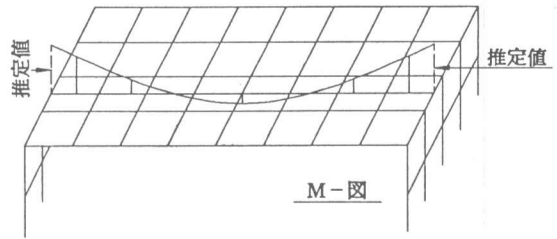


図17 節点位置の曲げモーメントの推定

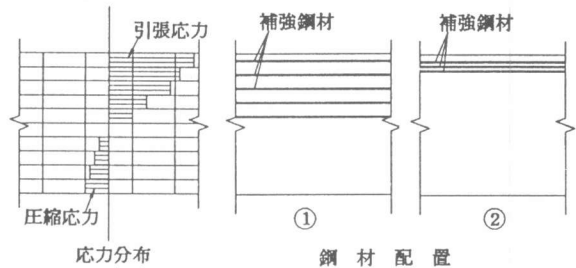


図18 応力分布から鋼材配置を決める方法

5.3 組合せ断面力に対する断

面設計 (§4.3)

床版、壁等の面部材を平面要素やシェル要素でモデル化した場合、要素および作用荷重の種別等により、表3に示す3タイプの組合せ断面力が得られる。

ガイドラインでは、各々の組合せ断面力の組合せについて、断面設計手法を紹介している。

表3 組合せ断面力の種類

ケース	組合せ断面力	構造部材例
(1)	面内力 膜力 N_x, N_y 面内せん断力 N_{xy}	平面要素でモデル化した壁に面内荷重が作用する場合等
(2)	モーメント等 曲げモーメント M_x, M_y ねじりモーメント M_{xy} 面外せん断力 Q_x, Q_y	板曲げ要素でモデル化した床版に面外荷重が作用する場合等
(3)	面内力 + 膜力 N_x, N_y 面内せん断力 N_{xy} 曲げモーメント M_x, M_y ねじりモーメント M_{xy} 面外せん断力 Q_x, Q_y	シェル要素でモデル化した円筒壁に面外荷重が作用する場合等

6. 結論

「FEM解析の適用に際してのガイドライン」の主な内容を紹介した。ここで紹介したガイドラインの作成にあたり、できるだけ設計実務技術者の参考になることを目指した。ただし、現時点では全ての項目について完全なガイドラインを作成することは、時間的にも能力的にも困難であるので、可能な範囲でより良いと思われるものを目指した。将来は、内外からの意見を踏まえ、完成度のより高いガイドラインにしていきたいと考えている。

本委員会では、1989年10月に「JCIコロキウム：RC構造のせん断設計法に関する解析的研究」を開催する予定です。この分野の研究・実務に携わっている研究者・技術者の方々の多数の参加を得て活発な討議を行い、相互に知見を深め研究・技術の発展をはかることを目的としていますので、ふるってご参加くださるようご案内致します。