

建築構造物の解析技術

深井 悟*

1. はじめに

最近20年程度でコンピュータの性能が非常に向上し、昔は大型コンピュータでしかできなかった地震応答解析のような解析でも、現在ではパソコンでできるようになっている。ここでは、建築物の構造解析について、各種建築物の構造設計において行われている一般的な検討手順と対比して、そのときに使用されている構造解析について述べる。その次に、PC構造において構造設計で行われている構造解析について、現状における他の構造と異なる点の比較を含めて記述する。

2. 各種建築物と構造解析

2.1 一般建築物

特別な評価・評定などを必要としない事務所ビル、共同住宅などの階が積み重なった一般建築物（層状建築物）の構造設計における検討は、現在では一貫プログラムを利用して解析・検討されるのがほとんどである。この場合、建築物の形状・断面・荷重などに関するデータが入力されれば、荷重拾い、架構のモデル化、架構の応力解析、断面検討などが行われ、それらを編集すれば計算書ができる状態で出力される。以下に一般建築物に採用されている検討方法、① ルート1、ルート2での検討、② ルート3での検討、③ 限界耐力法での検討、における建築物の検討手順と、そこで用いられている構造解析について記述する。

(1) ルート1、ルート2で検討される建築物

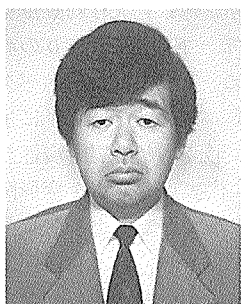
ルート1、ルート2で検討される建築物は、比較的形狀が良く低層の建築物のものが多く、これらの建築物に対する一般的な構造計算・検討の流れ（言い換えれば一貫プログラムでの計算の流れ）と、そこで使用されている構造解析について図-1に示す。ルート1、ルート2の建築物に対する架構解析は、弾性解析により、一般的には長期荷重（鉛直荷重、固定荷重+積載荷重）に対しては平面架構モデルによる固定モーメント法またはマトリックス変位法とし、短期荷重（水平荷重、地震荷重）に対しては以前はD値法で算定

されていたが、現在では平面架構を組み合わせた疑似立体モデルによるマトリックス変位法とされることが多い。しかし、これでは不十分で3次元の立体モデルによる解析が必要となることもあり、これに対応できるように、3次元立体解析を選択できるようになっている一貫プログラムも多くなっている。ここで行われる弾性解析は、単純な解析であるので、どのプログラムを使用しても同じかという現状ではかなり異なっている。その理由の一番は壁、とくに雑壁の評価法に対して使用するプログラムによりモデル化の方法がばらばらであり、算定される応力及使用するプログラムによりかなり違う結果となる場合もあるので、十分に注意する必要がある。

架構解析の後に断面検討を行うことになるが、一貫プログラムでは、入力された断面に対して断面検討し、OKまたはNGかの判定をするプログラムと、RCの場合には入力されたコンクリート断面を基準として断面検討がNGの場合に必要な鉄筋を自動的に計算する機能をもったプログラムもある。ただし、この自動計算部分のプログラミングの考え方についてはプログラムごとにより異なっており、この点についても使用にあたっては十分に注意する必要がある。

(2) ルート3で検討される建築物

ルート3で検討される建築物は、ルート1、ルート2での計算（1次設計）に加えて保有水平耐力の検討（2次設計）が必要とされる。ルート3で検討される建築物は、ルート1、ルート2で検討される建築物に比べて比較的建築物の高さが高く、壁量が少なく、架構の変形能を期待する建築物が多い。ルート3で検討される建築物の一般的な構造計算・検討の流れ（一貫プログラムでの計算の流れ）とそこで使用されている構造解析についても図-1に示す。保有水平耐力の算定法にはいろいろな方法があり、主な方法としては、節点振分け法（フレーム部）+仮想仕事法（連層耐震壁部）、荷重増分法による静的弾塑性解析（Pushover解析、以下、荷重増分解析と記述）がある。荷重増分解析は比較的多くの演算を必要とするので、10年以上前ではあまり行われていなかったが、最近のコンピュータの性能の向上によりパソコンでも解析できるようになり、比較的多く用いられるようになってきている。荷重増分解析の解析モデルとしては、図-2に示すように、材端ヒンジモデルが多く使用されており、RCの場合はひび割れによる剛性低下を考慮する必要があるため、材端剛塑性ばねをもつモデルが使用されることが多い。また、軸力が作用する柱などでは、曲げ耐力が軸力により変化するので、この軸力と曲げの相関関係を表すためにフロールールによるモデルが採用される場合もあり、さらに2軸曲げを考慮するためにRCではマルチス



* Satoru FUKAI

(株)日建設計
東京本社 構造設計室

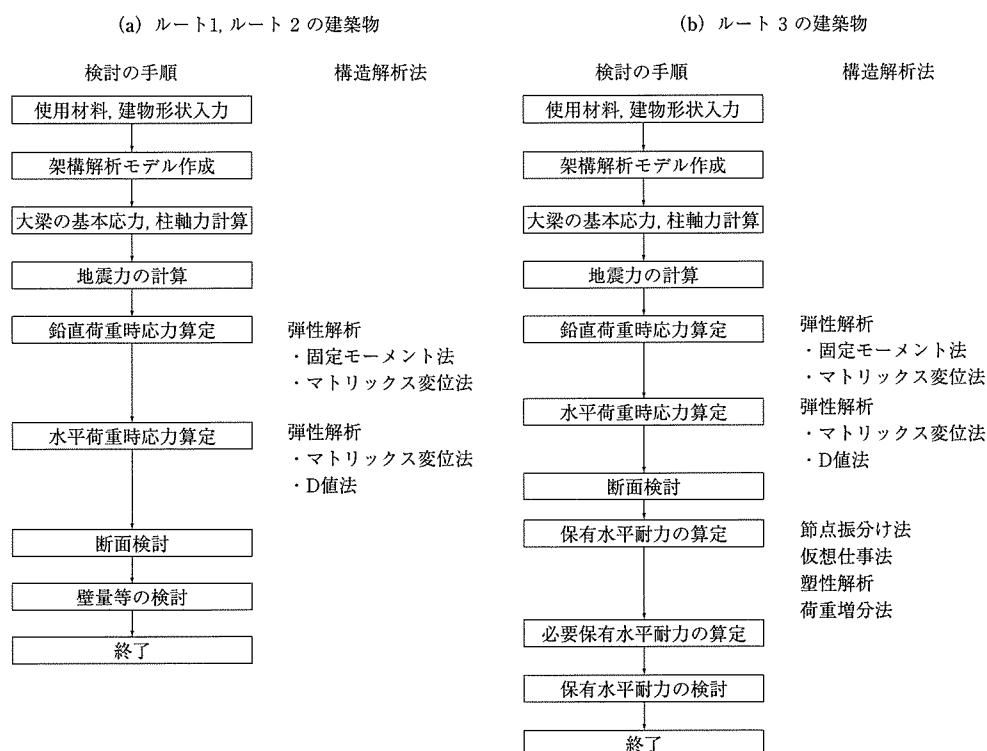


図-1 一般建築物の構造検討の手順と解析法

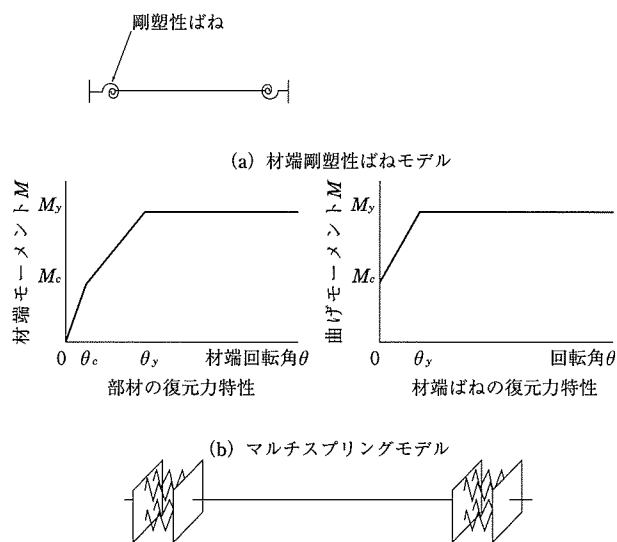


図-2 弾塑性解析用部材モデル

プリングモデル (Multiple Spring Model) が採用されて解析されることもある。

荷重増分解析を行うメリットとしては、荷重－変形関係が得られる、部材の変形が分かるなどが挙げられるが、デメリットとして、保有水平耐力が仮定した外力分布形と相似形となる、最終崩壊形まで押すことができない、などの問題がある。この点については、各プログラムにより対応が異なり、途中から外力分布を変更するなどさまざまな工夫がされている。

必要保有水平耐力の算定としては、各部材の部材断面などから決まるランクおよびその部材の寄与率などにより、層としてのランクが算定され、必要保有水平耐力が算定さ

れる。このとき、節点振分け法の場合は、すべての崩壊形が分かっているので層のランクを算定することは簡単であるが、荷重増分法を用いた場合は、先に述べたように全層が崩壊形となっていない場合が多いので、このときの取扱いについてどう考えるかが問題となり、この点についても各プログラムがいろいろ工夫して算定している。

(3) 限界耐力法で検討される建築物

2000年の建築基準法・施行令改正で従来のルート1, ルート2, ルート3による検討法以外に、限界耐力計算による方法が規定された。限界耐力計算による検討では、ルート3の保有水平耐力の検討の代わりとして、等価線形化法である限界耐力計算を行い、限界値が応答値を上回ることを検討することになる。限界耐力法による検討のフローを図-3に示す。利点としては、地震応答解析を行わなくても直接応答値 (荷重, 変形など) が算定できること、変形能力に見合った部材を設計できること、設計法自体の関係ではないが耐久性を除く仕様規定に従わなくてよいことなどである。限界耐力計算においては、荷重増分解析を行うことが原則となっている。具体的には、荷重増分解析における部材が限界値に達する以前のステップでの荷重分布, 変形分布等より代表点の荷重 (ベースシヤを1次有効質量で割った値) と、代表点の変形 (固有モードの $\beta U=1.0$ の高さ位置での変形に相当する値) を求め、必要耐震性能スペクトルと比較することにより検討する。概念図を図-4に示す。具体的には、代表点の荷重・変形関係と必要耐震性能スペクトルの交点が応答値となり、代表点の荷重・変形関係の線が必要耐震性能スペクトルより図上で右上まで延びていればOKとなる。限界耐力計算は、かなりの計算量があり、手計算では困難で、プログラム化しないと対応できな

い検討法である。本方法はまだ規定されてからあまり時間が経っていないので、現在はまだ本方法に十分対応した一

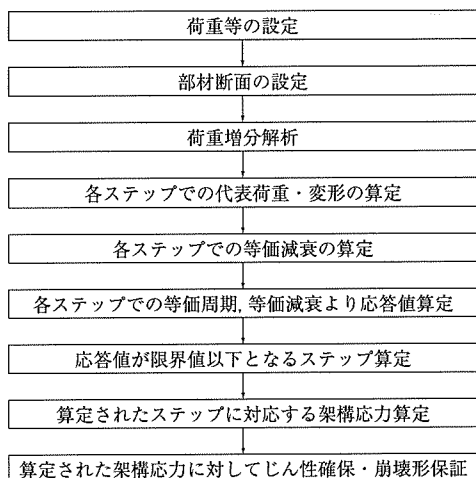


図-3 限界耐力計算における検討フロー（安全限界）

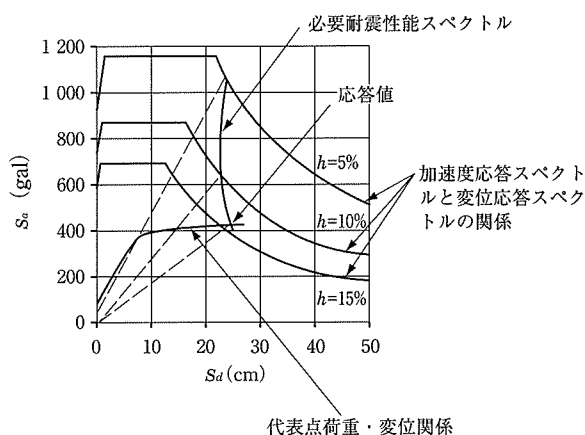


図-4 限界耐力計算による応答値の算定

貫プログラムはないが、今までの保有水平耐力の検討などと同様に建築基準法・施行令で規定化されており、本検討法により確認申請を出すこともできるので、今後まもなく本方法によるプログラムが整備され、一般の一貫プログラムに組み込まれると思われる。

建築基準法・施行令の限界耐力計算においては、設計用地震荷重が工学的基盤で与えられ、工学的基盤から地表までの増幅は設計者が計算するかたちとなった。これに伴い、軟弱地盤の高層ビル等以外の一般建築においてはあまり行われてこなかった地盤の地震応答解析が、今後よく行われるようになると思われる。地盤の解析には1次元波動伝播解析などいろいろな方法があるが、地盤のばらつきを適切に評価することが重要となると思われる。

2.2 高層建築物

高層建築物については、一般建築物の構造設計に加えて地震応答解析が行われ、応答値に対する検討が行われる。この場合、一般的に行われている内容が、鉄骨系の建築物とRC系の建築物で若干のモデル化および解析法に相違があるので、以下にそれぞれの場合の検討および解析の概要を示す。

(1) 鉄骨系の建築物の場合

一般の鉄骨系の高層建築物の場合、図-5に示すように1次設計の後に荷重増分解析、地震応答解析を行うことになる。比較的整形な建築物では、まれな地震に対しては各階1質点の直列型の弾性曲げせん断型モデルによる地震応答解析が行われ、ごくまれな地震に対しては荷重増分解析の層せん断力・層間変形の結果を用いて各階1質点の直列型の等価せん断型または等価曲げせん断型モデルによる地震応答解析が行われる。このとき、減衰としては初期剛性比例型（または瞬間剛性比例型）で2%が採用されることが多い。この地震応答解析の結果を用いて耐力、変形などの応答値に対する検討が行われる。

整形でない建築物に対しては、その建築物の性状を適切に評価できるモデルが採用される。地震応答解析に用い

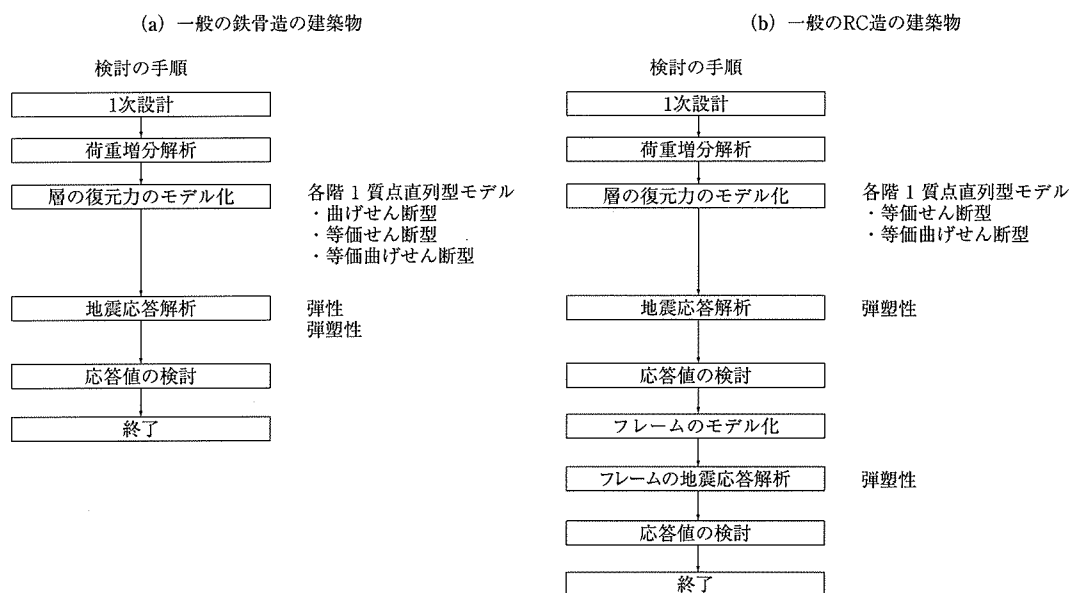


図-5 高層建築物の構造検討の手順と解析法

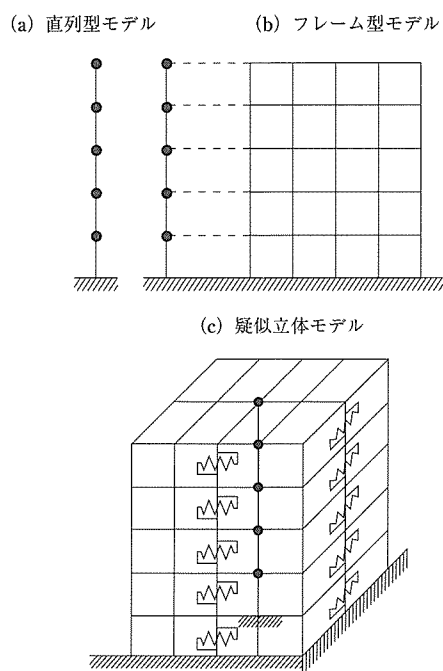


図-6 振動解析モデル

れる一般的な解析モデルを図-6に示す。たとえば、平面的な偏心による影響を考慮する必要がある建築物に対しては、各架構ごとにその架構位置に各階ごとのばねを考え、それらを各階で剛床として結びつけたモデルを採用する。それでも不十分な場合は立体のフレームモデルを採用するなどして地震応答解析を行う。入力地震動についても、水平1方向だけでは問題となる場合には水平2方向入力とした地震応答解析を行う。また、上下動を評価しなくてはならない建築物に対しては、柱だけでなく梁中央などにも質点を設けて上下動に対する地震応答解析を行い、水平動との組合せも必要な場合は水平・上下同時入力による地震応答解析を行う。

(2) RC系の建築物の場合

RC系の建築物の場合、鉄骨系の建物に比較して早期にひび割れが生じるため、まれな地震に対しても線形として取り扱うことができないので、一般的にはまれな地震およびごくまれな地震の両方に対して、荷重増分解析の層せん断力-層間変形の結果を用いて各階1質点の直列型の等価せん断型または等価曲げせん断型モデルによる地震応答解析が行われる。このとき、減衰としては瞬間剛性比例型で3%が採用されることが多い。RC系の場合、この各階1質点の直列型の等価せん断型等のモデルに対する地震応答解析に加えて、図-5(b)に示すようにフレーム型モデルによる部材レベルの地震応答解析が行われ、部材の応答値が直接検討される。理由としては、鉄骨造で造られてきた日本の高層建築物をRC造で造るにあたって、RC系の部材の場合は鉄骨系の部材に比べて変形能が劣る、脆性的な破壊が生じる場合がある、などの疑念に対して十分に高層RCが可能であることを示す解析的検討として、高層RCが広まるときに実務的に利用できるようになったフレーム型モデルに対する地震応答解析を利用して詳細に検討することになったことに

よられる。

RC系の場合、まだ形状的には比較的整形な建築物が多く、鉄骨系で記述したような整形でない建築物で採用されるような特殊なモデルに対する解析はほとんどなされていないが、鉄骨系でも日本で高層建築物が建設されはじめた初期の段階は整形であり、その後どんどん解析の進歩も手伝い、かなり特殊な形状のものが増えていったことを考えると、RC系においても、今後は複雑な形状の建築物に対する地震応答解析が増えてくると思われる。

2.3 特殊建築物

建築物の中には、一般建築物(層状建築物)に比べて建築物の形状、重要度などにより特別な解析を行う建築物(特殊建築物)がある。例としては、ドーム建築物、原子力関連建屋、制振・免震建築物などが挙げられる。以下に、ドーム建築物(大空間建築物)と原子力関連建屋、制振・免震建築物について、その設計段階で使用されている解析法について示す。

(1) ドーム建築物(大空間建築物)

ドーム建築物については、建築物の大きさに比べて部材寸法が小さいためたわみが大きいこと、部材座屈や全体座屈の可能性があることなどの理由により、微小変形理論の一般的な解析では対応できず、それぞれのドーム建築物の特性を考慮して幾何学的非線形解析が行われることが多い。幾何学的非線形解析の場合、初期形状の設定、初期不整の取扱いなどにより、座屈耐力が著しく低下する場合などがあるので十分に検討される必要がある。また、ドーム建築物においては施工法により生じる応力が大きく異なる場合があるので、この点についても検討が必要である。RC系のドーム建築物では、有限要素法による立体解析が行われている。この場合においては、境界条件の設定などにより応力などがかなり異なるので、解析モデル設定には十分注意する必要がある。

(2) 原子力関連建屋

原子力関連建屋は、建屋の重要度に応じて耐震性能が決められており、最も重要な建屋についてはAクラスとされ、静的地震力は建築基準法で定められている値の3倍が採用されている。これらの建屋は一般的に壁の多い建築物で、建屋の構成要素としては壁、床などの面材により構成されている場合が多いので、このような場合には有限要素法による解析が多く用いられている。また、建屋と地盤との相互作用、地盤の安定性などの検討のため、建屋および地盤を有限要素法でモデル化して地震応答解析が行われる場合がある。その他の特殊な解析として、必要とされる場合には飛来物・落下物に対する検討が行われる場合があり、この場合には有限要素法による衝突解析が行われる。

(3) 制振・免震建築物

制振建築物については、地震を対象とした建築物に対しては地震応答解析による検討をすることになる。このときには制振部材のモデル化が重要となる。極低降伏点鋼を制振部材に用いた制振建築物であれば、その鋼材の性質を構造部材と同様にモデル化して地震応答解析を行えば結果が

得られ、その部材の制振効果を比較的簡単に評価することができる。これに対して制振部材に粘弾性ダンパーを用いる場合には注意が必要である。一般に粘弾性ダンパーに使用される粘弾性体は温度、振動数、ひずみ依存性があり、それらを評価するために提案がなされているさまざまなモデルから最適なものを選ぶことになる。

免震建築物については、従来は地震応答解析を行って検討を行ってきたが、2000年に免震の告示が出され、地震応答解析を行わなくても限界耐力計算により検討を行うことができるようになった。免震建築物を地震応答解析する場合でも、免震層のモデル化を適切に行ってやれば上部構造はほぼ弾性であるので、比較的簡単な各層1質点の直列型モデルで対応することができ、比較的簡単に検討できる。

3. PC建築物と構造解析

PC建築物について必要とされる解析法は、RC造とほとんど同じと考えられる。しかし、PC建築物は図-7に示すように設計法がRC造と異なり、一般的には保有水平耐力の代わりに弾性解析に基づく終局強度設計（ルート3a）で設計されることが多いこと、RC造に比べて件数が少ないこと、個々の建築物により違う構造モデルを考える必要が多いことなどの理由により、一般建築物を対象として作成されている一貫プログラムのようなPC構造を対象とする一貫プログラムは、筆者が知るところではまだ存在しない。筆者が知っている現在市販または公開されて使用されているPC構造を対象とするプログラムとしては、図-8に示すように(a)1構面の架構を対象として応力解析（不静定応力解析も含む）、断面検討、保有水平耐力を計算するプログラム、(b)一般建築物に対する一貫プログラムとデータのやりとりがで

きるサブプログラム（プレストレスによる不静定応力算定用の荷重項算定、PC梁の部材耐力の計算など）を作成し、PC部材がある場合でも荷重増分解析をできるようにした一貫プログラム、(c)プレストレスによる不静定応力算定用の荷重項算定およびPC梁の断面検討プログラム、である。このようにPC構造関係の解析プログラムが他の構造に比べて世の中にあまり浸透していないのは、PC建築物の場合、場所打ちの場合でも多くの場合は施工段階を考慮した解析が必要であり、プレキャストの場合は確実に施工順序などを考慮した解析を行わなくてはならないため、一般の建築物と比較して、この点が構造解析モデル化上かなり異なることになるため、一貫プログラムには取り入れにくいと思われる。これを除けば、必要とされる構造解析はほとんどRC造の場合と同じであり、違うのは部材の復元力特性、不静定応力の取扱いなどである。2001年1月現在ではまだ出ていないが、PC構造の新しい告示が出れば、そのときにはPC構造においても限界耐力計算が含まれていると思われる、そうならば限界耐力計算においてはRC造とPC構造の違いはほとんど等価減衰の違いだけで表現されるので、プログラム上はほとんど変わらなくなり、限界耐力計算の場合にはPC構造が一貫プログラムに入れられる可能性は大きいと思われる。

地震応答解析については、モデル化はRC造の場合とまったく同じでよく、復元力特性だけをPC構造のものに置き換えるだけでよいのであるが、現在、筆者の知っているところではPC部材の復元力が入った市販のプログラムは僅かであり、まだ一般化されているとは言い難い状態である。しかし、この点については、プログラムに復元力特性を追加するのは比較的簡単であり、需要があれば比較的早く一般的になると思われる。



図-7 RCとPCの検討法の違い

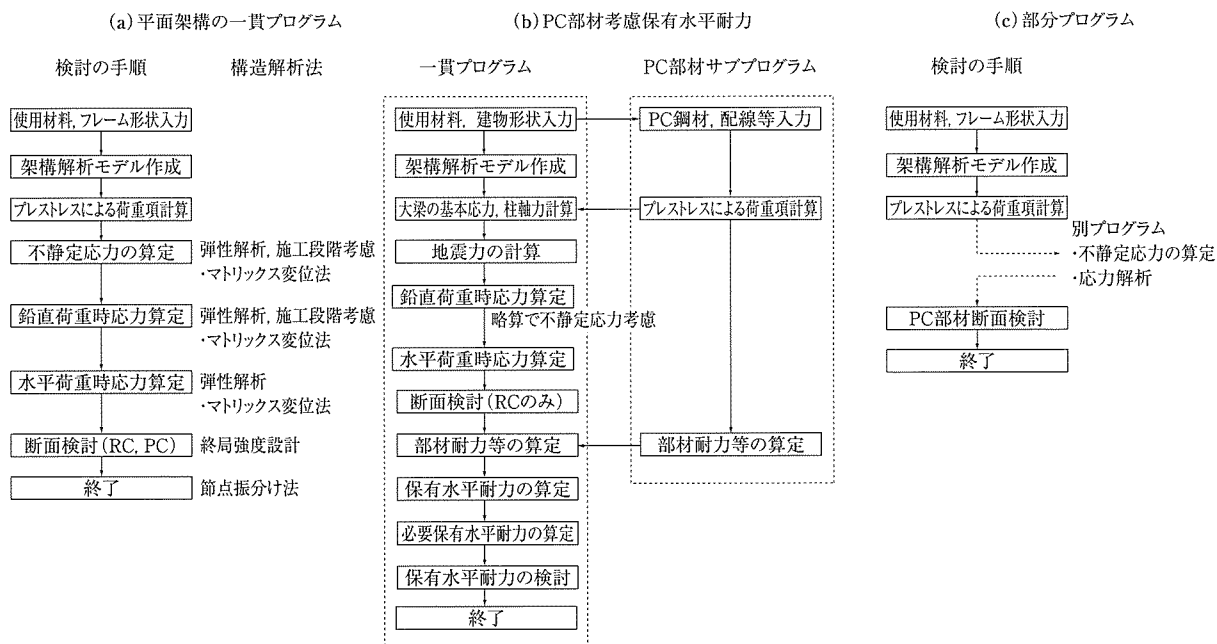


図-8 PC建築物に対するプログラム

4. おわりに

建築物の設計と結びつけて現状の建築物の構造解析について述べたが、今後いちだんとコンピュータの性能は向上し、どんな高度な解析でも入力すればすぐに結果が出るようになると思われる。しかし、建築物の構造設計の立場からすると、高度の解析を行えばよいのではなく、設計する建築物に対してどのような情報が欲しくてどのような解析

をするかを判断することが一番重要になると思われる。これらの能力を鍛えることが構造設計者に求められると思われる。

参考文献

- 1) 特集コンピュータ時代の構造設計と解析を考える, 建築技術, pp.593, 1999.7
- 2) 新年号特別企画*コンクリートとコンピュータ利用技術, コンクリート工学, Vol.38, No.1, 2000.1

【2001年2月1日受付】