

第6回 建築分野ではどのように使っているの？

講師：岡本 晴彦*1・太田 義弘*2・上林 厚志*3・前中 敏伸*4

1. はじめに

本年、Vol.43, No.1 から連載されてきた本講座は今回が最終回となります。ここでは、主として設計実務者に読んでいただくことを念頭において、建築分野ではFEM解析をどのように活用しているかについて述べることにします。

また、一部においては近年、PC技術適用において発展を続けている建築と土木の境界分野における構造物についても記します。

2. PC建築構造でのFEM解析の使い方

PC建築構造の設計においてFEM解析が必要となることが多い構造物もしくは部位は面構造です。面構造物には平板構造と曲面(シェル)構造とがあります。前者はさらに床板(床スラブ)と壁板に分類することができます。これらの構造においてFEM解析が普及する以前においては、設計用外力ならびにプレストレス導入により生じる応力、変形を計算することに多くの困難が伴っていました。すなわち、微分方程式をいかに解くかに労力が注がれました。とくに、プレストレストコンクリートシェル構造の設計に際しては、解析を行うとともに模型実験によりその妥当性を確認した後に実工事に適用することもしばしばありました¹⁾。

しかし、今日では当時ほどの労苦を伴わずに複雑な建築構造物の応力解析ができるようになりました。

今回の講座では、PC建築構造物へのFEM解析の現状における適用方法をその力学的基本について示します。かつ優れた建築機能の発現、自由な空間設計への寄与、PC構造の適用対象の拡大などに対して有効にFEM解析を適用した事例をその具体的方法と効果について紹介します。

3. FEM解析における導入プレストレスの扱い方

FEM解析において緊張力を考慮する方法として、図-1に示すように、(a)緊張力を外力として与える方法と、(b)緊張力をトラス要素の初期ひずみにより与える方法があります。これらの詳細な設定方法と考え方については第3回に説明されていますが、ここではそれぞれの方法の得失と、どのような場面で利用しているかについて説明していきます。

す。

3.1 緊張力を外力として与える方法

緊張力を外力として作用させる方法は、ケーブル端部に緊張力を圧縮力として作用させるとともに曲線部には曲率による腹圧力を作用させる方法です(図-1(a))。

この方法はすでに構造解析モデルがある場合に、少ないモデルの変更と荷重の設定だけで解析できることから、自重によるたわみ量をキャンセルするためのプレストレス量と配置を検討する場合や、主荷重に対してコンクリート断面にひび割れ応力を生じさせないプレストレス量の算定などに用いています。

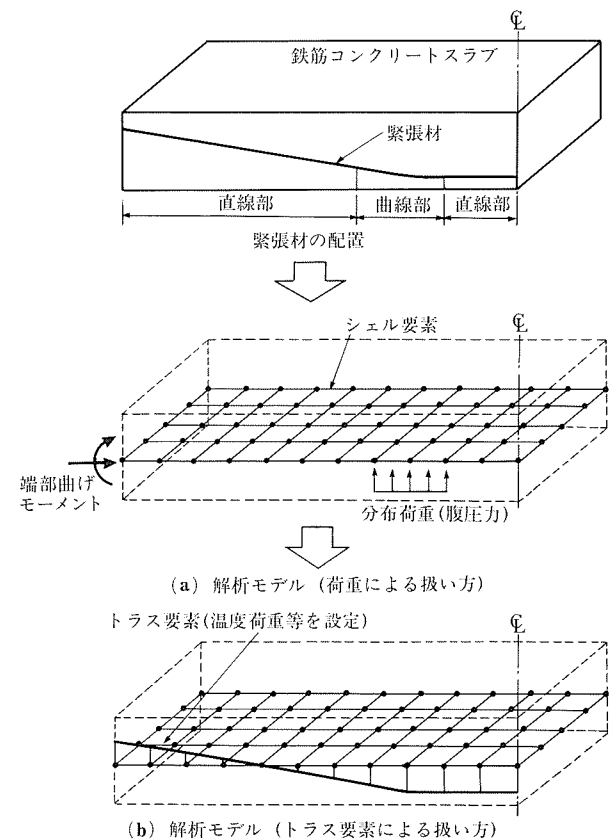


図-1 FEMでの導入プレストレスの扱い方

*1 Haruhiko OKAMOTO: (株)竹中工務店 技術研究所 主任研究員 博士 (工学)

*2 Yoshihiro OHTA: (株)竹中工務店 技術研究所 研究員

*3 Atsushi KANBAYASHI: (株)竹中工務店 技術研究所 研究員

*4 Toshinobu MAENAKA: (株)竹中工務店 東京本店 LNG本部

3.2 緊張力をトラス要素の初期ひずみにより与える方法

緊張材が3次元的な曲線配置の場合などで、腹圧力の算出が難しい場合や、緊張材の剛性が必要な場合には、緊張材を構造要素としてモデル化して載荷します(図-1(b))。載荷の方法は温度応力解析機能や初期ひずみの設定機能を利用して緊張材に張力を設定します。

この方法は、自動的に緊張力による分力(腹圧力など)を計算できるというメリットと緊張材が構造要素として存在するので、緊張材の剛性を考慮した解析が可能なのですが、1回の計算では緊張材の変形と他の緊張材における張力の影響で緊張力が減少するため、設定温度や初期ひずみ量を割り増して、数回の収束計算を行う必要があります。

4. 適用事例

4.1 長期荷重に対するフラットプレートの設計

「次世代構造住宅開発事業実験棟」における、長大スラブ部分についてプレストレスを導入したフラットプレートの長期荷重に対する設計を行っています。ここでは導入プレストレス量を決定するために行った解析と、復元力特性を求める解析を行うための前段階として実施した解析を紹介しします。

(1) 建物概要

表-1に本建物の概要、写真-1にその外観を示します。図-2に床伏図、図-3に軸組図を示します。本建物は、免震構造とその上部躯体である壁柱とフラットプレートからなる架構から形成されています。屋上階には11.6m×21.6mの長大スパンスラブを有しており、長期たわみ制御のためにX、Y方向にプレストレスを導入しています。

(2) FEM解析による導入プレストレスの検討

① プレストレス量の検討

長期荷重によるたわみ量を制御することを目的として、大スパン部分(屋上階)にプレストレスを導入します。このプレストレス量を決定するためにFEM解析を行っています。プレストレス量および配置を替えたいいくつかのケースについて検討するために、緊張力に相当する力を解析モデルの節点に荷重として与えています。図-4に設定した緊張材の配置と要素分割・設定荷重を示します。設定荷重は図-4(b)に示すように、緊張材の端部に水平力と鉛直方向力を作用させます。水平力は緊張材の端部の近い節点に振り分けたため節点ごとに異なっています。また、中央部の端点ではデッドアンカーが2連となっているため、作用位置を振り分けています。腹圧力は曲率と緊張材本数により面荷重の大きさを各部において変えてあります。

② 新手法によるプレストレス解析

プレストレス力を考慮した解析を行うには、前述したように緊張力を外力として与える方法と、要素の初期ひずみとして扱う方法がありますが、それぞれ、外力の計算または初期ひずみの設定に時間がかかります。これを省力化するために図-5に示すような新しい手法を用いています。まず、プレストレス力を荷重として緊張力と偏心量で各節点に与えた計算を行います(STEP 1)。次にトラス要素を加え(STEP 2)、その軸力を緊張力とします。これを初期応力状

表-1 建物概要

建物名称	次世代構造住宅開発事業実験棟
建築用途	共同住宅・実験施設
建築面積	650.0m ²
延床面積	1300.0m ²
建物高さ	GL+11.00m
階数	地上3階

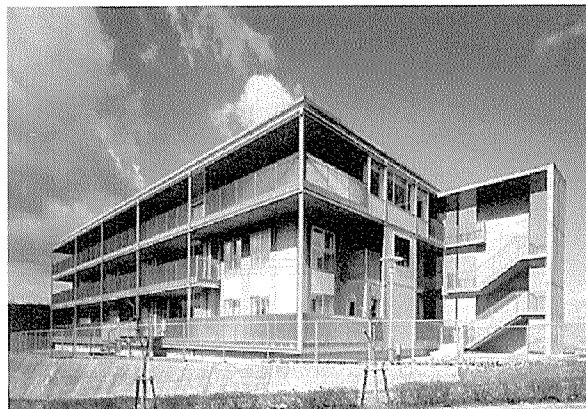


写真-1 次世代構造住宅開発事業実験棟

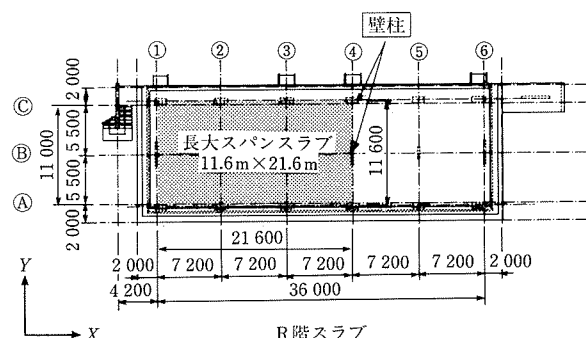


図-2 床伏図

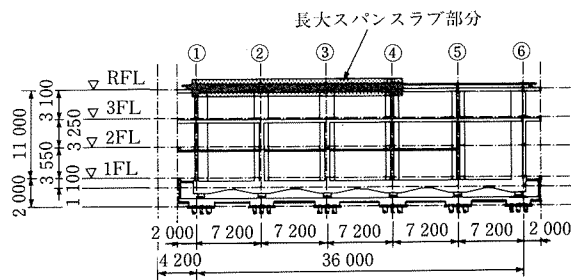


図-3 軸組図

態として地震力等の外力による非線形計算を行います(STEP 3)。この機能を実現するにはプログラムの改良を伴いますが、緊張力による部材応力と緊張材の剛性を考慮した、非線形地震応答解析等が可能となります。温度応力で緊張材の張力を設定する方法でも同様の解析が可能ですが、この方法では前述のように繰返し計算が必要です。また、荷重を設定する方法では緊張材の剛性を評価できません。図-6に、この解析による変形と前節の緊張力を外力として与える方法による解析の変形を比較して示します。同様の変形をしていますが、新手法の解析モデルには引張力

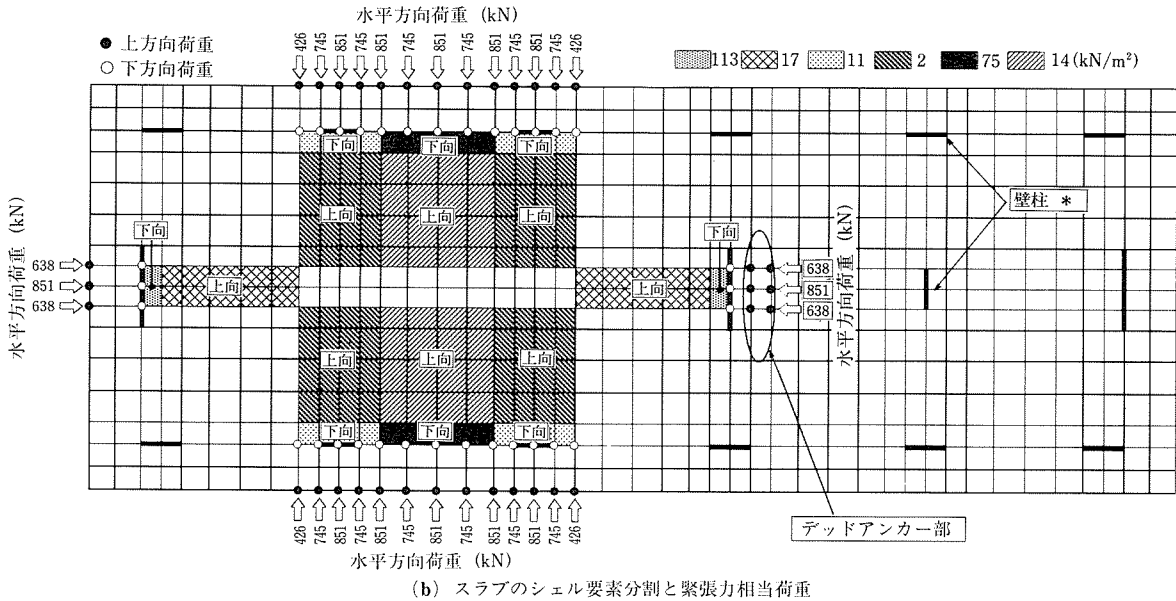
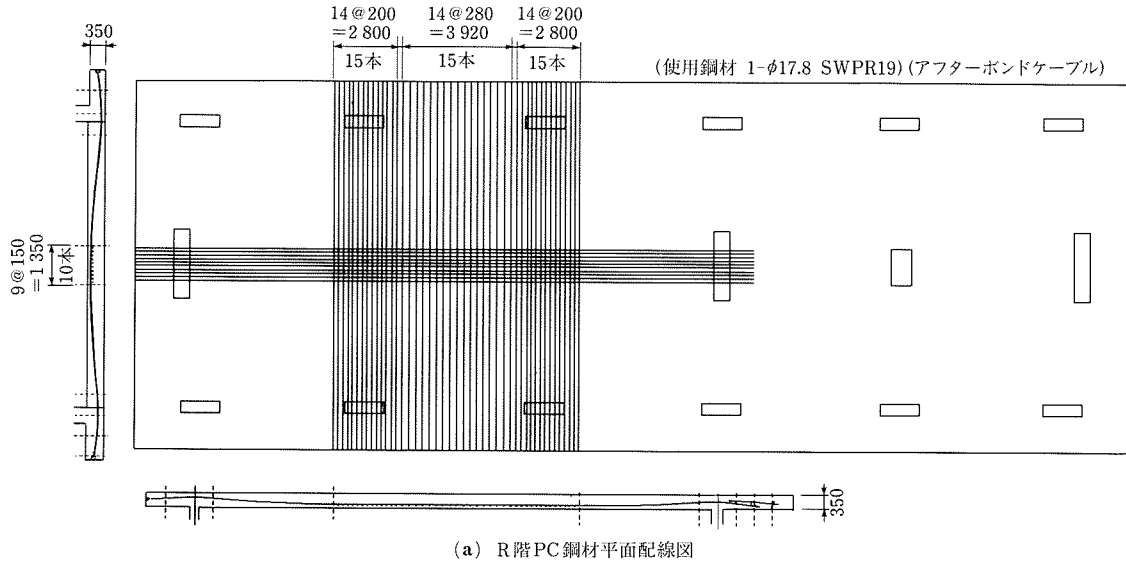


図-4 緊張力に相当する節点荷重

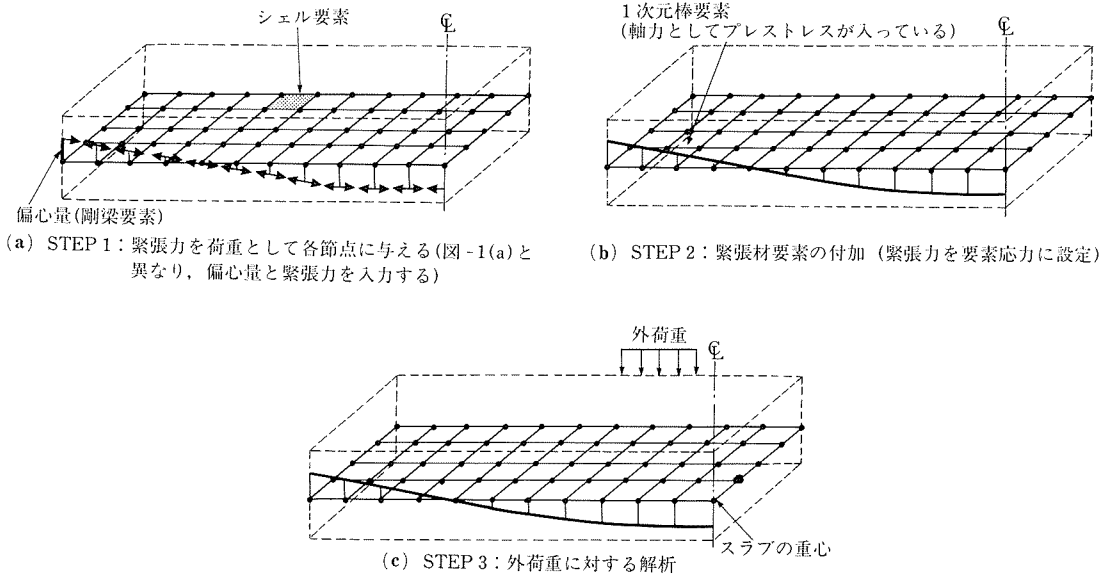


図-5 新手法による導入プレストレスの扱い方

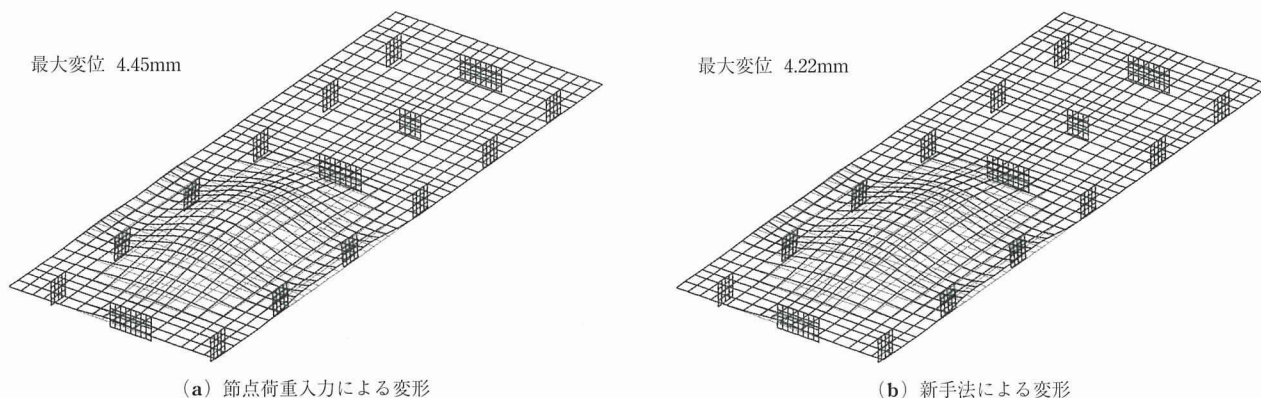


図-6 緊張力を外力として与える方法と新手法の解析による変形の比較

の作用している緊張材要素が入っているため、引続き行く非線形解析で緊張材の剛性評価が可能です。

4.2 長期荷重に対するアンボンドPCフラットスラブの設計

(1) 目的

アンボンドPC鋼材を用いたフラットスラブの長期荷重に対する設計を行うことを目的とします。

(2) 建物概要

以下に建物の概要を示します。図-7に本建物の完成予定図を示します。

建築用途：倉庫

建築面積：2 542.0 m²

延床面積：7 614.6 m²

建物高さ：GL+30.95 m

階数：地上6階、塔屋1階

(3) 構造概要

図-8に床伏図、図-9に軸組図を示します。本建物は、フラットスラブ、フラットスラブを支持するCFT（鋼管コンクリート）柱と外周壁から構成されています。フラットスラブとCFT柱によって長期荷重を支持し、外周壁により地震力を想定した水平力に抵抗します。

(4) アンボンドPCフラットスラブの設計

① 設計方針

フラットスラブの柱列帯と柱間帯における長期荷重による曲げモーメントを算出し、その値に対してプレストレス力によるキャンセルモーメントを決定します。ここで、キャンセルモーメントはプレストレス力による偏心曲げモーメントを示し、長期荷重による曲げモーメントと逆向きに作用させます。キャンセルモーメントの大きさは、できるだけDead Load（自重+仕上げ荷重）による曲げモーメントと等しくなるようにします。

② 設計フロー

図-10にアンボンドPCフラットスラブの設計フローを示します。FEM解析はスラブの断面力の算定において用いました。

③ 設計条件

アンボンドPCフラットスラブの設計条件を、以下に示します。



図-7 建物完成予定図

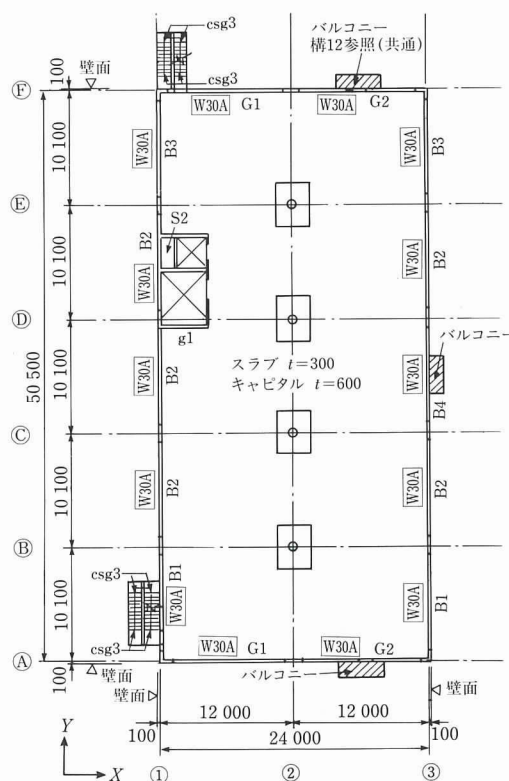


図-8 床伏図(5階)

- スラブ厚さ：300 mm（一般部），600 mm（支板部）
- 積載荷重：12 000 N/m²（2 階，3 階）
7 000 N/m²（4 階～6 階）
- コンクリート設計基準強度：27 N/mm²

④ FEM解析による断面力の算定

断面力の算定はFEM弾性解析によって行いました。スラブの支持条件を反映させるために、壁、柱、支板およびスラブ一般部に分けてモデル化しています。支板とスラブ一般部はシェル要素とし、その厚さを考慮しました。柱と壁

に関しては、それらが存在する位置に対してシェル要素を分割して、各要素の節点において荷重を支持しています。ここでの支持条件は、各方向の変形およびスラブ面内の回転を拘束するというものです。図-11に解析モデルを示します。

スラブの面外曲げモーメントおよびせん断力を、X、Y方向の柱列帯と柱間帯に対してそれぞれ算出しました。図-12

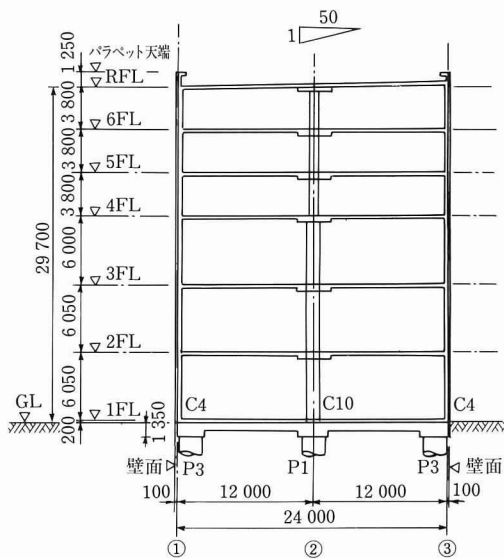


図-9 軸組図 (B通り)

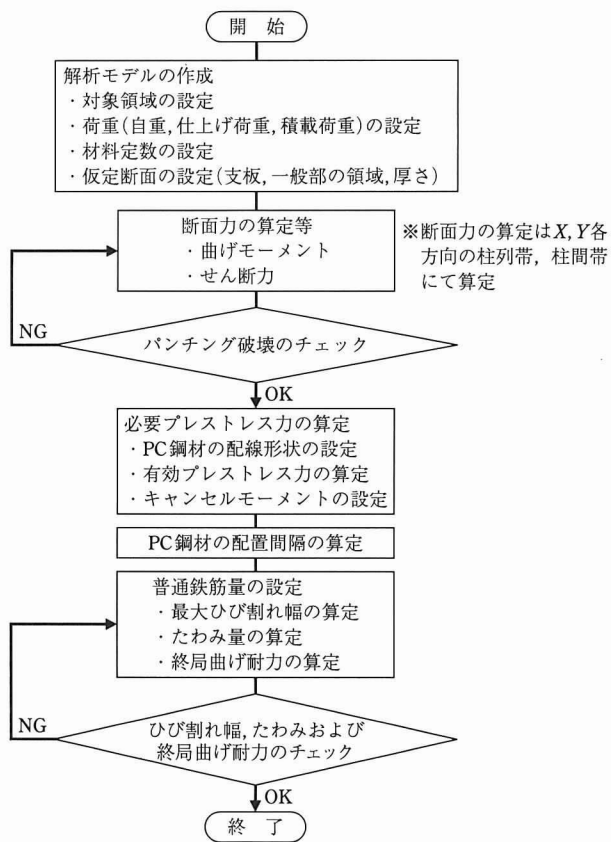


図-10 設計フロー

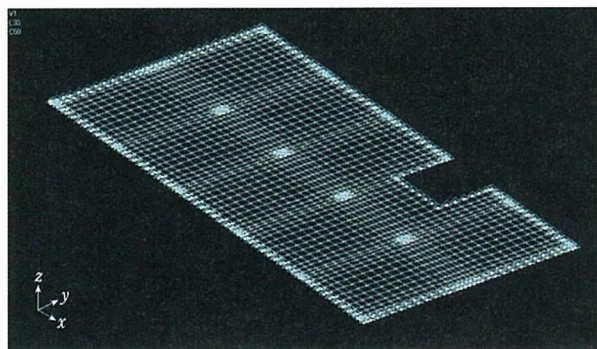


図-11 解析モデル

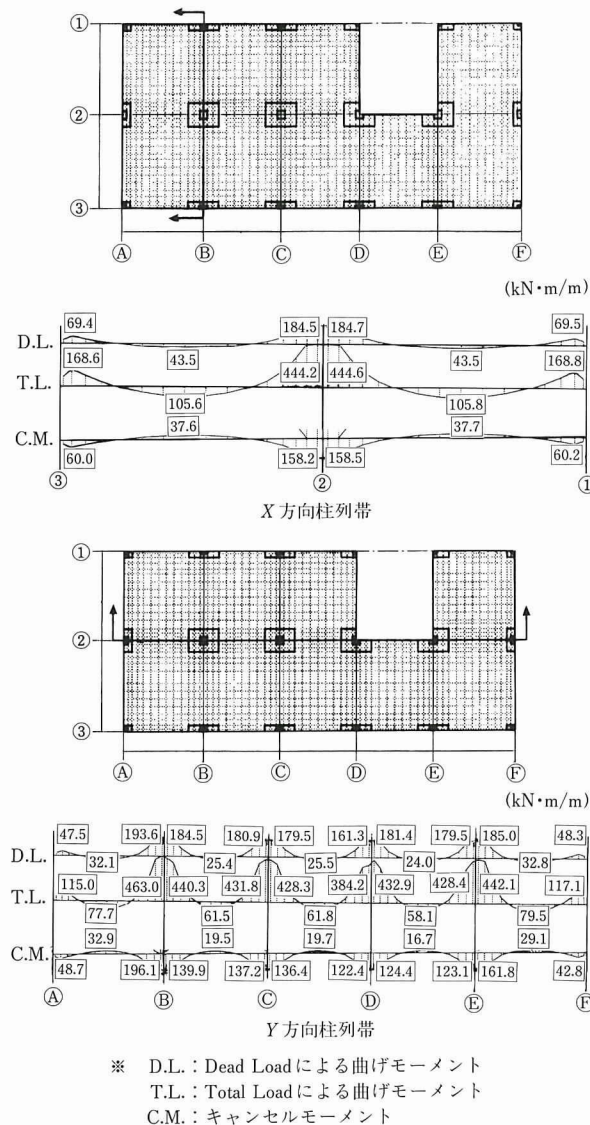


図-12 スラブの面外曲げモーメントの算出例

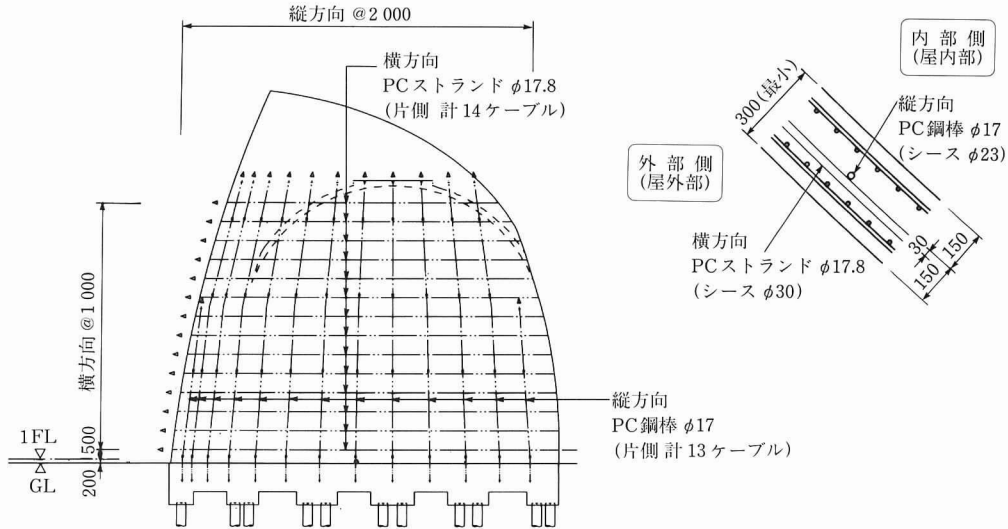


図-14 PC鋼材配置図および平断面図

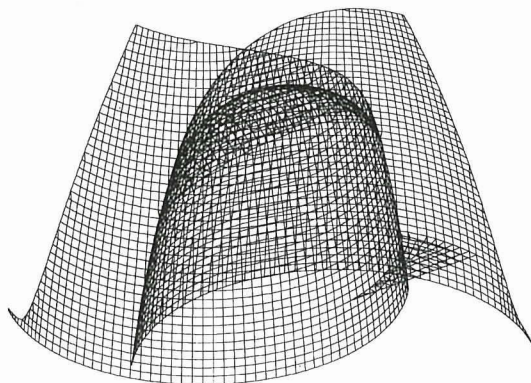


図-15 解析モデル

モデルを示します。2枚の壁と屋根といった面材はシェル要素として、実際の曲面形状をできるだけ忠実にモデル化させました。ただし、プレストレス力による断面力の算定にあたっての解析モデルは、縦方向の緊張端位置の高さまでとしました。

横方向に導入したプレストレス力は、図-16に示すように曲面板に端部の圧縮力とそれに釣り合う分布荷重を外力としてモデルに入力して、部材に発生する断面力を算定しました。鉛直方向に導入したプレストレス力についても同じ方法を用いました。

図-17にFEM解析によって算定された断面力を示します。FEM解析より屋根に最大で約0.2MPaの引張応力が発生する結果となり、その応力が小さいことを確認しました。

4.4 プレストレストコンクリート製 LNG タンクの設計

(1) プレストレストコンクリート製 LNG タンクの概要

プレレストレストコンクリート製 LNGタンク（以下、PC・LNGタンク）の断面概要を図-18に示します。この地上式のタンクは、内部の金属製タンクとその外側にあるプレレストレストコンクリート製の防液堤（以下、PC防液堤）から構成されています。内部の金属製タンクは常時の貯液性能を満足するように設計されますが、万が一、金属製のタン

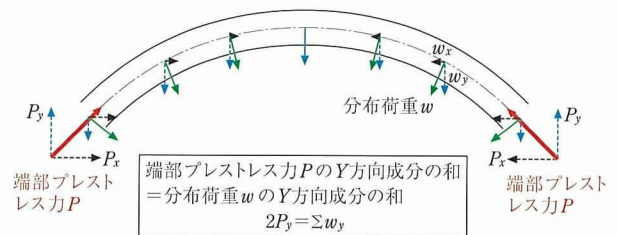
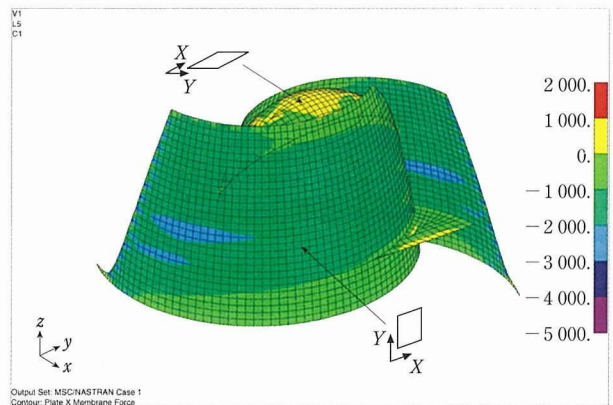
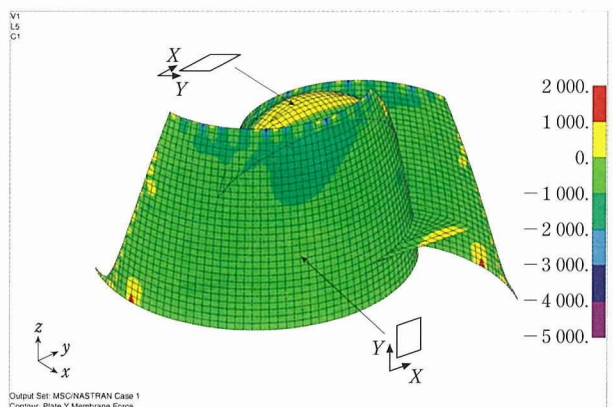


図-16 横方向のプレストレス力の取扱い



プレストレス力によるX方向の面内断面力 (N/cm)



プレストレス力によるY方向の面内断面力 (N/cm)

図-17 プレストレスト力による応力分布

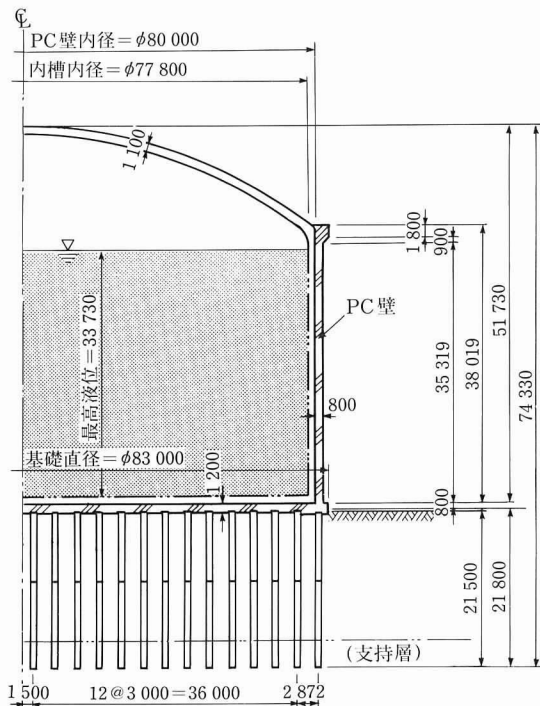


図-18 地上式PC・LNGタンク

クから LNG が漏れ出した場合（以下、漏液時）に、周囲への LNG の拡散を防止する目的で、PC防液堤が設置されています。

そのため、PC防液堤には漏液時の貯液性能を満足することが求められ、プレストレストコンクリート製となっています。ここでは、PC防液堤の水平方向導入プレストレス力の設計概要について述べます。

(2) PC防液堤の設計

① 設計方針

設計は限界状態設計法にて行います。使用限界状態の設計においては、「曲げひび割れ発生限界」と「貯液限界」を設定しています。ここに、貯液限界とは、漏液時において

内容液がPC防液堤の外側に漏れ出さないことを保証するためのもので、断面内に10 cm程度の圧縮領域を設けることが要求されています。また、終局限界状態においては断面耐力と発生断面力とを照査し、安全性を確認します（表-2）。

表-2 PC防液堤の限界状態²⁾

	通常運転時	地震時	漏液後
使用限界状態	曲げひび割れ発生限界以下	—	貯液限界以下
終局限界状態	—	断面耐力以下	—

② 設計方法

PC防液堤の導入プレストレス量や配置を検討するために行った、漏液時の設計方法について述べます。まず、漏液時の断面力分布をFEM解析により求め、次に、線形重合せの原理を用いて各部位に必要な導入プレストレス量と配置を仮定します。その仮定が貯液限界を満足するように繰り返し照査を行い設計を進めていきます。

• FEMモデルのモデル化

図-19のように鉄筋コンクリート部分をシェル要素で、PC鋼より線をトラス要素にてモデル化します。基礎版の境界条件は基礎版下にある杭をばね要素でモデル化し、基礎版と防液堤は剛結合としました。また、PC鋼より線をモデル化したトラス要素と鉄筋コンクリートをモデル化したシェル要素とは節点を共有することで、PC鋼より線の緊張により導入されるプレストレスを考慮しています。作用荷重は、漏液時の液荷重、温度荷重、自重を作用させ、漏液時の応力分布を計算します。

ここで、導入プレストレス力は、トラス要素に温度収縮を与える方法により考慮しました。

• 漏液時の断面力分布

漏液時の外力により発生する円周方向応力を図-20の●に示します。この断面力と導入プレストレス力の和が使用限界状態を満足するように、導入プレストレス量や配置、

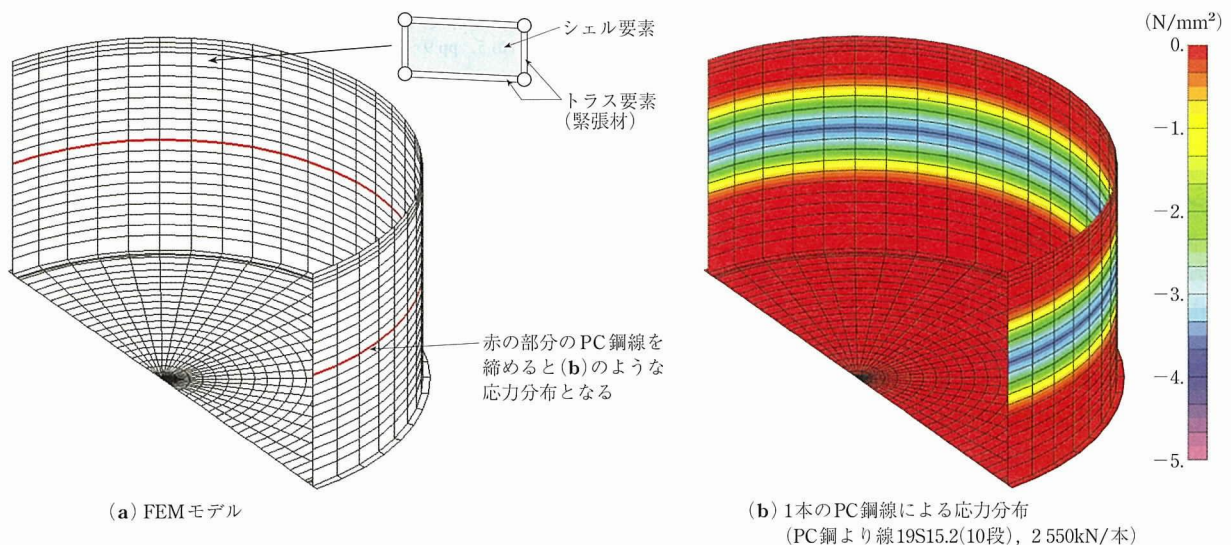


図-19 FEMモデルと一部分のPC鋼線による応力分布図

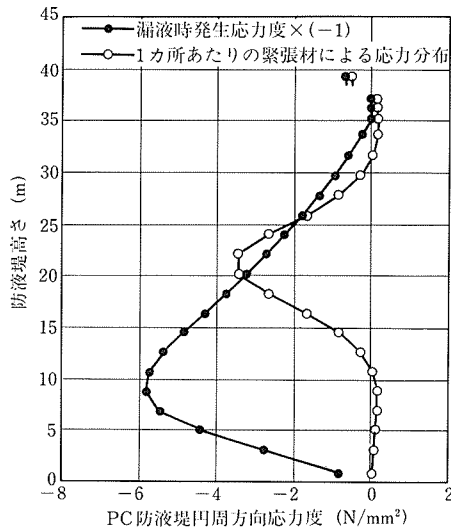


図 - 20 FEM解析結果

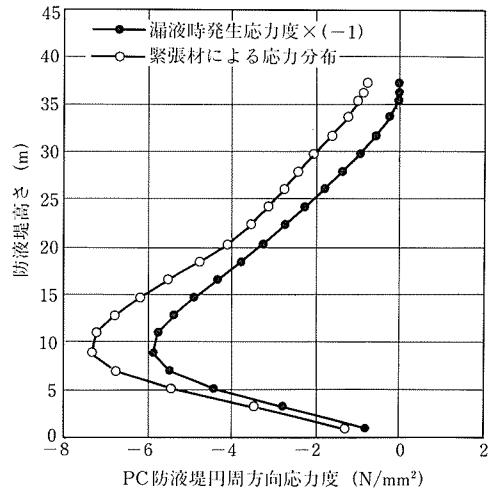


図 - 21 PS導入量検討結果

ピラスターの箇所数などを検討していきます。

● 線形重合せによるPC鋼材量の検討

図 - 19 (a)の赤い線で示した1カ所の円周方向PC鋼より線を緊張すると、図 - 19 (b)および図 - 20 の○のような円周方向応力度分布が得られます。この計算をすべての箇所の緊張材に対して実施し、それぞれの应用到に漏液時の応力を打ち消すような適切な倍率をかけて重ね合わせることににより、図 - 21 の○のような応力分布を得ることが可能となります。このようにして求められた倍率から必要な緊張力を算出し、PC鋼材量を決定しています。

(3) 設計結果

図 - 21 に設計結果を示します。線形重合せの原理を用いて重ね合わせた緊張材による応力分布は、漏液時に発生する応力を打ち消すことが分かります。

ここに、プレストレス導入力が漏液時発生応力よりも大きくなるのは、貯液限界の照査項目で、「断面内に圧縮領域を設ける」という要求性能を満足するためです。

(4) まとめ

このほかPC・LNGタンクは、PC防液堤鉛直方向もプレストレスを導入する構造です。FEM解析を適宜用いるこ

とにより、合理的に設計を進めていくことが可能になります。

5. おわりに

FEM解析が建築分野においてどのように使われているのかについて、基本事項、応用方法そして適用事例を通してご紹介しました。

適用事例の設計をとともに遂行された方々へ、本誌掲載についてご快諾いただいたことを感謝いたします。

この講座が今後のPC構造物の発展に役立つことを念じています。そして、解析方法の進歩により、構造物の設計の自由度が高くなったことは事実であると同時に、構造設計においては解析を有用な道具として使っているのであり、設計には高度の総合的判断力が必要であることを再認識いたしたく思います。

引用文献/参考文献

- 1) 六車：プレストレスコンクリート，建築構造講座8，コロナ社，p.282，1963
- 2) 中島，北村ほか：プレストレスコンクリート製大型LNGタンクの設計および施工，プレストレスコンクリート，Vol.34，No.5，pp.9～25，1992

シリーズを終えて

本年，Vol.43，No.1より6回にわたり「よくわかるPC構造物のFEM解析」と題し，講座を連載してまいりました。表題のとおり読者に広くFEM解析を理解していただくために，なるべく平易な言葉と文章で説明するよう努めてきましたが，シリーズの回数や誌面などの都合により，十分に真意をお伝えすることができたか不安です。また，FEM解析に実際に携わっている技術者にも退屈にならないように，非線形解析の実例なども取り上げましたが，一般の方には結構難しい内容になってしまったかも知れません。

しかし，今回の講座でFEM解析に対しいくらかでも理解が得られ，今後の業務などに活かしていただければ幸いです。最後に，講座の主旨をご理解いただき執筆していただいた方々に厚く御礼申し上げます。

講座部会一同