

# 低張力構成モデルを用いたボイドスラブの非線形解析

Non-Linear Analysis of Void Slab by the Low Tension Constitutive Model

吉田秀典\*・竹下智正\*\*・堺孝司\*\*\*・森西隆寛\*\*\*\*・M. Boulfiza†

Hidenori YOSHIDA, Tomomasa TAKESHITA, Koji SAKAI,

Takahiro MORINISHI and Mohamed BOULFIZA

\*正会員 博士(工学) 香川大学助教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

\*\*工修 (株)穴吹工務店 研究開発部 研究開発課 (〒761-0301 香川県高松市林町 2217-10)

\*\*\*正会員 工博 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

\*\*\*\* (株)穴吹工務店 研究開発部 部長 (〒761-0301 香川県高松市林町 2217-10)

†正会員 Ph.D 日本学術振興会 特別研究員 (〒761-0301 香川県高松市林町 2217-20)

Nowadays, void slab, two-way slab and half precast concrete plate are employed in order to control the creep or time-dependent behavior of large-span concrete slab. Additionally, barrier-free type slab that has very complicated shape to remove a difference in grade is appeared to respond the strong request for handicapped people. The mechanical behaviors of these new slabs have not been well considered yet. Above all, the non-linear behaviors due to cracks are not investigated and the linear analysis is employed to analyze their mechanical behaviors. Thus, in this article, a non-linear constitutive model for the void slab is proposed and its behaviors are analyzed by the proposed analytical method. As the low-tension constitutive equation in the region of tension stress introduced, the numerical result has good accordance with the real behavior.

**Key Words :** void slab, low-tension material, constitutive equation, non-linear analysis

## 1. はじめに

鉄筋コンクリートスラブは、住宅用構造物の中でも最も大きな面積を有し、使用者の「居住性」に対して直接的に関わってくる部材である。また、空間の自由度・デザインへの対応性を考慮し、スパンが大きく、かつ小梁のないフラットなスラブが要求されており、今後もさらに大スパンとなる傾向にある。しかし、それに伴うスラブ厚の増大は、自重・各階高の増加につながり、結果的に構造物の主架構全体の断面決定に大きく影響するものとなる。こうした問題に対応すべく、現在、様々なスラブ構法(例えば、ボイドスラブ)が開発されてきている。

一方、大スパンコンクリートスラブの力学的要求性能としては、強度、長期たわみ、ひび割れ、振動等が挙げられる。現在、一般的な鉄筋コンクリートスラブの設計は「日本建築学会；鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説<sup>1)</sup>」に、また、プレストレスト鉄筋コンクリートスラブについては「日本建築学会；プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説<sup>2)</sup>」に準じている。断面算定における鉄筋量の決定は、一般的な梁理論に基づく許容応力度設計を基本とし、スラブ厚の決定については、長期たわみを制限内に収めることを基本としている。しかしながら、スラブ最小厚さの算定式は周辺固定場所打ちスラブを対象としており、他のスラブ構法に対しての細かな設

定までには至っていない。また、長期たわみの予測提案式やひび割れ幅の制御設計に基づいた鉄筋の応力算定式が設定(参考文献<sup>1)</sup>付録7)されているが、各種スラブ構法に対しては条件が複雑となり適用困難となる。

種々のスラブの加え、近年、新たにバリアフリー住宅に対応した上面段差付き(切り欠き)スラブの需要が高まってきており、これをハーフプレキャストボイドスラブと組み合わせた非常に複雑な複合構造スラブが現れた。しかし、この段差を付けることによって変断面部分が生じ、この周辺で応力集中と、応力集中に伴って発生するひび割れによる剛性低下が懸念されている。このような問題に対しては、スラブ周辺の支持条件や板の二方向の剛性を評価した実験的・解析的な研究<sup>3)~11)</sup>がなされているが、ボイドスラブを非線形材料として扱ったものは少なく、また、亀裂(クラック)の発生などを考慮したものはまだ存在していない。こうしたボイドスラブがマンション建築などの分野において普及していくことを考えれば、その力学的パフォーマンスを把握して、さらには、数値解析などが行なえるような体制作りが必要であると考えられる。

そこで本研究では、この複雑な複合構造スラブである段差付きボイドスラブに着目し、ボイドの影響などについて解析的に検討することを目的とした。段差付きボイドスラブにおいては、変断面周辺でクラックが発生することが想定されるため、こうしたクラックの発生などを模擬できるモデル化を行ない、さらに、そ

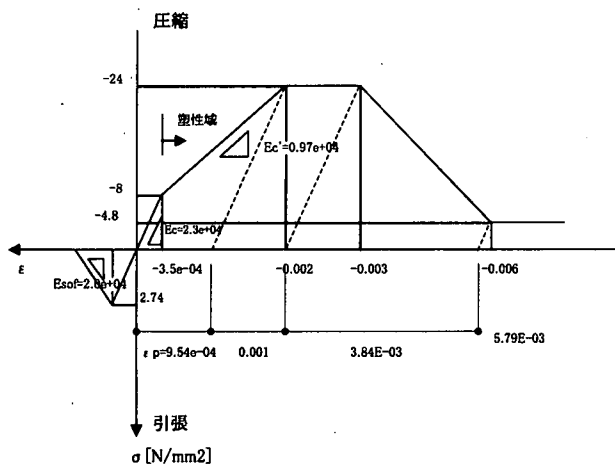


図-1 コンクリートの構成モデル

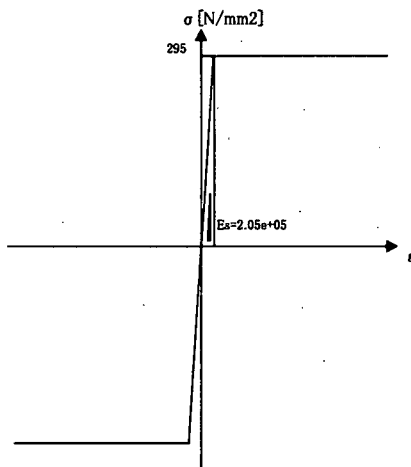


図-2 鉄筋の構成モデル

これらのモデル（構成則）を有限要素解析コードに組み込み、非線形な力学的挙動に関して解析的な検討を行なうこととした。

## 2. 低張力構成モデル

ボイドスラブの構成をなしているのは、主としてコンクリートと鉄筋であり、この点に関しては、従来の鉄筋コンクリート構造のスラブと全く同じであると考えられる。そこで本研究では、コンクリートおよび鉄筋に関する構成モデルを組み合わせることで、ボイドスラブのモデル化を行なうこととした。尚、コンクリートおよび鉄筋の変形特性および強度特性など各種特性に関しては、「日本建築学会；鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説<sup>1)</sup>」に準拠して定めた。

### 2.1 コンクリートの構成則

コンクリート材料の応力-ひずみ関係に関しては、上述した通り、図-1 に示すような構成関係を定めた。「日

本建築学会；鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説<sup>1)</sup>」によれば、コンクリート材料の初期弾性係数は、コンクリート強度の1/4 ないしは1/3 の応力の値における割線勾配（セカントモジュラス）とすることが一般的であるということより、本研究では、23,000 N/mm<sup>2</sup> と定めた。尚、コンクリートの強度に関しても、同文献を参考に圧縮側を  $F_c = 24 \text{ N/mm}^2$  とし、引張側は、以下のような算定式

$$\text{引張強度} = 0.56\sqrt{F_c} \quad (1)$$

を用いて、2.74 N/mm<sup>2</sup> とした。

圧縮側の応力-ひずみ関係において、このセカントモジュラスを取るのにはコンクリート強度の1/3 の応力（初期降伏応力度 8 N/mm<sup>2</sup>）までとし、その後、ピーク強度までは 9,700 N/mm<sup>2</sup> に減じることとした。コンクリートのピーク時におけるひずみが 0.15~0.3%<sup>1)</sup> ということから、本研究ではピーク時におけるひずみレベルを 0.2% に設定し、それから逆算してこの勾配を求めた。尚、塑性に関しては、Von-Mises の降伏関数を設定し、硬化則は等方硬化とした。

ピーク応力到達後は、ひずみのレベルが 0.3% になるまでピーク応力を保ち、その後、ひずみのレベルが 0.6% になるまでひずみ軟化し、その後は、応力（ $0.2F_c = 4.8 \text{ N/mm}^2$  の残留応力<sup>1)</sup>）を保ちながら、ひずみだけが增加するものと仮定した。

一方、引張側は、圧縮側と同じ勾配（23,000 N/mm<sup>2</sup>）を有しながら引張強度まで上昇し、引張強度に達した後は、クラックなどの発生に伴う tension-softening の挙動を再現できるようモデルを設定した。各要素において最大引張応力を求め、その応力が引張強度に達した場合、最大主応力方向に対して垂直方向な方向にクラックが入るものとした。具体的には、最大主応力方向において、図-1 に示すように、引張強度（本研究では 2.74 N/mm<sup>2</sup>）に達すると一定の勾配を有して softening するように設定した。この勾配（軟化勾配）が物理的にどのような意味を持つのか、また、どのような値がふさわしい値なのかなどを議論する必要があると思われるが、これらに関しては今後の課題としたい。本研究では、軟化勾配を 0 ~ 100,000 N/mm<sup>2</sup> までの範囲で計算を行ったが、軟化勾配を 20,000 N/mm<sup>2</sup> とした場合、次章で示すような鉄筋コンクリートの曲げ試験の解析結果が得られた。解析結果は、おまかであるが鉄筋コンクリートの曲げ試験時の挙動に近い結果と判断し、本稿においては軟化勾配を 20,000 N/mm<sup>2</sup> としたケースの計算結果を示す。

### 2.2 鉄筋の構成則

鉄筋に関しても、コンクリート同様、「日本建築学会；鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説<sup>1)</sup>」に準拠して各種材料パラメータを定め、図-2 に示すような、バ

表-1 鉄筋の材料パラメータ

種類	SD295, D10
ヤング係数	205,000 N/mm <sup>2</sup>
ポアソン比	0.3
降伏応力度	295 N/mm <sup>2</sup>
降伏条件	Von-Mises
硬化則	等方硬化

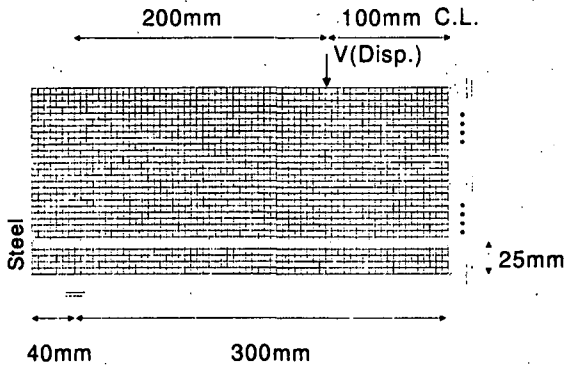


図-3 解析概要

イリニア型の応力-ひずみ関係を仮定した。鉄筋に関する材料特性を表-1 にまとめて示す。

### 3. 準備解析

#### 3.1 解析概要

ポイドスラブの力学的応答を解析的に追跡する目的で、前章で設定したような鉄筋コンクリートの構成モデルを汎用的な有限要素解析コードに組み込み、解析手法を構築した。本解析手法を用いることで、ポイドスラブのみならず、任意の境界条件、材料形状を有する鉄筋コンクリートの非線形解析が可能となる。本章では、本研究で開発した解析手法のパフォーマンスを検証するために、まず簡単な準備解析を行う。

図-3 に示すような支点間距離 600mm、高さ 150mm、奥行き 30mm のコンクリートばりに対して、平面応力の条件下で、単純な 3 等分点荷重の曲げ試験解析を行なった。左右対称問題であることから、図に示すような、単純支持 1/2 領域を、解析領域として設定した。

問題設定を簡単にするために、この解析ではコンクリートなどの自重を無視し、全ての解析パラメータは、前章で示した値を採用している。ただし、コンクリートのポアソン比は 0.2 と設定した。

鉄筋は、下縁から 25mm の箇所には 1 本配置した。鉄筋比に関しては、その値が 0.6 ~ 1.6 までの範囲で解析を行なったが、本稿では鉄筋比を 1.57 とした場合の結果のみを示す。鉄筋の付着に関しては改善の余地があるものと思われるが、本研究では、引張強度に達した

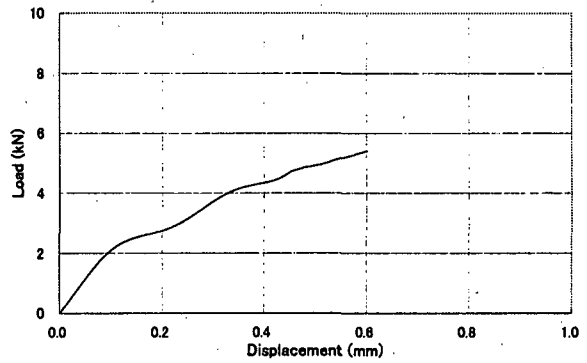


図-4 荷重-変位曲線

要素において、その方向の剛性を低下させるという低張力要素を導入した場合に、初期の段階で材料（コンクリート）がどのような挙動を呈し、その段階で鉄筋がどの程度の役割を果たすかという点に着目しているため、鉄筋の付着に関しては、詳細な議論を行わず、完全付着とした。この点についても今後の課題としたい。

荷重条件としては、はりの上縁より変位制御で荷重を与えた。尚、荷重初期において下縁の支点付近に発生したひずみ軟化領域は、荷重とともに大きくなり、やがて荷重点付近まで進展するが、解析はこの時点（与えた変位が 0.6 mm）で終了させた。これは、前述の通り、本解析では鉄筋の付着を完全密着としているため、これ以上の荷重においては現実とやや乖離があると考えたからである。

有限要素解析の要素タイプとして、コンクリートに対しては 4 節点平面応力要素を、鉄筋に対しては 2 節点トラス要素を用いた。前章で示した通り、コンクリートは、圧縮側において Tri-linear-model 型の非線形等方弾塑性体とし、引張側においては、引張強度に達した方向に剛性を失う低張力要素を導入した。また、鉄筋については、Bi-linear-model 型の非線形等方弾塑性体とした。

#### 3.2 解析結果

まず最初に、コンクリートのみの（鉄筋を導入しない）弾性解析のみを行なって、理論解との比較を行なった。紙面の関係上、それらの結果を本稿では示さないが、弾性解析の範囲においては理論解と一致していた。

次に、本研究で設定した鉄筋コンクリートの構成モデルを用いて解析を行なった。まず、荷重点における荷重-変位曲線を図-4 に示す。尚、本解析においては（変位 0.6 mm の荷重）、鉄筋は降伏していない。

荷重途中の材料の挙動を詳しく検討するために、引張軟化（本稿では便宜的にクラックひずみと呼ぶ）領域およびその値を、図-5 から図-9 にプロットした。尚、それぞれの図は、荷重変位を 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm,

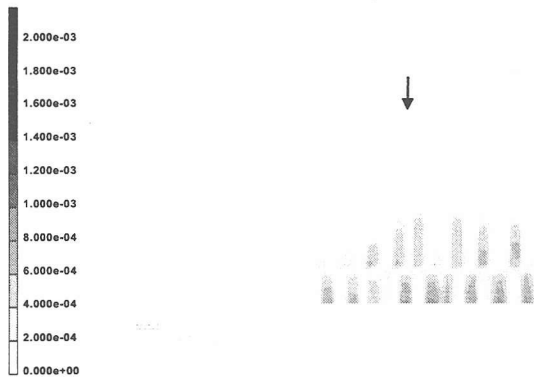


図-5 引張軟化領域における非弾性ひずみ分布 (変位 0.1 mm)

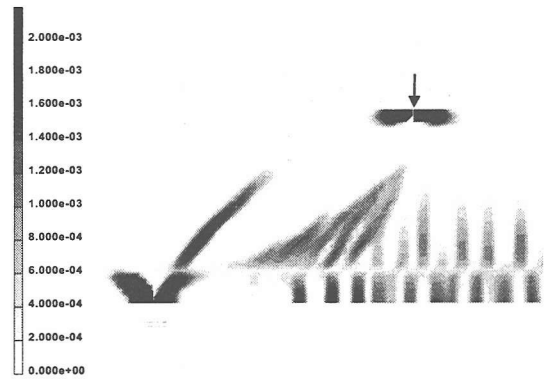


図-8 引張軟化領域における非弾性ひずみ分布 (変位 0.4 mm)

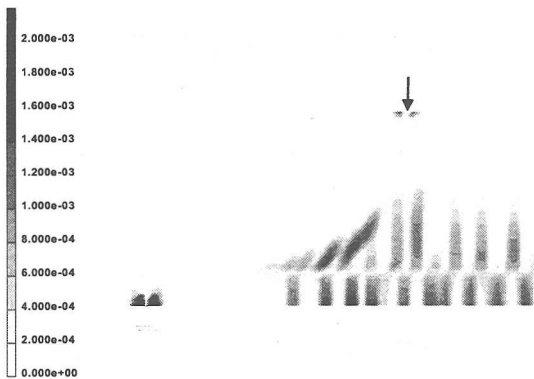


図-6 引張軟化領域における非弾性ひずみ分布 (変位 0.2 mm)

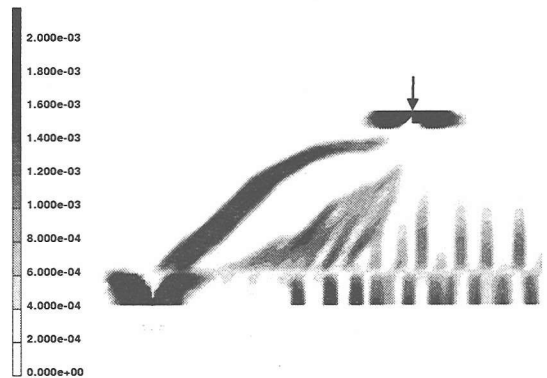


図-9 引張軟化領域における非弾性ひずみ分布 (変位 0.5 mm)

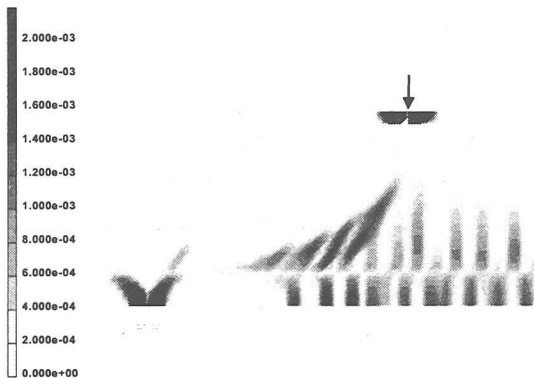


図-7 引張軟化領域における非弾性ひずみ分布 (変位 0.3 mm)

0.4 mm, そして 0.5 mm とした時に対応している。

図より、曲げモーメントが大きい、はりの中央付近から引張軟化領域が発生し、その値を大きくしながら領域を拡大していく過程が見てとれる。本研究では、引張軟化領域が塊をなして生じるのではなく、ある一定の間隔を持って、引張軟化した領域、そうでない領域が交互に存在する。これは、ある一定間隔を持って引張クラックが発生・成長するような実験的な過程と似通っている。また、引張軟化領域は部材下縁中央から支点方向に広がりを見せ、やがて、支点から荷重点に向かって進展する。この領域の成長は早く、分散して現

れることがなく、局所化の様相を呈している。これは、実験における斜め引張ひびわれの発生状況に対応していると考えられる。引張軟化が発生した付近では材料の剛性が低下し、応力を負担しなくなる一方、その応力はより健全なコンクリート部分に再配分されていることと大きな相関があることが考えられる。こうした引張軟化領域の発生と進展は、一般的な鉄筋コンクリートの曲げ挙動と類似する点が多い。

そこで、荷重の進行にともなって、どのように応力分布が変化するのかについて検討を行なった。引張軟化領域におけるひずみ分布をプロットした図に相当する時点の最大主応力の分布を図-10 から図-14 にプロットした。コンクリートばりの下縁から 25 mm の位置に鉄筋を配しているため、鉄筋において応力が高くなっているが、前述の通り、最終段階まで鉄筋自体は降伏に至っていない。

図-5 と図-10 より、引張軟化が生じた領域で応力が減少し、周辺の健全領域に応力再配分されている様子がよく分る。荷重変位 0.3 mm 位までは、引張軟化が生じた領域の拡大とともに、応力は引張軟化が生じていない健全領域へと再配分されていき、アーチのようなものを形成していることが分る。図においては明確ではないが、応力が低下した領域 (引張軟化が発生し

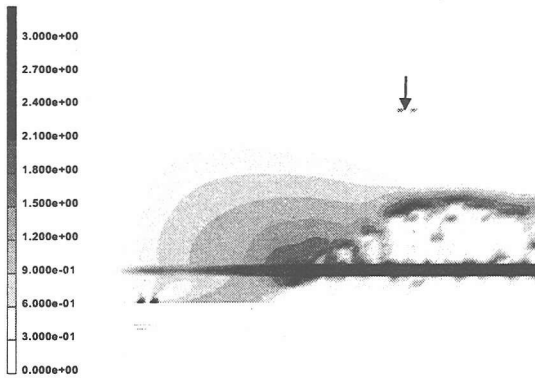


図-10 最大主応力分布 (変位 0.1 mm)

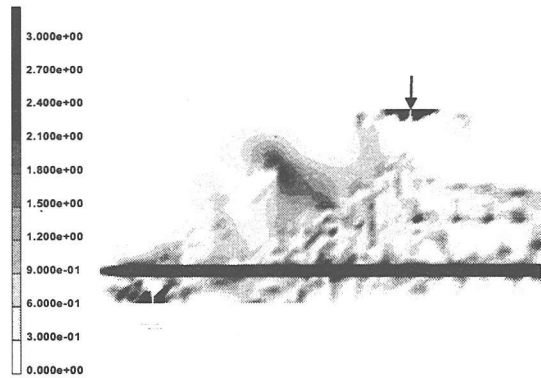


図-13 最大主応力分布 (変位 0.4 mm)

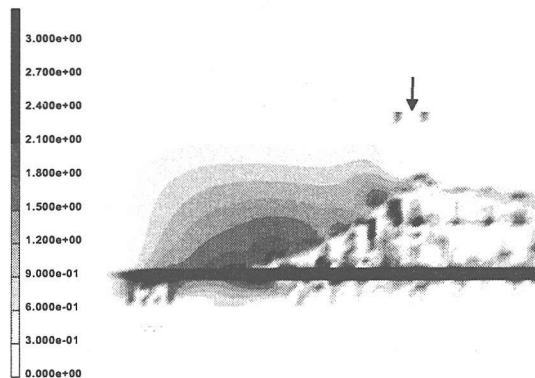


図-11 最大主応力分布 (変位 0.2 mm)

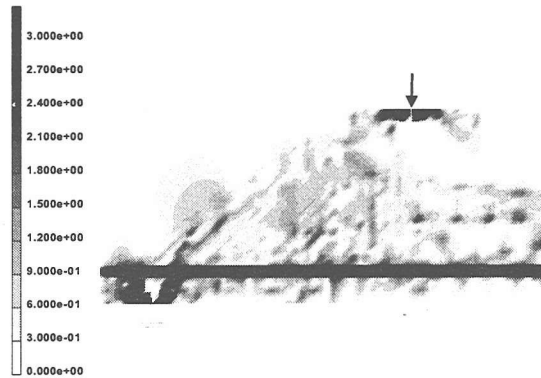


図-14 最大主応力分布 (変位 0.5 mm)

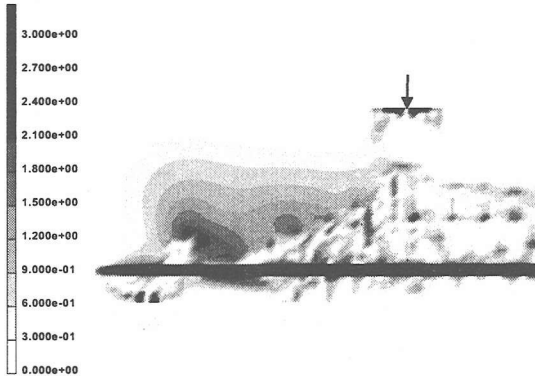


図-12 最大主応力分布 (変位 0.3 mm)

た領域)では、その近辺に配置されている鉄筋に荷重が移って、鉄筋が再配分された応力を負担している。つまり、鉄筋にも適切な応力の再配分がなされたものとする。しかしながら、荷重変位が0.4 mmあたりで、支点付近から荷重点方向における領域で引張軟化現象が起こるため(図-8参照)、はりの中央付近から徐々に再配分されてきた応力は、それ以降、適切な再配分がされていないことが、図-13や図-14より分る。荷重変位0.4 mm以降、支点から荷重点に伸びるように引張軟化領域が拡大し、かつ、その領域において、はり中央の下縁における引張軟化領域のひずみよりもひ

ずみレベルが大きくなっている。

このような状況は、実験などで見られる状況と類似する点が多く、コンクリートばりの破壊現象をおおまかではあるが再現できていると考える。これより、本研究で開発した解析手法をボイドスラブの解析に適用しても構わないものと判断した。

#### 4. ボイドスラブ解析

本研究では、ボイドスラブの力学的応答を解析的に追跡する目的で鉄筋コンクリートの構成モデルを構築し、前章にて、そのパフォーマンスの確認を行なった。最大主応力が引張強度に達した要素について、最大主応力方向の剛性のみをひずみ軟化的に低下させるという低張力要素の導入で、引張クラックの発生と進展に近い挙動の再現が可能であることが判明したため、任意の境界条件、材料形状を有する鉄筋コンクリートの非線形解析が可能であると判断し、本章では、ボイドスラブの解析を行なう。数値解析をするにあたって、問題設定としては、文献<sup>6)</sup>を参考に各種設定を行なった。文献<sup>6)</sup>においては、単なるボイドスラブではなく、今後、マンションなどにおいて積極的に用いられると思われる、「バリアフリー対応型ボイドスラブ」を問題と

表-2 解析条件

要素タイプ	3次元8節点ソリッド要素
コンクリート	2節点トラス要素
鉄筋	2節点トラス要素
拘束条件	四辺完全固定 1/2 モデル
荷重条件	積載荷重 (自重を含む) 一般部 0.00265 N/mm <sup>2</sup> 切り欠き部 0.00265 N/mm <sup>2</sup>
自重	24 kt/m <sup>3</sup>
節点数	17,360
要素数	20,158

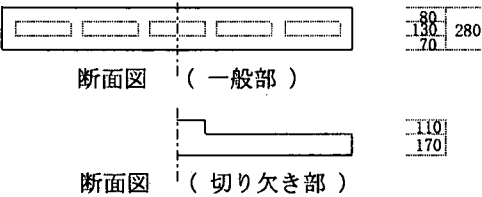
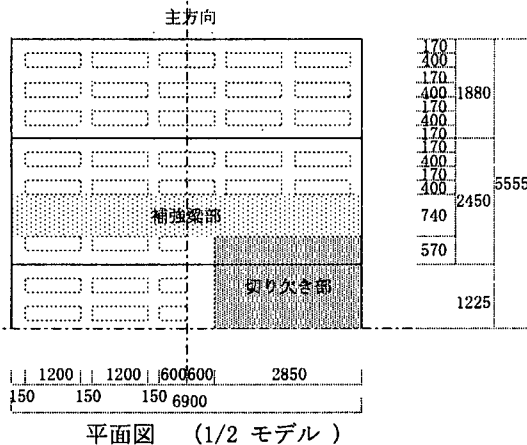


図-15 ボイドスラブの概要 (単位は mm)

表-3 鉄筋の種類

	短辺方向 (主筋)	長辺方向 (配力筋)	補強梁部
上端筋	D13 @ 150	D13 @ 150	D13 @ 100
下端筋	D13 @ 150	D10 @ 150	-

注：鉄筋の配置はメッシュのピッチに合わせた等価断面積とした。

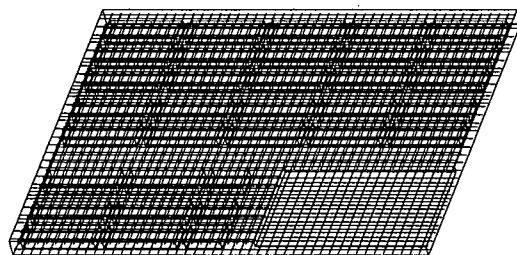


図-16 解析メッシュ (間引きして表示)

して取り上げている。その理由として、バリアフリー対応型ボイドスラブを一方方向スラブとして設計する場合、切り欠き部周辺の応力状態が不明確であり、たわみ量の計算値が過大になる傾向があるからとしている。しかしながら、文献<sup>6)</sup>では、ボイドスラブを線形弾性材料とし、ひび割れの効果などを無視している。また、鉄筋を的確にモデル化しておらず、結局のところ、より真実に近い「解」が得られているとは言い難い。そこで、本研究では、文献<sup>6)</sup>に挙げられた問題について、提案するひび割れの発生などを意識した非線形の構成モデルを用いて解析を行なう。

#### 4.1 解析概要

解析スラブの平面形状は、図-15の平面図に示す通り、その短辺寸法を6,900 mm、長辺寸法を11,110 mmとした。また、同図の断面図が示すように、スラブ厚は、全厚を280 mm、切り欠き部厚を170 mmとし、

PCa板厚を70 mm、ボイド型枠厚を130 mm、上部シェル厚を80 mmとした。スラブの境界条件はスラブ内法位置で4周辺とも固定とした。但し、本解析は長辺方向に対して左右対称問題となるため、図に示すような2分の1領域のみについて解析を行なった。対称の中心となる箇所の断面の要素では、面に対して垂直な方向の変位のみを固定し、他の方向についてはフリーとした。

載荷する荷重については、マンション建築で一般的に用いられている、スラブ設計荷重  $2.65 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$  (積載荷重  $1.75 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ , 仕上荷重  $0.9 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$  の合計) を想定し、スラブ上面 (図-15の平面図に示す面全体) に一様載荷した。

図-16に、本解析で用いたメッシュの概略 (実際はもっとメッシュが細かいが、それを掲載すると真っ黒になって見えないため) を示す。切り欠き部の位置/大きさは、図-15の平面図を参照されたい。

解析は3次元とし、材料特性は前章で示したものと同一のものを用いた。バリアフリーの切り欠き部付近は、板厚が薄いことに加え、ボイドの形状が矩形なためその隅角部周辺で応力が集中するなど、力学的に条件が厳しくなる。そこで、この部分については鉄筋の補強が図られることが一般的であることから、本解析においても、鉄筋のピッチを短くして導入している (以後、「補強部」と呼ぶ)。解析の諸条件を表-2にまとめて示す。また、用いた鉄筋の諸条件を表-3にまとめて示す。

表-4 最大変位と最大応力度

	Case A	Case B	Case C
主方向応力 (N/mm <sup>2</sup> ) (短辺方向応力)			
端部上端			
補強梁部	3.118	2.650	2.523
切り欠き部	2.454	2.454	2.364
一般部	2.375	2.375	2.241
中央下端	1.468	1.469	1.419
直交方向応力 (N/mm <sup>2</sup> ) (長辺方向応力)			
端部上端	1.913	1.913	1.817
中央下端	0.970	0.970	0.936
最大変位 (mm)			
中央付近	1.270	1.270	1.212
最大引張軟化ひずみ			
端部上端補強梁部	-	1.70E-04	1.76E-04

表-5 載荷圧と最大応力度の関係

	設計荷重解析		設計荷重の2倍の解析	
	concrete	steel	concrete	steel
主方向応力 (N/mm <sup>2</sup> ) (短辺方向応力)				
端部上端				
補強梁部	2.523	17.421	1.428	25.252
切り欠き部	2.364	7.494	2.649	10.670
一般部	2.241	12.920	2.474	16.871
中央下端	1.419	4.290	1.830	5.817
直交方向応力 (N/mm <sup>2</sup> ) (長辺方向応力)				
端部上端	1.817	7.116	2.379	9.300
中央下端	0.936	4.175	1.249	5.635

#### 4.2 解析結果

変位は、PCa板下端の節点変位をスラブ鉛直方向変位として、また、応力は、積分点における応力を節点にスムージングした値とし、設計荷重時における変位およびコンクリートの応力の最大値を表-4に示した。ここで、Case Aは無筋弾性解析を、Case Bは無筋非弾性解析を、そして、Case Cは鉄筋を考慮に入れた非弾性解析を表している。

まず、Case AとCase Bを比較することにより、線形解析と非線形解析の差が本来分るが、設計荷重時においてはスラブのほとんどの領域が弾性体であるため、両解析における応力、および変位にはほとんど差がない。両解析は無筋の解析であるが、鉄筋を補強する予定の場所、つまりバリアフリー用の切り欠き部の近辺で、非線形解析の方が応力レベルが小さくなっていることが分る。

鉄筋の影響を評価するためには、Case BとCase Cを比較すればよいわけであるが、上述の通り、設計荷重時においてはスラブのほとんどの領域が弾性体であるため、あまり鉄筋の効果が現れていないことが分る。鉄筋を有する解析の方が、全ての箇所での応力レベルは小さいものの、設計荷重時において、鉄筋の効果を言

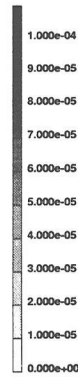


図-17 引張軟化領域における非弾性ひずみ分布 (設計荷重, 斜め上部から見た図)

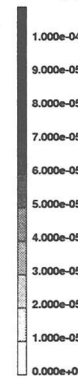


図-18 引張軟化領域における非弾性ひずみ分布 (設計荷重の2倍, 斜め上部から見た図)

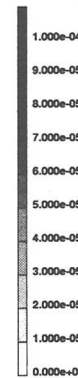


図-19 引張軟化領域における非弾性ひずみ分布 (設計荷重の4倍, 斜め上部から見た図)

及することは難しいと言えよう。尚、引張軟化領域における非弾性ひずみの最大値についても、ほとんど差が出ていない。参考までに、図-17に、Case Cにおける引張軟化領域における非弾性ひずみ分布を示すが、これより、ほとんどスラブ全体が弾性体であることが分る。尚、この解析において、圧縮側で塑性域に入っている要素は存在しない。

そこで、解析領域において、もう少し引張軟化領域の占める領域を大きくさせる目的で、設計荷重の2倍、

及び4倍の荷重を載荷する解析を追加した。実際には、このような大きな荷重は作用しないのが一般的であるが、本解析では、バリアフリーポイドスラブがどのような挙動を呈し、さらに、鉄筋の効果などがどの程度あるのかを検討するためにこのような解析を行なった。表-4で示した箇所と同じ箇所におけるコンクリート、あるいは鉄筋における応力を算出し、その結果を、表-5に示す。さらに、設計荷重の2倍、及び4倍の荷重を載荷する解析における引張軟化領域における非弾性ひずみ分布を、それぞれ図-18、図-19に示す。これより、ある程度まで荷重を増加させることで、引張軟化領域が拡大し、短辺方向の両端にそれが広がっている。また、設計荷重の4倍まで載荷すると、短辺方向だけでなく長辺方向の端部やバリアフリーの切り欠き部(図-19における中央下部)でも引張軟化領域が生じている。本解析では、4周辺固定スラブの解析を行なったが、この場合、バリアフリーの切り欠き部より、スラブを固定する箇所の方が、強度的には弱いことが判明した。

各所に配置された鉄筋の応力は増加しているものの、コンクリート部においては、依然として弾性体である領域が多く存在するため、一部を除いて応力は増加しているが、載荷圧が2倍になっていることを考慮に入れば、それほど大きな増加とは言えないのではないだろうか。これは即ち、荷重の増加にともなって材料の剛性などが低下し、応力がより健全な領域に、あるいは鉄筋へと再配分されていることを示唆しているものと思われる。

## 5. まとめ

近年、バリアフリー住宅に対応した上面段差付き(切り欠き)スラブの需要が高まってきており、これをハーフプレキャストポイドスラブと組み合わせた非常に複雑な複合構造スラブが現れた。しかし、この段差を付けることによって生じる、変断面部分への応力集中とそのひび割れ発生による剛性低下や適切なポイドスラブの剛性評価が懸念されているため、本研究では、こうしたひび割れ発生などにより剛性低下を表現できるスラブの構成則を導いた。

まず、導いた構成モデルのパフォーマンスを検証するために、簡単な3等分曲げ試験の解析を行い、実際の現象と酷似していることを確認すると同時に、こうした非線形材料の破壊に至るメカニズムについて考察を加えた。鉄筋コンクリートのダクタイルな挙動やそのタフネスを的確に表現するには、鉄筋の付着などを的確に捉えてモデル化する必要がある。しかしながら、本研究では、引張破壊を生じて、異方的な挙動をすることを念頭においた構成モデルの開発の途についたばかりであることから、鉄筋の付着問題は次なるステッ

プという位置付けで、載荷初期段階における鉄筋コンクリートの挙動について検討を加えた。その結果、本研究で提案している低張力材料の構成モデルは、鉄筋コンクリートの挙動を再現することが可能であることを確認した。

次に、バリアフリー型のポイドスラブの解析を行い、通常の設計の範囲におけるポイドスラブの健全性や、非線形領域における鉄筋の効果、そして切り欠き部の存在の影響などについて検討を行なった。現行の設計においてポイドスラブは力学的に特に問題となるようなことはないという結論に達した。しかしながら、よりスラブが大型化したり、あるいは、バリアフリーの切り欠き部分の形状、大きさによっては、静的のみならず、材料の長期、あるいは動的挙動に影響を与える可能性もあるものと思われる。今後は、こうした問題に対応できるよう、モデルや解析手法の改良、拡張を行なっていく予定である。

付記: 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究補助金(奨励研究 課題番号 12750423, 研究代表者: 吉田秀典)の助成を得て行なった。

## 参考文献

- 1) (社)日本建築学会;鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説,1999.
- 2) (社)日本建築学会;プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説,1986.
- 3) 荒川総一郎,青木功,法量良二 他;バリアフリー対応型ポイドスラブに関する実験研究(その1~その4),日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.695-702,1998.
- 4) 荒川総一郎,法量良二 他;バリアフリー対応型ポイドスラブの設計手法に関する研究(その1~その2),日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.343-346,1999.
- 5) 法量良二,金子裕一 他;バリアフリー対応型段差付きポイドスラブの実大住宅における短期載荷実験(その1~その4),日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.347-354,1999.
- 6) 渡部雄二,法量良二,佐藤真一郎,小山正豪;バリアフリー対応型二方向ポイドスラブ,コンクリート工学,vol.38, No.8, 2000.
- 7) 小堀隆治,渡辺一弘 他;バリアフリー対応型ポイドスラブの設計手法に関する研究(その3~その5),日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.751-756,2000.
- 8) 小堀隆治,荒川総一郎 他;バリアフリー対応型ポイドスラブの設計手法に関する研究(その7~その8),日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.757-760,2000.
- 9) 川相真実,菊本一高,佐藤立美;段差付き中空スラブの応力・変形に関する実験的研究,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.761-762,2000.
- 10) 法量良二,金子裕一 他;バリアフリー対応型段差付きポイドスラブの実大住宅における長期載荷実験(その1~その4),日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.763-770,2000.
- 11) 上田正生,土橋由造;鉄筋コンクリート床版の非線形解析,日本建築学会論文報告集,第283号,pp.26-36,1979.

(2001年4月20日受付)