

I-12 周辺を拘束した鉄筋コンクリート床版の圧縮膜作用について

北大 ○上田正生 ・ 土橋由造

はじめに 周辺を拘束したRC床版は 版面内に生ずるアーチ作用により、他の支持形態の床版に比べて、実験と理論との対応の点で 著るしく異つた変形や耐力を呈することは周知の現象であるが、この事実は、1955年に、Ocklestonが実験とJohansen 理論との大きな乖離として提起したものである。その後も、主として降状線理論の立場から、多くの研究が為されてきたが、未だ終局耐力についてさえ 確定的な予測値を得られぬ現状である。最近、時流の進展により、有限要素法を用いたRC床版の材料非線型解析が可能となつたが、既往の報告の殆どは、単純支持や自由辺をもつ床版の実験と照合したものであつて、周辺を拘束した床版の解析例は極めて少なく、而も、この種床版に特有な圧縮膜効果について論及したものは見当らぬようである。本報告は、2軸応力下のコンクリートに、Darwin等の接線応力-歪マトリクスを使用した有限要素法により、周辺を拘束したRC床版の材料非線型解析を行い、実験結果との対比によつて、これらの床版に特有の圧縮膜作用や、耐力性状等について述べたものである。

1 解析法の概要

本報告の材料非線型解析法は、初期応力法を混合型有限要素法に適用したものであつて、解析のための基本仮定は前報告⁴とほぼ同一であるゆえ、ここでは、この報告に特徴的なコンクリートの応力-歪関係についてのみ記述することにする。

(1) コンクリートの応力-歪マトリクス 2軸応力下にあるコンクリートの、破壊以前の非線形性を表示する応力-歪マトリクスとして、種々のモデルが提案されているが、1976年、野口は³、Liu, Darwin, Kupfer, Romstad等のモデルと、Drucker-Prager の降状条件を使用した弾-塑性モデルによる解析結果を、Nelissen, Kupferの実験結果と比較し、上記の解析値のうちでは、Darwinモデルが最もよい適応性を有しており、Kupferの値は、高応力下で、歪が小さめとなり、よい結果が得られぬことを述べている。Kupferモデルが剛性を過大評価することは、このモデルを用いて行つた著者等^{4,5}のRC床版の材料非線型解析の際にも認められたが、この報告では、Darwinの接線応力-歪マトリクスを基本モデルとして採用することにする。

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_1 \\ \Delta\sigma_2 \\ \Delta\tau_{12} \end{Bmatrix} = \frac{1}{1-\nu_e} \begin{bmatrix} E_1 & \nu_e \sqrt{E_1 E_2} & 0 \\ \nu_e \sqrt{E_1 E_2} & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4}(E_1 + E_2 - 2\nu_e \sqrt{E_1 E_2}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_1 \\ \Delta\epsilon_2 \\ \Delta\gamma_{12} \end{Bmatrix} = [D] \{\Delta\epsilon\} \quad (1)$$

但し、 E_1, E_2 : 主応力方向の接線ヤング係数、 ν_e : 等価ポアソン比

(2) コンクリートの破壊条件と破壊後の

応力-歪曲線 2軸応力下のコンクリートの破壊条件を、各応力領域ごとに次式で与える。

引張り-引張り:

$$f_{crack}(\sigma_1) = \sigma_1 - \sigma_{ct} = 0 \quad (2)$$

引張り-圧縮:

$$f_{crack}(\sigma_1, \sigma_2) = \frac{E_c}{\sigma_{ct}} \sigma_1 - \sigma_2 - F_c = 0 \quad (3)$$

圧縮-圧縮:

$$f_{com}(\sigma_1, \sigma_2) = \left(\frac{\sigma_1}{F_c} + \frac{\sigma_2}{F_c} \right)^2 - 3.65 \frac{\sigma_1}{F_c} = 0 \quad (4)$$

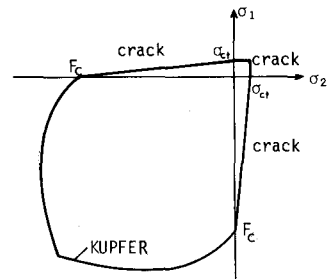


図1 コンクリートの破壊曲面

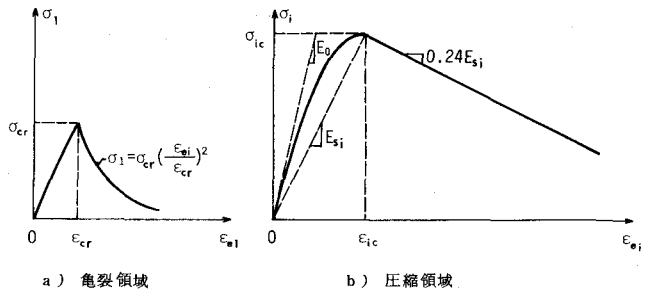


図2 破壊後のコンクリートの仮定応力-歪曲線

以上3式のうち(2)、(3)式は既報^{4,5}の条件と同一であり、図1の破壊曲面上で、 σ_1 と直角方向に亀裂が生じ、 σ_2 は鉄筋の引張り剛性効果により、図2-(a)に示す垂直曲線に沿って徐々に応力を消失するものとする。また、2軸圧縮領域の破壊条件式(4)はKupfer²の提案式であつて、この曲線上で圧縮破壊したコンクリートは、2方向に亀裂の生じた場合と同様、その剛性[D]は零マトリクスとし、図2-(b)に示す直線に従つて応力を解除する。この直線の傾きは、一軸剛性試験による木山と西林の研究を参考にして定めたものである。

2 実験床版の概要

試験床版はA、B、Cの3枚の版で、A、B版が $2m \times 2m$ 、C版は $1.2m \times 1.2m$ の正方形R版である。図3、4、5に、夫々の補剛架構及び当該床版の位置と符号を示したが、8点載荷のA版は6枚構成の、又、9点載荷のB、C版は9枚構成の柱付補剛架構中に位置したもので、A、C版は、既に破壊実験を終えた隣接床版2枚を切り落した後に(図3及び5参照)、又B版の場合は、他の周辺床版8枚の実験を終え、その儘として最後に実験を行なつたものである。これらの床版の拘束度を比較すると、B、C版では隣接床版の補剛効果が不明であるため、その大小関係を明示することは出来ぬがこの2枚とA版を比べると、補剛梁の寸度と隣接床版の有無等からA版が幾分低い状態にあるものと見ることが出来る。尚、表1に試験床版の形状諸元と、使用材料の力学的性質を掲げた。

3 実験と解析値との比較と考察

(1)床版A この床版は、拘束辺中央と版中央点の補強筋応力の測定目的をも有していたので、載荷板による応力の擾乱の影響を避けるため、中央荷重点を取り除き8点載荷としたものである。図6は、解析値と実験結果を、版中央点の荷重-撓み曲線で比較したもので、図中には、1)拘束辺の面内変位を拘束した完全固定条件の解と、2)拘束辺上の節点に、梁を想定した水平バネ要素を付加し、終局荷重が実験値とほぼ等しくなるバネ定数 $K_0 = 8 \times 10^4$ の解、及び、3)2軸圧縮領域のコンクリートを完全弾塑性体と仮定した既報告⁴のE-型解の3種の解析曲線を併記した。図によれば、E-型の解は、剛性、耐力とも、実験値を可成り上廻っているが、この原因としては、図7に示したように、高圧縮応力下におけるE-型の応力-歪曲線の過大なエネルギー評価にあると思われる。即ちこのことはコンクリートの圧縮破壊が耐荷能を規定するような床版の場合には、圧縮破壊後の応力減衰を考慮

することが必要なことを示し

表1 実験床版の形状寸度及び材料性状諸元

床版符号	寸法 cm	版厚 mm	鉄筋比 %	鉄筋位置 mm	鉄筋の材料性状		コンクリートの材料性状				
					E	σ	E_0	F	σ	ϵ	
A	200x200	56.4	上 0.284 下 0.284	17.2 42.0	2.1×10^5	4600.0	3.0×10^5	295.0	25.0	0.23	
B	200x200	65.2	0.364	32.8	2.1×10^5	4600.0	2.7×10^5	256.0	20.2	0.22	
C	120x120	49.7	0.320	28.0	2.1×10^5	4500.0	2.5×10^5	245.2	19.2	0.21	

り小さく、この圧縮膜力が床注： 1) 鉄筋比は全版厚に対する値

2) 鉄筋位置は版上面から鉄筋中心までの距離

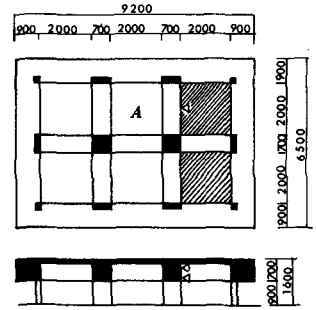


図3 A床版の補剛架構

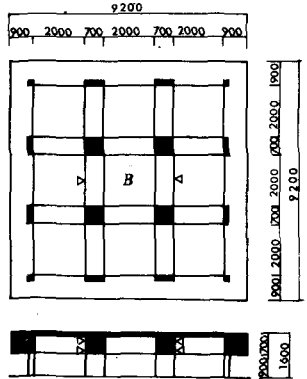


図4 B床版の補剛架構

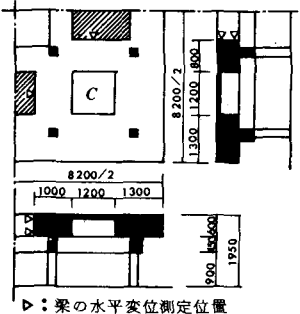


図5 C床版の補剛架構

※斜線部分は破壊実験終了後スラブを切り落したものである

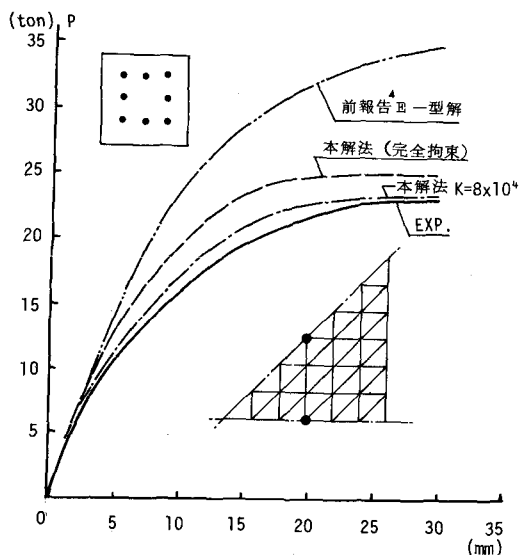


図6 A版の中央点の荷重-撓み曲線

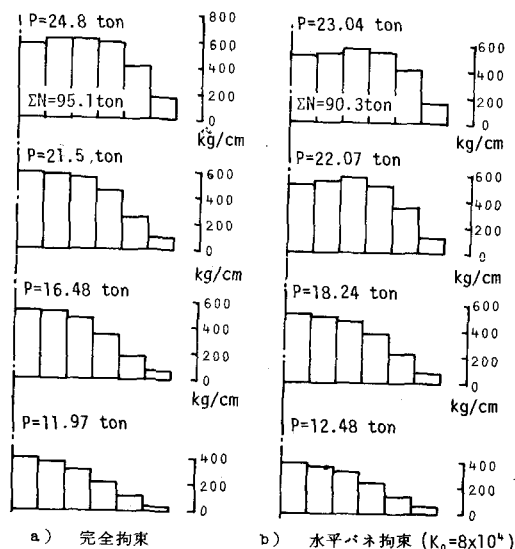


図8 拘束辺に沿う圧縮膜力分布の推移状況

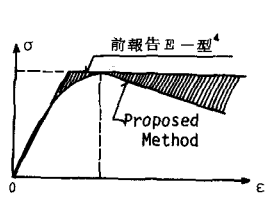


図7 圧縮領域のコンクリートの仮定応力-歪曲線の相違

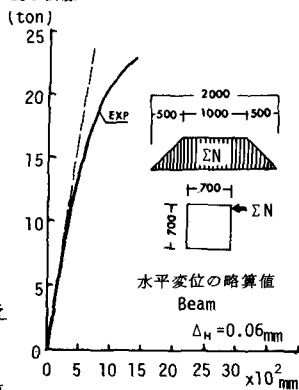


図9 補剛梁中央部上・下2点の平均水平変位の実測値

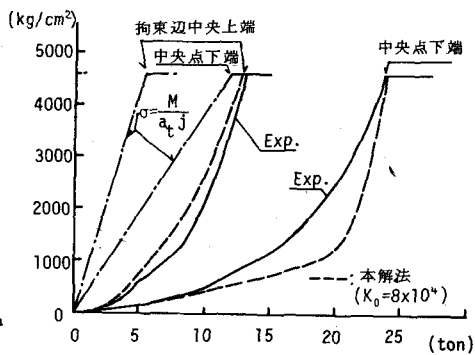


図10 鉄筋応力の推移状況

版の耐力能力に顕著な影響を与えていることを知ることができる。又、この結果によれば、最大荷重時の拘束梁一本当りに作用する膜力の総和は、 $K_0=8 \times 10^4$ の解でも 90.3 ton に達している。因に、周辺梁一本当りに加わる最大鉛直荷重は終局耐力の $1/4$ で約 5.85 ton となる。従つて、水平膜力は鉛直荷重の 1.54 倍にもなり、周辺梁には梁を外側に押し出す極めて大きな水平力が作用することになる。この膜力分布を台形で近似し、両端固定の周辺梁に荷重として作用させると、中央点の弾性変位は約 0.06 mm となる。図9には、ダイヤルゲージ ($1/100_{\text{mm}}$) で計測した周辺梁中央部の上下2点の平均水平変位曲線を掲げたが、この梁が仮に弾性状態を持続するものとすれば、終局時における仮想の変位は約 0.07 mm 前後となり、前記の略算値に近い値が得られる。また、図10は、版中央点下端筋と拘束辺中央上端筋の実測応力値を、水平バネ拘束時の解と対比

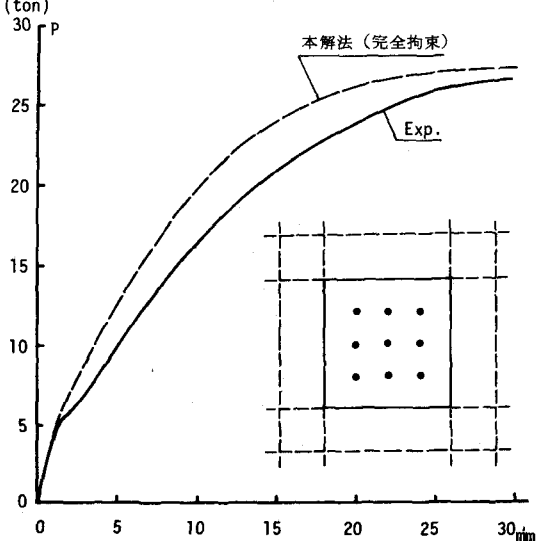


図11 B版の中央点の荷重-撓み曲線

したものであるが、両者は比較的良好に近似している。

(2) 床版 B この床版は9枚構成の補剛架構の中央に位置しており、拘束度は極めて高いものと考えられるが、試験開始以前に、乾燥収縮によると思われる貫通亀裂が、図4に破線で記入した部位に認められたもので、収縮亀裂を有する床版の撓み形状や、耐力を知るための一実験例として採り上げたものである。図11に、完全拘束の本解析値と実験荷重-撓み曲線を示した。両者を比較すると、実験曲線には荷重6 ton近傍の低荷重下で、変形流れの現象が見られるが、終局荷重は実験値の1.03倍とよく近似している。又この低荷重時の変形流れ現象は 収縮亀裂による影響と考えられ、亀裂が無ければ 解析値と実験曲線はよりよい近似度を示すであろうことが推察される。

(3) 床版 C この版は完全固定に近い拘束度を持つ、収縮亀裂のない健全な床版の例として記載した。図2に中央点の荷重-撓み曲線を示した。解析値は完全拘束時の解のみを掲げたが、この場合は、解析曲線全体が可成りよく実験結果と対応しており、本床版の拘束度が完全固定にほど近い状態にあることを推量させるが、このことは又、試験時において、周辺梁中央部の水平変位が1/100mmダイヤルゲージでは計測出来なかつたことから裏づけられるものである。図13は、拘束辺上のコンクリートの版厚方向応力分布の状況を、3段階の荷重について示したものである。この図のコンクリート層の応力を各要素ごとに積算し、鉄筋の負担応力を加算すると、図14に掲げた拘束辺に沿う圧縮膜力分布が得られる。

4 まとめ

以上、周辺が拘束された3枚の実験R C床版の解析を行い、拘束辺上の版厚方向の応力分布と、圧縮膜力の分布形状を呈示し、梁の水平変位も含めて、荷重-撓み曲線及び鉄筋応力等の実験と解析値との比較考察を行い、本解法の妥当性を示して、2軸圧縮領域におけるコンクリートの破壊後の応力漸減を考慮することの必要性や、面内拘束度が床版の変形・耐力性状に大きな影響を与えること等の知見を明らかにした。尚、本報告の計算には北大大型計算機センターのF A C O M 230/75、及びH I T A C M - 180を使用した。

参 考 文 献

1. Darwin, D., Pecknold, D. A. W., [Nonlinear Biaxial Stress-Strain Law for Concrete] ASCE, Vol. 103, No. EM2, 1977
2. 木山、西林 [コンクリートの破壊前後の応力-ひずみ挙動] 土木学会論文報告集, 第240号, 1975
3. 野口 [有限要素法による鉄筋コンクリートの非線形解析, 第1報] 建築学会論文報告集252, 1977
4. 上田、土橋 [鉄筋コンクリート床版の非線形解析] 土木学会道支部論文報告集第35号, 1979
5. 上田、土橋 [鉄筋コンクリート床版の非線形解析] 建築学会論文報告集283, 1979

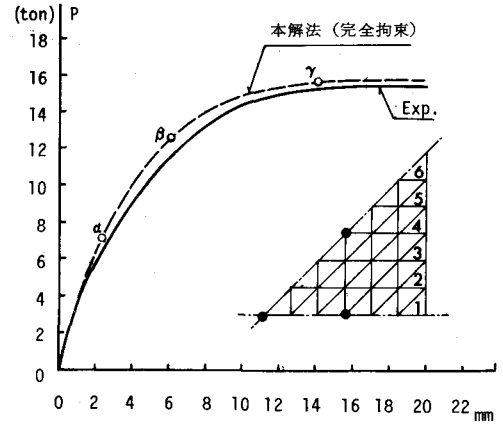
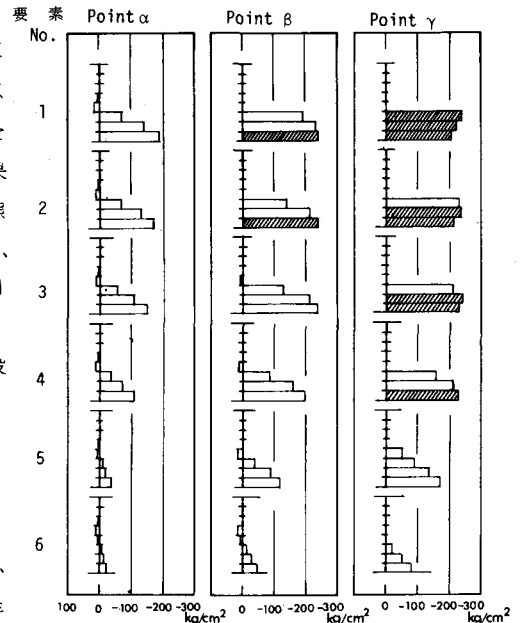


図12 C床版の中央点の荷重-撓み曲線



注) 斜線部は最大圧縮応力後の応力漸減領域にあることを示す

図13 C床版の拘束辺に沿う版厚方向の応力分布の推移

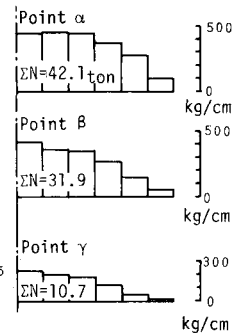


図14 C床版拘束辺の膜力分布の推移