

論文 RC 造有孔梁のプレストレス導入による開孔補強効果に関する解析的研究

尾関 桂子^{*1}・篠原 保二^{*2}

要旨 : RC 造有孔梁の孔部に発生するひび割れを低減させる為、梁に PC 鋼棒を回周させプレストレス導入し、開孔補強する実験が行われている。本論文では、三次元有限要素法解析によりこの補強効果を検証し、その結果以下の知見が得られた。(1)プレストレス導入したモデルは孔際補強筋の負担が小さかった。これは、プレストレス導入によりひび割れ幅、ひび割れ発生領域の抑制効果が得られたことに起因する。(2)等価拘束圧、損傷度という 2 つの尺度を用いることで、プレストレス導入による圧縮応力の分散効果が明らかになった。

キーワード : AC 工法, 等価拘束圧, 損傷度, 三次元解析

1. はじめに

RC 造有孔梁は断面が欠損しているため、応力集中や収縮ひずみの影響等で、非常にひび割れが発生しやすくなっている。そういったひび割れ発生の緩和策として、既存 RC 造建物の有孔梁を対象とし孔の周囲に PC 鋼棒を回周させプレストレスを導入する開孔補強方法(以下 AC 工法)が提案されている¹⁾。実験では、AC 工法の有孔梁は無補強の試験体と比較してひび割れ幅の抑制、せん断終局耐力の上昇、といった効果があるという知見が得られた。そこで本研究では、プレストレス導入が内部コンクリートにもたらす拘束効果に着目し、三次元有限要素法解析を行い、等価拘束圧と損傷度という尺度を用いて、その拘束効果を積分点レベルで明らかにすることを目的としている。解析には、有限要素法解析用汎用ソフト DIANA を用いる。

2. 解析概要

2.1 対象試験体・要素分割

解析対象試験体の要素分割を図-1に示す。実験では AC 工法の試験体は 1 体のみであったが、今回の解析ではプレストレス導入の効果を実用

的な観点から検証するために、プレストレスの導入方法を変数とした。すなわち、実験と同様に梁せい・梁幅面 4 面に均等にプレストレスを導入したモデル(No.4)の他に、実際には梁は床スラブと一体となっているために、4 方向にプレストレスを導入することは困難であることから、プレストレス導入を梁せい面と梁幅下面の 3 方向にしたモデル(No.3)、梁せい面のみの 2 方向にしたモデル(No.2)、さらに比較のため、PC 鋼棒に全くプレストレスを加えないモデル(No.1)、以上の 4 モデルを解析対象とする。これらのプレストレス導入方法についての概念図を図-2に示す。

実験では正負交番繰り返し载荷を行ったが、今回の解析では梁の右側断面において y 軸正方向に変位制御で荷重を与えている。また、逆対称加力とするために、その右側断面の x 方向変位と等しくする Tying を設定した。コンクリートには、直方体要素には 8 節点、角錐形要素には 6 節点のアイソパラメトリック・ソリッド要素を使用した。主筋、せん断補強筋には埋め込み鉄筋要素を採用し、コンクリートと鉄筋の間は完全付着とした。また、PC 鋼棒にはトラス要素を

*1 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻 工修 (正会員)

*2 東京工業大学 建築物理研究センター助教授 工博 (正会員)

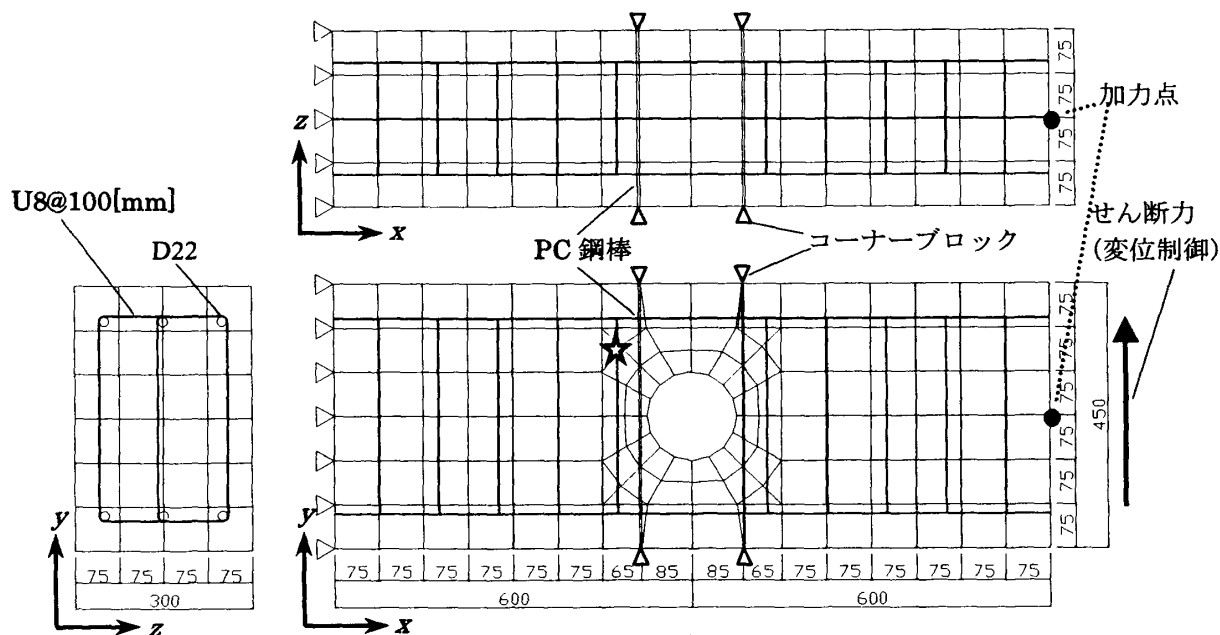


図-1 要素分割

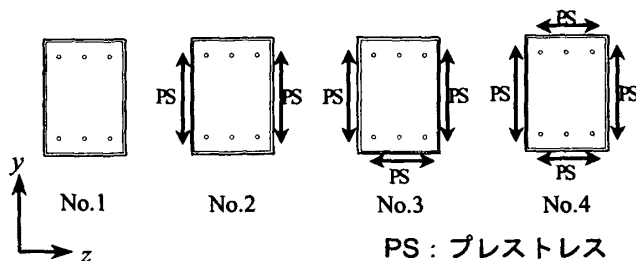


図-2 プレストレス導入概念図

用いている。加力方法としては、プレストレスを加える No.2～No.4 モデルに関しては実験と同量(プレストレス導入量 $\sigma_p=602\text{N/mm}^2$)の初期応力を PC 鋼棒要素に加え、その後変位制御でせん断力を与えていく。

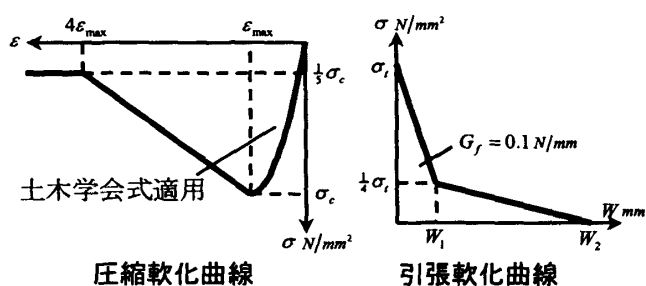
2.2 構成モデル概要

本研究で用いたコンクリート、鉄筋の要素特性を図-3、4に示す。

コンクリートの応力上昇部分には、土木学会のコンクリート標準示方書の式を用い、ヤング係数は実験のシリンダ圧縮試験から算出した値を用いた。圧縮領域には Drucker-Prager 破壊基準を採用し、内部摩擦角は 20° とした。また、引張領域においては最大引張応力基準によるテンションカットオフを採用し、引張軟化特性としてパイリニアモデルを用いている。

鉄筋の材料データは全て、実験で用いた鉄筋の材料試験から得た値を用いており、ひずみ硬

化を仮定しないパイリニアとし、Von Mises の降伏条件を採用した。

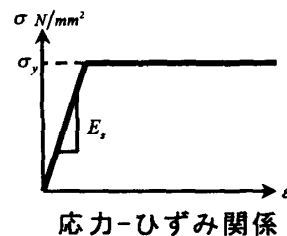


圧縮軟化曲線

引張軟化曲線

σ_c N/mm ²	ϵ_{max}	E_c N/mm ²	σ_t N/mm ²	W_1 mm	W_2 mm	ν
39	0.002	2.4E+4	2.8	0.032	0.16	0.2

図-3 コンクリート要素特性



応力-ひずみ関係

	$\sigma_y(\text{N/mm}^2)$	$E_s(\text{N/mm}^2)$
主筋	1153	1.90E+5
補強筋	874	1.95E+5

図-4 鉄筋要素特性

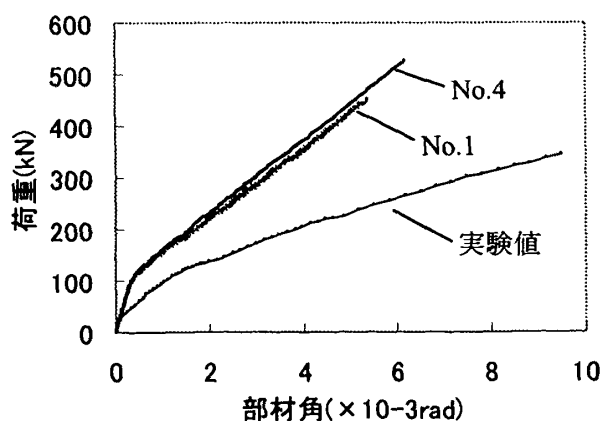


図-5 Q-R 曲線

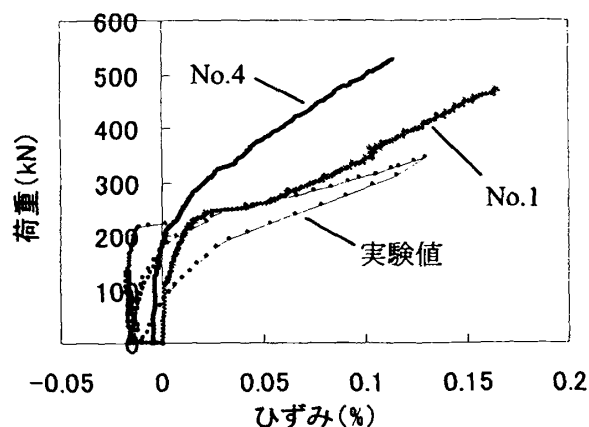


図-6 Q-ε 曲線

3. 解析結果

3.1 Q-R 曲線

図-5に、せん断力 Q と部材変形角 R の関係を示す。プレストレスを4方向に対して導入した No.4 は、プレストレスを加えていない No.1 と比べて勾配にはあまり差が生じていないが、最大強度は No.4 の方が約 15% 高く出ている。また、実験値と解析値を比較すると、実験とプレストレス導入方向が等しい No.4 を始めとして全ての解析モデルが、実験結果より勾配が高くなっていた。この原因としてはまず、本解析モデルが分散ひび割れを採用しているために、小さいひび割れ幅が分散するのに対し、実験ではひび割れが局所化し、数本のひび割れ幅が卓越したことが考えられる。それ故、解析ではストレスロッキングの影響により、コンクリート要素の変形が隣接する別のコンクリート要素により拘束されたのだと思われる。さらに、補強筋とコンクリートの間の付着を完全付着としたことも、剛性が高くなった要因と考えられる。また、主筋、せん断補強筋は解析、実験とも最大耐力まで降伏しなかった。

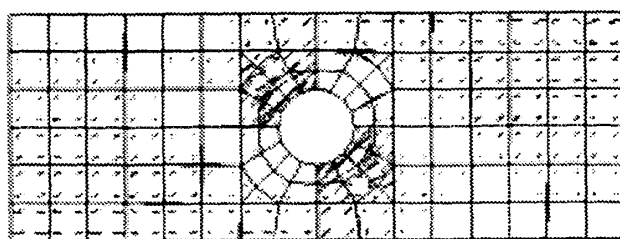
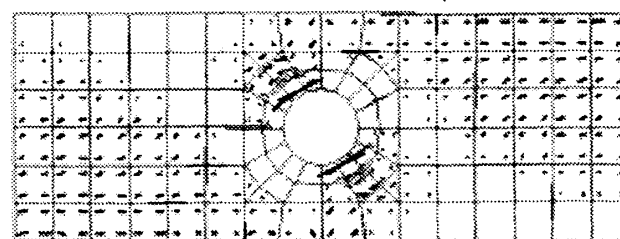
3.2 補強筋ひずみ

実験では孔際に最初にひび割れが発生したとき、そのひび割れの角度は約 45° であった。そこで、孔中心を通る 45° 断面と孔際せん断補強筋の交点に最も近い補強筋の積分点(図-1に星印で示した位置)の $Q-\epsilon$ 関係を図-6に示す。No.4 の方が、No.1 より同荷重におけるひずみが

小さいが、これは No.4 の方がひび割れ発生領域が狭かった(次節参照)ため、補強筋の負担も小さくなったことに起因すると考えられる。また、解析の方が孔部せん断ひび割れ発生後の勾配が急であり、これが前節の $Q-R$ 曲線の勾配に大きな差が生じたことに影響したと思われる。

3.3 ひび割れ分布

図-7, 8に $Q=300\text{kN}$ 時のひび割れベクトル図を示す。この図はひずみベクトル図で、ベクトルの長さがひび割れ幅を表し、ひび割れはベクトルの直交方向に入る。ひび割れ幅の長さは 7500 倍して出力している。 $Q=300\text{kN}$ の段階で見た理由としては、前節でせん断補強筋のひずみ分布を示したが、 $Q=300\text{kN}$ では No.1 は勾配が初期に比べてかなり寝ているが、No.4 は初期勾配と殆ど変わらないため、孔周辺のひび割

図-7 No.1 ひび割れ分布($Q=300\text{kN}$)図-8 No.4 ひび割れ分布($Q=300\text{kN}$)

れ分布に差が生じると予測したからである。

梁の左右端部の曲げ及び曲げせん断ひび割れは、プレストレス導入の影響が少ないため、ほぼ同様のひび割れ性状を示している。一方、開孔周辺のひび割れ幅やひび割れ発生領域に関しては、プレストレス導入により No.4 は No.1 より抑えられていることが分かる。このため、前節のように No.1 モデルの補強筋の負担が大きくなったのだと思われる。

3.4 等価拘束圧

コンクリート構造物の有限要素法解析では、各要素内での応力経路はランダムな経路となる。そこで、水野・畑中らは等価拘束圧 σ_L という尺度を提案した²⁾。これは図-9 に示すように、一般応力状態を側圧一定の三軸圧縮実験経路上の応力状態に換算した場合の側圧を、等価拘束圧として評価する手法である。ここで、ランダム経路上の一般応力状態が点 A となったとき、点 A から静水圧軸 (ξ 軸) に向かって $\sqrt{2}$ の傾きで下ろした直線と静水圧軸 (ξ 軸) との交点を $1/\sqrt{3}$ 倍した値が等価拘束圧 σ_L となる。

ここでは $Q=300\text{kN}$ の段階で、No.1~No.4 の各モデルに対して最も手前の積分点(コンクリート表面)と梁幅方向の中央断面における積分点(コンクリート内部)での等価拘束圧を計算し、その結果を図-10 に示す。実験では開孔部の上下弦部にひび割れが集中していたことを考慮して、開孔部周囲 $450\text{mm} \times 450\text{mm}$ の範囲に絞って表現している。また、コーナーブロック配置箇所を三角印で示している。

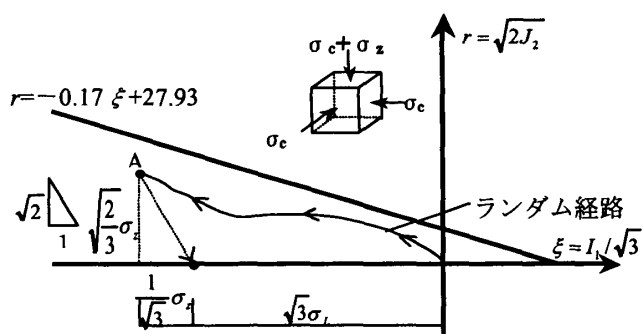


図-9 等価拘束圧の定義

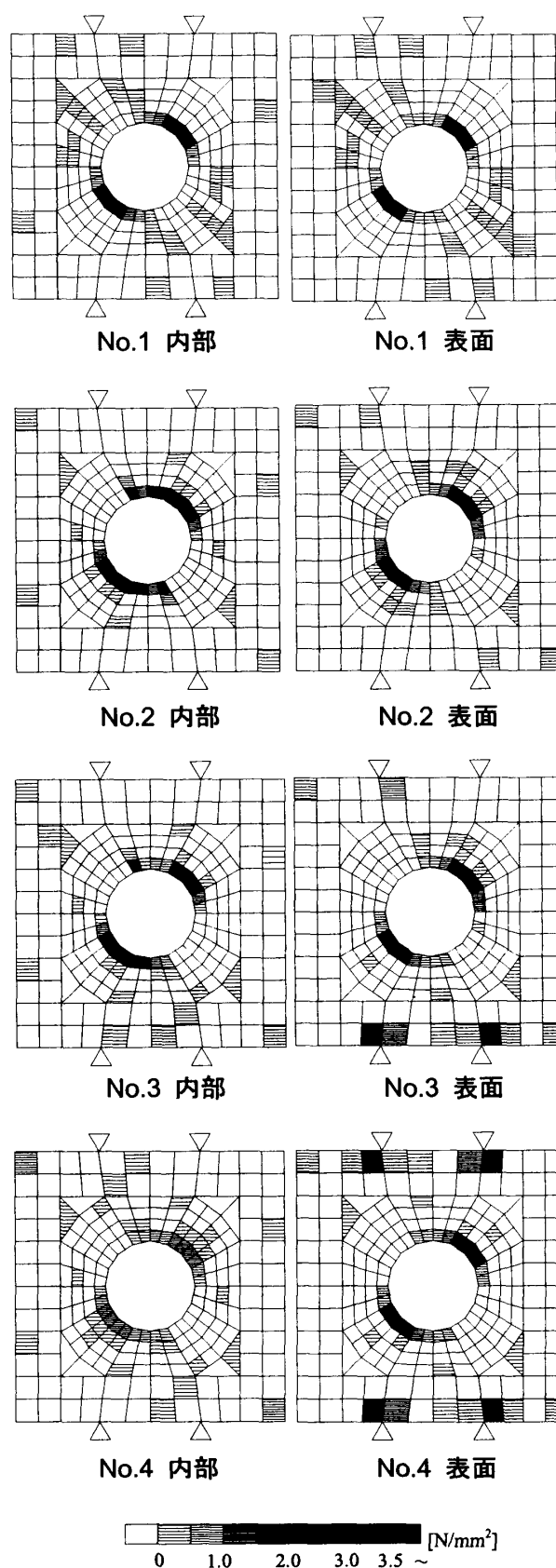


図-10 等価拘束圧($Q=300\text{kN}$)

色が濃くなるほど、その積分点における等価拘束圧は大きくなる。No.4 は 4 面にわたってプレストレス導入されているため、コンクリート表面のコーナブロック部に局所的に拘束圧の高い部分が生じているが、内部、表面共に孔周辺にも拘束圧が作用する積分点がまばらに分布している。その広がり方は他の 3 モデルより広範囲であり、プレストレス導入による拘束効果が広く及んでいることが分かる。また、内部コンクリートでは孔際の拘束だけが卓越してしまうのを抑制していることも読み取れる。

さらに、No.1 は内部、表面とも引張応力を生じる領域(孔左上から右下にかけて)において、孔中心部から放射状に拘束圧の高い領域が生じているが、これはひび割れ発生後、補強筋に引張応力が作用したことにより、内部コンクリートに圧縮力が生じたためであると考えられる。

3.5 損傷度

コンクリートの圧縮破壊に対する損傷度を、図-11 に示す応力の不変量 ξ - r 平面上における偏差応力成分 r を用いて定義する³⁾。つまり応力の不変量 (ξ_p , r_p) を有する応力点 P の損傷度 D_f は、静水圧成分 ξ_p における Drucker-Prager 基準の子午線上の偏差応力成分 r_{fs} に対する r_p の比として、 $D_f = r_p / r_{fs}$ で定義できる。

ここでは等価拘束圧の場合と同様、孔周囲に焦点を当て、各々のモデルに対してコンクリート内部、表面の損傷度を見ていく。基準となる荷重は等価拘束圧の場合と同様、 $Q=300\text{kN}$ の時点とする。図-12 に損傷度の計算結果を示す。

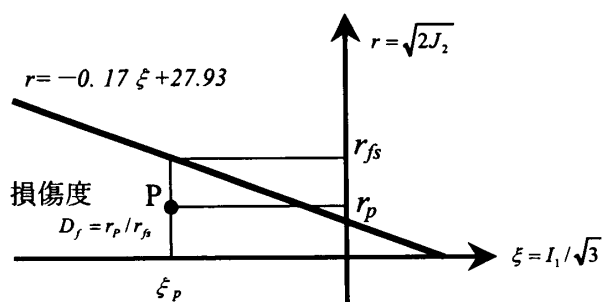


図-11 損傷度の定義

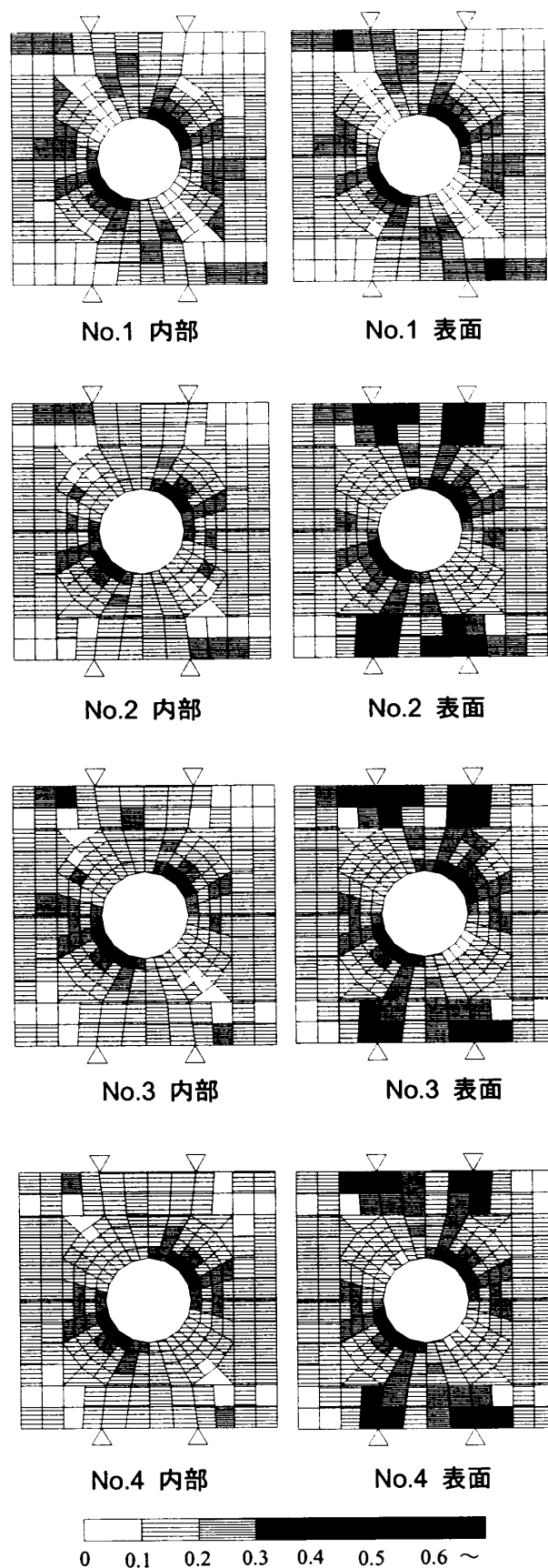


図-12 損傷度 ($Q=300\text{kN}$)

プレストレスを4方向に導入した No.4 は、コンクリート表面ではコーナブロック部付近の損傷度が局所的に高くなったが、コンクリート内部では孔周辺部は No.1 に比べて均一に損傷度が分布している。一方、No.1 は表面、内部とも孔中心から損傷度の高い領域が放射状に広がっている。つまり、プレストレス導入することにより、圧縮応力が局所的に高くなることを防ぎ、均一的に分布させることができるので、損傷に関して有利になるといえる。また、孔周囲に関して No.2 と No.4 を比較すると、コンクリート内部、表面共に、非常に似た損傷度分布となっている。つまり、1 方向のみに載荷する場合は、その方向にプレストレス導入すれば、損傷の集中を抑えるのに有効であるということが分かる。

また、図で白く示されている領域は引張応力を受けている箇所であるが、No.1 に関しては内部、表面両方で、No.2 と No.3 に関しては内部で、引張応力を受ける領域が孔際から母材部へと分布している。これより、これらのモデルでは孔部せん断ひび割れが孔際から母材部に進展していることが予測できる。その点、No.4 は引張応力を受ける領域が小さくなっており、孔部せん断ひび割れの抑制についてはプレストレス導入を2方向より4方向に施した方が効果的である、という知見が得られた。

4. まとめ

本解析結果より、以下の知見が得られた。

1. プレストレス導入した有孔梁と導入していない有孔梁の孔際補強筋のひずみ-荷重曲線を比較し、孔際補強筋のひずみはプレストレスを導入していない有孔梁の方が大きい

ことが分かった。これは、プレストレス導入にはひび割れ抑制効果があるために、逆に導入しないものに関しては、コンクリートが負担していたせん断力が、ひび割れ発生に伴い補強筋へと作用した、ということに起因する。

2. 等価拘束圧という尺度を用いて、表面だけでなく内部コンクリートの拘束状況も評価できた。プレストレスの有無に関わらず、圧縮を受ける孔際の積分点が最も等価拘束圧の値は高かった。また、4方向にプレストレスを導入したものが、最も広範囲に拘束効果を与えることができた。
3. 損傷度という尺度を用いて、等価拘束圧と同様に内部コンクリートの圧縮破壊に対する損傷を評価することができた。プレストレスを載荷するのと同じ方向に導入すると、損傷が局所的に高くなるのを防ぎ、均一的に分布する効果があることが分かった。

参考文献

- 1) 赤木大介：プレストレスを導入して開孔補強した RC 造有孔梁のせん断性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.2，pp.409-414，2003
- 2) 水野英二，畑中重光：コンクリートのひずみ軟化型構成モデルの開発とコンファインドコンクリートの三次元有限要素解析，土木学会論文集，No.571，V-36，pp.185-197，1997.8
- 3) 吉田幸夫，水野英二，畑中重光：円形コンファインドコンクリート内部の応力と損傷状態に関する FEM 解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.97-102，2002