

論文 かぶりコンクリートの剥離と鉄筋座屈を考慮した中空断面 RC 橋脚の 3 次元非線形 FEM 解析

増川 淳二^{*1}・須田 久美子^{*2}・前川 宏一^{*3}

要旨：特に中空断面の RC 橋脚の変形性能を把握するためには、かぶりコンクリートの剥離と鉄筋座屈時期を精度良く予測することが重要である。そこで、横拘束筋の配筋方法による拘束特性の違い、塑性化による鉄筋の曲げ剛性の変化、部材曲率による初期変形、かぶりコンクリートの引張特性及び拘束特性などを考慮できるかぶりコンクリート剥離と鉄筋座屈時期判定モデルを提案した。この提案モデルを鉄筋コンクリート用有限要素法解析プログラム-COM3-に組み込み、中空断面 RC 橋脚模型の加力実験を解析した。その結果、これまで困難であった最大耐力以降の挙動についても、高い精度で解析できるようになった。

キーワード：中空断面, RC 橋脚, かぶりコンクリート, 剥離, 座屈, 有限要素法

1. はじめに

今後建設が予定されている高速道路には、橋脚の高さが 30m 以上の高橋脚を有するコンクリート橋梁が多数含まれている。高橋脚では、地震時における橋脚自重による影響を軽減するために中空断面鉄筋コンクリート(以下、RC と略記)橋脚が採用されることが多い。中空断面 RC 橋脚では、図-1 に示すように、まず、圧縮フランジ外側のかぶりコンクリートが剥離後、鉄筋が座屈する。その後、断面内側のかぶりコンクリートが剥離し鉄筋が座屈すると、最終的には内部コンクリートが圧壊して耐力が著しく低下し、場合によっては作用軸力を保持できない

ことがある。したがって、中空断面 RC 部材の変形性能を把握するためには、断面内外におけるかぶりコンクリートの剥離と鉄筋座屈時期をそれぞれ正確に判定することが重要である。

本論文では、横拘束筋の配筋方法による拘束特性の違い、塑性化による鉄筋の曲げ剛性の変化、部材曲率による初期変形、かぶりコンクリートの引張特性及び拘束特性などを考慮できるかぶりコンクリート剥離と鉄筋座屈時期判定モデルを提案した。この提案モデルを鉄筋コンクリート用有限要素法 (FEM) 解析プログラム COM3^{1), 2), 3)} に組み込み、中空断面 RC 橋脚模型の加力実験を解析した。

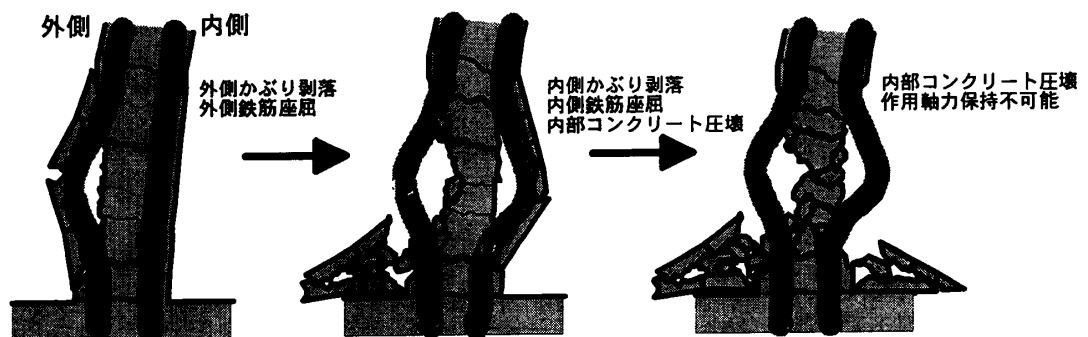


図-1 中空断面RC部材の圧縮フランジにおける破壊進行状況

* 1 鹿島 技術研究所 第一研究部 研究員, 工修 (正会員)

* 2 鹿島 技術研究所 第一研究部 主任研究員, 工博 (正会員)

* 3 東京大学大学院教授 工学系研究科 社会基盤工学専攻, 工博 (正会員)

2. かぶりコンクリート剥離・鉄筋座屈解析モデル⁴⁾

ここでは、提案するモデルの概要のみを述べる。詳細は、参考文献4)を参照されたい。

2.1 モデル化の概要

かぶりコンクリートの剥離及び鉄筋の座屈を解析するために、図-2に示すように、かぶりコンクリート、帯鉄筋、中間帯鉄筋をばねで置き換えてモデル化する。軸方向鉄筋は圧縮力を受ける両端固定梁とし、座屈変形は正弦曲線で近似する。かぶりコンクリートは変形に伴い引張応力が低下するばねとし、引張応力が0となる点を限界ひび割れ幅と規定する。帯鉄筋のばね定数kは、図-3のように帯鉄筋と中間帯鉄筋を梁及びばねでモデル化して算出する。

このモデルに弾性座屈理論を適用することにより、鉄筋の座屈長さLが次式のように表せる。

$$L = 4.4\sqrt{EI/\beta} \quad (1)$$

(E: 鉄筋の見かけの剛性, I: 鉄筋の断面2次モーメント, $\beta = k/s$, s: 帯鉄筋間隔)

式(1)より、鉄筋の曲げ剛性が小さいほど、帯鉄筋による拘束が強いほど座屈長さLが短くなることわかる。圧縮時の鉄筋の見かけの剛性は、塑性化した鉄筋の軟化の影響を考慮するため、鉄筋の応力-ひずみ履歴曲線において、鉄筋応力が引張から圧縮になるときに応力ゼロになる点と、その時点での応力-ひずみ点を結んだ割線勾配として求める(図-2参照)。この方法による座屈長さの計算値は、過去の実験と非常に整合性が良いことが確認されている^{4), 5)}。

2.2 かぶりコンクリート剥離判定モデル

かぶりコンクリートの剥離は、鉄筋の座屈変形によって外側に押し出されることにより生じる。そこで、図-4に示すように、曲率を持った鉄筋に圧縮力Pが作用することによって生じる微小な座屈変形を考慮し、かぶりコンクリートがあり初期変形を有する鉄筋の座屈に対する安定性判定式を Timoshenko のエネルギー法により誘導し、剥離を判定した。

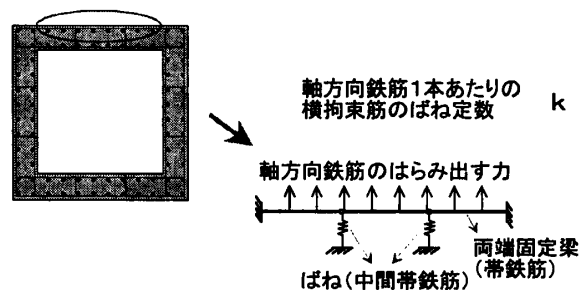
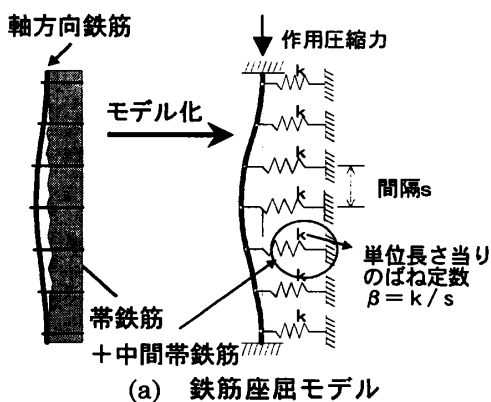
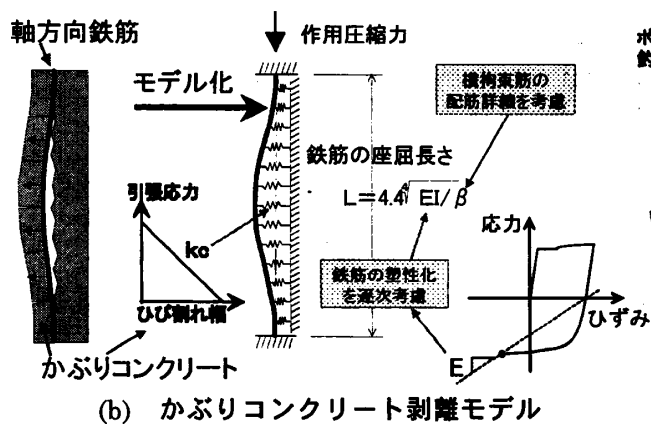


図-3 横拘束筋のモデル



(b) かぶりコンクリート剥離モデル

図-2 モデル化概念図

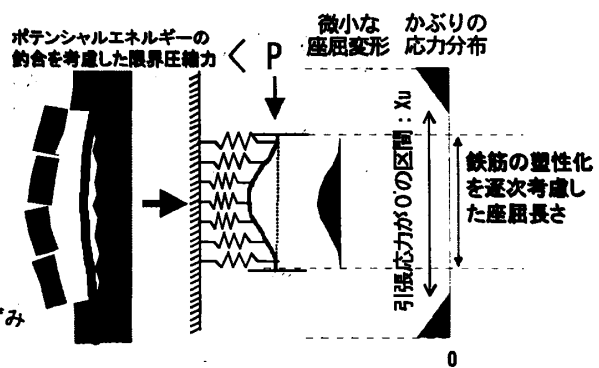


図-4 かぶりコンクリート剥離判定方法

式の誘導に当っては、着目する鉄筋に沿って発生する縦ひび割れのひび割れ幅がこの座屈変形によるたわみ量の増分に等しいと仮定した。また、変形が微小であるため、帯鉄筋による拘束力は考慮に入れない。

座屈に対する安定性解析の結果、かぶりコンクリートによる拘束がある間は、座屈に対して安定であることが判明した。

曲率及び圧縮力 P が大きくなってくると、この微小な座屈変形によりかぶりコンクリートが押し出され、かぶりが引張力を負担できない区間の長さ X_u が長くなる。それに対し、鉄筋の座屈長さ L は、塑性化に伴って鉄筋の見かけの剛性が低下していくことにより短くなる(式(1))ため、ある時点で X_u より小さくなり、鉄筋の座屈区間でかぶりコンクリートが引張力を負担しなくなる。つまり、かぶりコンクリートの拘束が無視できるほど小さくなる。このとき圧縮力 P が図-2 b のモデルでの弾性座屈荷重の 2.56 倍以上であれば、初期変形量にかかわらず座屈に関して不安定になり、かぶりコンクリートが鉄筋に押し出され剥落する。したがって、

- a) 鉄筋の座屈長さ $L < \text{応力 } 0 \text{ の区間長 } X_u$
- b) 圧縮力 $P > (\text{図-2 b での弾性座屈荷重 } P_a) \times 2.56$

のとき、かぶりコンクリートが剥落すると判定する。

2.3 鉄筋座屈判定モデル

かぶりコンクリートが剥落すると帯鉄筋の拘束効果が急激に強まるため、鉄筋はすぐには大きくはらみ出すとは限らない。そこで、外側に大きくはらみ出す鉄筋座屈に関しては、かぶりコンクリートが無く、帯鉄筋による拘束を考慮に入れた図-2 a のモデルで判定する。鉄筋の座屈は弾性座屈理論より導かれ、かぶりコンクリート剥落後、

- a) 圧縮力 $P > \text{図-2 a のモデルでの弾性座屈荷重 } P_b$

のときに生じると判定する。

以上のかぶりコンクリート剥離・鉄筋座屈判定モデルは、軸方向鉄筋の作用圧縮力と応力ひずみ履歴及び曲率と、かぶりコンクリートの限界ひび割れ幅のみで判定できるのが特徴で、既存の解析ソフトの組込みが容易に出来る。

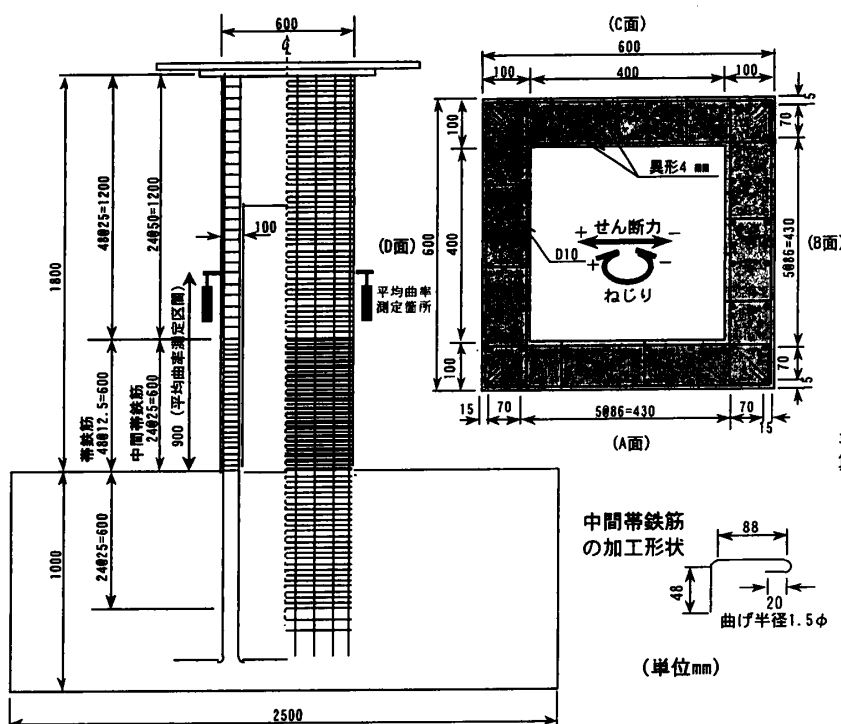


図-5 解析対象試験体概要図

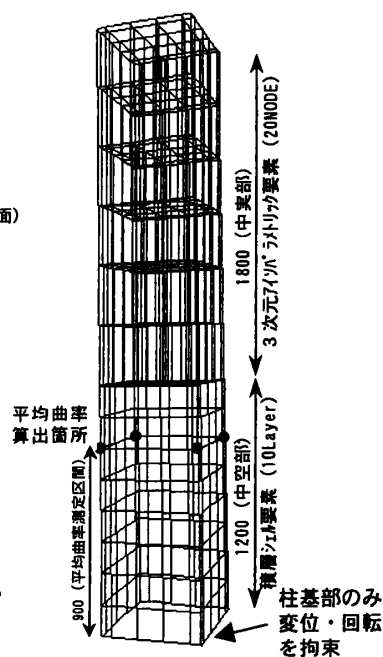


図-6 要素分割図

3. かぶり剥離・鉄筋座屈モデルの適用性検討

3.1 FEM 解析プログラムへの組み込み

新しく提案したかぶりコンクリート剥離・鉄筋座屈判定モデルの中空断面 RC 橋脚への適用性を検討するため、模型試験体の加力実験結果とそのシミュレーション解析結果を比較検討する。解析は、前述の COM3 に提案したモデルを新たに組み込んで行った。

3.2 解析対象⁶⁾とモデル化

解析対象⁶⁾の試験体概要図を図-5に示す。柱基部 120cm が中空で、加力は試験体柱頭部に軸力（軸応力 3.53 N/mm²）、曲げモーメント、ねじりモーメント、せん断力を作用させて、せん断スパン比 5 で正負交番繰り返し加力を行っている。最外縁引張鉄筋が降伏強度の 90%（地震時許容応力度に相当）に達するまでは曲げモーメントの 15% のねじりモーメントを作用させ、それ以降は、最外縁引張鉄筋が降伏強度の 90% に達したときの柱基部 90cm 区間の平均曲率に対するねじり回転角の比率を求め、この比率を一定に保つように加力を行った。これは、PC 連続ラーメン橋に橋軸直角方向の地震力が作用した際に橋脚に生じる変形適合ねじりを考慮に入れた加力である。

要素分割図を図-6に、解析で用いた材料特性を表-1に示す。柱部のみをモデル化し、中空部は RC 積層シェル要素³⁾とし、一つの要素の大きさは表-1に示すとおり幅 12.5cm×高さ 15cm である。中実部分は、3 次元アイソパラメトリック要

素とし、弾性体とした。解析での加力方法の理由から、中実部分を試験体よりも 120cm 長くし、柱基部の曲げモーメント・せん断力分布が、せん断スパン比 5 で加力している解析対象の試験体と同一になるようにしている。また、試験体の軸方向鉄筋には、断面と比較して細径の D10 鉄筋を使用していることから、軸方向鉄筋のフーチングからの抜け出しによる影響が少ないと考え、本論文の解析では無視することとした。

図-7に各要素の断面方向における積層分割図を示す。対象とする中空断面試験体には断面の内外それぞれに軸方向鉄筋が配筋されているため、解析のモデル化に当たってもこれを考慮し、鉄筋コンクリート積層シェル要素には内外二層の鉄筋 Layer を設定した。かぶりコンクリートの剥離及び鉄筋座屈の判定と、その後の取り扱いは鉄筋 Layer の積分点毎（1 Layer につき 4 点）に行った。かぶりコンクリートの剥離と鉄筋の座屈が判定された場合、それぞれ以下のように処理を行った。

[かぶりコンクリートが剥離している場合]

- ・着目している積分点の鉄筋 Layer より外側のコンクリート Layer (要素の 1/4 に相当) の応力をゼロにする。

[鉄筋が座屈している場合]

- ・着目している積分点の鉄筋 Layer より外側のコンクリート Layer の応力をゼロにする。
- ・着目している鉄筋 Layer の軸方向鉄筋応力度が圧縮のときには応力をゼロに、引張の時にはひずみから求められた値の 8 割に減じる。

表-1 解析で用いた材料特性

コンクリート強度	86.0 N/mm ²
引張強度	3.24 N/mm ²
ヤング係数	31300 N/mm ²
ポアソン比	0.2
壁厚	100 mm
Layer数	10
軸方向鉄筋降伏強度	866 N/mm ²
軸方向鉄筋比	1.712 %
帯筋降伏強度	284 N/mm ²
帯筋比(柱基部1D)	2.01 %
帯筋比(その他)	1.005 %
シェル要素	幅12.5cm×高さ15cm

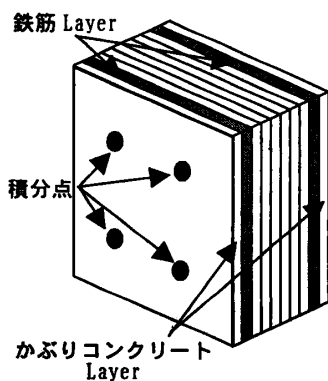


図-7 断面厚さ方向の Layer 分割図

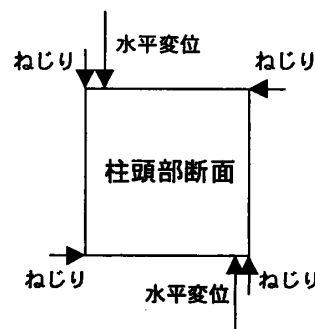


図-8 解析での加力方法

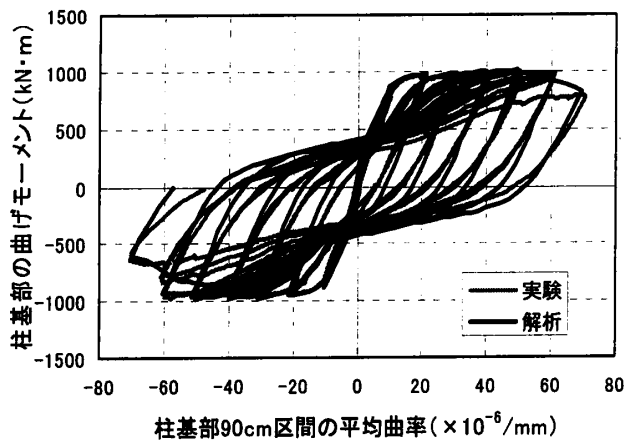


図-9 柱基部のモーメントと平均曲率

座屈後の鉄筋履歴モデルについては、モデルを開発済み⁵⁾であるが、今回は簡略化して解析を行った。

隅角部については、帯鉄筋が交差して二重に配筋されているため、かぶりコンクリートの剥離は起こるが鉄筋の座屈は起きないとした。

コアコンクリートは、横拘束筋による拘束効果を考慮して、Pallewatta らの方法²⁾により拘束コンクリートの圧縮強度を評価した。

曲げとねじりの加力は、図-8に示すとおり、柱頭部の隅角部4点に、曲率とねじり回転角の比率が実験と同じになるように強制変位を与えることにより行った。また、実験では同一変位で3回ずつ繰返し加力を行っているが、解析では行わなかった。

3.3 解析結果

図-9に柱基部の曲げモーメントと柱基部90cm区間の平均曲率の関係を、図-10にねじりモーメントと柱基部90cm区間のねじり回転角の関係をそれぞれ実験結果と解析結果を対比して示す。

実験では、ねじり加力の影響はひび割れの分布状況などに見られたものの、最終的には曲げ破壊により終局に達した。4φ_y~5φ_y (φ_y=10×10⁻⁶/mm)で柱基部隅角部コンクリートの剥離が進み、5φ_yの3サイクル目~7φ_yで鉄筋が座屈し、通常の曲げ破壊と同じように終局に至った。

図-9を見ると、曲げ降伏までの初期勾配は、解析の方が実験よりも若干大きかったが、最大耐力及び耐力低下時期など、実験と解析はかなりの高い精度で一致している。本解析では、柱基部の

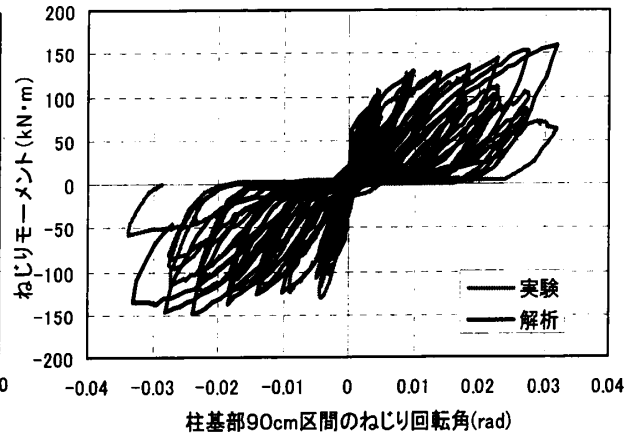


図-10 ねじりモーメントとねじり回転角

抜出しを考慮に入れてないが、解析精度にそれほど大きな影響はなかったと考えられる。

しかし、図-10に示すねじりモーメントとねじり回転角の関係では、かぶりコンクリート剥離以降のねじり剛性が大きく評価されており、解析精度が低下している。この原因の一つには、提案したかぶりコンクリートの剥離及び鉄筋の座屈判定モデルが鉄筋に圧縮力が作用する場合のみに限定したものであることが考えられる。ねじり破壊をおこすRC部材のねじり耐力及びねじり変形挙動を把握するためには、ねじりによるかぶりコンクリートの剥離メカニズムの把握が必要である。しかしながら、高橋脚で想定される断面力の組合せにおいては、ねじり補強により、ねじり破壊を防止することができ、十分な変形性能を有している。

したがって、図-9に示されるとおり、中空断面RC高橋脚の変形性能は、ねじりによるかぶりコンクリートの剥離挙動を考慮しなくても、提案した判定方法を解析に組み込むことによって、かなり高い精度で評価できると考えられる。

次に、図-11にかぶりコンクリートの剥離時期と鉄筋座屈時期の判定結果を、柱下端の要素について示す。前述の通り、判定は各要素内の内外2層の鉄筋Layer内の4つずつある積分点毎に行った。積分点の個数は、それぞれ剥離及び座屈が判定された積分点の個数を表している。したがって、図中で積分点の個数が多いほど、その要素内の剥離及び座屈の進行が進んでいることを表している。

図-11より、フランジ部のB面及びD面の断面

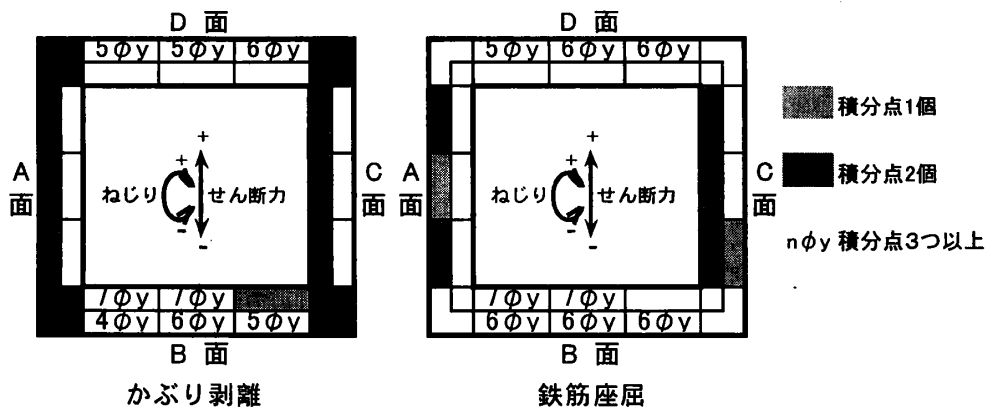


図-11 柱下端の要素におけるかぶりコンクリート剥離及び鉄筋座屈判定状況

外側におけるかぶりコンクリートの剥離に加えて、ねじりモーメントによるせん断応力の方向とせん断力の方向が一致している A 面でも、断面外側のかぶりコンクリートの剥離がほぼ全面に渡って発生しており、図-12 の実験での最終ひび割れ状況とも対応している。以上より、組み合わせ断面力の影響により破壊挙動の偏る様子は、提案したモデルによって再現できると言える。

4. まとめ

中空断面鉄筋コンクリート橋脚の変形性能評価を目的として、横拘束筋の配筋方法による拘束特性の違い、塑性化による鉄筋の曲げ剛性の変化、部材曲率による初期変形、かぶりコンクリートの引張特性及び拘束特性などを考慮できるかぶりコンクリートの剥離及び鉄筋座屈時期の判定方法を新しく提案した。このモデルの適用性を検討するため、高橋脚で想定される組み合わせ断面力を作用させた模型実験のシミュレーション解析を行った。その結果、かぶりコンクリートの剥離以降において、ねじり剛性を過大に評価するものの、曲げ破壊型の中空断面 RC 橋脚では、曲げ変形性能については精度良く評価できることが確認された。

参考文献

1) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの構成則と非線形解析, 技報堂, 1991.5
 2) Pallewatta,T.M., Irawan,P. and Maekawa,K.: Confinement Effectiveness of Lateral Reinforce-

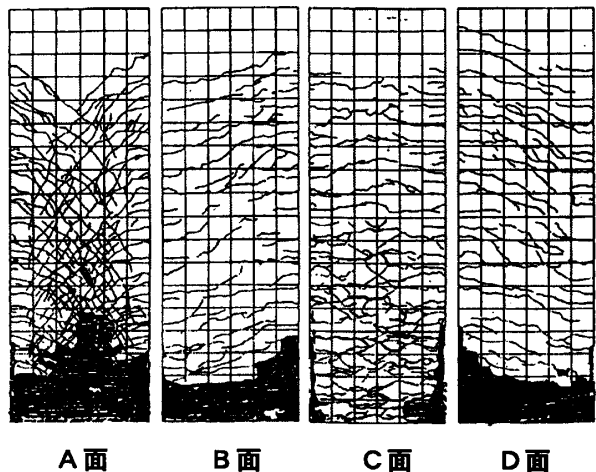


図-12 最終ひび割れ状況 (1マス 10cm)

ment Arrangements in Core Concrete, Concrete Library of JSCE, No.27, pp.221-247, June 1996

3) Irawan,P. and Maekawa,K.: Path-dependent Nonlinear Analysis of RC Shells Subjected to Combined In-plane Membrane and Out-of-plane Flexural Actions, Concrete Library of JSCE, No.30, pp.221-238, December 1997

4) 須田久美子: 中空断面鉄筋コンクリート高橋脚の地震時変形性能に関する研究, 博士論文, 東京大学大学院工学系研究科, 1998.12

5) 村山八洲雄, 須田久美子 他: 繰返し荷重下における鉄筋の座屈モデル, 鹿島技術研究所年報, 42号, pp.93-98,1994.10

6) 須田久美子, 天野玲子, 増川淳二, 一宮利通: 高橋脚の耐震性能に及ぼすねじり加力の影響, コンクリート工学年次学術論文報告集, vol.19, No.2, pp.789-794, 1997