

論文 不連続有限要素解析法を用いた有孔鋼板とコンクリートの付着の特性に関する研究

高 東 劭¹⁾・呉 智 深²⁾・町田篤彦³⁾・西海健二⁴⁾

要旨：本研究では、複合構造の不連続解析を行うために開発された不連続有限要素解析法を用いて、有孔鋼板とコンクリートの付着力学特性について解析を行った。解析にあたっては、分布クラックの引張軟化曲線と統一的に取り扱うため付着エネルギーに基いた付着応力-付着すべり関係を導入。実験結果と比較することによって各々付着パラメーターを同定した。そして本解析法によって付着とクラックなどを同時に含んだ複雑な破壊メカニズムを解明できることを示した。

キーワード：不連続要素、有限要素解析法、付着すべり

1. はじめに

鉄骨を鉄筋のかわりに用いたSC構造では鋼板とコンクリートとの付着力が非常に小さいという欠点がある。この問題の解決法の一つに鋼板に穴をあける方法が挙げられる。こうすることにより、コンクリートの打設が困難であるという問題も同時に解決されるのである。しかしながら、鋼板にあげた穴が付着にどのように影響を及ぼすか、本来の付着メカニズムとどのように変わるかなどは全く明らかにされていない。

有孔板の引き抜き試験結果によれば、荷重の増加に伴い、平板とコンクリートおよび孔付近の付着面の付着が逐次に破壊され、大きなひずみ集中が生じる。また、コンクリートに割裂破壊を起こし、孔付近から多方向にわたってクラックが進展する。このような問題を従来の有限要素法によって解析しようとする場合、すべりボンドリング要素およびクラックボンドリング要素などを追加および併用する必要がある、詳細な解析を行うためには、膨大な自由度となる。

一方、一般的な不連続性状を解明するために、著者らは内部不連続面での変形不連続性を考慮した特殊な有限要素を定式化し、クラックの伝播や複合構造での付着破壊などを表現できる解析法を開発した。導いた支配方程式は通常の有限要素定式化と同様な形であって、有限要素汎用コードの機能をそのまま生かすことができる点に特徴があり、自由度の増加の必要がない。また、結果が有限要素メッシュに依存する性状を解消し、軟化性状を追跡できるようになっている[1]。さらに論文[2]では本解析法によって鋼複合構造における付着強度の小さい、脆性的な付着すべり挙動のもととなる現象を解析することが可能であることを明らかにした。本論文、その鋼板に穴を開けた場合の付着性状について、特に開口の数量、口径に着目した実験ならびに数値解析より検討した結果について述べる。

2. 一般的な不連続問題に関する混合有限要素定式化

*1 創建エンジニアリング (株) 工修 (正会員)

*2 茨城大学工学部・助教授 工博 (正会員)

*3 埼玉大学 工学部・教授 工博 (正会員)

*4 新日本製鉄株式会社 技術開発本部、鉄鋼研究所 (研究員)

2.1 不連続有限要素の支配方程式

内部不連続性を考慮した有限要素に関する支配方程式の定式化手順については論文[1]に詳しく述べられているが、ここではその結果について簡単に説明する。節点変位の増分 $\Delta \bar{\mathbf{u}}$ と等価節点力 $\bar{\mathbf{f}}$ 間の非線形支配方程式は次のように表される。

$$\bar{\mathbf{K}} \Delta \bar{\mathbf{u}} = \bar{\mathbf{f}} \quad (1)$$

$$\bar{\mathbf{f}} = \bar{\mathbf{f}}_u + \mathbf{K} \mathbf{P} (\mathbf{K}_{ii} + \mathbf{P}^T \mathbf{K} \mathbf{P})^{-1} \bar{\mathbf{f}}_i \quad (2)$$

$$\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K} - \mathbf{K} \mathbf{P} (\mathbf{K}_{ii} + \mathbf{P}^T \mathbf{K} \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{K} \quad (3)$$

$$\bar{\mathbf{f}}_u = \int_s \mathbf{N}_u^T \Delta \mathbf{p} ds, \quad \bar{\mathbf{f}}_i = \int_s \mathbf{N}_i^T \Delta \mathbf{p} ds \quad (4)$$

式(3)に示された剛性マトリックス $\mathbf{K}$ は通常の剛性マトリックスであり、次式より得られる。

$$\mathbf{K} = \int_v \mathbf{B}_u^T \mathbf{D}_i \mathbf{B}_u dV \quad (5)$$

また不連続領域での剛性マトリックス $\mathbf{K}_{ii}$ は次のような形で求められる。

$$\mathbf{K}_{ii} = \int_{S_i} (\mathbf{N}_i^+ - \mathbf{N}_i^-)^T \mathbf{D}_i (\Delta \mathbf{u}^+ - \Delta \mathbf{u}^-) ds \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{B}_u$ ：ひずみ-変位マトリックス、 $\mathbf{N}_u$ ：有限要素の形状関数、 $\mathbf{N}_i$ ：不連続面での形状関数； $\mathbf{D}_i$ ：不連続面の剛性マトリックス、 $\mathbf{D}_t$ ：連続体の剛性マトリックス、 $\Delta \mathbf{p}$ ：節点力増分、 $\mathbf{P}$ ：変換マトリックスである。

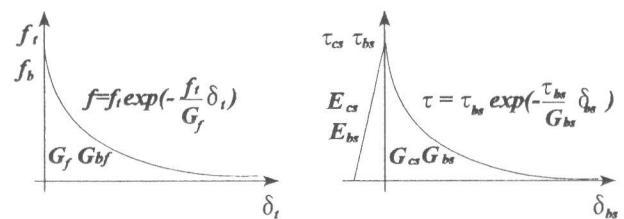
式(1)に示したように、内部不連続性を考慮した有限要素に関する支配方程式は通常の有限要素定式化と同様な形で表現されている。従って、通常の有限要素汎用コードの機能をそのまま生して簡単にプログラミングすることができる。また節点変位ベクトルは通常の有限要素定式化での自由度 n 次元と同様である。不連続面の変形集中、接触性状などを算定するためには、通常の剛性マトリックスと荷重ベクトルの修正を行うだけで計算時間の大幅な増加はないと考えられる。

2.2 構成モデル

要素の剛性を算定するには、関連の構成モデルを導入する必要がある。すなわち、要素剛性マトリックスに材料自身の構成則の他、不連続面、例えば付着面において、鋼材とコンクリートとの付着-すべりの関係を導入しなければならない。本研究では、鋼材およびコンクリートの材料自身は弾性体と仮定し、不連続面

$$\mathbf{D}_i = L_i \begin{bmatrix} \mathbf{E}_n & 0 \\ 0 & \mathbf{G}_{nt} \end{bmatrix} \quad (7)$$

の非線形性を算定する剛性マトリックス $\mathbf{D}_i$ を次のように与えた。ここで、 L_i ：不連続面の長さである。 $\mathbf{D}_i$ の成分は、不連続面に垂直な方向の $\mathbf{E}_n$ (opening) (図-1(a)) 及びそれに平行方向の $\mathbf{G}_{nt}$ (sliding) (図-1(b)) の二つである。本研究ではopeningモデルは、図-1(a)に示すように与えた。ただし、クラック要素と付着要素に



(a) openingモデル

(b) slidingモデル

図-1 不連続面のモデル

において、強度はそれぞれ f_t (引張強度) と f_b (付着面の垂直方向付着強度) とし、 G_f 、 G_{bf} はそれぞれの破壊エネルギーである。また、コンクリートのすべりクラックおよび付着すべり解析を行うための sliding モデルは図-1(b) に示すように与えた。ここで、 E_{bs} : 弾性状態の付着すべりせん断剛度、 E_{cs} : コンクリートの初期せん断剛度、 τ_{bs} : 付着すべり強度、 τ_{cs} : コンクリートせん断強度、 G_{cs} 、 G_{bs} : それぞれのせん断破壊エネルギーである。

3. 数値解析

3.1 非線形解析

計算にあたっては、Newton-Raphson に基づく荷重増分法を用いた。また、極限点後の変位が増加するとともに荷重が減少していく不安定な経路を追跡するために Cristied の修正弧長法を導入して繰返計算を行った。収束基準としては、一般の Residual force 収束基準を適用した (収束判定の基準 $= 10^{-3}$) [3]。

3.2 解析モデル

孔がコンクリートと鋼板との付着にどのよう

表-1 解析時材料定数特性 単位: N/mm^2

材料	弾性係数	引張強度	圧縮強度	せん断強度	ポアソン比
鋼材	205000	371	371	-	0.28
コンクリート	31000	3.03	30.2	15	0.2

うに影響を与えるかを調べるため、円孔を有する有孔鋼板の引き抜き試験[4]について数値解析を行った。供試体の寸法、形状などの詳細を図-2(a)に示す。解析には、有孔鋼板の引き抜き試験の対称性を考えて全体の1/4を解析モデルとした。

4 節点アイソパラメトリック要素を用いた有限要素分割図を図-2(b)に示す。材料の定数特性は表-1のとおりとした。コンクリートの板厚は実際の供試体と同じ、10cmとし、円孔部のコンクリートの厚さは4cmとし、板厚方向の応力変化は無視し、平面問題として取り扱った。そして、実際の鋼板周りの付着面を図-2(b)に示す側面A-Aに等価的に置き換えることにした。また、円孔の位置は実際に図-2(b)中の鋼板の左側となっているが本解析ではその右側に置き、コンクリートと鋼板に共有の節点をもたせて、バネ要素を導入する必要をなくした。

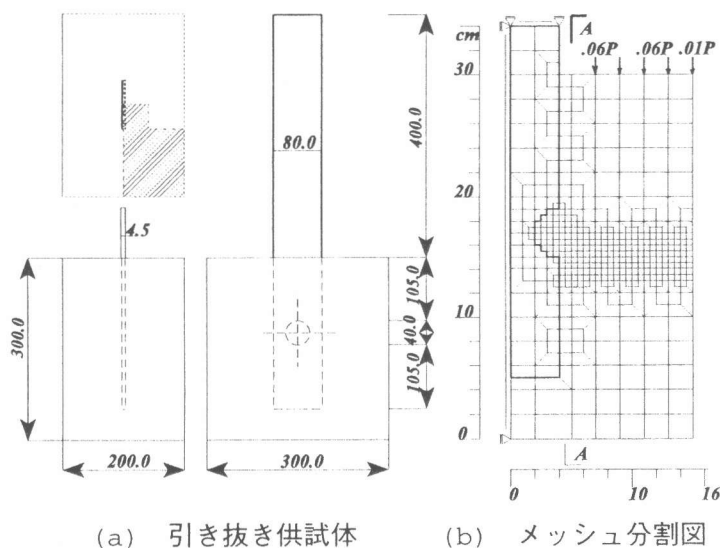


図-2 引き抜き解析モデル

3.3 実験結果からの付着パラメーターの算定

前報では[2]、不連続有限要素解析法を用いた無孔鋼板とコンクリートの付着特性を解析し、付着パラメーターを同定

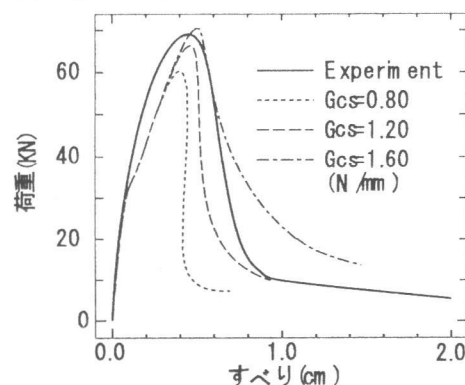
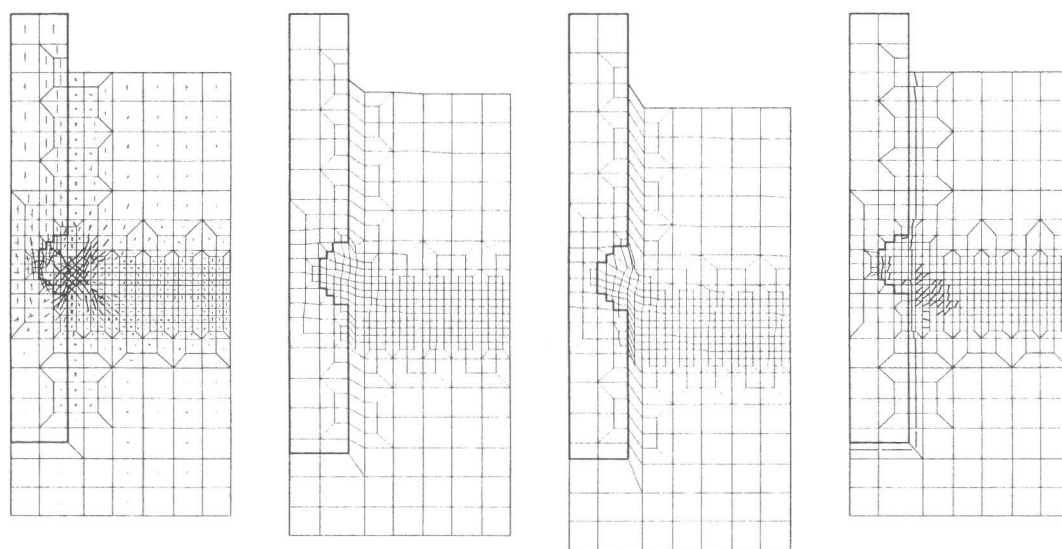


図-3 コンクリートのせん断破壊エネルギー G_{cs} が荷重-滑り曲線に及ぼす影響

した。同定された結果はつぎのとおりである。 $\tau_{bs}=0.71 \text{ N/mm}^2$ 、 $E_{bs}=1.55 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 、 $G_{bs}=0.5 \text{ N/mm}$ 、 $f_b=0.2 \text{ N/mm}^2$ 。このようにして同定されたパラメーターを用いて、荷重端のすべり量の着目とし、有孔鋼板とコンクリートの特性の解析を行った。その結果得られたコンクリートのせん断破壊エネルギー G_s をパラメーターとした解析結果を図-3に示す。ここで、コンクリートの破壊エネルギー $G_f=0.2 \text{ N/mm}$ 、コンクリート初期せん断剛性は弾性係数の半分、せん断強度 τ_{cs} は圧縮強度の半分とした。円孔の直径は $D=4\text{cm}$ である。図-3に示すように、 G_{cs} を変化させて、解析を行った結果、コンクリートのせん断破壊エネルギーについては1.2と1.6 N/mm の間の値を取ることが適当であることが判明した。解析結果と実験結果の比較によって最大荷重、付着破壊により急激に荷重が下がるなどのことをよく再現できた。また、 G_{cs} 増加に伴い、最大荷重値が大きくなるとともに、軟化領域の勾配が緩やかとなることがわかった。

3. 4 有孔鋼板の付着破壊メカニズム

上記の同定結果に基づき $G_{cs}=1.6 \text{ N/mm}$ とした詳細解析結果を図-4に示す。図-4(a)は最大荷重時の主応力分布図を示すものである。同図より鋼板において、円孔より荷重端側では引張応力が、自由端側の円孔付近には圧縮応力がみられ（図-5にも同じ傾向を確認できる）。コンクリートにおいては円孔付近に卓越した引張ひずみがみられるが、円孔内部の卓越した圧縮応力がかぶり方向に伝わらず、ごく狭い領域に集中し、圧縮応力は円孔の自由端側より放射状に広がっていることがわかる。図-4(b)(c)は最大荷重時およびポストピークの軟化領域における有孔板の引き抜き供試体の変形図である。解析過程において、孔が低い荷重段階から鋼板とコンクリートとの付着に効果を発揮していることを示している。円孔の自由端側の鋼板のひずみが圧縮側にでるのは抜け出ようとする鋼板の動きに対し円孔の位置でこの方向への変形が妨げられるためであり、孔が機械的な抵抗により付着力に寄与していることを示している。



(a)主応力分布 (b)変形図（最大荷重時） (c)変形図（軟化領域） (d)クラック状況

図-4 有孔鋼板とコンクリート付着特性解析

全体の破壊プロセスとしてはまず鋼板とコンクリートの付着破壊が荷重端から発生し、それに伴って、円孔内部の圧縮応力は徐々に増加し、ごく狭い領域に集中していく。その圧縮応力の直角方向には引張応力が生じ、この引張応力により、コンクリートに割裂クラックが起きると考えられる。その結果、図-4(d)に示し

たように最も大きな引張応力の働く円孔の自由端側の縁部分のコンクリートにかぶり方向に向かって横方向のひびわれが生じる。また円孔内部にも付着面にほぼ平行しているクラックが生じている。これらは実験で確認されている結果と定性的に一致している。これらのことにより付着抵抗は孔部分の引張りのみで荷重を支えるようになって最終的にこの部分のコンクリートにもせん断すべりが生じ、全体的な付着破壊に至ると言える。図-5には各荷重スラップにおける鋼板の自由端から荷重端へのひずみ分布を表している。実験結果と解析結果を比較すれば、両者はよく一致していることがわかる。特に孔付近のひずみ集中をよく算定できていると言える。低荷重時のひずみ分布を詳細にみると、荷重端から円孔位置まではほぼ直線分布となっていることがわかる。よって、鋼板とコンクリートの付着面において付着抵抗初期には付着力が支配的であるが、荷重の増加に伴い、荷重端から円孔位置までひずみの減少はなくなり、円孔付近ひずみがかなり大きくなって、付着力が低下し、鋼板からコンクリートに引張力が伝わらなくなる。

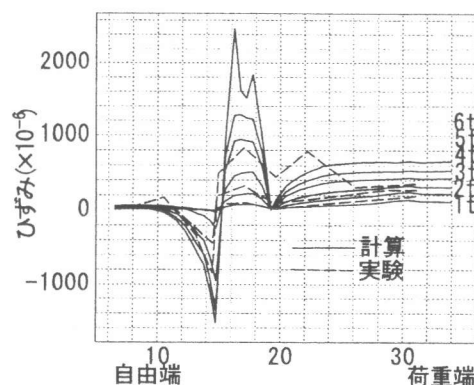


図-5 鋼板ひずみ分布図

ば、両者はよく一致していることがわかる。特に孔付近のひずみ集中をよく算定できていると言える。低荷重時のひずみ分布を詳細にみると、荷重端から円孔位置まではほぼ直線分布となっていることがわかる。よって、鋼板とコンクリートの付着面において付着抵抗初期には付着力が支配的であるが、荷重の増加に伴い、荷重端から円孔位置までひずみの減少はなくなり、円孔付近ひずみがかなり大きくなって、付着力が低下し、鋼板からコンクリートに引張力が伝わらなくなる。

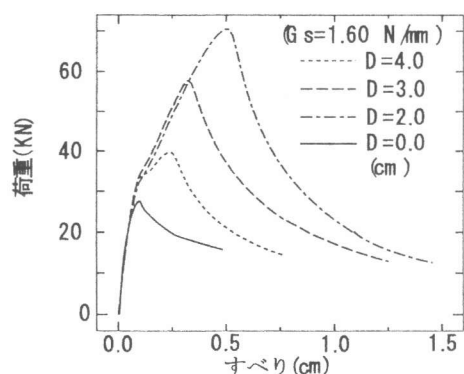


図-6 孔径が荷重-滑り曲線に及ぼす影響

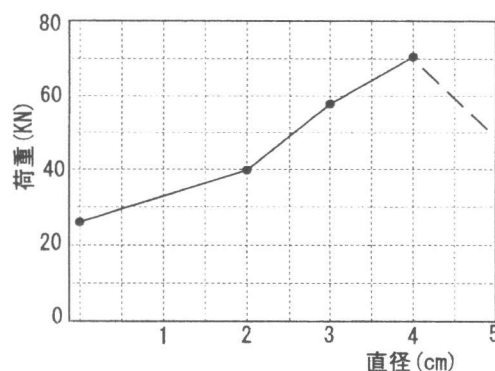


図-7 最大荷重-孔径関係図

3.5 開口直径による付着効果

開口直径Dが付着効果に与える影響を数値シミュレーションした結果を図-6に示す。図に示すとおり、開口直径D=4cm時の最大荷重は70.5 kNであり、これは無孔板の約2.5倍である。最大荷重時における鋼板の引き抜け量は無孔板と比べて大きくなる。また開口直径Dの増加に伴い、破壊の勾配の低下が急激となる。図-7では最大荷重-開孔直径の関係を示したものである。これより、開口面積の増加に伴い、付着強度が上昇することがわかる。しかし、開口面積がある限界を越えると、鋼板の降伏などが起こされ、最大荷重の増加ができなくなる。従って開口面積による付着効果には上限値と下限値が存在すると思われる。

3.6 開口数量による付着効果

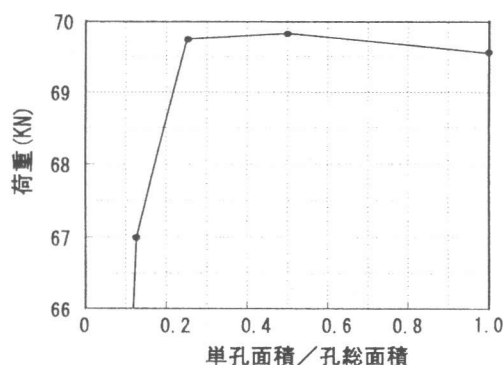


図-8 最大荷重-孔率関係図

開口数量により、付着効果がどのくらい影響があるのか、その問題の解明のため、合計開口面積を同じにして（直径4cm）、孔数を1, 2, 4, 8とした、一列孔を均等に配置した鋼板に対して、数値解析を行った。図-8に示すように、開口数量の増加に伴い、まず、最大荷重がやや上昇ことが表して、孔数が二つの場合に、荷重最大となり、以後、最大荷重の勾配が緩やかに減少する。孔数の4つ以上の場合、最大荷重が急速に下がっていることが表された。一方、図-9に示すような孔数の増加に伴い、引き抜き構造物の剛性がある程度強くなっていくことがわかった。

4. まとめ

筆者らが開発した内部不連続面での変位不連続性を有する不連続有限要素解析法をより一般化し、分布クラック、付着およびせん断すべり面などの不連続性を統一的に取り扱い、同時に表現できるように改良した。この解析法によれば内部不連続性を表現するためのボンドリンク、すべり要素、クラック要素などの追加及び併用の必要がなくなる。解析法および前報で同定された付着パラメーターを用いて有孔鋼板とコンクリートの付着メカニズムを解析した結果、つぎの結果と知見を得るに致った。

- 1) 有孔板の引き抜き供試体で見られた破壊プロセスを数値シミュレーションで再現できた。特にコンクリートの割裂破壊によって多方向にわたって生じるクラックの現象が究明できた。
- 2) コンクリートのせん断破壊エネルギーを同定することができた。
- 3) 円孔内部の卓越した圧縮応力がかぶり方向に伝わらずごく狭い領域に集中していることが明らかとなった。
- 4) 開口直径の変化による付着効果を予測し、その上限値と下限値が存在していることを明らかにした。さらに無孔板の破壊メカニズムとの比較を行った結果、破壊直後の脆性性状を解明することができた。
- 5) 開口数量が最大荷重に及ぼす影響が確かに存在することが、解析の結果によりわかった。

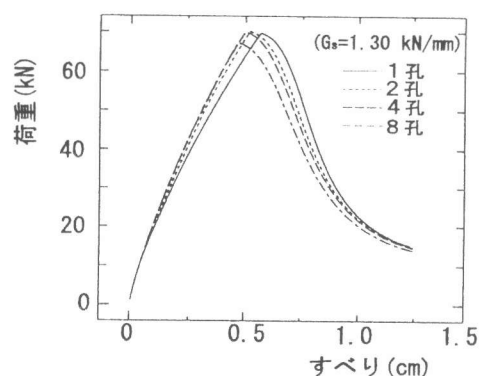


図-9 孔数が荷重-すべり曲線に及ぼす影響

参考文献

- [1] M. Afifuddin, Z. WU and A. Machida, Special finite elements with Displacement Discontinuity Across Internal Interfaces, コンクリート工学年次論文報告集; 第16巻, 第2号, pp. 123-128, 1994.
- [2] 高 東劭, 西海健二, 呉 智深, 町田篤彦, 不連続有限要素解析法を用いた鋼板とコンクリートの付着特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 2, pp. 1235-1240, 1995.
- [3] Z. WU 'Development of Computational Models For Reinforced Concrete Plate and Shell Elements', 名古屋大学学位論文 1990.
- [4] 石井博典, 有穴鋼板とコンクリートの付着特性に関する研究, 埼玉大学卒業論文1994.