

第2章 孔明き鋼板の付着

2.1 既往研究の紹介

2.1.1 有孔鋼製エレメントとコンクリートの付着強度 (JH・新日鐵) [1, 2]

有孔鋼製エレメントとは継手を有する鋼矢板と形鋼などを組み合わせたものであり、図-2.1.1に示すようにコンクリートとともに合成断面を構成し、そのためコンクリートを打設するための開口が配置されている。この開口はコンクリート中においてずれ止めとして機能することが期待できる。この種の合成構造が橋脚や連続地中壁に適用されつつある。有孔鋼板とコンクリートの付着特性を把握するために、エレメントをコンクリート中に埋め込み単純に引抜く引抜き試験および実構造物を想定した梁供試体による2種類の付着試験実施されている。その結果、有孔鋼製エレメントの開口による付着力は、図-2.1.2に定義する被り面積 A_c と開口面積 A_o の比 A_c/A_o を指標として、①開口部でのせん断破壊と②開口部での支圧割裂破壊に分類できる。以下にそれぞれの付着強度算定式を示す。

$$P_{ob} = 0.13F_c \cdot A_o \quad (A_c/A_o < 5 \text{ の時 : 支圧割裂破壊})$$

$$P_{os} = \min(P_{os1}, P_{os2}) \quad (A_c/A_o \geq 5 \text{ の時 : せん断破壊})$$

$$P_{os1} = 0.15F_c \cdot A_c$$

$$P_{os2} = 2.25F_c \cdot A_o$$

ここで、 F_c : コンクリートの圧縮強度

A_o : 開口面積

A_c : 被り面積

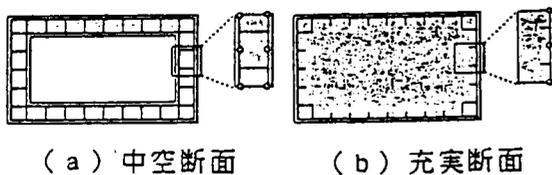


図-2.1.1 合成橋脚の種類

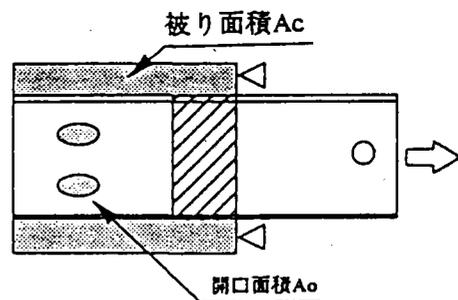


図-2.1.2 被り・開口面積の定義

参考文献

- [1] 緒方、村山、沖本、今西：鋼製エレメントとコンクリートの付着性能に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.2、1994、pp.1165-1170
- [2] 沖本、河原、藤井：有孔鋼製エレメント合成構造に関する実験的研究（その1 曲げ耐荷性能、その2 せん断耐荷性能）、土木学会第46回年次学術講演会、1991年9月

2.1.2 レオンハルト

レオンハルトは、連続合成桁の引張力を受ける床版において、床版と鋼桁の間にずれを生じさせない確実なずれ止めを用いるのであれば、床版にプレストレスを行わなくても良いのではないかと述べている。そして、ずれ止めとして孔あき鋼板が有効であり、多数のスタッドジベルよりも経済的である事を示唆している。[1]

一方、ずれ止めの破壊と耐荷力について次の様に述べている。[2]

孔あき鋼板をずれ止めとして使用した場合、終局状態として、①孔を通過しているコンクリートのせん断破壊、②孔と孔の間の鋼材のせん断破壊、③鋼板取り付け部（溶接部）の破壊の3通りが考えられる。

今溶接部を破壊に対して十分な強度をもたせた場合、孔あき鋼板のずれ止めの耐荷力は、実験から得られた結果を基にそれぞれ破壊に対して以下のようなになる。

- ・コンクリートが破壊する場合

$$P_c = 1.4 \times d^2 \times \sigma_c'$$

ここに d : 孔の径 (mm)

σ_c' : コンクリートの立方体強度 (N/mm²)

- ・鋼材が破壊する場合

$$P_s = 1.44 \times A_s \times \sigma_{sy}$$

ここに A_s : 図-2.1.3の鋼板断面 (mm²)

σ_{sy} : 鋼板の降伏強度 (N/mm²)

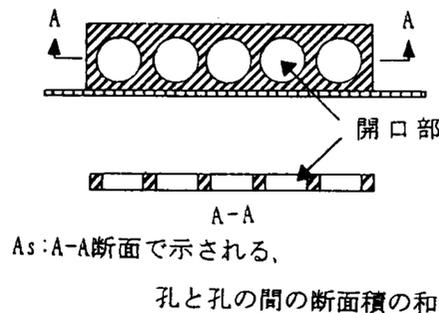


図-2.1.3 鋼板断面

上式は、コンクリート強度が一定ならば、孔と孔の間の面積を大きくすればコンクリート、小さくすれば鋼板が破壊することを示している。

参考文献

- [1] Leonhardt: Zur Bemessung durchlaufender Verbundträger bei dynamischer Belastung, Bauingenieur 62 1987
- [2] F. Leonhardt: Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton-und Stahlbetonbau, 12/1987

2.1.3 孔あき鋼板ジベルの疲労特性（鹿島）[1]

孔あき鋼板ジベルのせん断耐力と繰り返し荷重を受けたときのずれ特性を調べるために、スタッドジベルと比較しながら、押し抜き試験および疲労試験を行っている。

静的な押し抜き試験では、孔あき鋼板ジベルはレオンハルトの算定式、スタッドジベルはフィッシャーの算定式と良好な一致を示している。

疲労試験は、孔あき鋼板に作用するせん断応力度とスタッドに作用するそれとを同等にした繰り返し荷重のもとに行われており、以下のような結果を得ている。

(1) $\Delta \tau = 80 \text{ MPa}$ のとき

- ・ 200万回以上の载荷に対して、両者ともずれ量に大きな変化は見られない。
- ・ 疲労試験終了後の押し抜き試験結果は、計算値に対して、孔あき鋼板で約1割、スタッドで約4割低減した。

(2) $\Delta \tau = 180 \text{ MPa}$ のとき

- ・ 回数が増えるにしたがって、孔あき鋼板はずれ量が大きくなるが、スタッドは比較的緩やかな増加となる。
- ・ スタッドは約10万回でずれ量が増大し、孔あき鋼板は約35万回で増大する。疲労試験後の押し抜き試験結果は、計算値に対して、孔あき鋼板で約4割、スタッドで約5割低減した。

したがって、孔あき鋼板とスタッドの鋼材に加わるせん断応力度が同じであれば、孔あき鋼板の方が疲労試験後の残存耐力低下の割合が小さいという結果を得ている。

ただし、本文献は、孔あき鋼板とスタッドとの疲労強度を比較する上で、鋼板のせん断応力度とスタッドに作用するせん断応力度を同等にして疲労実験を行っているため、コンクリート部に作用する応力を同程度にした場合の評価がない。また、JSSCの疲労設計指針では、スタッドの疲労強度をせん断応力度の繰り返しで80 Mpaと定めている。したがって、実際の使用状態を考慮した荷重で両者の疲労強度を比較していないため、今後の研究に期待される。

参考文献

[1] コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, 1997

2.1.4 孔あき鋼板による鋼・コンクリート合成構造の耐荷力に関する検討（横河ブリッジ） [1]

孔あき鋼板の孔径と板厚をパラメータとした2次元のF.E.M.解析を行い、孔部周辺のコンクリートに発生する引張応力を、次式で表している。

孔部支圧に対して直角方向に働く割列引張応力

$$\sigma_{引張} = 0.15 \cdot \sigma_p$$

孔内コンクリートが鋼板厚を支間とした梁曲げに伴う引張応力

$$\sigma_{引張} = 7.0 \cdot \sigma_p \cdot \frac{R}{t}^{-1.28}$$

ここに、

$$\sigma_p : \text{孔部支圧応力度} (= \frac{F}{R \cdot t})$$

F : 孔1つ当たりに作用する力

R : 孔径

t : 板厚

上式のうち、梁曲げに伴う引張応力で、孔あき鋼板のせん断耐力を評価すれば、安全側に推定できることを、実験により確認している。

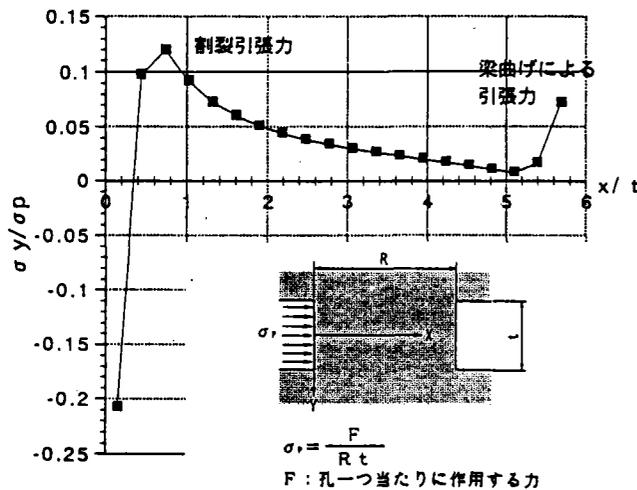


図-2.1.4 孔径70mm-リブ厚12mmの $\sigma_{引張}/\sigma_p$ 分布

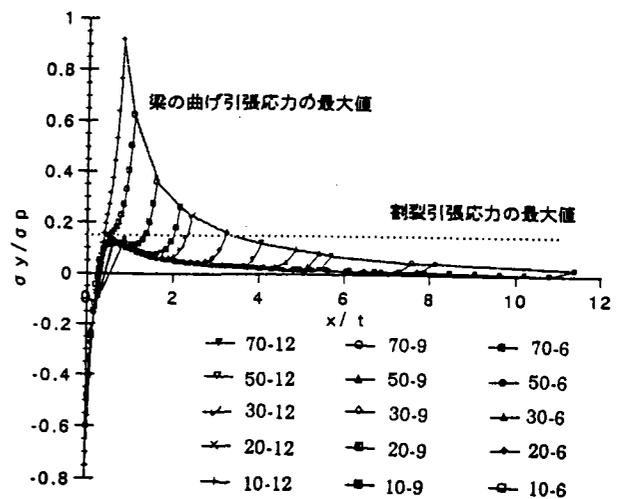


図-2.1.5 各解析モデルの $\sigma_{引張}/\sigma_p$ 分布

参考文献

[1]—土木学会第51回年次学術講演会，I-A506，平成8年9月

2.1.5 埼玉大学

埼玉大学では、無孔鋼板および直径 40mm の円形の孔およびこれに外接する正六角形の孔を有する有孔鋼板について、引き抜き試験および両引き試験を行っている。

引き抜き試験では、無孔鋼板の付着強度につき、平均 8.8 kgf/cm^2 の値を得ている。この付着強度は、既往のコンクリート中に埋め込まれた平鋼の付着強度と比較して、相当に小さい。これは、用いた供試体が小さく、コンクリートの拘束効果が十分に発揮されなかったためと考えられ、事実、破壊は、すべて、引き抜けによって生じている。これに対し、円形の孔を有する有孔鋼板では 21.2 kgf/cm^2 、正六角形の孔を有する有孔鋼板では、 18.3 kgf/cm^2 の付着強度を得て、付着強度向上の効果は、円形の孔の方がやや大きいこと、有孔鋼板の付着強度は無孔鋼板のおおむね 2 倍であると考えてよいこと、などを結論している。また、ひずみ測定の結果から、孔は低荷重時からその効果を発揮するが、無孔鋼板の引き抜けが生ずる荷重段階で割裂ひび割れの発生が見られたことから、粘着力や摩擦力による付着が消滅する段階でその効果が著しくなるとしている。そして、有孔鋼板の場合、適当な横補強筋を配すれば、より大きな付着強度が期待できるとしている。

両引き試験は、引き抜き試験ではコンクリートが圧縮力を受けていて実際の状況を模擬し得ない問題を解決しようとした試験方法で、異形鉄筋の付着特性を明らかにするために用いられている方法である。この方法では、鋼板の長さ方向にある間隔で穴をあけておき、コンクリートから突出させた鋼板の両端部に引張力を载荷して、供試体に発生するひび割れの間隔から、次式によって付着強度を評価するものである。

$$\tau = 2A_c \sigma_t / L_{\max} u$$

ここに、 τ : 付着強度、 A_c : コンクリートの断面積、 σ_t : コンクリートの引張強度、 u :

鋼材の周長、 L_{\max} : 最大ひび割れ間隔

両引き試験の結果は、表 2.1.1 のようであって、この表から、両引き試験でも、円形の孔の方が有孔であることが認められること、引き抜き試験と比較して、孔の効果が小さく示されていること、これは、最大ひび割れ間隔を大きめに評価する供試体であったことおよび孔の一で鋼材が降伏したことが原因と考えられることなどを結論している。なお、実際の部材で使用状態におけるひび割れ幅は、孔の径と間隔、孔の径と鋼材幅の比などを考えると、この実験に類似すると推定できるとしている。

表 2.1.1 両引き試験による付着強度

鋼板	最大ひび割れ間隔 (cm)	付着強度 (kgf/cm^2)
無孔鋼板	56.6	11.5
円形有孔鋼板	44.6	14.8
六角形有孔鋼板	50.9	13.2

2.2 不連続有限要素法による有孔鋼板とコンクリートとの付着特性の解析方法の紹介

2.2.1 まえがき

有孔鋼板の引き抜き試験結果によれば、荷重の増加に伴い、鋼板とコンクリートおよび孔周辺の付着面における付着が逐次破壊され大きなひずみ集中が生ずる。また、孔の存在により、コンクリートが割裂破壊し、孔付近から多方向にわたってひび割れが進展する。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、すべりボンドリンク要素およびクラックボンドリンク要素などを追加併用する必要があり、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、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、ひび割れの伝搬や付着破壊などを表現できる解析法が開発されている。これは、呉智深助教授（現茨城大学、当時埼玉大学）によるもので^{1)、2)}、

- (1) 有限要素汎用コードの機能をそのまま活かすことができる。
- (2) 自由度の増加の必要がない。
- (3) 結果が有限要素のメッシュ分割にあまり依存しない。
- (4) 軟化性状を追跡できる。支配方程式は通常の有限要素解析法におけるものと同様な形である。

などの特徴がある。

ここでは、今後の便も考えて、この解析法の概略を述べるとともに、これによって有孔鋼板の付着性状を解析した結果を紹介することとする。解析結果には、孔の数および口径が付着性状に及ぼす影響に関するものも含まれている。

2.2.2 一般的な不連続問題に関する混合有限要素定式化

(1) 不連続要素の支配方程式

節点変位の増分 $\bar{\Delta u}$ と等価節点力 \bar{f} 間の非線形支配方程式は、

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

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

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

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

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、次式より求められる。

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

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。

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

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 : 連続体の剛性マトリックス、 \mathbf{D}_i : 不連続面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)のように、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有限要素定式化と同様な形で表現されている。また、節点変位ベクトルは通常有限要素定式化での自由度 n 次元と同様である。

(2) 不連続補間関数

不連続性が生ずる不連続要素における不連続補間関数については、2次元解析のためのアイソパラメトリック要素について次のように定式化されている。すなわち、

有限要素内部の変位 \mathbf{u} は、その用を構成する節点の変位 $\bar{\mathbf{u}}$ と変位ジャンプ $\bar{\mathbf{u}}_i$ によって次のように補間されるものとする。

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}_u \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{N}_i \bar{\mathbf{u}}_i, \quad \bar{\mathbf{u}} = \tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{P} \bar{\mathbf{u}}_i \quad (7)$$

また、式(7)と違った形を取って、有限要素内部の変位 \mathbf{u} を連続タイの変位に対応する節点変位 $\tilde{\mathbf{u}}$ と不連続面での節点変位ジャンプ $\bar{\mathbf{u}}_i$ に分ければ、次のような形で書くことが

$$\mathbf{u} \approx \mathbf{N}_u \tilde{\mathbf{u}} + \Phi_i \bar{\mathbf{u}}_i, \quad \Phi_i = \Phi \mathbf{I} \quad (8)$$

できる。式(7)と(8)を比較すると、

$$\mathbf{P} = [\Phi_1 \quad \Phi_2 \quad \Phi_3 \quad \dots \quad \Phi_n]$$

ここで、要素の節点が V^+ 側にあるとき $\Phi_j = \omega \mathbf{T}$ 、節点が V^- 側にあるとき $\Phi_j = (\omega - 1) \mathbf{T}$

$$\Phi_j = \begin{cases} \omega \mathbf{T} & \text{in } V^+ \\ (\omega - 1) \mathbf{T} & \text{in } V^- \end{cases}$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

\mathbf{T} : 不連続面における局所座標から全体座標への変換マトリックス、 n : 有限要素節点数、 α : 局所座標と全体座標のなす角度、 ω : 不連続ジャンプ関数である。 ω は V^+ 側と V^- 側の面積比で決定されるが、この研究では、すべりクラックが付着滑りの不連続要素の中心に生ずると考えて、 $\omega = 0.5$ としている (図 2.2.1 参照)。

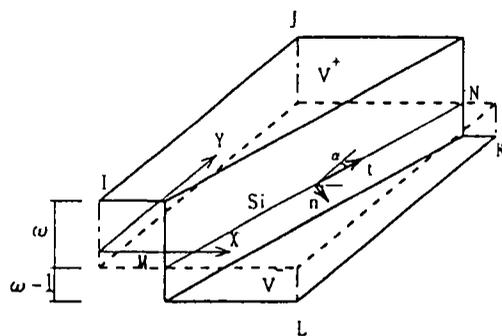


図-2.2.1 局所変位の不連続関係図

(3) 構成モデル

要素の剛性を算定するには、要素剛性マトリックスに材料自信の構成則のほか、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—すべり関係を導入する必要がある。この研究では、不連続面の非線形性を算定する剛性マトリックス \mathbf{D}_i を次のように与えている。

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

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) および平行方向の \mathbf{G}_{nt} (sliding) である。この研究では、opening モデルは、図 2.2.2(a) のように与えている。ただし、クラック要素と付着要素において、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、sliding モデルは、図 2.2.2(b) のように与えている。ここで、 E_{bs} : 弾性

状態の付着せん断剛度、 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}

コンクリートのせん断強度、 G_{bs} 、 G_{cs} : それぞれのせん断破壊エネルギーである。

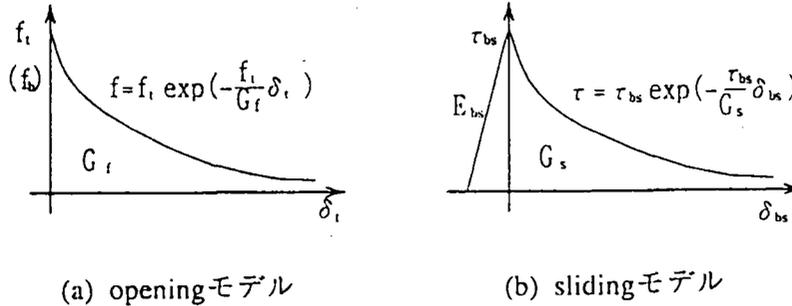


図-2.2.2 不連続面のモデル

参考文献

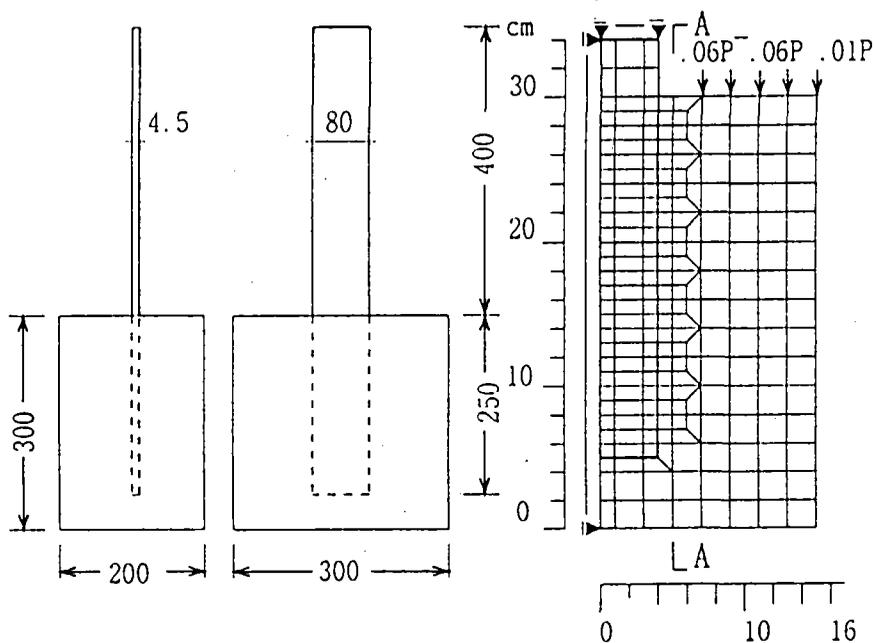
- 1) 高東劭、西海健二、呉智深、町田篤彦、不連続有限要素解析法を用いた鋼板とコンクリートの付着特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.2, pp.1235-1240, 1995
- 2) 高東劭、呉智深、町田篤彦、西海健二、不連続有限要素法を用いた有孔鋼板とコンクリートの付着の特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.1, pp.347-352, 1996

2.3 解析例

2.3.1 鋼板とコンクリートの付着特性の解析

無孔鋼板の引き抜き試験の解析結果を以下に示す。

解析には、対称性を考えて全体の 1/4 を解析モデルとし、要素分割は図 2.3.1 のようである。用いた要素は、4 節点のアイソパラメトリック要素であり、材料特性は表 2.3.1 のように仮定している。また、コンクリートの厚さは供試体と同じ $20/2=10\text{cm}$ とし、厚さ方向の応力変化を無視した平面問題としている。なお、実際の鋼板周りの付着面を図 2.3.1(b) に示す側面 A-A に等価的に置き換えるとともに、コンクリートと鋼板に共通の節点をもうけて、バネ要素を導入する必要性をなくしている。



(a) 引き抜き供試体

(b) マッシュ分割図

図-2.3.1 引き抜き解析モデル

表-2.3.1 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	ポワソン比
鋼材	205000	371	371	-	0.28
コンクリート	31000	3.03	30.2	15	0.2

2.3.2 付着パラメータ

図 2.3.2 は、付着要素の初期すべりせん断剛性係数 E_{bs} をパラメータとした解析結果である。この図より、解析は E_{bs} の増加に伴い、最大荷重は変わらないがすべり量が大きく変化する結果を与えることが分かる。また、解析により、付着要素の初期すべりせん断剛性はコンクリートの弾性係数の $1/10 \sim 1/20$ となっていることが示された。一方、すべり破壊面の破壊エネルギー散逸とコンクリートのクラック進展の破壊エネルギー散逸を基本的に同じと考えたが、すべり軟化領域の勾配がコンクリートの場合よりも少し緩やかであることが示された。また、 $\tau_{bs} = 7.1 \text{ kg/cm}^2$ 、 $E_{bs} = 1.55 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ として、図-2.3.3 に示すように G_s を変化させて、解析を行った結果、付着すべり破壊エネルギーは、 $0.4 \sim 0.6 \text{ kg/cm}$ の間にあることが判明した。

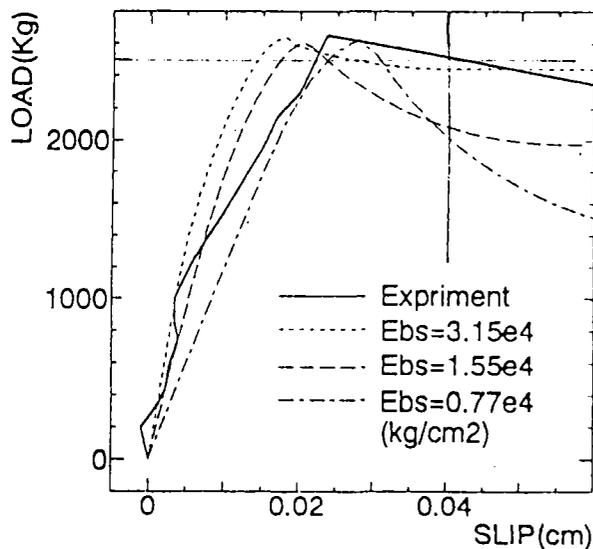


図-2.3.2 E_{bs} が荷重-滑り曲線に及ぼす影響

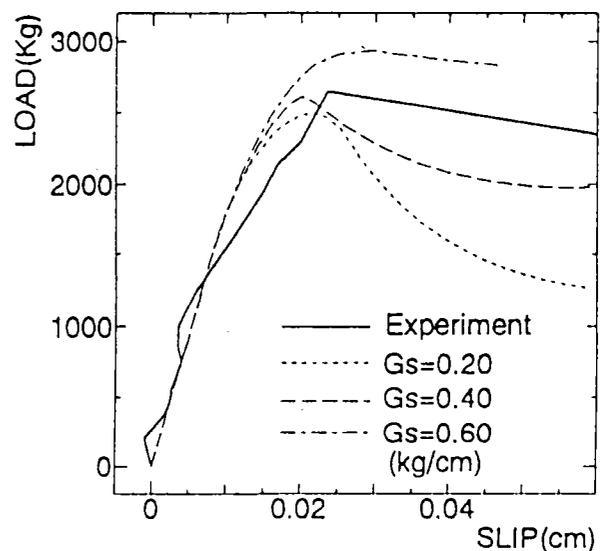


図-2.3.3 G_s が荷重-滑り曲線に及ぼす影響

図 2.3.2 および 2.3.3 に引き抜き試験の引き抜き荷重-荷重端のすべりの関係を示す。これらによれば、本解析は最大荷重後の挙動もよく追跡していることがわかる。また、最大荷重に達してから付着破壊によって荷重が急激に下がることが確認され、異形鉄筋に比べコンクリートとの付着が脆性的に破壊されることが再現された。

次に解析で予測されたある荷重における自由端から荷重端にかけてのひずみ分布と実験で測定したひずみ分布の比較図を図 2.3.4 に示す。比較的、低荷重時のひずみ分布を見ると、ひずみは荷重端から自由端に向かって勾配が緩やかに減少している。よって、この荷重段階では付着面の全領域にわたって付着形状はまた弾性領域になっているといえる。しかし、荷重の増加に伴い、荷重端側よりひずみの勾配が徐々に緩やかになり、さらにその範囲は徐々に拡大していく。このことは荷重端近傍から付着力が弱まっていることを示している。また、荷重の増加に伴い、付着破壊が自由端側に向かって進展していくこともわかる。

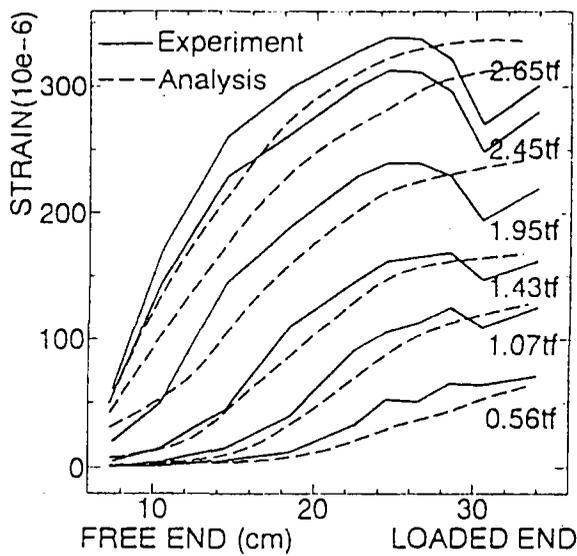
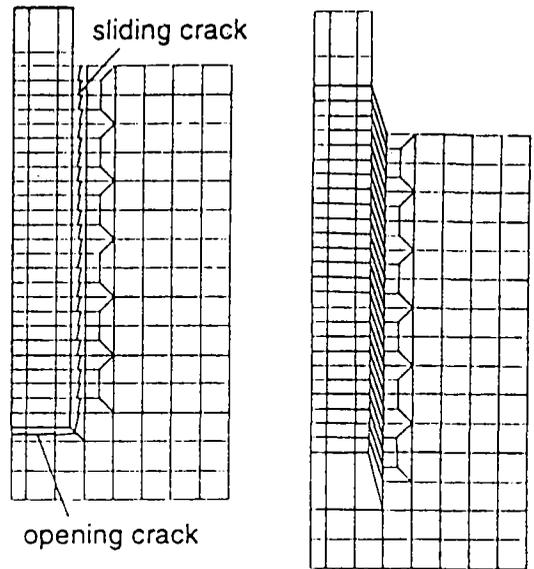


図-2.3.4 鋼板ひずみ分布図



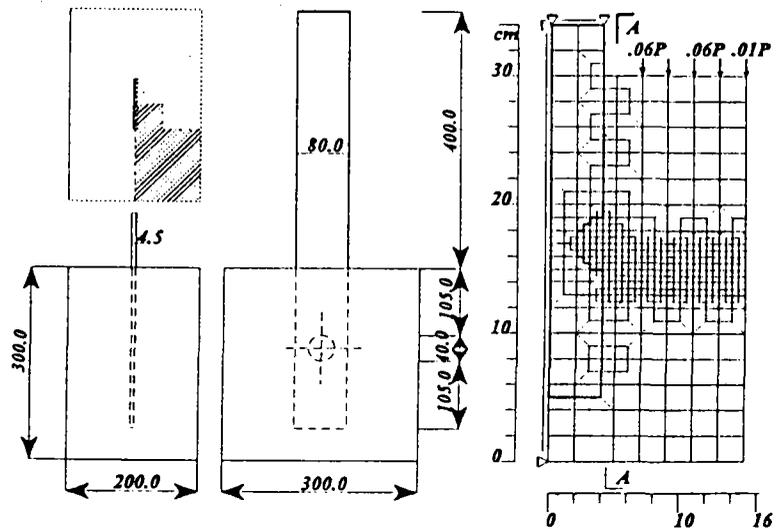
(a) (b)

図-2.3.5 滑りひびわれ及び変形図

図 2.3.5 は解析より得られた付着すべりひびわれ図(a)及び変形図(b)である。これによれば、解析は鋼板付近の変形集中をよく追跡していることがわかる。また、鋼板の端部の引張ひびわれも表現されている。

2.3.3 有孔鋼板の解析モデル

有孔鋼板の解析に用いたモデルは図 2.3.6 のようであり、無孔鋼板の場合と同様、1/4 をモデル化、4 節点アイソパラメトリック要素を用いている。材料特性も表 2.3.1 と同様である。孔の位置に関しては、実際は鋼板の左側であるが、これを右側において、コンクリートとの共有節点をもっている。付着パラメータは、2.3.2 の結果に基づき、



(a) 引き抜き供試体 (b) メッシュ分割図

図-2.3.6 引き抜き解析モデル

$\tau_{bs} = 0.71N/mm^2$ 、 $E_{bs} = 1.55 \times 10^3 N/mm^2$ 、 $G_{bs} = 0.5N/mm$ 、 $f_b = 0.2N/mm^2$ とした。

また、コンクリートの破壊エネルギーを $G_f = 0.2N/mm$ 、コンクリートの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て、コンクリートのせん断破壊エネルギー G_{cs} をパラメータとした解析の結果、図 2.3.7 のように、 G_{cs} は1.2と1.6 N/mm の間の値が適当であることが明らかにされている。

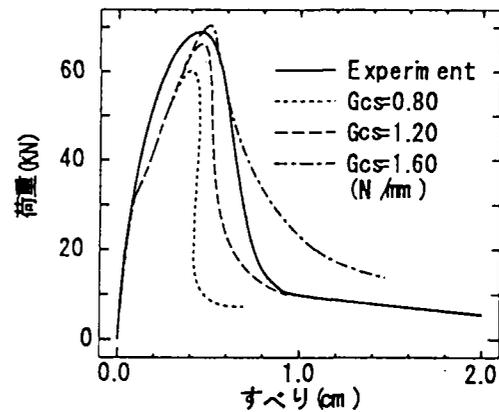
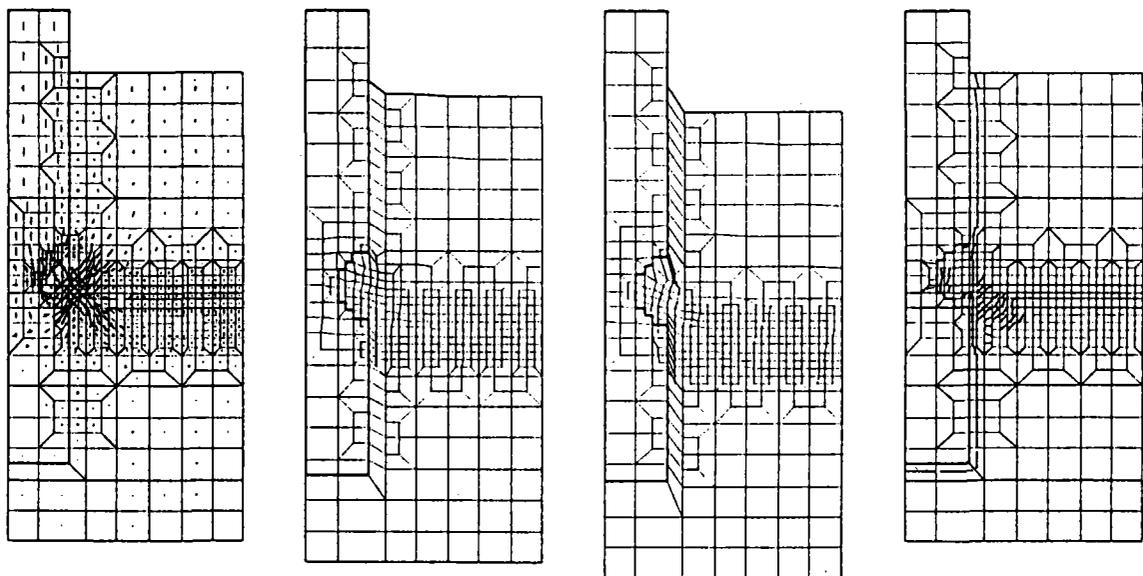


図-2.3.7 コンクリートのせん断破壊エネルギー G_{cs} が荷重-滑り曲線に及ぼす影響

2.3.4 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 $G_{cs} = 1.6N/mm$ とした詳細解析結果を図 2.3.8 に示す。



(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-2.3.8 有孔鋼板とコンクリート付着特性解析

図 2.3.8(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 2.3.9 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 2.3.8(b)(c)は最大荷重時及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出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。

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 2.3.8(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 2.3.9 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。

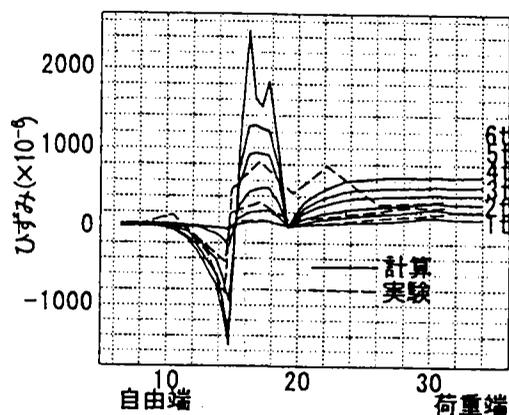


図-2.3.9 鋼板ひずみ分布図

2.3.5 開口直径が付着に及ぼす影響

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 2.3.10 に示す。図に示すとおり、開口直径 $D=4\text{cm}$ 時の最大荷重は 70.5KN であり、無孔板の約 2.5 倍であるが、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り、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 2.3.11 は、最大荷重—開口直径の関係を示したもので、これにより、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超えると、最大荷重の増加が認められなくなる。これは、鋼板の降伏その他によるものと考えられる。このように、開口面積が付着に及ぼす効果には上限値と下限値が存在すると思われる。

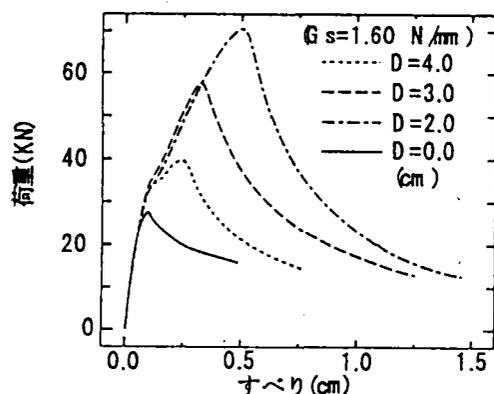


図-2.3.10 孔径が荷重—滑り曲線に及ぼす影響

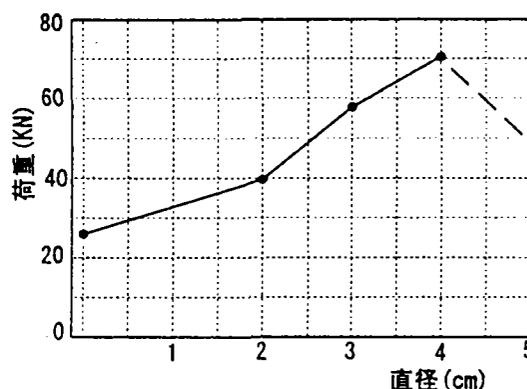


図-2.3.11 最大荷重—孔径関係図

2.3.6 開口数が付着に及ぼす影響

合計の開口面積を同じにして、孔数を 1, 2, 4, 8 と変化させ、一列に孔を均等に配置した鋼板に対して、数値解析を行った。その結果は図 2.3.12 に示すようで、孔数の増加に伴い、まず、最大荷重がやや上昇し、孔数が 2 の場合に荷重最大となって、以後、最大荷重の勾配が緩やかに減少するのであり、孔数が 4 以上の場合、最大荷重が急速に下がっていることが示された。一方、図 2.3.13 に示すように、孔数の増加に伴い、引き抜きの剛性はある程度大きくなっていくことがわかった。

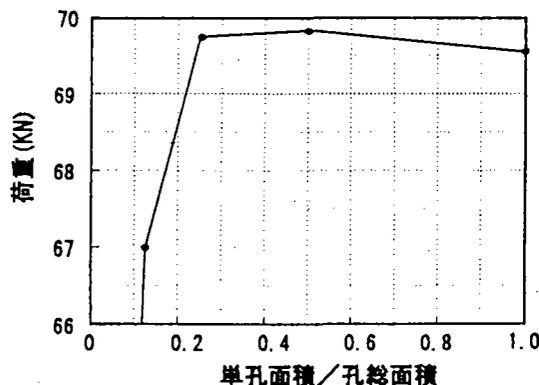


図-2.3.12 最大荷重—孔率関係図

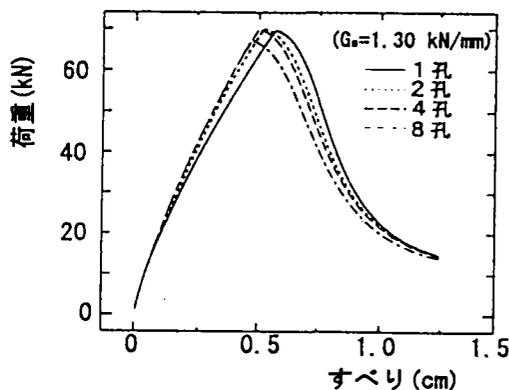


図-2.3.13 孔数が荷重—すべり曲線に及ぼす影響

2.3.7 まとめ

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て、分布クラック、付着及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解析法を紹介した。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り、有限要素汎用コードの機能をそのまま活かすことができる。

また、この解析法によって有効鋼板とコンクリートの付着メカニズムを解析した結果も示した。解析により解明できた点は、以下のように纏めることができる。

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になった。

4)開口直径が付着特性に及ぼす効果を予測し、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。

5)開口数量が最大荷重に影響を及ぼすことを確認した。

参考文献

- 3) 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
- 4) 高東劭、呉智深、町田篤彦、西海健二、不連続有限要素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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.1, pp.347-352, 1996