

接触効果を考慮した圧縮板の強度特性

Compressive strength characteristics of a plate element with contacting effect

中沢正利*・山崎誠幸**・松本秀樹***・岩熊哲夫****

Masatoshi NAKAZAWA, Nobuyuki YAMAZAKI, Hideki MATSUMOTO
and Tetsuo IWAKUMA

*正会員 工博 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

**学生員 学士(工学) 東北大学大学院工学研究科

***学士(工学) 福岡県 (〒812-8577 福岡市博多区東公園 7-7)

****正会員 Ph.D. 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻

Firstly, the elastic compressive buckling strength of a plate element with contacting effect is investigated analytically.

Secondly from the elasto-plastic FEM analysis, the behavior of contacted plate and the ultimate strength characteristics are revealed numerically. The relationships between the compressive strength and the gap of plate and contacting surface, the width-thickness ratio and the aspect ratio are evaluated. A plate of which aspect ratio equals unity rebounds after contacting, and the compressive strength increases temporarily, but decreases to the same level of those without contacting effect.

Key Words : Contact problems, plate element, FEM, compressive strength characteristics

1. まえがき

兵庫県南部地震以降の耐震補強に代表されるように、巻き立て工法やコンクリート充填工法による鋼構造の補強など、補強後の構造が合成構造となる場合が今後増えることが予想される。このような合成柱の場合、板要素の面外変形を充填コンクリートが抑制し、かつ外壁が充填コンクリートを拘束することによって、全体としての強度向上が見込まれるが、その基本的な挙動および効果には不明確な部分も多い。

そこで本研究では、これらの合成構造物の挙動特性を探る上で重要な項目の一つである接触問題に着目し、弾塑性数値解析を通してその接触挙動および接触強度特性を調べる。解析対象としては、充填コンクリートを片側に配した、一方向に一樣圧縮を受ける板要素を考え、簡便なモデルとする。

鋼板が最初から外側に変形する場合には鋼板単独の強度特性しか現れないが、充填コンクリート側に変形してコンクリートと接触するような場合には、その挙動は大きく異なってくることが予想される。また、内側の充填コンクリートは乾燥収縮などにより鋼板と必ずしも密着しているとは言えず、接触時は鋼板とコンクリートの接触面間距離によってもその挙動は変わってくると考えられる。よって、鋼板とコンクリートの接触面間距離、鋼板の幅厚比、縦横比などのパラメータ等を変化させることにより、面内力を受ける鋼板要素の弾塑性接触挙動および強度特性を数値的に検討することを本研究の目的とする。

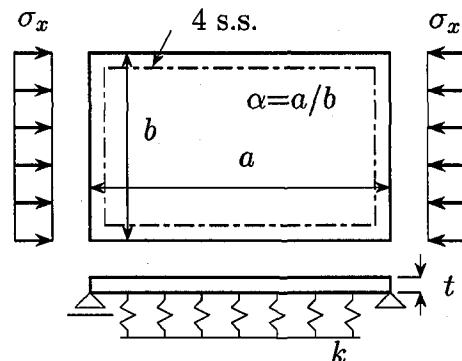


図-1 部分解析モデル(四辺単純支持境界条件)

する。

2. 平板の弾性接触解析

2.1 弾性床上板近似による座屈強度解析解

ここでは、例えばコンクリート充填式角形鋼管柱の中のダイヤフラムおよび縦リブに挟まれた部分を取り出し、図-1に示すような部分解析モデルを考える。この解析対象が面内一樣圧縮力を受ける時のコンクリートからの面外接触効果を、弾性床上矩形板としてモデル化する。コンクリートを充填した鋼管構造に関する渡辺らの研究¹⁾によると、鋼板の局部座屈強度に関しては、その実験値が四辺固定支持境界条件の解析値と四辺単純支持

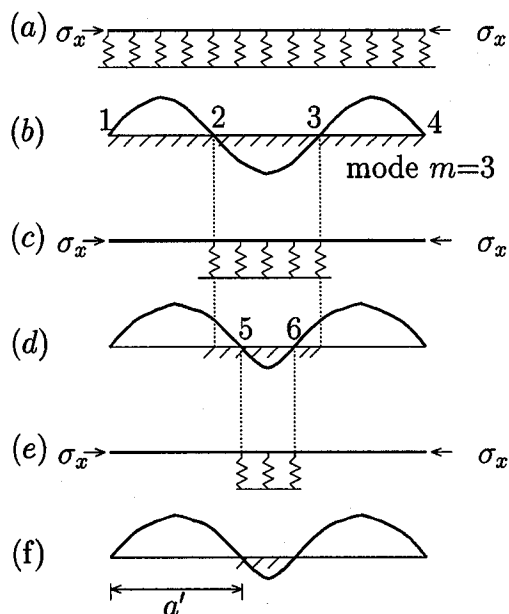


図-2 接触問題近似解析法の手順 (a' は有効座屈長)

の解析値の間になることが示されているが、ここでは基本的特性を把握するために四辺単純支持境界条件のもとで座屈解析解の近似解を求めてみる。

(1) 近似解析手法

座屈解析手法の基本的原理は文献 2) と同様であるが、Winkler 型弾性床³⁾の効果を検討し、接触を考慮した解析的解法としてここでは逐次近似解法を用いた。

図-2 (a) のような全面バネ支持の場合の座屈解析をまず行い、その時の座屈モードが (b) のようになるとすると、板にバネによる正の面外反力が作用する部分 (2-3) にバネ支承を与え、負の面外反力が作用する部分 (1-2, 3-4) のバネを除去した (c) のようなモデルを次に設定する。すなわち、床のバネ定数 k については、板のたわみがバネ側に生ずるときは k を与え、バネと反対側に生ずるときは k を 0 とし数値積分を行なう。このようなバネ支持条件に対して同様に固有値計算を行ない、その結果座屈モードが例えば (d) のようになれば、ここでもまた上と同様に (5-6) の部分にバネを与え、それ以外のバネを除去して (e) を解く。以上を座屈荷重及び座屈モードが収束するまで繰り返し計算する。

解析解を求めるという意味からすると、背面コンクリート側へのたわみはゼロにしたい。本計算手法ではたわみは 0 ではないが、得られる計算上のたわみの大きさは非常に小さく、よって解析解に対する近似解を求めることが可能となる。

(2) 弾性接触座屈強度

鋼板を対象に考えているため、板の材料定数として弾性係数 $E=2.09 \times 10^5$ (N/mm²)、ポアソン比 $\nu=0.3$ とする。また、線形バネ定数 k は背面の充填材料によって

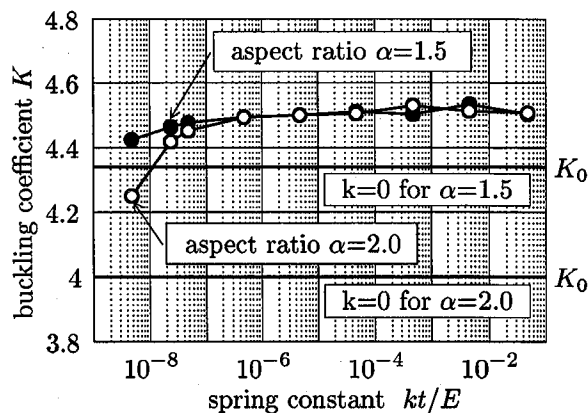


図-3 バネ定数 kt/E と座屈係数 K の関係

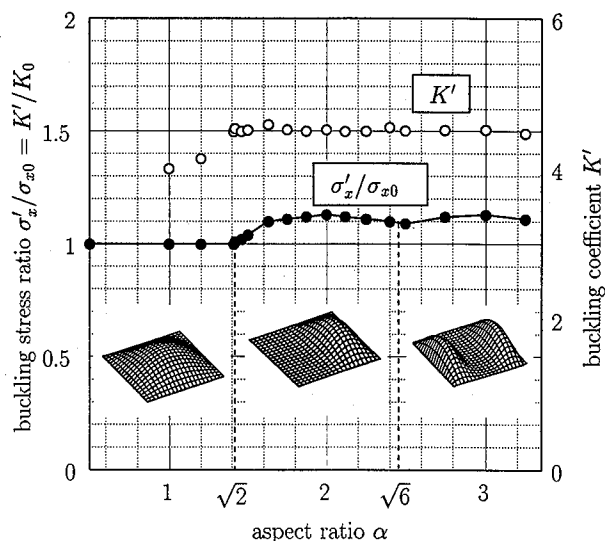


図-4 有効座屈長と縦横比の関係 (4 s.s.)

様々な値を取り得るが、ここではコンクリートから地盤程度の弾性床を考え、 $k = 1.0 \times 10^5 \sim 0.1$ (kgf/cm³) ($kt/E = 4.76 \times 10^{-2} \sim 4.76 \times 10^{-8}$) の範囲に設定した。

縦横比 α を一定とし、バネ定数 k の大きさを変化させて座屈強度を求め、図-3 に示した。ここで、横軸は無次元化したバネ定数 kt/E を示し、縦軸は座屈係数 K である。これらの図より、バネ定数が小さい値ではバネのない単純な板の座屈強度に漸近し、また地盤程度以上のバネ定数 ($kt/E > \text{約 } 5.0 \times 10^{-7}$) になると、バネの強さに関係なく座屈強度はほぼ一定となることがわかる。こうしたバネ定数の大きさに依存しない一定座屈強度に相当する座屈係数 K' と縦横比 α の関係を図-4 に示す。また、弾性床上板の座屈応力 σ'_x と四辺単純支持板 (バネなし) の座屈応力 σ_{x0} との比も併記した。

四辺単純支持板が正弦半波の座屈モード $m=1$ の場合を示す縦横比 α の範囲 ($\alpha \leq \sqrt{2}$) に対しては、バネと反対側にのみたわむため、弾性床上板の座屈強度および

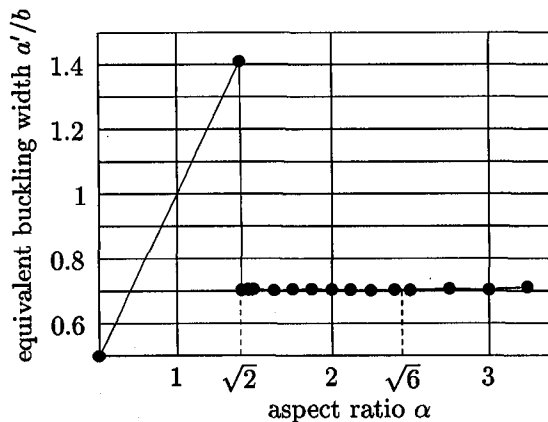


図-5 弾性床板上の座屈強度と縦横比の関係 (4 s.s.)

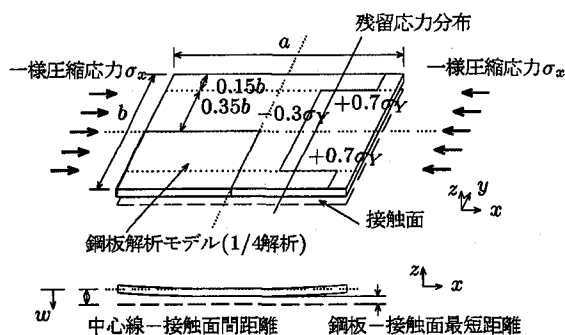


図-6 弾塑性 FEM 解析に用いる解析モデル

座屈モードはバネ支承の影響を全く受けない。また、それ以上の大きさの縦横比に対しても約 10% 増程度のレベルの座屈強度が得られ、これは例えば $\sqrt{2} < \alpha < \sqrt{6}$ の範囲でも弾性床板上は $m=1$ (半波長 $\simeq a/2$) のモードで部分的に片側のみが座屈するためである。したがって、弾性床の影響は座屈強度には小さいが、座屈波長には大きいことが分かる。バネ無しの四辺単純支持板が $m=3$ のモード形状に変わる $\sqrt{6} \leq \alpha$ でも同様の考察が成り立ち、 $\sqrt{2} < \alpha < \sqrt{6}$ の範囲でのモードが二個並んだ形状となって、やはり大幅な座屈強度の増加はない。

以上の議論より、 $\alpha > \sqrt{2}$ の弾性床板上の座屈強度は、その座屈している部分 (図-2 (f) の a' の範囲) の有効座屈長を求めてやることで簡便に算出できることになる。よって、弾性床板上の座屈強度と等価な座屈強度を示す四辺単純支持板の換算有効長 a' 、あるいは換算縦横比 $a'=a'/b$ を、図-5 に示した。図より分かるように、 $\alpha < \sqrt{2}$ までは実幅と同じだが、それ以降は $a' \simeq 0.7$ で、座屈半波長はほぼ一定のままである。

2.2 FEM による弾性接触解析

ここでは、弾性接触座屈後の挙動をみるため、FEM 解析を行った。解析対象は面内一様圧縮応力 σ_x を受け

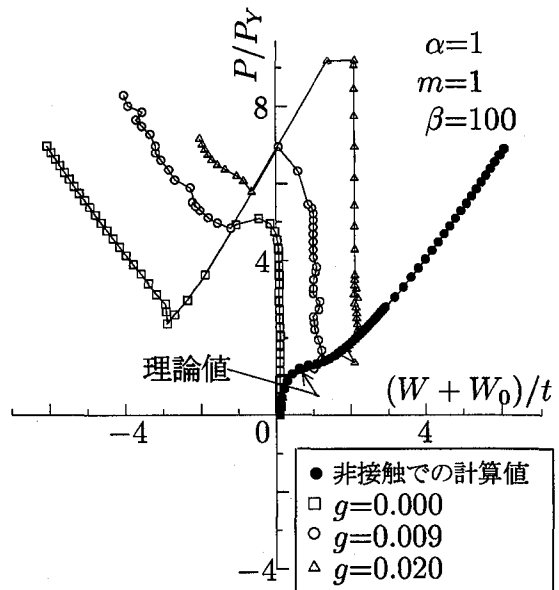


図-7 弾性接触解析の結果 ($P=\sigma_x A$, $\alpha=1$, $m=1$, $\beta=100$)

る鋼板であるため、図-6 のように 1/4 領域のみを解析した。また、接触面としてはコンクリートを想定しているが、鋼の板厚に対してコンクリートは十分厚いと考えられることより、面外方向にたわんだ鋼板とコンクリートが接触した際の鋼板の面外力によるコンクリートの変形は無視できると考え、FEM による接触解析では接触面を剛体とみなした。図中には、次節の弾塑性解析で考慮した残留応力分布も併記してある。なお、数値解析には有限要素法による汎用解析コード^{4),5)}を使用し、変位制御解析を行った。またここでは、鋼板の接触特性を示すために以下の無次元量を定義した。

$$g \equiv \frac{\text{鋼板と接触面の最短距離}}{\text{鋼板の横辺長 } a} \quad (1)$$

この無次元化接触距離 g を用いて、弾性接触解析の結果を図-7 に示した。ここで、 W_0 , W はそれぞれ、着目した板の中央点の初期たわみ量及び付加たわみ量である。図-6 で示したように、鋼板が面外にたわむ方向に w 軸を定義したので、鋼板が接触後にはね返って元の位置を越えた場合は横軸は負となる。なお、これ以降使用する「はね返る」という表現は、鋼板が剛体面に接触した後、接触前と逆の面外方向に変形の向きを変えることを意味するものとする。また、数値計算上、後座屈挙動を追跡するためには初期たわみを与えなければならないので、一半波長の初期たわみ振幅 W_0 を $W_0/a=0.001$, $W_0/t=0.1$ に設定した。図-7 より、以下のような弾性接触特性がうかがえる。

- 鋼板は一点で接触した後に徐々に接触面積が増加するが、ある段階ではね返る。この多面接触時には一時的に非接触の場合より強度は上昇する。

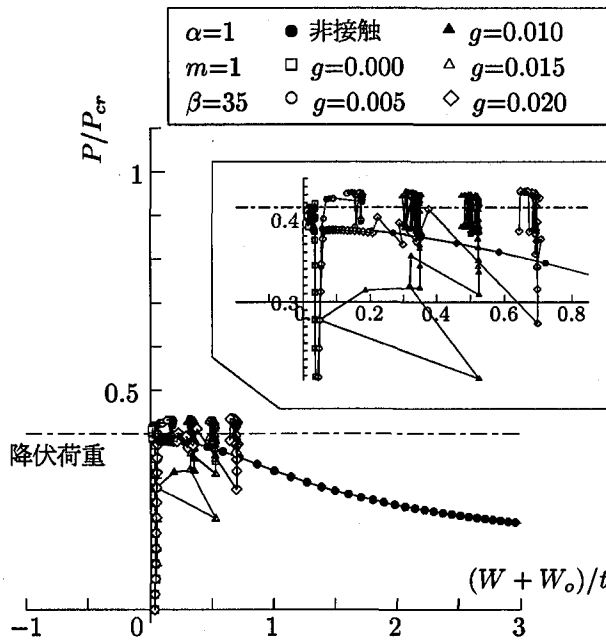


図-8-a 幅厚比 $\beta=35$ の場合

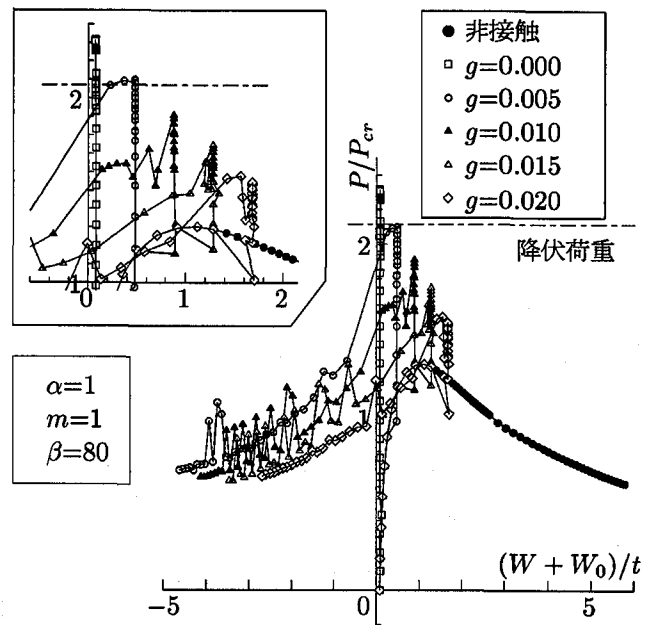


図-8-b 幅厚比 $\beta=80$ の場合

図-8 弾塑性接触解析の結果 ($\alpha=1, m=1$)

- はね返った後、鋼板の強度は急激に低下するが、接触面間距離が大きい程、接触してからはね返るまでの接触面積は減少するので、接触部分での有効座屈長が小さくなり、その最低強度は高いレベルになる。

これらの結果から、鋼板の接触面間距離の相違によって、弾性接触強度、変形およびはね返り時の有効座屈長等が大きく異なってくることが分かる。

3. 平板の弾塑性接触解析

接触を考慮した鋼板の終局強度に与える要因としては、鋼材の降伏および残留応力の影響などがあり、図-7のような接触状態での大きな強度上昇は現実的ではなく、はね返った後の挙動についてもよく分かっていない。したがって、実際の鋼板の弾塑性接触強度について定量的な評価を行うため、次に弾塑性接触解析を行った。

3.1 解析モデルおよび解析条件

鋼板の降伏応力度を $\sigma_Y=235.2(\text{N/mm}^2)$ とし、完全弾塑性体と仮定した。縦横比 $\alpha=1$ に対して幅厚比 β を 35, 60, 80, 100 の 4 段階で、それぞれ非接触および接触 ($g=0, 0.005, 0.010, 0.015, 0.020$) について解析を行った。また、縦横比の相違についても比較するため、縦横比 $\alpha=2$ に関して幅厚比 $\beta=35$ について接触および非接触解析を、さらに $\beta=60, 80, 100$ について接触面間距離 $g=0.010$ の接触解析を行った。なお、このときの軸方向

に与えた強制圧縮ひずみはすべて最大 0.75% とした。

3.2 縦横比 $\alpha=1$ の場合の解析結果と考察

弾性接触解析の時と同様、縦軸に P/P_{cr} 、横軸に $(W + W_0)/t$ をとり、荷重 - 面外たわみ曲線を図-8-a および図-8-b に示す。これらは、鋼板が早期に降伏する場合 ($\beta=35$) と接触した後に降伏する場合 ($\beta=80$) について、接触後の挙動が異なる二つの代表例である。

どちらの場合も接触時は非接触時に比べ、はね返るまでの間一時的に強度が上昇するが、前者は単なる塑性変形であるため、接触後の強度上昇も降伏点で頭打ちになり、その後は徐々にはね返るだけの単調な挙動となる。尚、解析で降伏点以上の強度が得られたり、解析結果が振動して乱れているのは、接触計算の中で接触判定が頻繁に行われているための誤差である。本解析での接触判定条件は、節点と剛体壁の距離がしきい値 $\pm(\text{板厚})/2$ の範囲に入った時点で接触したと見做しているが、メッシュ分割数を増やした解析ではその振れ幅が小さくなることを確認している。ただし、メッシュ分割を多くすると接触判定に多大の計算時間を要するため、ここでは 10×10 分割での結果を示した。

一方、接触後に降伏するような板の場合は、接触面間距離によって最大耐力に相違が見られ、鋼板が接触面側に変形する場合には、接触面間距離が大きいほど曲げ変形による早期降伏が生じて、最大耐力も小さくなる。この点が弾性接触解析と相反する結果である。

初期状態から接触させた場合 ($g=0$) は、鋼板がほとんどはね返らずに圧縮力に抵抗し、生じる面外変位も微

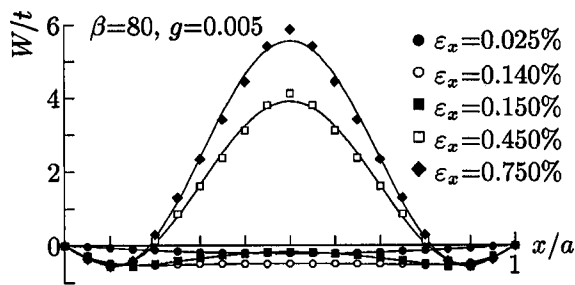


図-9-a $g=0.005$ の場合

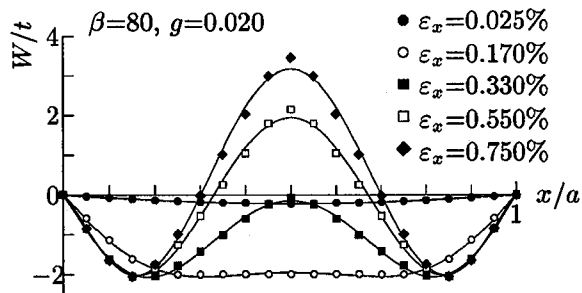


図-9-b $g=0.020$ の場合

図-9 面外たわみの成長曲線 ($\beta=80$)

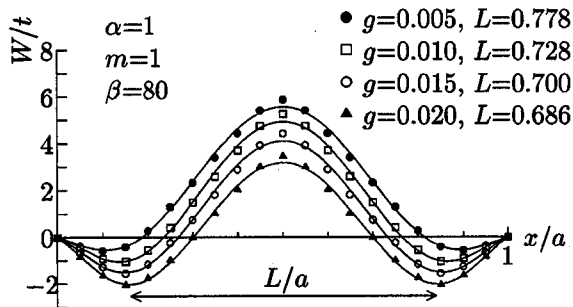


図-10 板の最終変形状の比較 ($\beta=80$)

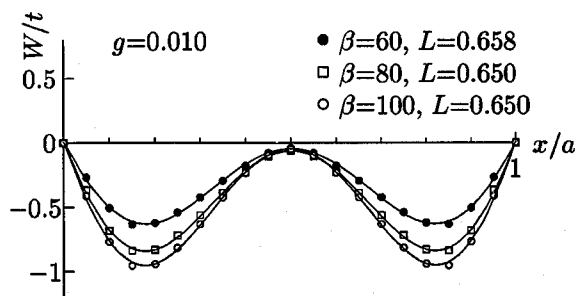


図-11 幅厚比と面外たわみ形状の関係 ($g=0.01$ の場合)

小で、鋼の降伏点まで強度が期待できる。なお、この場合、最大強度以降は荷重辺と直交する側辺の面内変形が大きくなる傾向がみられた。また、はね返り後の強度低下は漸近的で、収束状態となる時の圧縮強度は最も小さくなるが、それでも非接触時とほぼ等しいといえる。

(1) 幅厚比と局部変形半波長の関係について

はね返った鋼板の面外たわみ形状について、たわみ角が 0 となる 2ヶ所の接点を両端とする中央区間の半波長を弾性解析時は有効屈屈長と表現するが、塑性域では塑性変形に伴う局部変形に起因するためこの表現は不適切となる。したがって、ここではこの半波長を局部変形半波長と呼ぶことにして、次のような無次元化パラメータを定義し、はね返り時の挙動について考察する。

$$L \equiv \frac{\text{局部変形半波長}}{\text{鋼板の横辺長 } a} \quad (2)$$

解析時の板の変形状態の代表例を成長曲線の形で図-9-a および図-9-b に示す。ここで縦軸は面外方向変位を板厚で除した W/t とし、横軸は板の横方向の位置を表す無次元量 x/a とした。図中の ϵ_x は各変形状態における軸方向圧縮ひずみである。なお、曲線を描くにあたっては 6 次多項式を用いた最小自乗法による関数近似を行った。また、板の最終変形状態 ($\epsilon_x=0.75\%$) での各幅厚比ごとに L の値を調べ、一例として $\beta=80$ の場合について図-10 に示した。

鋼板が早期に降伏する $\beta=35$ のような幅厚比の小さい板の場合は、はね返り時の面外変位も小さく、接触面間距離 g と局部変形半波長 L の関係を定性的には評価す

表-1 各幅厚比ごとの接触面間距離 g と局部変形半波長 L の関係 (板中央の $W/t \neq 0$)

	$\beta=60$	$\beta=80$	$\beta=100$	L の平均
$g=0.005$	0.714	0.708	0.708	0.71
$g=0.010$	0.658	0.650	0.650	0.65
$g=0.015$	0.644	0.644	0.722	0.67
$g=0.020$	0.644	0.644	0.650	0.65
L の平均	0.67	0.66	0.68	

ることは難しい。しかし一般的に、幅厚比が比較的大きくて接触後に降伏する場合については、 g が大きくなるのに反比例して L が小さくなり、定性的には L が g の関数であると考えられる。そこで、局部変形半波長 L は荷重段階でも変化する量ではあるが、鋼板の変形状態がほぼ等しい時点で比較するのが妥当と考え、板中央での W/t の値が最も 0 に近づく荷重段階の板の変形曲線について接触面間距離ごとに整理し、 $\beta=35$ の場合を除いて表-1 にまとめた。また、その代表例を図-11 に示した。これらの結果より、局部変形半波長 L は幅厚比が変わってもほぼ一定値をとることが分かる。

以上より、局部変形半波長 L は大局的には接触面間距離 g のみの関数と見做すことができるが、その影響はさほど大きなものではなく、 $\alpha=1$ で接触した後に降伏するような鋼板の場合には、局部変形半波長 L は幅厚比や接触面間距離に関係なく、表-1 よりほぼ一定値

表-2 コンクリート圧壊時の圧縮強度の比較

幅厚比 β	50	60	70	80	100
σ (N/mm ²) ($\varepsilon_x=0.35\%$)	131	111	106	91.7	70.6
解析値 (σ/σ_Y)	0.56	0.47	0.45	0.39	0.36
設計値 (f'_{ud}/σ_Y)	0.59	0.49	0.42	0.37	0.30

0.65~0.71 をとることが分かった。

(2) 最大強度到達後の強度低下について

最大強度到達後の強度低下については、図-8-b 等より接触・非接触に関らずほぼ同様の漸近的な減少傾向を示すといえる。よってここでは、最大強度到達後の強度低下を考慮した合成部材の強度算定式と本解析の数値結果を比較する。

コンクリートの表面を鋼板が覆うような合成部材を設計する際、鋼板に取り付けられた補剛材がコンクリートに十分に固定されていない等の理由でその効果が十分期待できない場合の設計圧縮強度 f'_{ud} は、一般に次式によって算定されるとある⁶⁾。

$$f'_{ud} = \frac{t_f}{b} \sqrt{E_s f'_{yd}} \quad (3)$$

ここに、 f'_{yd} は鋼板の設計圧縮降伏強度 (N/mm²) であり、 E_s は鋼板のヤング係数 (N/mm²)、 t_f は鋼板の板厚 (cm)、 b は鋼板の部材方向に配置された補剛材の間隔 (cm) を表わす。

上式は鋼板の最大耐力以後の強度低下を考慮した圧縮強度特性を算定するために、板を柱モデルに置き換えて導出したものである。これに対して本研究では、板のモデルをより忠実に解析していることから、この場合の解析値と式 (3) による計算値を比較し、その妥当性を検討した。なお、値の比較は解析時に鋼板の軸方向ひずみがコンクリートの終局圧縮ひずみ 0.35% に達した時点において行うこととする。その結果を表-2、図-12 および図-13 に示す。ここで図-12 は表-2 における解析値と設計計算式の値を最小二乗法で近似して比較したものである。

これより、 $\beta=50\sim80$ では非接触条件での解析値と設計式の値はほぼ一致することが確認できた。ただし、 β が小さい場合には設計上危険側に計算される傾向がみられる。また、 $\beta=100$ の場合については、解析値の方が設計計算式よりも 20% ほど大きく評価された。また、接触を考慮すると圧縮強度は全般的に大きくなることが確認された。

さらに、図-12 に残留応力を考慮した場合の解析値も併記した。残留応力の有無による差はほとんど無く、コンクリートが圧壊する圧縮ひずみ 0.35% の時点でも、残留応力の影響は小さいことを確認した。

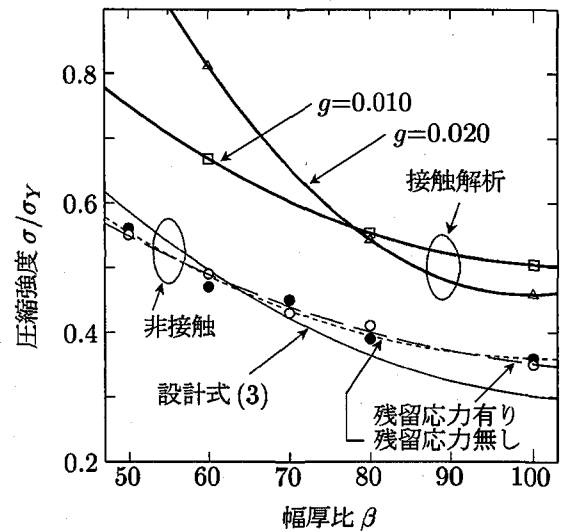


図-12 コンクリート圧壊時の圧縮強度の比較 (圧縮ひずみ $\varepsilon_x=0.35\%$)

(3) 強度低下後の収束値としての漸近強度

圧縮ひずみ 0.35% 以降も軸ひずみを増加させると、強度は指数関数的に低下して一定値に収束する傾向がみられ、その漸近強度を知ることは最終的な耐力として興味のあるところである。図-8-b より、接触・非接触とも最終的にはほぼ同程度まで強度が低下することが予想される。しかし、その一定の漸近強度まで計算を継続することは無理なので、ここでは外挿式⁷⁾を用いてその漸近強度を計算し、考察する。

すなわち、ある近似値 f (ここでは σ/σ_Y) が分割 n (ここでは面外方向たわみ W) の増加に伴い単調に収束する場合、 f は真値 f_{ex} に対して

$$f = f_{ex} + C_1 N + C_2 N^2 \quad (4)$$

という関数形で表わすことができる。ここで、 C_1 、 C_2 は定数であり、 $N=1/n^2$ とする。この時、 $n \rightarrow \infty$ の時 $N \rightarrow 0$ で $f \rightarrow f_{ex}$ となる。図-8-b および図-13 のデータよりそれぞれ 3 種類以上のパターンについて外挿した値を平均し、結果を表-3 にまとめた。

これらの結果より、接触時は非接触時に比べて、漸近値としての強度が同程度もしくは高めにすることが確かめられ、接触が原因で強度が下回ることはない。また、表-3 の非接触時と表-2 の解析値とを比較してみると、鋼板の強度はコンクリートが圧壊する $\varepsilon_x=0.35\%$ の時に比べて、最終的にはその約半分程度に低下することが分かった。

3.3 縦横比 $\alpha=2$ の場合の解析結果と考察

(1) 縦横比 $\alpha=2$, $m=1$ の場合について

まず、非接触条件のもとでの解析を行った。ある程度変形してから降伏するような幅厚比の場合には、初期た

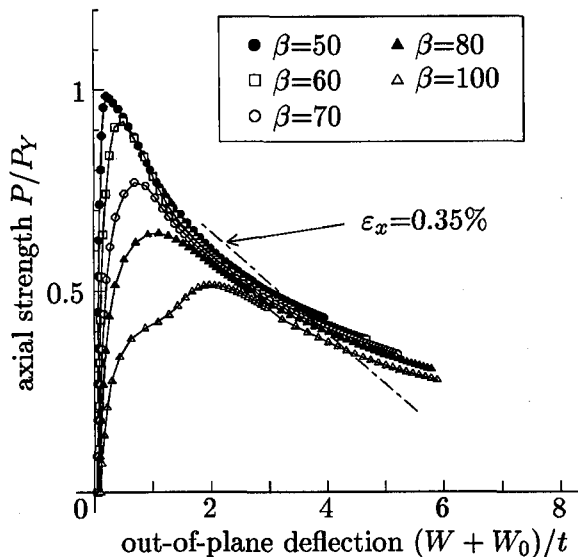


図-13 最大荷重到達以後の荷重低下と幅厚比の関係 (非接触条件)

表-3 強度低下後の漸近強度

	漸近強度 σ/σ_y				
	$\beta=50$	$\beta=60$	$\beta=70$	$\beta=80$	$\beta=100$
非接触	0.307	0.270	0.209	0.184	0.167
$g=0.005$	—	0.434	—	0.282	0.201
$g=0.010$	—	0.355	—	0.270	0.275
$g=0.015$	—	0.269	—	0.260	0.302
$g=0.020$	—	0.484	—	0.284	0.313

わみ正弦波半波数 m を 1 としても、最終的には基本座屈形状の $m=2$ へと移行するため、その半分の領域を考えると $\alpha=1$ の場合と等しい議論に帰着する。

しかし、早期に降伏するような鋼板 ($\beta=35$) の場合には、降伏後単なる塑性変形となるため、降伏後は初期たわみ形状と同じモードで推移する。なお、この場合の接触解析では、先に述べた $\alpha=1$, $m=1$ と同様の変形挙動を示した。

(2) 縦横比 $\alpha=2$, $m=2$ の場合について

次に、 $\alpha=2$, $m=2$ の条件下で、非接触時と接触時 $g=0.010$ の場合について比較した。この時の軸方向応力-軸ひずみ曲線を図-14 に示す。

変形形状については、初期たわみモードが $m=2$ であるため、鋼板は面外の正負 2 方向に同時にたわむ。しかし、片側が接触面に接触しても、 $\alpha=1$ の時とは異なり、応力が再分配されるためはね返るという現象は起こらず、接触面の範囲は徐々に増加し、それに伴って反対側 (即ち接触面と離れる方向にたわんでいる側) の端部

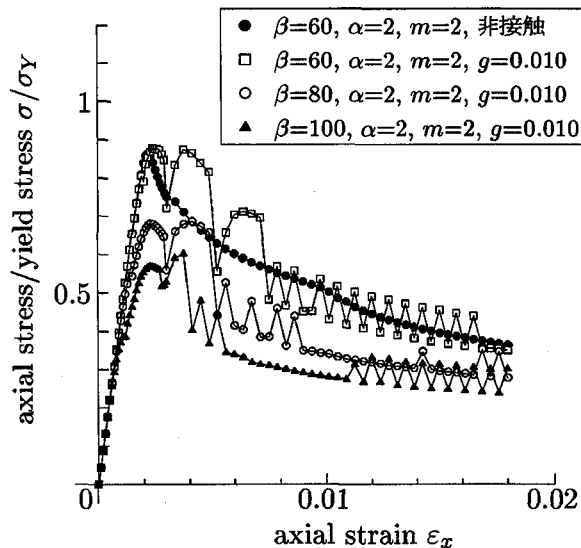


図-14 鋼板の弾塑性接触解析結果 ($\alpha=2$, $m=2$)

に応力集中を引き起こす。この変形形状は、近似解析解の座屈モードと類似している。さらに、鋼板の降伏後は変形が応力集中部分に局所化していく。

軸方向荷重-軸ひずみ曲線については、この場合も $\alpha=1$ の時とは異なり、接触することによって一時的に強度が保持されるような現象は起きないので、図-14 から分かるように接触・非接触の別および幅厚比の違いに関係なく同じ様な挙動を示している。

4. まとめおよび結論

面内一様圧縮力を受ける板要素について、周辺単純支持条件のもとで弾性および弾塑性接触解析を行った結果、以下のような特性が得られた。

- (1) 弾性床板上板として接触効果を考慮した弾性座屈解析の近似値を求めた。弾性床のパネ定数が地盤程度より大きければ、座屈強度はほぼ一定値となる。接触効果による座屈強度の向上は約 10% 増と小さいが、座屈モードは片側へと偏在し、有効座屈長は約 $0.7b$ でほぼ一定となる特性が得られた。
- (2) 弾性接触解析の結果、接触面間距離が大きいほど有効座屈長は小さいため、鋼板が座屈した後の強度も大きく、その後の面外たわみの反転も大きい。これは接触区間の有効座屈長で説明できる。
- (3) 弾塑性接触挙動特性は縦横比 α の違いによって次の 2 つに大別できる。

$\alpha=1$ の時、鋼板が変形して接触した後一時的に強度は上昇し、最大強度は接触面間距離が大きいほど小さくなり、その後最初に接触した点からはね返る現象が生じる。強度は、幅厚比 $\beta=35$ の場合はほぼ降伏強度と等しくなるが、幅厚比が大きくなるに

つれて漸近的に低下し、最終的には非接触時と同程度となる。

また、 $\alpha=2$ の場合は、接触・非接触にかかわらず、最大耐力後に強度は単調に低下する。また、一度接触した点にはね返らず、非接触時とほぼ同様の強度特性となる。

- (4) 局変形半波長 L は大局的には接触面間距離 g のみの関数と見做すことができるが、その影響はさほど大きなものではなく、 $\alpha=1$ の場合には、ほぼ一定値 $0.65 \sim 0.71$ をとる。
- (5) コンクリートの終局ひずみ ($\epsilon_s=0.35\%$) 時における鋼板の弾塑性接触強度は、板を柱モデルで近似して求められる設計式による算定値とほぼ等しいが、幅厚比が小さい場合はやや危険側に計算される傾向がある。
- (6) 最大強度到達以後の強度低下の漸近値は (5) の強度の約半分程度となる。

参考文献

- 1) 渡辺 浩、崎元 達郎、山尾 敏孝、持田 拓児、寺田 昌弘：内部にコンクリートを充填した角形鋼管柱の局部座屈に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.41A, pp.321-328, 1995.3.
- 2) 中沢、倉西、横幕：種々の境界および荷重条件を統一的に考慮した弾性矩形板の線形座屈解析法、構造工学論文集、Vol.39A, pp.105-114, 1993.3.
- 3) 中沢、香川、岩熊：面内一様圧縮力を受ける弾性基礎上平板の後座屈挙動、構造工学論文集、Vol.43A, pp.281-288, 1997.3.
- 4) 日本マーク(株)：MARC(K-6) Volume A ~ D.
- 5) 日本マーク株式会社：トピック別セミナー CONTACT Ver. K6, 1997.
- 6) 土木学会：複合構造物設計・施工指針(案)、コンクリートライブラリー 90, pp.21-26, 1997.
- 7) Salvadori, M.G. and Baron, M.L. : *Numerical Methods in Engineering*, Prentice Hall, 1961.

(1998年9月18日 受付)