

基礎梁等スリーブの離間距離による応力影響に関する解析及び対応方法案について

2019年

MUSA 研究所

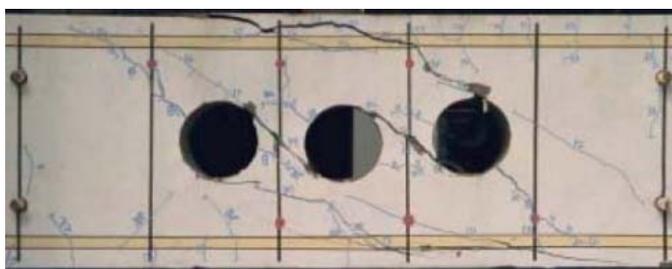
[隣接孔の離間寸法に関する技術的背景]

通常、複数の貫通孔が隣接する場合の一般的な離間距離は、平面寸法にて平均径の3倍以上 ($\geq 3 \cdot \phi_{AV}$) としている。

これは、過去の実験結果等から得られた推奨値であり、離間距離が小さいと隣接する孔周囲のひび割れが連続的に発生し、早期の剛性低下、および終局せん断耐力の低下を招く危険性を避けるためである。(写真)

大きな塑性変形を期待する大梁等においては、剛性・耐力の低下を許容できないため、X型補強等の特殊な方法により認定を取得した補強材を使用するか、複数孔を包絡する円形孔もしくは長方形開口として安全性を確認する以外には、最小離間距離の条件は必須であるが、基礎梁等のせん断破壊の生じないことが明らかな部材については、上記条件を必ずしも満足しなくとも良い場合があると考えられる。

本資料では、複数貫通孔の離間距離および配置による孔相互の周辺応力がどのような影響を与えるかを理論およびFEM解析により推察する。



写真：高強度コンクリートを用いたRC有孔梁のせん断実験

1. 無限板の円孔の応力集中

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_0}{2} \left[1 + \frac{r^2}{x^2} - \left(1 + 3 \frac{r^4}{x^4} \right) \cdot \cos \theta \right]$$

σ_0 : 円孔を無視した無限板の平均応力度 r : 円孔の半径
 x : 円孔中心から応力と直交方向への距離 θ : 応力方向との角度

a) 一般に応力方向に垂直方向 ($\theta=90^\circ$) の孔縁 ($x/r=1$) にて応力最大となり、 $\sigma_{\max} = 3 \cdot \sigma_0$ となる。

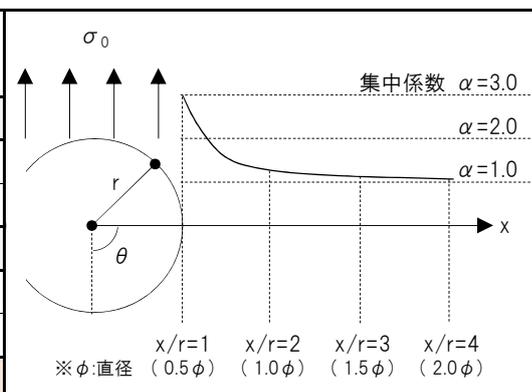
また、円孔中心からの距離が遠くなると α の値は急速に小さくなり、 $x/r=3$ にて $\alpha = 1.07$ となる。

$$\theta = 90^\circ \text{ のとき } \sigma_{\max} = \frac{\sigma_0}{2} \left[2 + \frac{r^2}{x^2} + 3 \frac{r^4}{x^4} \right]$$

各方向・距離による応力集中係数 ($\alpha = \sigma_{\max} / \sigma_0$)

x/r θ	1.0 (0.5 ϕ)	1.5 (0.75 ϕ)	2.0 (1.0 ϕ)	2.5 (1.25 ϕ)	3.0 (1.5 ϕ)	4.0 (2.0 ϕ)	5.0 (2.5 ϕ)
0°	-1.00	-0.07	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02
15°	-0.73	0.03	0.11	0.11	0.11	0.09	0.08
30°	0.00	0.32	0.33	0.31	0.30	0.28	0.27
45°	1.00	0.72	0.63	0.58	0.56	0.53	0.52
60°	2.00	1.12	0.92	0.85	0.81	0.78	0.77
75°	2.73	1.41	1.14	1.05	1.00	0.97	0.96
90°	3.00	1.52	1.22	1.12	1.07	1.04	1.02

$\theta=90^\circ$ 方向の応力集中係数と距離の関係



※負値は圧縮、 ϕ は孔直径基準

2. 有限板の円孔の応力集中

長さ方向に十分に長く、幅方向に有限な帯板の場合

a) 基準応力度（公称応力度）

円孔による断面損失を考慮した値を用いる。

$$\sigma_e = \sigma_0 \left[\frac{b}{b-r} \right]$$

σ_e : 円孔による断面損失を考慮した平均応力度

σ_0 : 円孔を無視した有限板の平均応力度

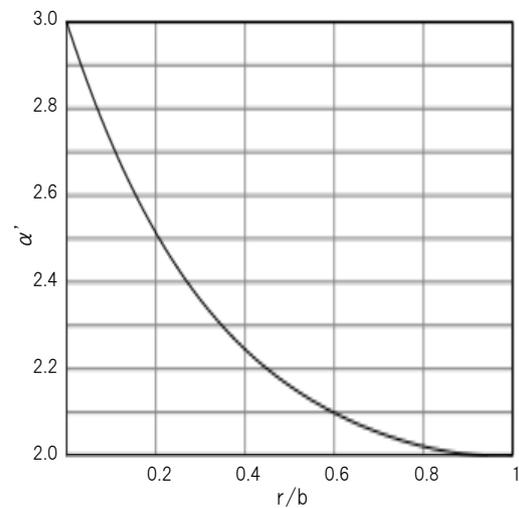
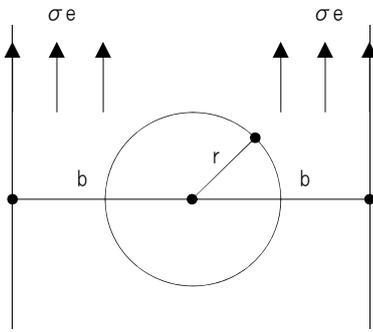
b: 有限板幅の 1/2

r: 円孔の半径

b) 円孔径と板幅の関係による応力集中係数

基準応力に対する応力集中係数 α' は図のようになり、円孔の直径と板幅の比 ($2 \cdot r / 2 \cdot b = r/b$) の関数として表される。

α' の値は、 $r/b = 0$ (無限板) の場合で最大値 3 となる。r が b に近づくほど α' は減少し、 $\alpha' = 2$ となる。



α' の値は基準応力度を円孔による断面損失を考慮したものであるため、無円孔の場合の平均応力度を基準とした応力集中係数 ($\alpha = \sigma_{\max} / \sigma_0$) を α' と b/r の関係で整理すると下式、下表となる。

$$\alpha = \alpha' \left[\frac{b/r}{b/r - 1} \right]$$

※ ϕ は直径基準

b/r	1.0 (0.5 ϕ)	1.25 (0.625 ϕ)	1.5 (0.75 ϕ)	2.0 (1.0 ϕ)	2.5 (1.25 ϕ)	3.0 (1.5 ϕ)	4.0 (2.0 ϕ)	5.0 (2.5 ϕ)	∞ (-)
α ($\alpha/3.0$)	∞ (-)	10.10 (3.37)	6.24 (2.08)	4.32 (1.44)	3.75 (1.25)	3.45 (1.15)	3.23 (1.08)	3.14 (1.05)	3.00 (1.00)

上表より、 $b/r = 2$ ($b = \phi$) のとき、 $\alpha = 4.32$ となり、無限板の応力集中係数の 1.44 倍程度となっている。

$b/r = 5$ ($b = 2.5 \phi$) のとき、 $\alpha = 3.14$ となり、無限板の値とほぼ等しくなっている。

一般的なスリーブの最大径の規定 $\phi \leq 1/3 \cdot D$ (D は梁せい) のときは、 $b/r = 3$ であり、 $\alpha = 3.45$ 程度となる。

3. 円孔の干渉効果に関する解析

近接する複数の円孔同士により応力度分布が変化する現象を干渉効果という。

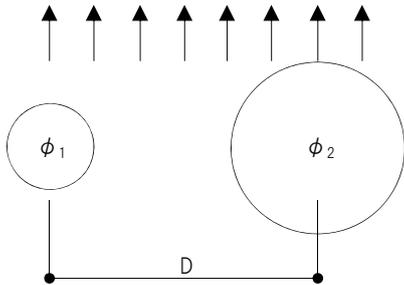
FEM解析により無限板における二円孔の径 (ϕ)、および離間距離 (D) を変化させた場合の応力度分布の比較を行う。

a) 解析条件

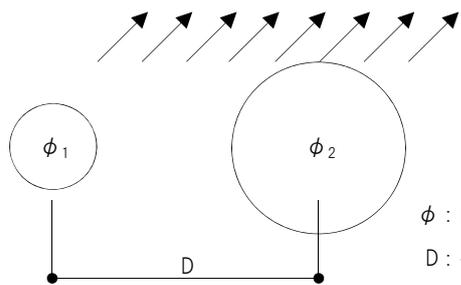
解析用荷重は、下図に示す孔の並列直角方向、斜め45° 方向の一様引張荷重とする。

解析モデルは、二円の孔径比を 1:1、1:2、1:3、孔中心間距離を孔の平均径の 2倍、2.5倍、3倍 (4倍) に変化させたモデルとし、各結果の比較を行う。

[垂直方向引張]



[斜め方向引張]

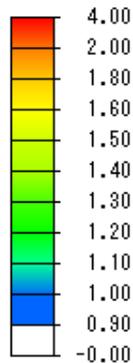
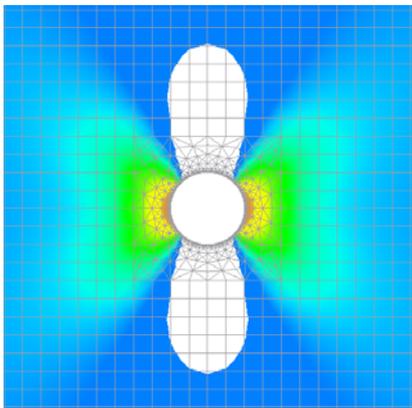


ϕ : 円孔の直径
 D : 孔中心間距離

b) 基準応力度の設定

並列孔の解析に先立ち、単一孔のFEM解析結果より、比較用の基準応力度 (最大主応力度) を設定する。

[単一孔の応力度分布]



[解析結果値]

・ 単位応力度 $\sigma_0 = 1.00 \text{ N/mm}^2$

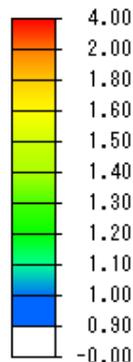
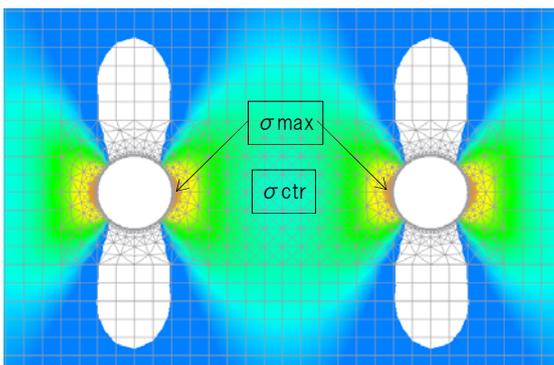
・ 最大応力度 $\sigma_{\max} = 2.75 \text{ N/mm}^2$

※ 最大応力度の理論値は 3.0 N/mm^2 となるが、FEM解析の精度に依存するため、解析結果により得られた値を基準値として用いる。

c) 着目応力度

干渉効果の影響を確認するための着目応力の位置は、下図のように円孔際の最大主応力度 (σ_{\max}) および円孔中央付近の最大主応力度 (σ_{ctr}) とする。

[孔径比 = 1:1 $D/\phi=4$ の解析結果]



[解析結果値]

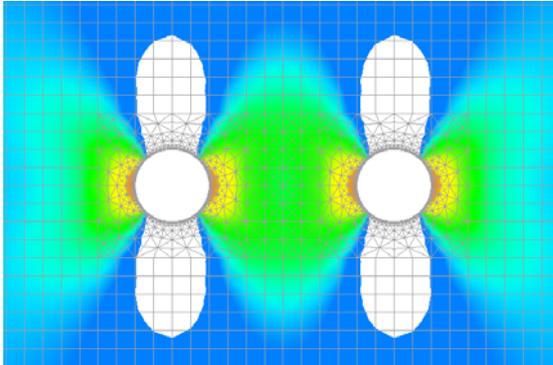
・ 最大応力度 $\sigma_{\max} = 2.76 \text{ N/mm}^2$

・ 中央応力度 $\sigma_{\text{ctr}} = 1.10 \text{ N/mm}^2$

d) FEM解析結果

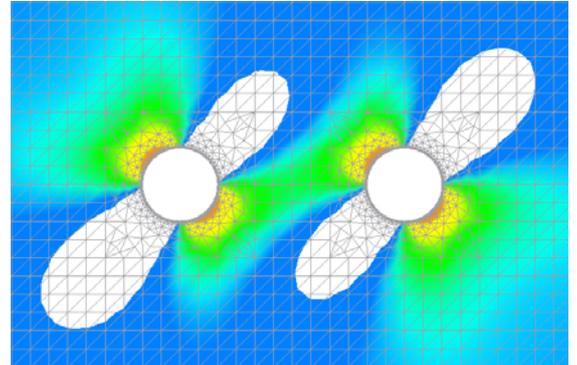
[孔径比 = 1 : 1 D/ ϕ =3 垂直方向荷重]

$\sigma_{\max} = 2.78$ $\sigma_{\text{ctr}} = 1.20$



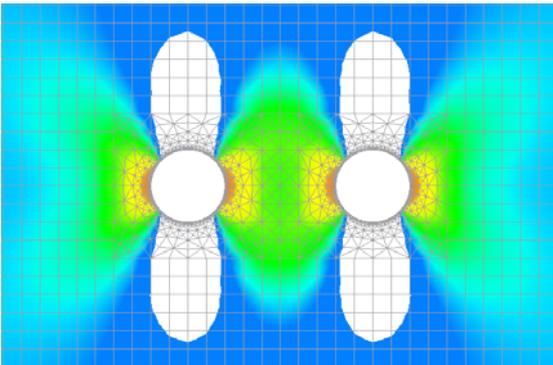
[孔径比 = 1 : 1 D/ ϕ =3 斜め方向荷重]

$\sigma_{\max} = 2.80$ $\sigma_{\text{ctr}} = 1.17$



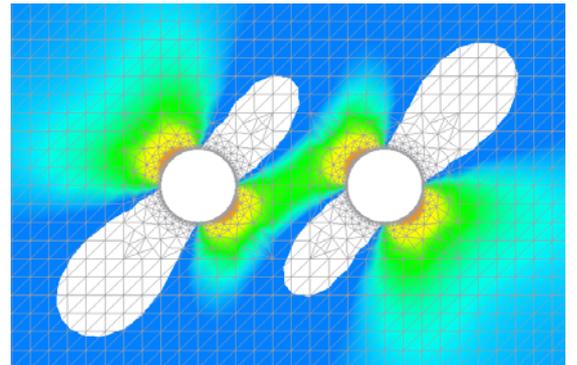
[孔径比 = 1 : 1 D/ ϕ =2.5 垂直方向荷重]

$\sigma_{\max} = 2.95$ $\sigma_{\text{ctr}} = 1.28$



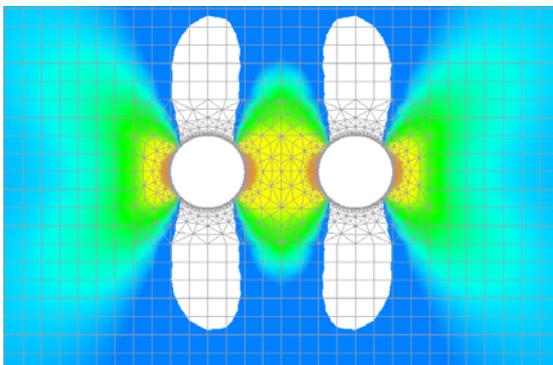
[孔径比 = 1 : 1 D/ ϕ =2.5 斜め方向荷重]

$\sigma_{\max} = 2.85$ $\sigma_{\text{ctr}} = 1.24$



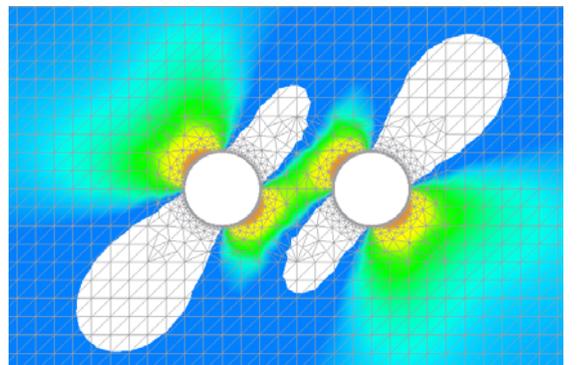
[孔径比 = 1 : 1 D/ ϕ =2 垂直方向荷重]

$\sigma_{\max} = 2.98$ $\sigma_{\text{ctr}} = 1.53$



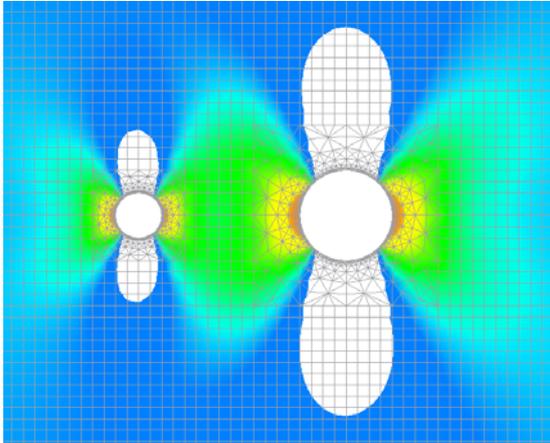
[孔径比 = 1 : 1 D/ ϕ =2 斜め方向荷重]

$\sigma_{\max} = 2.92$ $\sigma_{\text{ctr}} = 1.36$



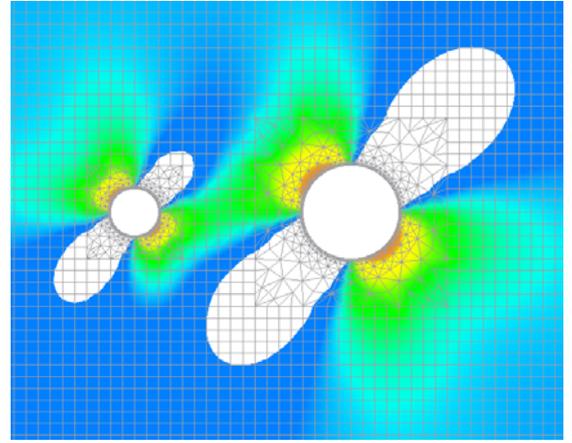
[孔径比 = 1 : 2 $D/\phi_{AV}=3$ 垂直方向荷重]

$\sigma_{max_1} = 2.82$ $\sigma_{max_2} = 2.78$ $\sigma_{ctr} = 1.18$



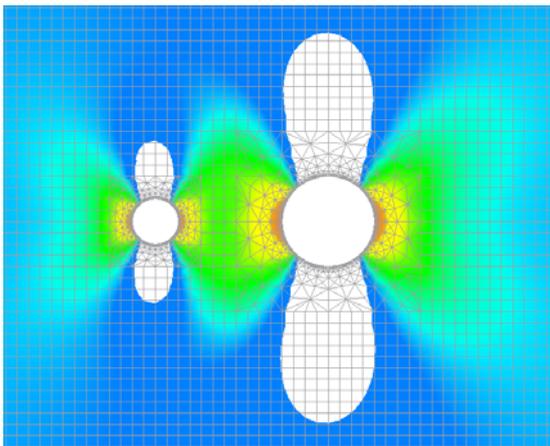
[孔径比 = 1 : 2 $D/\phi_{AV}=3$ 斜め方向荷重]

$\sigma_{max_1} = 2.93$ $\sigma_{max_2} = 2.81$ $\sigma_{ctr} = 1.17$



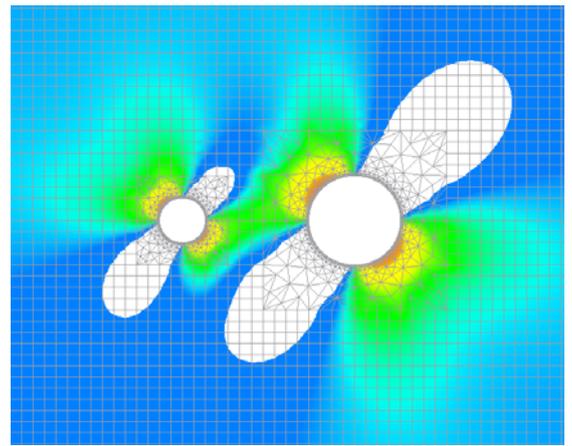
[孔径比 = 1 : 2 $D/\phi_{AV}=2.5$ 垂直方向荷重]

$\sigma_{max_1} = 2.86$ $\sigma_{max_2} = 2.79$ $\sigma_{ctr} = 1.27$



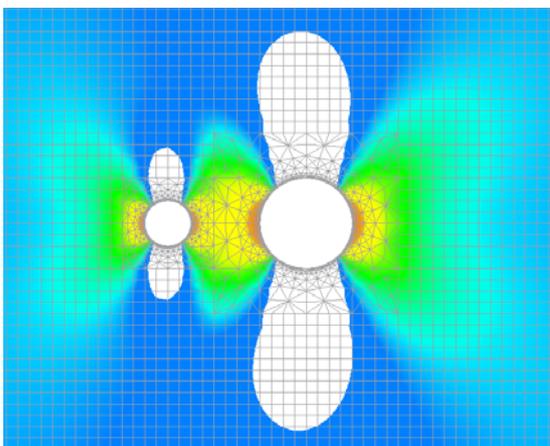
[孔径比 = 1 : 2 $D/\phi_{AV}=2.5$ 斜め方向荷重]

$\sigma_{max_1} = 2.99$ $\sigma_{max_2} = 2.81$ $\sigma_{ctr} = 1.24$



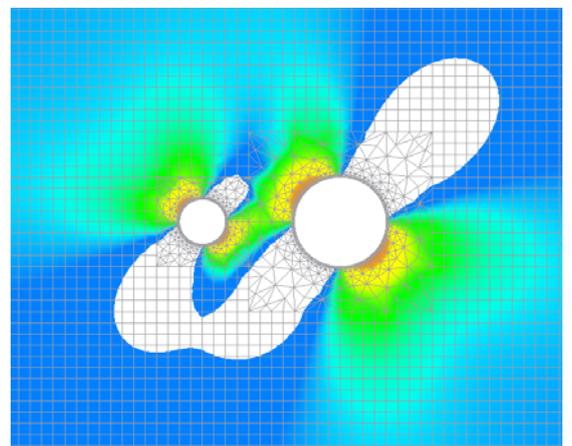
[孔径比 = 1 : 2 $D/\phi_{AV}=2$ 垂直方向荷重]

$\sigma_{max_1} = 2.95$ $\sigma_{max_2} = 2.82$ $\sigma_{ctr} = 1.50$



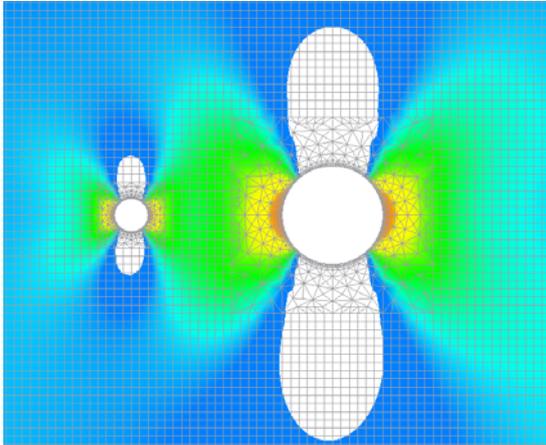
[孔径比 = 1 : 2 $D/\phi_{AV}=2$ 斜め方向荷重]

$\sigma_{max_1} = 3.07$ $\sigma_{max_2} = 2.83$ $\sigma_{ctr} = 1.36$



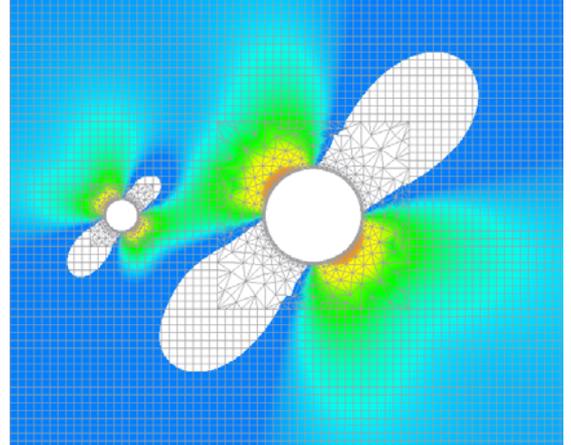
[孔径比 = 1 : 3 $D/\phi_{AV}=3$ 垂直方向荷重]

$\sigma_{max_1} = 2.85$ $\sigma_{max_2} = 2.80$ $\sigma_{ctr} = 1.18$



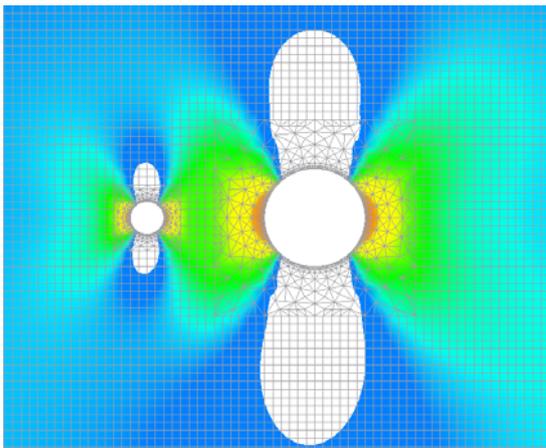
[孔径比 = 1 : 3 $D/\phi_{AV}=3$ 斜め方向荷重]

$\sigma_{max_1} = 2.94$ $\sigma_{max_2} = 2.78$ $\sigma_{ctr} = 1.15$



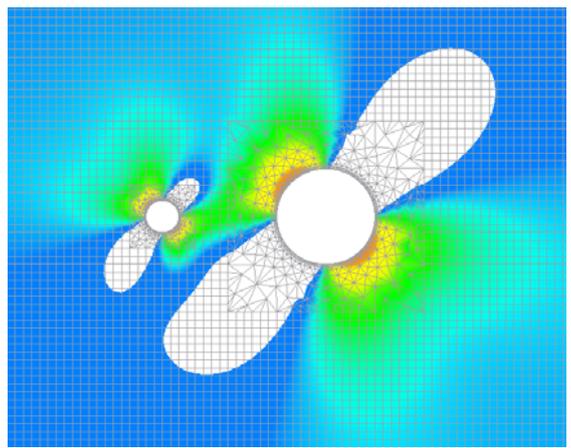
[孔径比 = 1 : 3 $D/\phi_{AV}=2.5$ 垂直方向荷重]

$\sigma_{max_1} = 2.91$ $\sigma_{max_2} = 2.81$ $\sigma_{ctr} = 1.27$



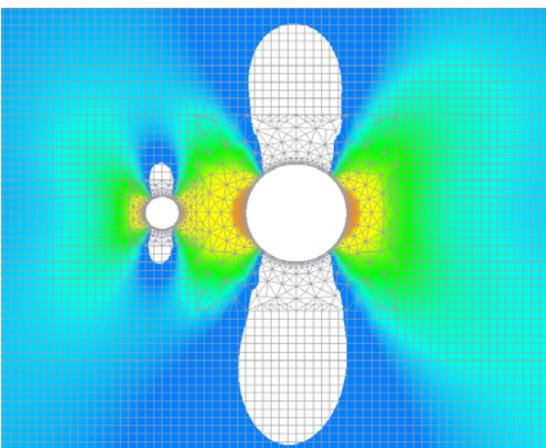
[孔径比 = 1 : 3 $D/\phi_{AV}=2.5$ 斜め方向荷重]

$\sigma_{max_1} = 3.01$ $\sigma_{max_2} = 2.79$ $\sigma_{ctr} = 1.22$



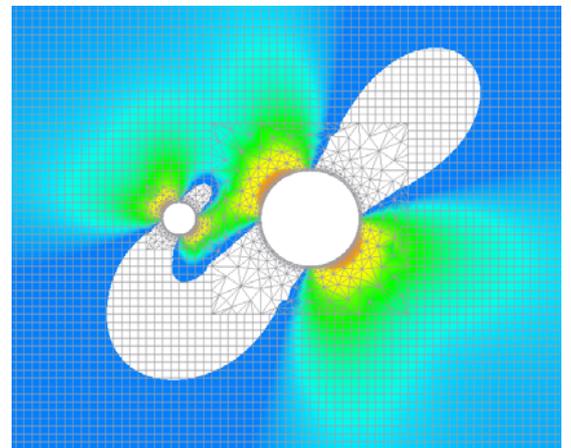
[孔径比 = 1 : 3 $D/\phi_{AV}=2$ 垂直方向荷重]

$\sigma_{max_1} = 2.95$ $\sigma_{max_2} = 2.83$ $\sigma_{ctr} = 1.50$



[孔径比 = 1 : 3 $D/\phi_{AV}=2$ 斜め方向荷重]

$\sigma_{max_1} = 3.11$ $\sigma_{max_2} = 2.79$ $\sigma_{ctr} = 1.28$



e) 解析結果比較

解析結果より得られた各部応力値を基準応力度に基準化して示す。

最大応力度上昇率 $\alpha'_{max} = \sigma'_{max} / \sigma_{max}$

中央応力度上昇率 $\alpha_{ctr} = \sigma_{ctr} / \sigma^0$

[垂直方向荷重]

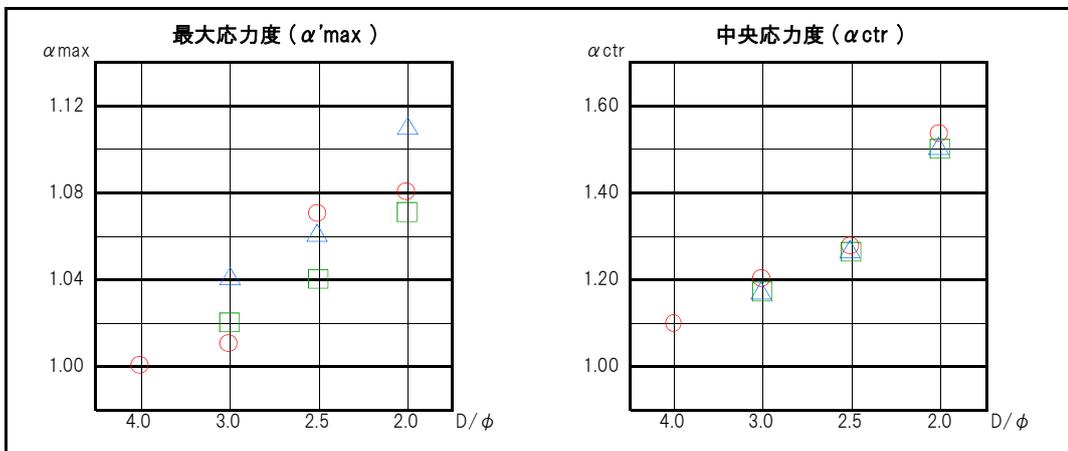
D/φ	4.0		3.0		2.5		2.0	
応力位置	σ'_{max} (α'_{max})	σ_{ctr} (α_{ctr})						
孔径比 1:1	2.76 (1.00)	1.10 (1.10)	2.78 (1.01)	1.20 (1.20)	2.95 (1.07)	1.28 (1.28)	2.98 (1.08)	1.53 (1.53)
孔径比 1:2	- -	- -	2.82 (1.03)	1.18 (1.18)	2.86 (1.04)	1.27 (1.27)	2.95 (1.07)	1.50 (1.50)
孔径比 1:3	- -	- -	2.85 (1.04)	1.18 (1.18)	2.91 (1.06)	1.27 (1.27)	3.04 (1.11)	1.50 (1.50)

[垂直方向荷重比較図]

○ : 孔径比 = 1:1

□ : 孔径比 = 1:2

△ : 孔径比 = 1:3



[斜め方向荷重]

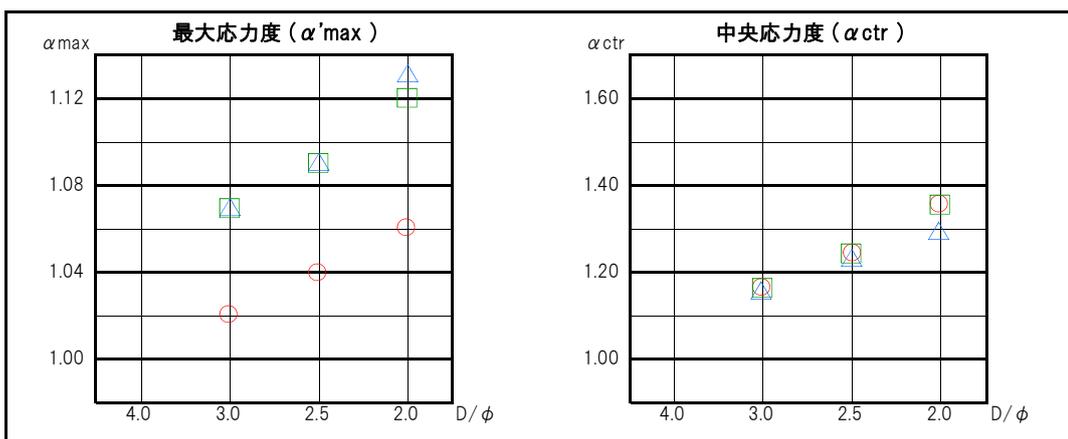
D/φ	4.0		3.0		2.5		2.0	
応力位置	σ'_{max} (α'_{max})	σ_{ctr} (α_{ctr})						
孔径比 1:1	- -	- -	2.80 (1.02)	1.17 (1.17)	2.85 (1.04)	1.24 (1.24)	2.92 (1.06)	1.36 (1.36)
孔径比 1:2	- -	- -	2.93 (1.07)	1.17 (1.17)	2.99 (1.09)	1.24 (1.24)	3.07 (1.12)	1.36 (1.36)
孔径比 1:3	- -	- -	2.94 (1.07)	1.15 (1.15)	3.01 (1.09)	1.22 (1.22)	3.11 (1.13)	1.28 (1.28)

[斜め方向荷重比較図]

○ : 孔径比 = 1:1

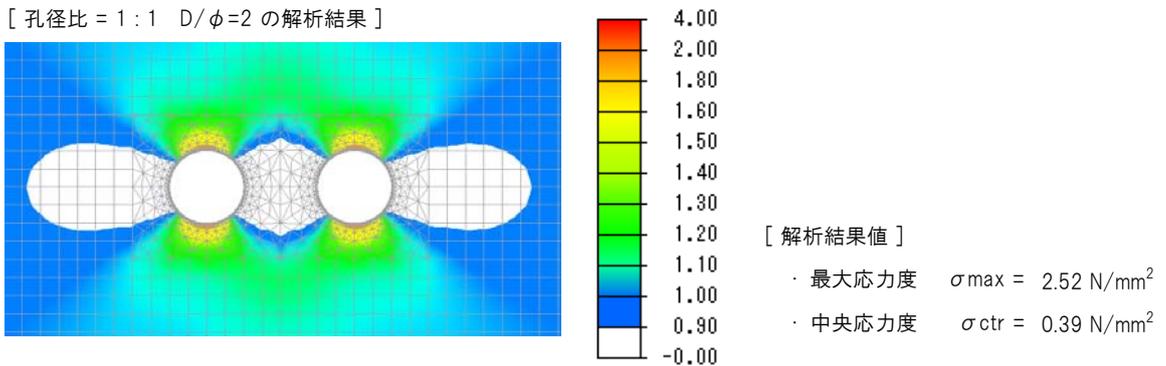
□ : 孔径比 = 1:2

△ : 孔径比 = 1:3



f) 孔並列方向荷重に対する解析結果

[孔径比 = 1 : 1 D/φ=2 の解析結果]



最大応力度、中央応力度ともに単円孔の場合よりも小さい値を示すが、これは応力の流れが緩やかになることによるもので、応力集中の低減効果として知られている。

4. 理論値および FEM解析結果に対する結果概要

a) 単円孔を有する無限板の応力集中について

- ・ 応力集中の分布は荷重方向により変化し、荷重方向と垂直方向にて最大値を取る。
- ・ 応力集中係数は円孔中心からの距離により変動し、円孔際で最大 $\alpha=3.0$ 、円孔中心から 1.5ϕ の位置で $\alpha=1.07$ 、円孔中心から 2.0ϕ の位置で $\alpha=1.04$ 程度となる。

b) 単円孔を有する有限板（帯板）の応力集中について

- ・ 応力集中係数は、孔径（ ϕ ）と帯板幅の $1/2$ （ b ）との比により変動し、 $b/\phi = 1.0$ にて $\alpha=1.44$ 、 $b/\phi = 1.5$ にて $\alpha=1.15$ 、 $b/\phi = 2.0$ にて $\alpha=1.08$ 程度となる。

c) 複数の同径円孔を有する無限板の相互干渉効果について

- ・ 円孔並列方向と垂直方向荷重および斜め方向荷重ともに円孔中心間距離が小さくなるほど、最大応力、中央部応力ともに上昇する。
- ・ 円孔中心間距離（ D ）による最大応力上昇率（ α'_{\max} ）は $D/\phi = 4.0 \sim 2.0$ の範囲では $\alpha'_{\max} = 1.00 \sim 1.08$ 程度となる。
- ・ 円孔中心間距離による中央応力上昇率（ α_{ctr} ）は $D/\phi = 3.0 \sim 2.0$ の範囲では、 $\alpha_{\text{ctr}} = 1.2 \sim 1.5$ 程度となり、斜め方向荷重より垂直方向荷重の方が大きくなる傾向となる。
- ・ 円孔並列方向と平行方向の荷重の場合、応力集中低減効果により最大応力および中央応力ともに基準応力度より小さくなる。

d) 異径円孔を有する無限板の相互干渉について

- ・ 最大応力は小なる方の円孔際に生じ、孔径比が大きくなるほど同径円孔の場合よりも最大応力は上昇する傾向である。
- ・ 中央部応力は孔径比の影響を受けにくい傾向である。

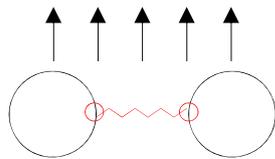
5. 一般設計時における所見

a) 円孔配置と主応力方向における影響に対する所見

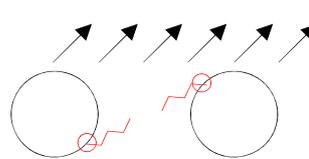
複数の円孔を並列して設ける場合の相互干渉効果は、主応力が作用する方向の影響を受け、円孔並列方向に対し垂直方向に引張応力が作用する場合に応力上昇が大きくなり、円孔並列方向に平行方向に引張応力が作用する場合は応力が低減される効果がある。

円孔並列方向に垂直および斜め方向に引張応力が作用する場合、円孔際に生じる最大応力位置からひび割れが発生し、それらが連続するように進展する。特に円孔並列方向に対し垂直方向に引張応力が作用する場合は最大応力発生位置が近く中央部へのひび割れの進展も早期に生じる可能性がある。(下図)

[垂直方向引張応力時のひび割れ状況]

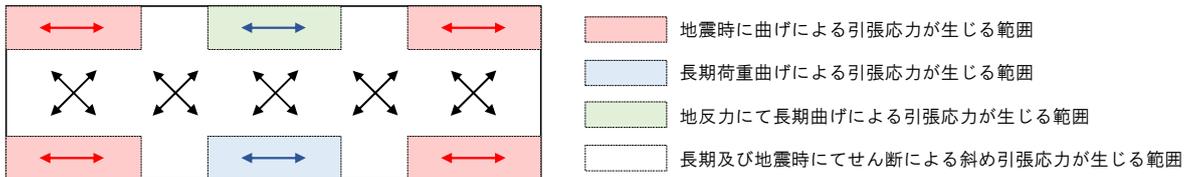


[斜め方向引張応力時のひび割れ状況]



一般的な梁の設計において想定する引張応力は曲げによる断面縁に生じる引張応力、およびせん断応力による斜め方向の引張応力であり、部材の検討位置によってはこれらが混在するため主応力の方向は一概に定義はできないが、概ね下図のように想定できる。

[一般的な大梁に生じる引張主応力の分布図]



上図における赤・青・緑色の範囲は曲げにより材軸方向に引張応力が生じる範囲であるため、この範囲においては、複数の円孔を縦並びとするのは避けることが望ましいと思われるが、やむを得ず縦並びとする場合には相互干渉の影響が少なくなる程度の離間距離を確保する必要がある。具体的には円孔平均径の4倍程度 ($D/\phi_{AV} \geq 4$) は必要と思われる。

上図の白色の範囲は曲げの影響を受けにくく、主としてせん断応力による斜め方向の引張応力が作用するため、この範囲においては複数の円孔を斜め並びに配するのは避けることが望ましいと思われるが、止むを得ない場合は前記同様に円孔平均径の4倍程度以上の離間寸法が必要と思われる。

b) 一般的な設計範囲における所見

一般的に梁貫通孔補強の設計時に想定する応力はせん断応力であり、純せん断となる範囲では斜め45°方向の引張力が作用していると想定している。また、一般の設計に用いられる複数円孔の中心間距離は $D/\phi_{AV} \geq 3$ とすることとしているが、この時の応力集中係数の上昇率の結果は、同径孔同士の場合 $\alpha'_{max} = 1.02$ 、異径孔の場合 $\alpha'_{max} = 1.07$ となっており大きな差異はないが、中央部の応力上昇率の結果は径によらず $\alpha_{ctr} = 1.15 \sim 1.17$ 程度と20%程大きくなっている。尚、通常の貫通孔周囲の補強設計方法は主として終局せん断耐力の確保を目的とすることが多いが、早期のひび割れは部材剛性の低下に影響するため、円孔相互にひび割れが連続する可能性が高いような配置は避けるべきである。

6. 十分なせん断耐力を有する基礎梁等における貫通孔設置条件の制限緩和に対する提案

本資料の目的は、基礎梁等で終局時においても十分なせん断耐力を有する部材に対する複数円孔の相互干渉を検証する事であるため、一定の条件を満たす基礎梁等について各種比較結果より得られた事項を考慮して、やむを得ず複数の貫通孔が近接する場合の制限の緩和を提案する。

対象範囲は曲げによる引張応力の影響を受けにくい範囲とし、貫通孔同士の離間距離の最小値は平均径の2倍以上とする場合で、大地震時においても基礎梁等のひび割れが生じないことを確認した場合に限り、緩和制限の範囲内において単独孔として取扱って問題ないものと判断する。

上記におけるひび割れの有無を確認する目的は、解析結果の前提条件としてコンクリートが弾性状態を想定しており、ひび割れ発生後は解析結果応力の状態とは一致しないためである。

ひび割れ判定に用いるせん断力は、解析結果による中央応力の上昇率 $\alpha_{ctr} \approx 1.36$ より、終局時の設計せん断力の1.5倍とする。尚、本解析の着目応力は最大主応力（引張応力）としているが、設計時にはせん断応力にてひび割れの有無の確認に置き換えることとする。

[緩和制限]

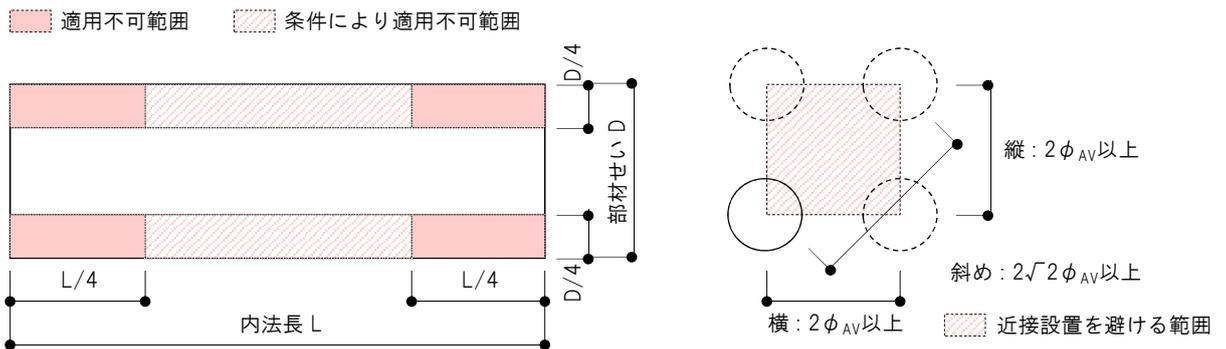
曲げによる影響が少なく、主としてせん断応力が生じる範囲に設ける複数貫通孔において、大地震時にせん断ひび割れが生じないことが確かめられた部材※ は下記条件の範囲にて単独孔として取り扱う。

※大地震時に無孔梁に生じると想定されるせん断力の1.5倍応力が、コンクリートの短期許容応力度以下であること。

[適用条件]

- ① $b \cdot j \cdot \alpha \cdot f_{sS} > 1.5 \cdot Q_u$ Q_u : 大地震時の梁せん断力（長期応力を含む）
- ② 長期および地震時に曲げの影響を受けると判断される場所には適用しない。（下図赤色範囲）
- ③ 縦・横配置において、離間距離が平均径の2倍以上 （各々の孔補強筋の被り厚が確保されていること）
- ④ 斜め配置において、離間の 45° 対角線距離が平均径の $2\sqrt{2}$ 倍（ $\approx 3\phi$ ）以上

[適用範囲]



[その他条件]

- ① 適用可能部材は基礎梁等の変形能力を期待しない部材とし、上階大梁には適用しない。
- ② 100φ程度の小径孔であっても追加補強を行うこととし、補強筋量は通常の2割増とする等配慮する。