

論文 複数の開口を有する鉄筋コンクリート有孔梁のせん断性状に関する実験研究

市塚貴浩^{*1} 香取慶一^{*2} 林静雄^{*3}

要旨：本研究はRC造複数孔有孔梁について、孔に対する必要補強区間(C区間)の重なり量の差がせん断性状に与える影響について調べることを目的とし、せん断スパン内に2つの開口を有する有孔梁について、曲げ降伏以前にせん断破壊する曲げせん断実験を孔径と孔中心間隔を変動要因として行った。その結果、孔径と孔中心間隔の違いにより破壊モード、変形性状、孔周囲の力の流れに差が生じ、せん断耐力は孔径がD/4の場合はC区間の重ならない孔中心間隔をとれば単一孔と同等のせん断耐力を示すものの孔径がD/5ではその孔中心間隔をとっても単一孔と同等のせん断耐力を示さないことが分かった。

キーワード：RC造複数孔有孔梁、孔中心間隔、孔径

1. はじめに

建物を有効利用するために設備配管用の貫通孔を設けるが、RC造ではこのような孔の存在は著しく耐震性能を低下させるために様々な研究がなされているものの、複数孔の研究は少ない。現行RC規準では梁に複数の孔を設ける場合にはその孔中心間隔を孔径の3倍以上離せば良いとされているが、孔径が小さい場合には孔に対する必要補強区間(以後C区間と呼ぶ)が重なり、2つの孔が互いに影響を及ぼし合うと考えられる。

本研究ではせん断スパン内に2つの孔を持ち、曲げ降伏以前にせん断破壊するRC造有孔梁の曲げせん断実験を行い、せん断性状についての検討を行うとともに、複数孔のせん断設計法についても考察した。

2. 実験概要

試験体一覧を表1、試験体の配筋の例を図1にそれぞれ示す。試験体は断面b×D=250×400(mm)、せん断スパン比3.14、主筋比1.15%、肋筋比0.51%、コンクリート強度270(kg/cm²)を共通因子とし、変動因子は孔径では2水準、孔中心間隔では3水準を設定した。複数孔では第1孔の位置を単一孔と同様に梁端部から1.0Dの位置に配置し、そこを基準として加力点側にもう1つ設け総数9体を計画した。また使用材料の力学

表1 試験体一覧

NO.	孔数	孔径比 (H/D)	孔中心間隔 L(mm)
1	1	D/4	—
2	1	D/4	—
3	2	D/4	300(中間)
4	2	D/4	332(広い)
5	2	D/4	250(狭い)
6	1	D/5	—
7	2	D/5	240(狭い)
8	2	D/5	286(中間)
9	2	D/5	332(広い)

注)・NO.2はNO.1と孔位置だけが異なり梁端部から732(mm)の位置に設けている。

・アンダーラインは孔中心間隔がRC規準で規定する最低長さ3Hのもの。

・孔中心間隔が『広い』とはC区間の重ならない最低孔中心間隔を示す。

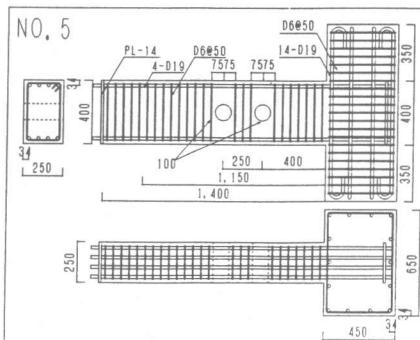


図1 試験体の配筋例

*1 大成建設(株)、工修(正会員)

*2 東京工業大学工業材料研究所 助手、工修(正会員)

*3 東京工業大学工業材料研究所 教授、工博(正会員)

的性質は表2に示した通りである。

加力方法は50(tf)オイルジャッキを用い片持ち梁形式で一方向単調載荷で行った。

3. 実験結果

3. 1 ひび割れ強度及びせん断耐力

実験結果一覧を表3に示す。いずれの試験体も曲げ降伏以前にせん断破壊を生じ、ひび割れ強度は、孔数、孔位置、孔中心間隔による差はあまり生じていない。最大耐力は孔径がD/4と大きい場合のNO.3、NO.5では約10%低下しているが、孔中心間隔の広いNO.4では同等のせん断耐力を示している。一方孔径がD/5と小さい場合には、複数孔のものは孔中心間隔によらず单一孔に比べ約15%低下している。最大耐力と各種計算値と比較するとRC規準式では V_u/V_{s1} は1.5~1.7となり2連孔の影響を考えても十分安全側となっている。RC指針式では孔径がD/4では V_u/V_{s2} は0.96と一致するものの、D/5と小さい場合では V_u/V_{s1} は0.8と危険側になっている。

表3 実験結果一覧

試験体	Vb(tf)	Vo1(tf)	Vo2(tf)	Vo3(tf)	Vu(tf)	δ (mm)	Vs1(tf)	Vs2(tf)	Vc(tf)
NO. 1	4.0	5.0	—	—	20.2	156.4	11.6	21.0	30.9
NO. 2	3.0	6.7	—	—	19.5	172.8	11.6	21.0	30.9
NO. 3	4.0	4.5	7.2	17.0	18.8	192.2	11.6	—	30.9
NO. 4	4.0	6.0	7.0	—	20.1	201.6	11.6	—	30.9
NO. 5	4.0	6.0	7.0	15.0	18.7	178.9	—	—	30.9
NO. 6	3.0	7.0	—	—	21.9	202.3	13.2	27.0	30.9
NO. 7	4.0	6.0	7.0	19.0	19.3	243.0	13.2	—	30.9
NO. 8	4.0	6.0	7.0	—	19.0	212.0	13.2	—	30.9
NO. 9	4.0	6.0	7.0	—	18.9	188.6	13.2	—	30.9

Vb : 曲げひび割れ発生荷重

Vo1 : 端部孔部せん断ひび割れ発生荷重

Vo2 : 中央部孔部せん断ひび割れ発生荷重

Vo3 : 孔部間せん断ひび割れ発生荷重

Vu : 最大耐力時せん断力

表2 使用材料の力学的性質

コンクリートの力学的性質

試験体	圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
NO 1 ~ 9	278	20.7	2.10×10^5

鉄筋の力学的性質

種類	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
D19(焼入れ)	9710	10200	1.62×10^5
D6	3100	4520	1.98×10^5

δ : 最大耐力時変形量

Vs1 : RC規準式によるせん断耐力

Vs2 : 学会指針式によるせん断耐力

Vc : 曲げ略算式による曲げ耐力

3. 2 最終破壊状況

最終破壊状況を図2に示す。单一孔では孔部せん断ひび割れが進展して最大耐力に達し、最終的には孔上下のコンクリートが剥離して耐力を失っている。複数孔の場合は孔中心間隔により分類することができ、孔中心間隔が狭い場合には2つの孔部せん断ひび割れが進展してそれらが互いに結ばれて最大耐力に達し、このひび割れ部分のコンクリートの剥離により耐力を失っている。孔中心間隔が広い場合には2つの孔部にせん断ひび割れが生じるもの、それらのひび割れは独立しており、梁端側の孔部のせん断ひび割れのみが進展して最大耐力に達し、单一孔に類似している。孔中心間隔が中間の場合には広いものと狭いものとの中間的な破壊状況を示している。

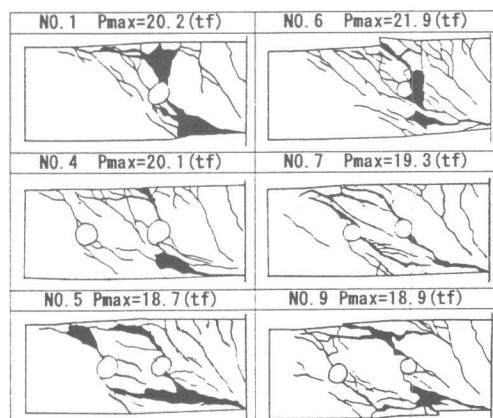


図2 最終破壊状況

3. 3 荷重(P)－変形(δ)関係

各孔径ごとの荷重(P)－変形(δ)関係を図3に示す。初期剛性は孔径、孔中心間隔によらずほぼ一定であり、いずれの試験体も曲げひび割れ、梁端側の孔部せん断ひび割れの発生後に剛性は低下している。複数孔では加力点側の孔部せん断ひび割れが主筋間を貫通する10.0(tf)近辺から剛性低下が顕著になってくる。また最大耐力以降NO.1とNO.4では急激な耐力低下を生じているがその他では変形40(mm)までほぼ耐力を維持している。

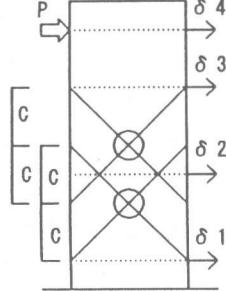
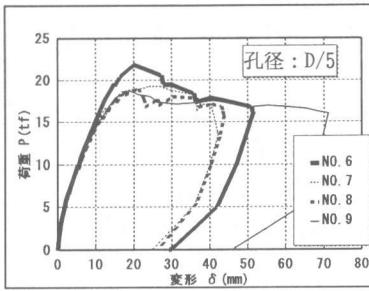
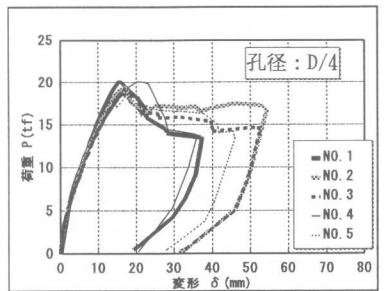


図3 荷重(P)－変形(δ)関係

参考図

3. 4 変形性状

各孔中心間隔ごとの最大耐力時及び最大耐力以降の $\delta=30(\text{mm})$ における各孔部分の水平変形分布の割合(加力点の水平変形に対する各変形量の割合)の比較を図4に示す(参考図は変形測定の模式図)。ここで孔部とは広沢修正式[1]で規定する2C区間(C区間の重なった場合はC区間の重なった箇所まで)を仮定している。最大耐力時では、複数孔は単一孔よりも梁端側の孔部分のせん断変形の割合が多少大きくなっているもののあまり差は生じていない。 $\delta=30(\text{mm})$ では孔中心間隔により大きく差が生じており、孔中心間隔が広い場合は単一孔と同様に梁端側の孔部のせん断変形成分の割合が卓越する。一方、孔中心間隔が狭い場合は加力点側の孔部のせん断変形の割合も大きくなり、2つの孔が一体となって変形が進む傾向となり、この局部的なせん断変形が最大耐力以降の各試験体の変形性状の差となって現れている。孔径の違いにより比較すると単一孔の場合は最大耐力時ではNO.1とNO.6はほぼ同じ変形性状を示しているが、 $\delta=30(\text{mm})$ では孔径の大きいNO.1は孔部における局部的なせん断変形が卓越しているのに対して、孔径が小さいNO.6では孔部における局部的な変形は小さくなっている。複数孔では、全体変形は孔中心間隔が狭い及び広い場合でも孔径の大小に関わらず最大耐力時及び $\delta=30(\text{mm})$ で同様の性状を示すが、その変形成分を見てみると孔径がD/4と大きいとD/5と小さい場合に比べて孔部分におけるせん断変形の割合が大きくなる傾向が見られる。

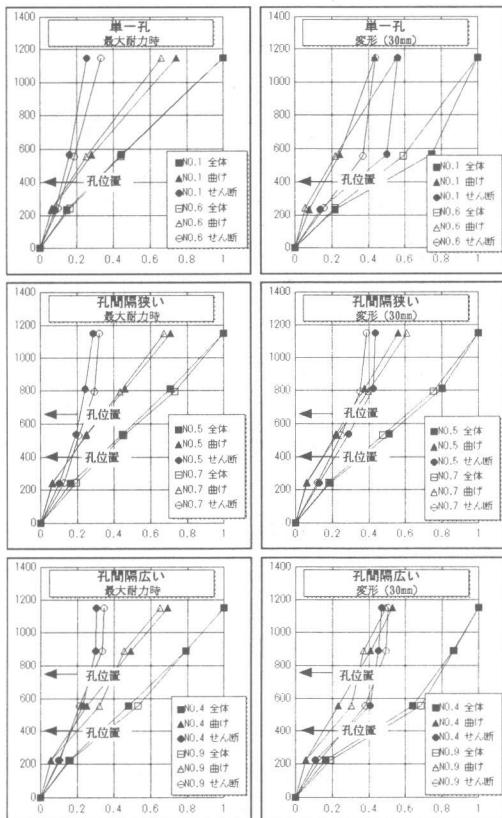


図4 水平変形分布の割合の比較

3. 5 主筋及び肋筋の歪み分布

最大耐力時における主筋及び肋筋の歪み分布の比較を図5に示す。主筋の歪みは曲げ理論で示されるように材端に向かうに従って大きくなっているが、孔部における剛性が低下することからNO.1を除き孔部の両側での歪みの差が大きくなる傾向が見られる。肋筋の歪みは、単一孔の場合は孔部にトラスを形成する部分に近づくほど大きくなっている。複数孔の場合も单一孔と同様に梁端側の孔部にトラスを形成する部分での歪みが大きくなり、孔中心間隔が狭くなるにつれて2連孔の影響が生じて加力点側の孔近傍の歪みも大きくなっている。

4. 考察

4. 1 破壊モード分類

破壊モードは図6に示すように4つのモードに大きく分けることができ、表4に破壊モード分類一覧を示す。単一孔の場合は孔部のせん断ひび割れにより破壊が生じており、NO.1は最大耐力以降に急激に耐力が低下しているが、NO.2、NO.6では最大耐力以降の急激な耐力低下は見られない。これはNO.1では孔部の局部的なせん断変形が大きくなること、材端部では大きな曲げモーメントを受けることなどが考えられる。複数孔では孔径がD/4と大きい場合は孔中心間隔により差が生じ、孔中心間隔が狭い場合にはモードAのように長方形孔のような様相を呈している。孔中心間隔が広い場合には孔部間に十分な間隔があるために加力点側の孔部にもせん断ひび割れが生じるもの、それは最大耐力以降も進展せず健全なまま、梁端部側の孔部にせん断変形が集中し最大耐力を迎え破壊に至っており、NO.1と同様に破壊モードD'の様相を呈している。孔径がD/5と小さい場合は孔中心間隔が狭い場合には破壊モードAとCの中間の破壊モードB、孔中心間隔が中間及び広い場合は破壊モードCの様相を呈し破壊モードにあまり差は生じていない。

4. 2 荷重(P) - 変形(δ)関係

図7に各破壊モード(MODE BはMODE Cと余り差はないので除く)の荷重(P) - 変形(δ)関係の比較を示す。いずれの試験体もA点で曲げひび割れ、B点で梁端側の孔部せん断ひび割れが主筋間を貫通して剛性の低下が生じている。B点以降梁端側の孔部のせん断ひび割れが徐々に進展する。単一孔と複数孔の差はC点において現れ複数孔ではもう1つの孔部のせん断ひび割れが

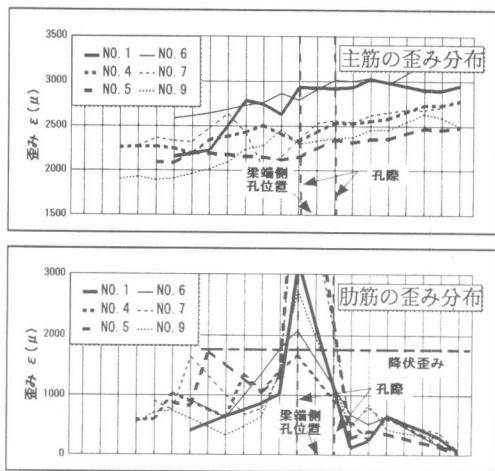
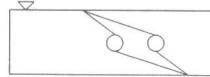


図5 主筋及び肋筋の歪み分布の比較

MODE A



MODE B



MODE C

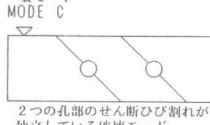


表4 破壊モード分類一覧

	孔径:D/4	孔径:D/5
単孔位置	400(mm)	MODE D'
	732(mm)	MODE D
複数孔中心間隔	広い	MODE D'
	中間	MODE C
	狭い	MODE A

注) : アンダーラインのあるものは孔中心間隔がR.C規格Cで規定する最短長さ3Hのもの: MODE D'はMODE Dにおいて脆的に破壊したもの

MODE D

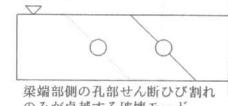


図6 破壊モード

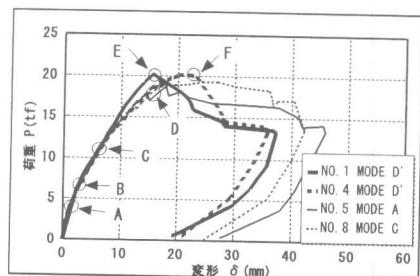


図7 荷重(P) - 変形(δ)関係の比較

主筋間を貫通することにより剛性がさらに低下するのに対して、単一孔ではそのまま上昇してE点において最大耐力を迎える。そしてD点において孔径がD/4における孔中心間隔の差が生じ、孔中心間隔が狭い場合は加力点側における孔部のひび割れも進展し、変形が流れで最大耐力を迎える。孔中心間隔が広い場合には加力点側の孔が健全であるために耐力はE点とほぼ同じF点まで上昇し最大耐力を迎える。また最大耐力以降の挙動は局部的な孔部におけるせん断変形に依存すると思われ、せん断歪が大きくなるNo.1、No.4では脆的に耐力は低下する。

4. 3 脅筋の応力度分布

孔径ごとの脅筋の応力度分布を図8に示す。单一孔では孔径がD/4と大きいNo.1の孔部における応力度分布は三角形型の分布となり、孔の存在による影響範囲が狭いのに対し、D/5と小さい場合の孔部の応力度分布は台形型分布となり、孔による影響範囲が広くなることを示している。これは孔径が大きくなると梁せい方向のコンクリート部分が狭くなるために孔上下近辺での破壊が生やすくなるためであると考えられる。よって複数孔では孔中心間隔が狭い場合は大きな台形型に近い分布を示している。孔中心間隔が広い場合、孔径がD/4と大きいと孔の影響範囲が狭いために孔中心間隔を広くとれば単一孔とほぼ同じ三角形分布を示すが、D/5と小さい場合は孔の影響範囲が広いために加力点側の孔の存在により単一孔よりも小さい台形分布となっている。ここで単一孔における突出している部分を孔の影響範囲と考えて(ハッチ部分)孔中心間隔の広いものとそれ比較してみると、孔径がD/4と大きい場合はこの部分における面積はほぼ等しくなるのに対して、D/5と小さい場合はNo.9における面積は単一孔の約81%となってせん断耐力の関係に一致する傾向にあり、脅筋の応力度分布がせん断耐力に大きな影響を持っていると考えられる。

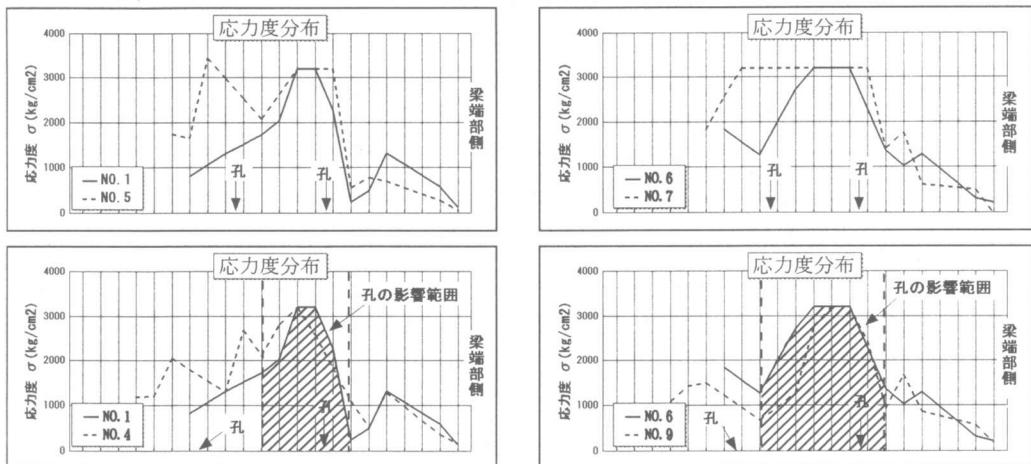


図8 脅筋の応力度分布

4. 4 孔周囲における力の流れ

最大耐力時におけるコンクリート圧縮束の分布を図9に示す。圧縮束角度及び圧縮束力は主筋の付着力と脅筋の引張力のベクトル和として求め、それぞれの圧縮束が交差する場合は合成して求めている。単一孔では孔近傍に流れる力は大きくなってしまっており有孔梁におけるせん断伝達は孔近傍が重要であることを示している。複数孔では孔中心間隔が広い場合には単一孔に類似するものの、孔中心間隔が狭くなると力の流れに乱れが生じるとともに、孔部間に流れる力は少なくなり長方形孔に近い性状を示すようになっている。

4. 5 最大耐力の比較

最大耐力の比較を図10に示す。複数孔の最大耐力は、孔径が $D/4$ では孔中心間隔が広いと加力点側の孔の影響を受けずに単一孔と同等のせん断耐力を示す。孔中心間隔が狭くなるに従って2連孔の影響が生じるために、梁端部側の孔部の耐力を発揮する以前に加力点側の孔部のせん断ひび割れも進展して、2つの孔部で破壊が進むようになる為に耐力低下が生じる。孔径が $D/5$ と小さい場合も同様であるが、孔中心間隔が広い場合にも耐力が低下しているのは、前述の『肋筋の応力度分布』で示したように孔径が小さいほうがかえって2つの孔の影響を受け易くなるためであると思われる。

4. 6 複数孔有孔梁におけるせん断設計法についての考察

以上のことから複数の開口を有する場合、孔径(H)が $D/4$ 、 $D/5$ のいずれにおいても、せん断耐力については孔中心間隔(L)はRC規準の規定する最低長さ $3H$ では、10~15%程度低くなっている。孔径が $D/4$ と大きい場合

では、C区間の重ならない最低長さ $L=332(\text{mm})$ では単一孔と同等のせん断耐力を示すが、孔径が $D/5$ と小さくなると、孔中心間隔を $332(\text{mm})$ としても単一孔と同等のせん断耐力は示さない。これは孔部における肋筋の応力度分布に依存すると考えられ孔径が大きい場合は影響範囲が狭くなることから、孔径が $D/4 \leq H \leq D/3$ ($D/3$:RC規準で規定する最大孔径)と大きい場合では孔中心間隔をC区間の重ならない長さ以上とすれば単一孔と同等のせん断耐力を持つと考えられるが、孔径が $D/5$ 以下の場合は孔中心間隔を更に大きくとらなければ(肋筋の応力度分布が同じ形状を示すようにならなければ)単一孔と同等のせん断耐力を持つものとして考えてはいけない。

また、設計という観点から言えば、せん断耐力だけでなく部材の剛性も重要な問題となってくる。複数孔においては複数の孔部のせん断ひび割れにより単一孔に比べて剛性が低下するので、孔中心間隔によらずに単一孔と同等のものとして考えるべきではないと思われる。

5. まとめ

- ①複数孔では破壊形式は孔径、孔中心間隔により大きく4つに分類できた。
- ②孔径により孔部の影響範囲が異なり、孔径が小さい方が影響範囲が広くなる。
- ③複数孔での孔周辺の力の流れは、孔中心間隔の広い場合は単一孔に類似し、狭くなるに従って長方形孔に近い性状になる。
- ④複数孔ではRC規準の規定する最低孔中心間隔では単一孔と同等のせん断耐力を示さない。

【参考文献】[1]日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1988.7

[2]日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990.11

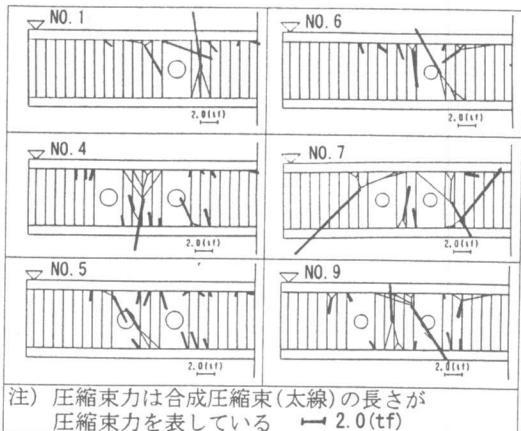


図9 コンクリート圧縮束の分布

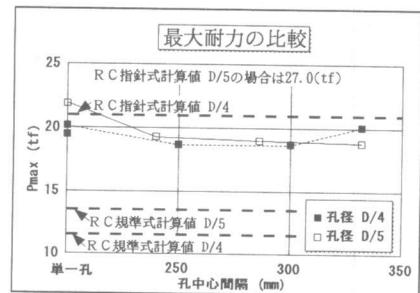


図10 最大耐力の比較