論文　耐震スリットを有する鉄筋コンクリート造壁付き梁の剛性に及ぼす壁開口寸法の影響

大村哲矢[*1]・林静雄[*2]

要旨：無開口壁の 3 面に完全スリットを設けた場合，その梁の剛性は長方形梁よりも増加する。既報ではその梁の剛性倍率を示した。本論ではたれ壁が取り付く梁および非構造壁の柱際に開口を有する壁が取り付く梁を想定する。それらの壁が梁の剛性にどのように影響するかを明らかにするため，開口の大きさを変動させたモデルの 2 次元静的弾塑性有限要素法解析を行い梁の剛性を検討する。

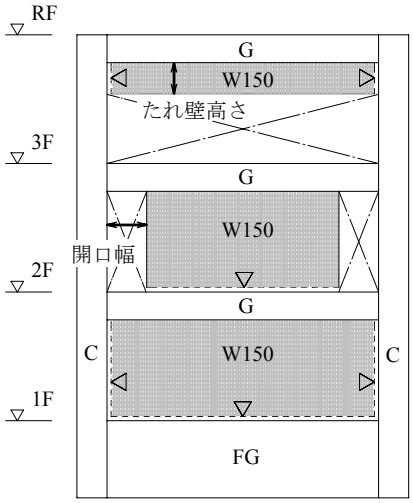
キーワード：耐震スリット，開口壁が接合する梁，有限要素法解析，剛性倍率

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の構造設計をする際に，そで壁・たれ壁・腰壁・方立て壁などの剛性と耐力を無視し明確な崩壊形を形成させるため，**図—1** に示すような壁とフレームの際に耐震スリット（以下，スリット）を設けるケースがよくみられる。

近年，共同住宅は大量供給の時代から，デザイン性や居住性を重視するような質を求める時代に変化した。以前の共同住宅は平面形状が長方形で梁間方向の全てを耐震壁とした明解な耐震壁構造が多く見られたが，近年の共同住宅ではデザイン性を優先するために平面形状が不整形であり開口付き壁が多く存在する傾向が見られ，そのことがスリットを有する壁が多く見られるようになった理由の一つであると思われる。

容積率上限まで延べ床面積を確保しようとするために，道路斜線等に沿って段上にセットバックした建物は多い。セットバックした建物の下層階は，平面的な重心が図芯から大きく外れるため偏心することになる。そのような建物では地震時に水平抵抗する壁の際にスリットを設け，平面的な剛性バランスをとることにより偏心を抑える方法がとられる。そのときに「スリットを有する壁付き梁」の剛性は,「その壁がない長方形梁」の剛性に等しいとするモデル化が一般的に行われている。しかし，既報[1]ではスリットを有する壁は梁の剛性を増大させる。梁剛性の増大によりフレーム剛性は増大し、そのフレームは実際の地震時に設計上想定した以上の水平力を負担することになり，平面的な剛性バランスがくずれ偏心率の増大によって捩れが生じる。建物平面の重心から離れたフレームほど，その梁剛性は適切に評価すべきであり,「壁付き梁」を「その壁がない長方形梁」としてモデル化することは実際の地震時に解析上想定していなかった損傷が発生する原因となる。



図—１　軸組図　(△：耐震スリット)

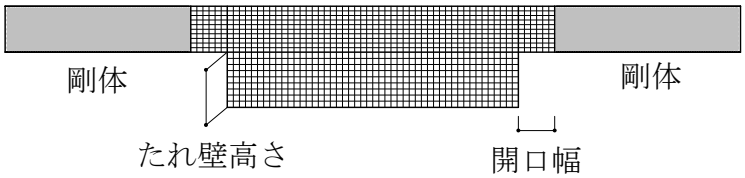
*1　武蔵工業大学 工学部 建築学科・助手　博士(工学)（正会員）
*2　東京工業大学 建築物理研究センター・教授　工博　（正会員）

既報[1]では**図—1** における第 1 層のモデル(2 階梁モデル)であるスリットを有する無開口壁付き梁を検討対象とした。無開口壁の 3 面に完全スリットを設けた場合, 梁の剛性は長方形断面梁よりも増加する傾向がみられ, 壁付き梁の剛性を長方形梁の剛性に対する比として次式で示した。

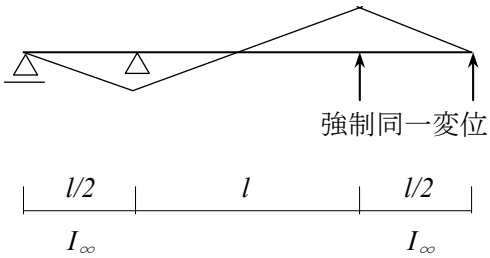
剛性倍率=$250\times I^{-0.206}$..... (1)

I：長方形梁の断面二次モーメント(mm^4)

本論では**図—1** における第 2 および 3 層のケースを検討対象とする。第 2 層のモデル(3 階梁モデル)では開口幅を，第 3 層のモデル(R 階梁モデル)ではたれ壁高さをパラメータとし 2 次元静的弾塑性有限要素法解析を行い，スリットによりフレームと縁を切った開口を有する壁付き梁の剛性について検討する。



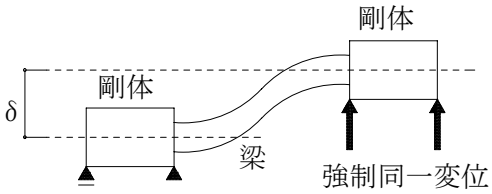
図—２　要素分割図



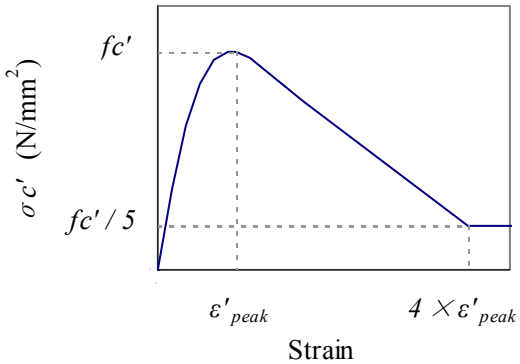
図－３　載荷模式図

2.　解析

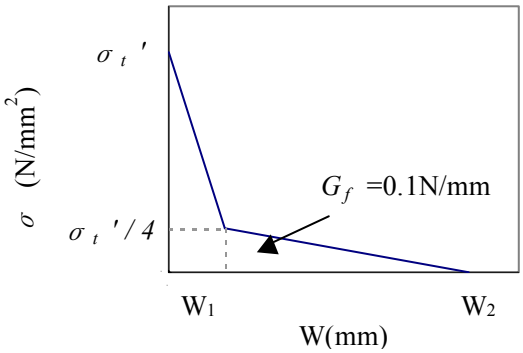
要素分割図を**図—2** に示す。**図—1** の梁をモデル化して解析するものとし，梁の両側に加力用の剛体をもうけた。**図—3** に載荷模式図を示す。左側の剛体をピンとローラーにより固定し右側の剛体に強制同一変位を与えることにより，



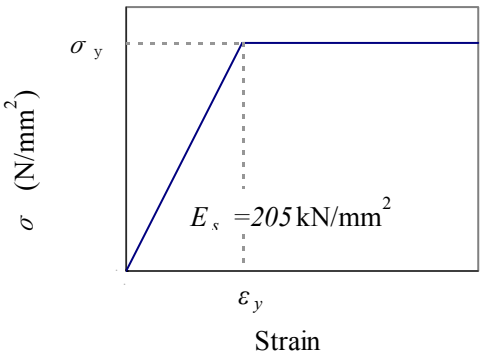
図－４　変形模式図



図－５　圧縮応力度－歪度関係（コンクリート）



図－６　引張応力度－ひび割れ幅関係



図－７　応力度－歪度関係（鉄筋）

地震時の梁の曲げモーメント（逆対称モーメント）をモデルに入力する。
変形模式図を**図—4** に示す。強制同一変位を与えると梁は図のように変形する。(以下，図中のδを変位という。)

コンクリートおよび鉄筋の材料特性を**図—5～7** に示す。コンクリートには 4 節点 4 辺形アイソパラメトリック平面応力要素を用い，圧縮領域には Drucker-Prager 破壊基準を採用し，応力度－歪度関係はコンクリート標準示方書[2]の式による。ヤング係数は鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説[3]の式による。引張領域の軟化特性には篠原らのバイリニアモデル[4]を使用し，ひび割れによるせん断剛性の低下については，ひび割れひずみの関数としている。主筋(SD345)，スタラップ，および壁筋(SD295A)は埋め込み鉄筋要素を用いた。鉄筋の材料定数は文献[3]による値とし，ひずみ硬化は考慮しない。破壊基準は Von Mises 型モデルを用いてバイリニアとしている。鉄筋とコンクリート間の付着は完全付着とした。

2.1 解析モデル

解析モデルを**表—1** に示す。**図—2** におけるたれ壁高さと開口幅を変動させ 11 モデルの解析を行った。

共同住宅の梁下高さを参考に，たれ壁高さを 0～2,200mm とした。開口幅は梁せい(以下，D)に対する比とし，0.04～1.25D とした。開口幅が 0.04D(30mm)のモデルはスリット幅を参考にした。

共通要因は**表—1** の下に示すように梁断面，梁の内法スパン，コンクリート強度，主筋，スタラップ，壁筋比である。

たれ壁厚さと梁幅の比や壁筋量が梁の剛性増加に影響すると思われる。しかし，スリットを設けることにより剛性と耐力を無視しようとする構造計画の場合にはその壁厚を最低厚さかつ最低配筋量とすることが多いため，本論では壁厚を 150mm とした。

梁の断面形状（主に断面二次モーメント）は梁の剛性増加に影響する[1]が，本論では基礎的な傾向を把握するために梁の断面は共通とし，b×D＝450×750mm とした。

3. 解析結果および考察

3.1 せん断力—変位関係

図—8 および 9 にせん断力－変位関係を示す。

図—8 は開口幅を 0.04D (30mm)とし，たれ壁高さを変動（No.1，3～7）させた。たれ壁高さが小さくなると長方形梁（No.1）に近づく傾向がみられた。特にたれ壁高さが 500 から 250mm に小さくなるモデル（No.4 と 5）について顕著な差がみられた。

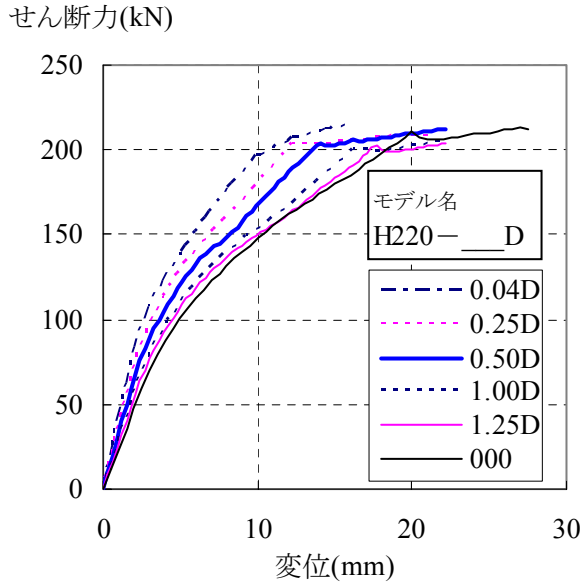
図—9 はたれ壁高さを 2,200mm とし開口幅を変動（No.1～2，8～11）させた。

表—１　解析モデル

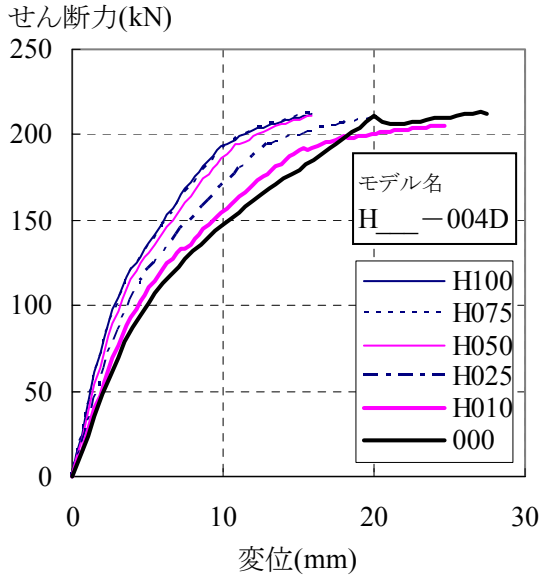
No.	モデル名	たれ壁高さ (mm)	開口幅 (mm)	開口幅/梁せい
1	000	0	－	－
2	H220 － 004D	2,200	30	0.04
3	H010 － 004D	100	30	0.04
4	H025 － 004D	250	30	0.04
5	H050 － 004D	500	30	0.04
6	H075 － 004D	750	30	0.04
7	H100 － 004D	1,000	30	0.04
8	H220 － 025D	2,200	188	0.25
9	H220 － 050D	2,200	375	0.50
10	H220 － 100D	2,200	750	1.00
11	H220 － 125D	2,200	938	1.25

共通要因

梁断面　：b×D＝450×750mm
梁の内法スパン　：6,000mm
コンクリート強度：24N/mm^2
主筋　：上端，下端とも 5－D25 (SD345)
スタラップ　：1.2% (SD295A)
壁筋比　：0.4% (SD295A)



図—８　せん断力－変位関係



図—９　せん断力－変位関係

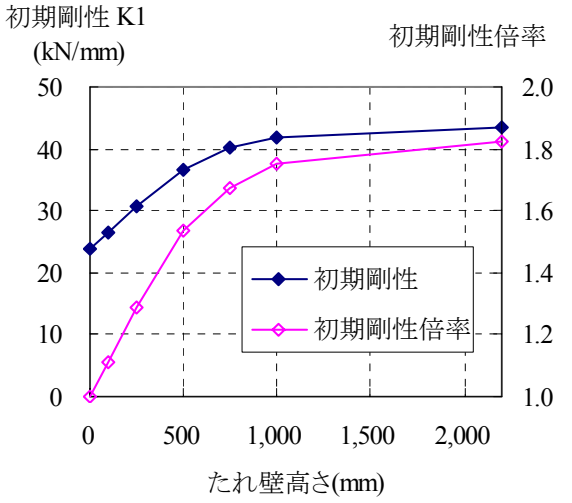
開口幅が大きくなると長方形梁に近づく傾向がみられた。

本論の解析結果において降伏時変位は最大で20mm 程度であったが，解析結果の変位は**図—4**に示すような相対変位であるため，解析結果の変位をスリット幅の必要最小値とはできない。実際の構造物ではフレームの終局時変位，柱梁節点の回転，柱の変形などを考慮した上で，たれ壁と柱が緩衝しないようにスリットの必要な幅を設定すべきである。

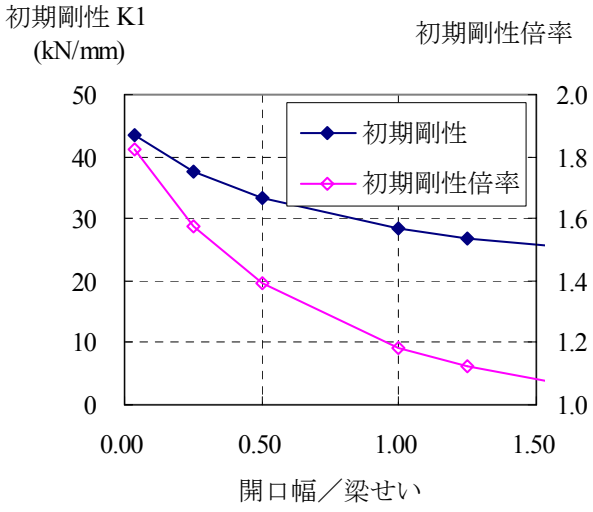
3.2 初期剛性

図—10 に初期剛性－たれ壁高さ関係を示す。たれ壁高さの増加に伴い初期剛性が増加する傾向がみられた。たれ壁高さが 1,000mm 以上になると**図—1** における第 1 層のモデル(2 階梁モデル)である無開口壁付き梁とほぼ同じ初期剛性を示した。

図—11 に初期剛性－開口幅関係を示す。開口幅の増加に伴い，初期剛性は低下する傾向がみられた。開口幅 1.25D 以上では初期剛性が低下する勾配が小さい。開口幅が 1.25D（938mm）になると，長方形梁とほぼ同様な初期剛性を示した。



図—10　初期剛性－たれ壁高さ関係



図—11　初期剛性－開口幅関係

3.3 初期剛性倍率

図—10 に初期剛性倍率－たれ壁高さ関係を示す。以下，剛性倍率は長方形梁の剛性に対する壁付き梁の剛性とする。

図のたれ壁高さが 0 のときは初期剛性倍率が 1.0 となる。たれ壁高さの増加に伴い，初期剛性倍率は増加する傾向が見られた。たれ壁高さ 100mm における初期剛性倍率は 1.11 倍であり，長方形梁の剛性と同程度となる。たれ壁が最も高い(2,200mm) No.2 が最大で 1.82 倍であった。たれ壁高さが 100mm を超える場合にはその梁の初期剛性を適切に評価すべきであると思われる。

図—11 に初期剛性倍率－開口幅関係を示す。開口幅の増加に伴い初期剛性倍率は低下する傾向が見られた。開口幅が梁せいの 1.25 倍における初期剛性倍率は 1.12 倍であり，長方形梁の剛性と同等となる。開口幅が最も小さい（30mm）No.2 が最大で 1.82 倍であった。開口幅が梁せいの 1.25 倍未満の場合にはその梁の初期剛性を適切に評価すべきであると思われる。

3.4 降伏時剛性

図—12 に降伏時剛性－たれ壁高さ関係を示す。降伏時剛性は梁の両端主筋が降伏したときの点における割線剛性とした。

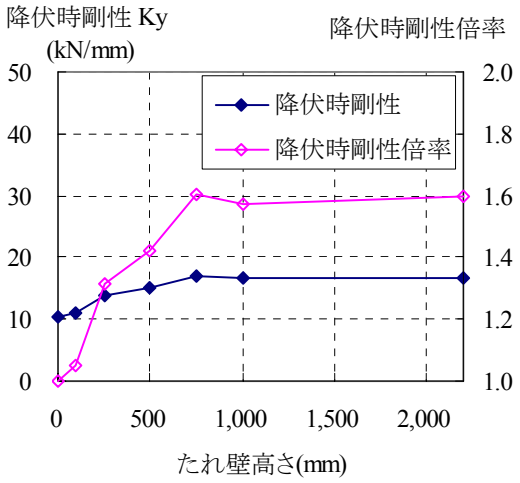
たれ壁高さ 750mm までは降伏時剛性が増加する傾向がみられたが，たれ壁高さ 750mm 以上では降伏時剛性がほぼ一定となった。たれ壁高さが 750mm 以上になると**図—1** における第 1 層のモデル(2 階梁モデル)である無開口壁付き梁とほぼ同じ降伏時剛性を示した。たれ壁高さ 100mm では長方形梁とほぼ同じ降伏時剛性を示した。

図—13 に降伏時剛性－開口幅関係を示す。開口幅 0.5D までは，降伏時剛性は低下する傾向がみられた。開口幅 0.5D 以上では降伏時剛性がほぼ一定となり，長方形梁とほぼ同じ降伏時剛性を示した。

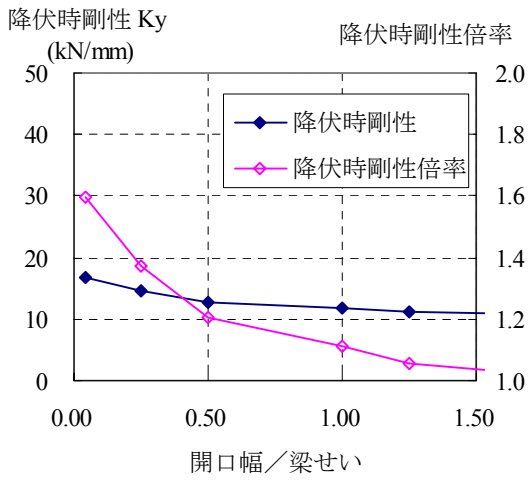
3.5 降伏時剛性倍率

図—12 に降伏時剛性倍率－たれ壁高さ関係を示す。たれ壁高さ 750mm までは降伏時剛性倍率が増加する傾向がみられたが，たれ壁高さ 750mm 以上では降伏時剛性倍率がほぼ一定となった。たれ壁高さ 100mm の降伏時剛性倍率は 1.05 倍となり，長方形梁とほぼ同等である。たれ壁が最も高い(2,200mm) No.2 が最大で 1.60 倍であった。たれ壁高さが 100mm を超える場合にはその梁の降伏時剛性を適切に評価すべきであると思われる。

図—13 に降伏時剛性倍率－開口幅関係を示す。開口幅の増加に伴い降伏時剛性倍率は低下する傾向が見られた。開口幅が梁せいの 1.25 倍における降伏時剛性倍率は 1.06 倍であり，長方形梁の降伏時剛性と同等となる。



図—12　降伏時剛性－たれ壁高さ関係



図—13　降伏時剛性－開口幅関係

開口幅が最も小さい（30mm）No.2 が最大で 1.60 倍であった。開口幅が梁せいの 1.25 倍未満の場合にはその梁の降伏時剛性を適切に評価すべきであると思われる。

3.6 剛性低下率

図—14 に剛性低下率－たれ壁高さ関係を示す。以下，剛性低下率は初期剛性に対する降伏時剛性とする。たれ壁高さが増加しても剛性低下率は 0.39～0.45 であり，ほとんど変化しない傾向がみられた。

図—15 に剛性低下率－開口幅関係を示す。開口幅が増加しても剛性低下率は 0.39～0.44 であり，ほとんど変化しない傾向がみられた。

剛性低下率に及ぼす，たれ壁高さおよび開口幅の影響は小さい。よって初期剛性を適切に評価し，それに剛性低下率を乗じる方法が設計上効率的であると思われる。

4. 結論

本論ではスリットによりフレームと縁を切った開口を有する壁付き梁の 2 次元静的弾塑性有限要素法解析を行った。開口幅およびたれ壁高さをパラメータとし，その梁の初期剛性および降伏時剛性について検討し，以下を得た。

(1) せん断力－変位関係において，たれ壁高さが小さくなると長方形梁に近づく傾向がみられた。特にたれ壁高さが 500 から 250mm に小さくなるモデルについて顕著な差がみられた。開口幅が大きくなると長方形梁に近づく傾向がみられた。開口幅が 1.25D（938mm）になると，長方形梁とほぼ同様になった。

(2) たれ壁高さが 100mm を超える場合，および開口幅が梁せいの 1.25 倍未満の場合にはその梁の初期剛性を適切に評価すべきであると思われる。

(3) 剛性低下率に及ぼす，たれ壁高さおよび開口幅の影響は小さいため，初期剛性を適切に評価し，それに剛性低下率を乗じる方法が設計上効率的であると思われる。

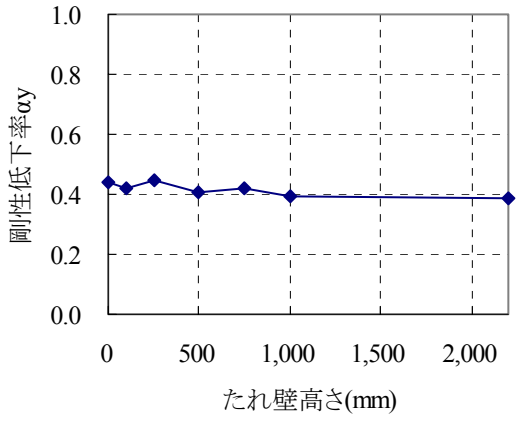
参考文献

[1] 大村哲矢，林静雄：耐震スリットを有する鉄筋コンクリート造フレームの剛性と耐力に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp49～54，2003 年 7 月

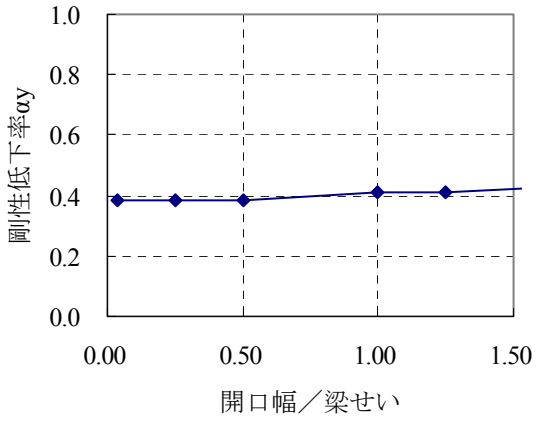
[2] 土木学会：コンクリート標準示方書[耐震性能照査編]，2002

[3] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準･同解説，1999

[4] 篠原保二，安部武雄，古村福次郎：ノッチ深さ，載荷速度，骨材寸法，水セメント比，載荷法，養生および材令がコンクリートの曲げ試験体の引張軟化特性に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，No.442，pp.13-22，1992.12



図—14　剛性低下率－たれ壁高さ関係



図—15　剛性低下率－開口幅関係