

論文

[2072] フラットプレート構造の側柱-スラブ接合部に関する実験

西田哲也^{*1}・吉崎征二^{*1}・狩野芳一^{*2}

1. はじめに

RC規準・同解説^[1]に示されたフラットプレート構造の柱-スラブ接合部のせん断強度式は、鉛直力のみを伝達する場合には、柱周りに設定した算定断面に等分布のせん断応力が作用するとして、せん断強度を推定しており、この点は、ACI規準318-89^[2]と同様である。しかし、モーメントのみを伝達する場合には、ACI規準では、算定断面でせん断応力が直線的に分布すると仮定しているのに対し、RC規準では、算定断面に接続された仮想の梁部材断面の耐力和によって、終局強度を推定する点で大きく異なっている（図-1）。中柱接合部を対象とした実験結果との比較では、鉛直力の小さい範囲で、RC規準式の適合性が、ACI規準式より良いことが報告されている^[3]。

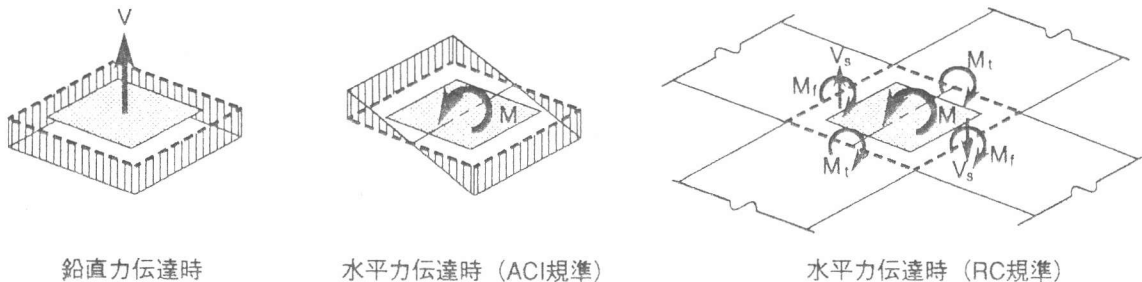


図-1 算定断面での応力伝達の仮定

一方、側柱接合部の場合、RC規準・同解説中の設計式の項で、はね出しスラブの有無を考慮して、算定断面を適切に設定し、せん断強度を推定することが、ただし書として記されている。しかし、この記述に対し、算定断面の設定方法やせん断強度の実験結果との比較に関する研究が、ほとんど成されていないのが現状である。そこで、側柱接合部における、算定断面の設定方法、せん断強度式の適合性を調べることを主な目的として、実験を行った。

本実験は、NewRC総プロの一環として行われたため、試験体にFc600クラスの高強度コンクリートが使用されていることを特記しておく。

2. 実験方法

試験体スラブの配筋を図-2に、一覧を表-1に、加力装置を図-3、4に示す。

試験体は、側柱とスラブの接合部を対象とした約1/2.5の縮尺模型で、柱を層間の中央で、スラブをスパンの中央で切り取った形状をしている。

柱は25cm×25cmで、階高

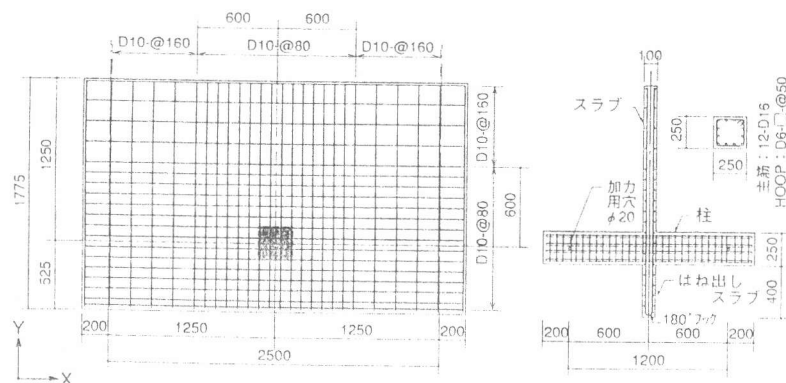


図-2 側柱試験体形状、寸法

*1 大成建設(株)技術研究所（正会員），*2 明治大学教授 理工学部建築学科，工博（正会員）

120cmである。スラブは厚さ10cm, スパン250cmである。

全試験体数は8体で、各試験体の特徴を以下に示す。

1) EV-1,2: 鉛直荷重のみを作用させた試験体。鉛直荷重の重心は、柱心に対して、はね出し縁と反対側に偏心しているため、接合部には鉛直力と同時に不釣り合いモーメントも作用する(図-3 鉛直加力装置平面図参照)。

2) EH-1,2: はね出し縁に対し、平行な方向の水平力のみを作用させた試験体。

3) EH-3,4: 鉛直荷重とはね出し縁に平行な水平力を同時に作用

させた試験体。鉛直力は、長期荷重を想定して一定値とし、算定断面の平均せん断応力度が 5kgf/cm^2 となるように定めた。この加力では、接合部に鉛直荷重と水平力による2方向のモーメントが作用する。

4) EH-5,6: はね出し縁に対し、直交する方向の水平力のみを作用させた試験体。接合部には、モーメントの他に、スラブのせん断力が鉛直力として作用する(図-4 参照)。

EH-3試験体はスラブ全幅の曲げ破壊を、その他は接合部のせん断破壊を意図した配筋としている。また、偶数番号の試験体は、はね出しスラブがなく、柱外面とスラブ端面が一致しており、奇数番号のものは、柱外面から400mmのはね出しを設けている。このはね出し寸法は、スラブ厚の4倍の400mmとしたが、これは、はね出しを設ける場合にバルコニー等の機能上最低限必要な寸法と考えられる。使用したコンクリートの圧縮強度は、表-1中に示した。スラブ筋(D10)の降伏点は、 3460kgf/cm^2 である。

表-1 試験体一覧

試験体	はね出し寸法(mm)	加力方法	柱列帯配筋	柱間帯配筋	想定破壊形式	コンクリート圧縮強度(kgf/cm^2)
EV-1	400	鉛直	D10-@80	D10-@160	せん断	516
EV-2	0					546
EH-1	400	水平 ^{*1}				542
EH-2	0					570
EH-3	400	鉛直 + 水平 ^{*1}	D10-@150	D10-@300	曲げ	561
EH-4	0					534
EH-5	400	水平 ^{*2}	D10-@80	D10-@160	せん断	713
EH-6	0					694

注)・水平^{*1}は、はね出し縁に平行な方向(X方向)、水平^{*2}は、はね出し縁に直交する方向(Y方向)の水平加力を示す。

・鉛直+水平の場合には、鉛直荷重による曲げモーメント相当分の鉄筋を上端に付加する。(EH-3:4-D10, EH-4:3-D10)

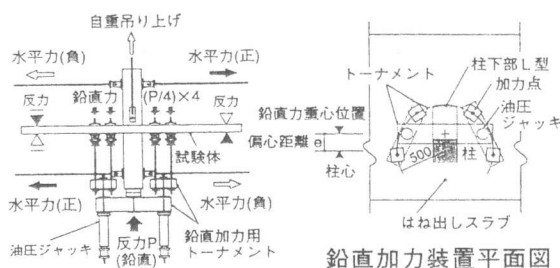


図-3 鉛直荷重およびはね出し縁に平行方向の水平加力装置 (EV-1,2,EH-1~4)

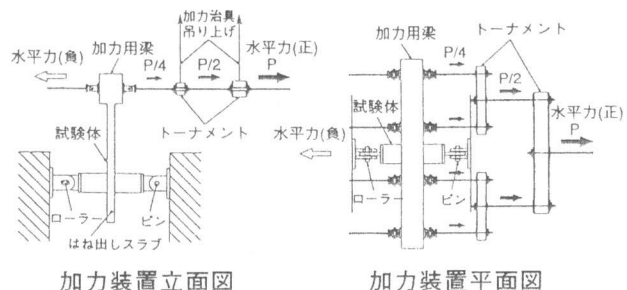


図-4 はね出し縁に直交方向の水平加力装置 (EH-5,6)

3. 実験結果と検討

3. 1 破壊性状

代表的な試験体のスラブの最終ひび割れ状況を図-5に示す。

1) EV-1,2: 鉛直荷重だけを受けたこれらの試験体では、ひび割れはスラブ上面の柱とスラブの

接合位置より発生し、荷重の増加と共に放射状に伸びる。はね出しのないEV-2は、その範囲が狭い。EV-1では、はね出しスラブにも放射状のひび割れが発生しており、はね出し側のスラブからも鉛直力が伝達されているものと考えられる。最終的に、加力側(はね出し縁反対側)スラブがパンチング破壊し、耐力が低下した。

2) EH-1~4: これらののはね出し縁に平行な水平力を受けた試験体は、ほぼ同様の破壊経過をたどった。加力方向に直交する柱前面のスラブに放射状のひび割れが発生し、柱側面のスラブには、ねじりによって生じたと思われる柱面と45度の角度を持つひび割れが発生した。最大荷重付近で接合部付近のスラブコンクリートが圧壊し始め、その部分で急激なせん断破壊を生じて、耐力が低下した。EH-1,3では、はね出し側の柱側面でもねじりひび割れが見られることから、はね出しスラブもねじり抵抗要素として作用していることがわかる。

3) EH-5: はね出しを有し、はね出し縁に直交する水平力を受けた試験体も、基本的なひび割れ性状は、2)の試験体とほぼ同じであるが、最終破壊形式は、せん断破壊でなく、曲げ破壊で、加力側の柱との接合位置にスラブ全幅にわたって降伏線が形成された。

この試験体でも、はね出しスラブに注目すると、柱面に平行な曲げひび割れとそれに直交するひび割れが発生している。図中に、点線で示したひび割れは負加力時のものであり、正加力時には、スラブの裏側に発生しているひび割れと同様である。ここで、図-6の変位分布図(図中の●は柱心位置を示し、手前ははね出し側である。)を見ると、はね出し縁では、柱心線上のスラブを周りのスラブが下から押し上げるように、下に凸な変形状態をしている。この変形状態と前記のはね出し部のひび割れ性状から、はね出しスラブからもせん断力・モーメントが伝達されていたものと考えられる。

4) EH-6: はね出しがなく、はね出し縁に直交する水平力を受けた試験体も、基本的なひび割れ性状は、2)の試験体とほぼ同じであるが、最終的には、加力側の柱前面スラブのせん断破壊は発生せず、柱側面スラブのみがねじりせん断破壊した。

3. 2 荷重-変形関係

水平力を受けた試験体について、接合部で伝達されたモーメント M と層間変形 δ の関係の代表例を図-7~9に、各試験体の包絡線を図-10に示す。

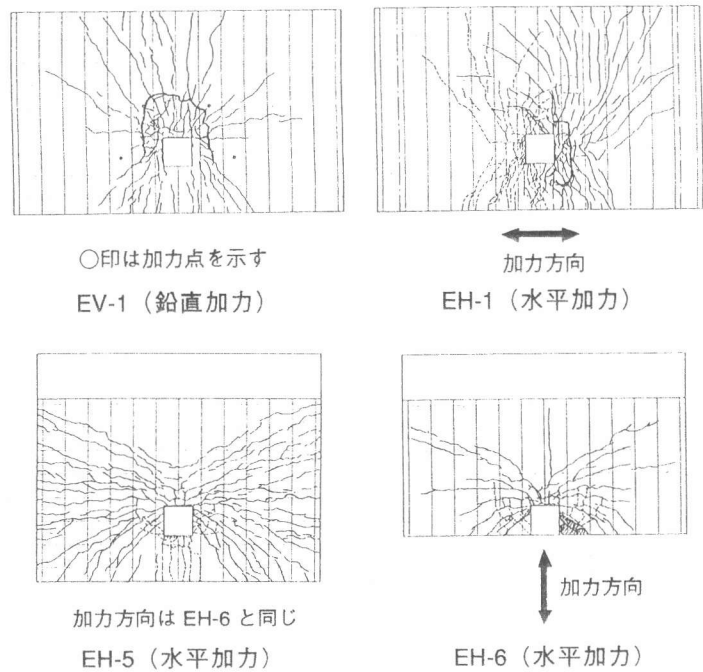


図-5 スラブ上面の最終ひび割れ状況

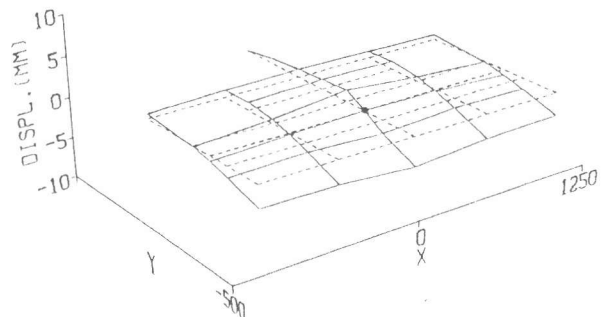
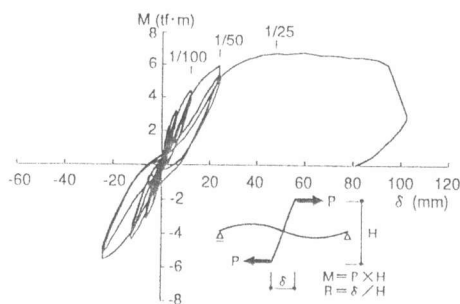
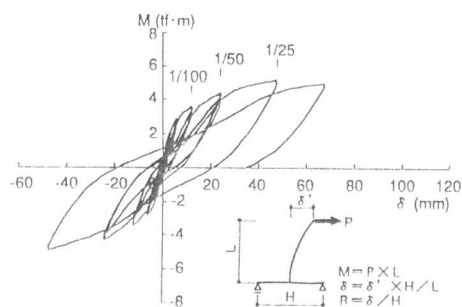


図-6 EH-5 変位分布図

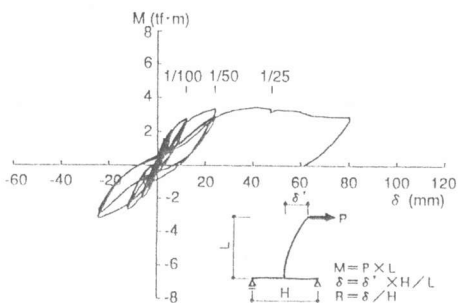
変形角1/50付近までは、いずれの試験体も荷重－変形関係の性状はほぼ同じであり、はね出しの有無、水平力の方向、鉛直荷重の有無および最終破壊形式による大きな差は見られない。この範囲内では、繰り返し加力による履歴ループは逆S字



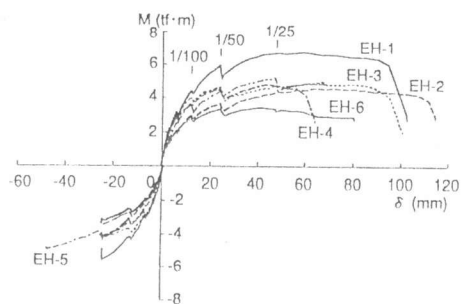
図－7 EH-1 荷重－変形関係



図－8 EH-5 荷重－変形関係



図－9 EH-6 荷重－変形関係



図－10 荷重－変形関係の包絡線

で、ループ面積は小さい。各試験体の最大荷重時の変形角は1/29～1/17であった。EH-5,6を除く、せん断破壊した試験体は、最大荷重以降スラブの圧壊に伴い若干の荷重低下を起こし、せん断ひび割れの発生と共に急激に荷重が低下した。せん断破壊時の変形角は1/20～1/11であった。

はね出し縁に平行な水平力と鉛直荷重を同時に受けたEH-4の変形能力は、水平力のみを受けたEH-2に比較して小さくなった。しかし、曲げ破壊型配筋で鉛直荷重を同時に受けたEH-3の変形能力は、水平力のみを受けるEH-1と変らない。はね出しがなく、はね出し縁に直交する水平力を受けたEH-6は、ねじりにより柱側面のみがせん断破壊した。その破壊形式は明瞭であったが、荷重低下はあまりなく、変形の増大と共に破壊が進行し、荷重は徐々に低下した。

3. 3 終局強度

RC規準・同解説による中柱接合部のせん断強度式（以下、規準式と呼ぶ）を本実験の側柱接合部試験体に適用するにあたり、以下の3点を考慮した。

①算定断面の設定方法。特に、はね出しを有する接合部の場合には、はね出し側の算定断面の扱いが問題となる。ここでは、3. 2節で述べたように、EV-1, EH-1, 3, 5のひび割れ性状、変形状態からはね出しスラブも接合部の応力伝達に寄与していると考えられたので、はね出しを有する試験体の算定断面を中柱と同じ柱周り4辺と仮定した。また、はね出しのない試験では、柱周り3辺を算定断面とした。

②中柱接合部では、お互いに独立した鉛直荷重による鉛直力 V と水平荷重によるモーメント M が同時に作用する場合の相関として、 V/V_0 - M/M_0 の関係式が示されている。一方、側柱接合部の実験では、鉛直荷重により鉛直力 V と不釣合いモーメント M_v が発生し(EV-1,2)、はね出し縁に直交する水平荷重時には、モーメント M とスラブからのせん断力が鉛直力 V_m として作用する(EH-5,6)。このように加力条件が異なっている場合にも、中柱接合部の鉛直力 V とモーメント M の相関関係が成り立つものとして、規準式を適用した。

③EH-3,4のように、鉛直荷重による不釣合いモーメントと水平力によるモーメントの2方向のモーメントが作用している場合の耐力評価については、文献[3]の45度方水平加力の実験結果を参

考にして、X,Yの2方向モーメントの相関を式(1)のように仮定した。

$$(\frac{M_{x\text{test}}}{M_{x0}})^2 + (\frac{M_{y\text{test}}}{M_{y0}})^2 = 1 \quad (1)$$

各試験体の終局強度実験値を計算値と比較して表-2に、 V_{test}/V_0 と M_{test}/M_0 の関係を図-12に示す。 V_{test} 、 M_{test} は、実験時にスラブから柱に伝達された鉛直力とモーメントであり、接合部の終局伝達鉛直力 V_0 、終局伝達モーメント M_0 は規準式より求めた計算値である。

ここで、はね出し縁に平行なX方向の水平力を受ける場合、はね出し側で伝達されるねじりモーメントの量は、はね出し部の鉄筋量により上限が決まる可能性がある。そこで、図-11のように、はね出し部のスラブに降伏線を仮定して、スラブの曲げ抵抗により伝達し得るモーメント M_t' を計算し、はね出し側算定断面のねじりモーメントの終局強度 M_t と比較して、小さい値をはね出し側で伝達できるねじりモーメントとした。計算に用いたスラブの平均有効せいは、7.5cmである。

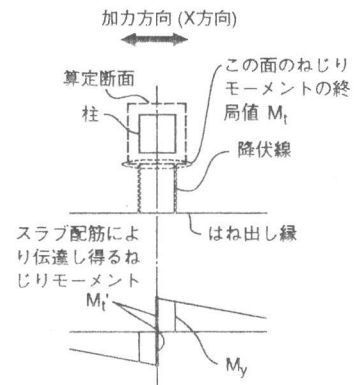


図-11 ねじりモーメント伝達時の降伏線

一方、水平加力時の曲げ終局強度計算値は、スラブの接合端を通過して、水平力の方向に直交する線上のスラブ全幅に降伏線が形成されると仮定して、接合端抵抗モーメントを梁の曲げ強度式で算定し、これを節点モーメントに換算して求めた。

1) EV-1,2: 鉛直荷重のみを受けた試験体の実験値は、計算値を大きく上回っているが、図-12でこれらは計算式による鉛直力とモーメントの相関とほぼ同様の傾きを持った線上に位置しており、はね出しを有する試験体で算定断面を4辺、はね出しのない試験体で3辺とした仮定は、ほぼ妥当であると思われる。また、規準式が実験値を過小評価した点については、②で述べた加力

表-2 終局強度

試験体	実験値			せん断強度計算値 (RC規準・同解説 終局強度式)							曲げ強度計算値	
	V_{test} (tf)	$x M_{\text{test}}$ (tf・m)	$y M_{\text{test}}$ (tf・m)	V_0 (tf)	V_{test}/V_0 ①	$x M_0$ (tf・m)	$x M_{\text{test}}/x M_0$ ②	$y M_0$ (tf・m)	$y M_{\text{test}}/y M_0$ ③	①+②+③	M_{flex} (tf・m)	$M_{\text{test}}/M_{\text{flex}}$
EV-1	21.5		3.93	23.5 (17.6)	0.91 (1.22)			5.60 (4.02)	0.70 (0.98)	1.61 ^{*1} (2.19) ^{*2}		
EV-2	11.9		3.63	16.7	0.71			3.80	0.95	1.67		
EH-1		6.74				5.89 (4.64)	1.14 (1.45)			1.14 ^{*1} (1.45) ^{*2}	7.47 ^{*7}	0.90
EH-2		4.56				4.48	1.02			1.02	5.50 ^{*7}	0.83
EH-3	4.0	4.84	0.73	24.5	0.16	5.52	0.88	5.82	0.13	1.05 ^{*3} (1.04) ^{*4}	4.32 ^{*7}	1.12
EH-4	3.6	4.79	1.10	16.5	0.22	4.91	0.97	4.23	0.26	1.23 ^{*5} (1.19) ^{*6}	6.09 ^{*7}	0.79
EH-5	4.2		5.20	27.6 (20.7)	0.15 (0.20)			6.55 (4.71)	0.79 (1.11)	0.95 ^{*1} (1.31) ^{*2}	4.72 ^{*8}	1.10
EH-6	2.7		3.41	18.8	0.14			4.30	0.79	0.94	4.72 ^{*8}	0.72

*1 算定断面を4辺仮定

*2 算定断面を3辺仮定

*3 ①+ $\sqrt{②^2+③^2}$ (2方向のモーメント考慮: 算定断面は4辺)

*4 ①+② (X方向のモーメントのみ考慮: 算定断面は4辺)

*5 ①+ $\sqrt{②^2+③^2}$ (2方向のモーメント考慮: 算定断面は3辺)

*6 ①+② (X方向のモーメントのみ考慮: 算定断面は3辺)

*7 はね出し縁に平行な方向 (X方向) に関する値

*8 はね出し縁に直交する方向 (Y方向) に関する値

条件の違いによる規準式の適合性の問題も含め、今後検討して行く必要がある。

2) EH-1,2: はね出し縁に平行な水平力のみを受けた場合の実験値は、計算値をそれぞれ14%(EH-1), 2%(EH-2)上回るだけで、比較的良い一致を示している。

3) EH-3,4: はね出し縁に平行な水平力と鉛直荷重を同時に受けた時にも、実験値と計算値は比較的良い一致を示した。

4) EH-5: はね出しを有する接合部で、はね出し縁に直交する水平力を受けた場合の実験値は、曲げ強度計算値とほぼ一致しており、算定断面を3辺としたせん断強度計算値より31%大きく、4辺とした場合より5%小さい。この実験ではせん断強度を確認できなかったが、その強度は、算定断面を4辺とした計算値に近いものと推測できる。

5) EH-6: はね出しのない接合部で、はね出し縁に直交する水平力を受けた場合の実験値は、計算値より6%小さい。計算では、終局伝達モーメント M_0 を、スラブの曲げ抵抗 M_r 、せん断力の偏心によるモーメント M_s 、柱側面のねじりによって伝達されるモーメント M_t 、それぞれの終局強度の累加としている。しかし、EH-6では、はね出しスラブによる拘束がないため、柱側面のねじりせん断破壊が、加力側のスラブのせん断破壊より先行して起こり、 M_s が終局強度に達しなかったために、計算値を下回ったと考えられる。EH-6の実験値から M_s 成分を逆算すると、終局値の0.62倍となる。

4. まとめ

フラットプレート構造の側柱接合部の実験を行い、せん断強度について、荷重条件や加力方向の違いによる規準式の適合性を検討した。せん断強度を計算する時の算定断面の設定として、はね出しのない場合には柱周り3辺、スラブ厚の4倍以上のはね出しを有する場合には、中柱と同じ柱周り4辺とした仮定は妥当であると考えられるが、今後、更にはね出し縁に直交するモーメントと鉛直力が作用する場合について、実験データを蓄積し、検討する必要があると思われる。

謝 辞

本研究は、NewRC総プロの一環である「超高層フラットスラブ建築物の開発研究委員会」(委員長 狩野芳一明大教授)のもとで行われたものである。実験の実施にあたり、明治大学大学院生 諏訪寛、'92年度卒論生 大久保浩光、下田佳隆 三君の助力を得た。ここに感謝の意を表します。

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, pp.106~109, 1988.12
- [2] ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89) and Commentary - ACI 318R-89, American Concrete Institute, pp.174~177, Nov. 1989
- [3] 吉崎征二, 狩野芳一: フラットプレート構造の柱-スラブ接合部に関する研究 その4 終局せん断強度算定法とその確証実験, 日本建築学会論文報告集, 第309号, pp.29~40, 昭和56年11月

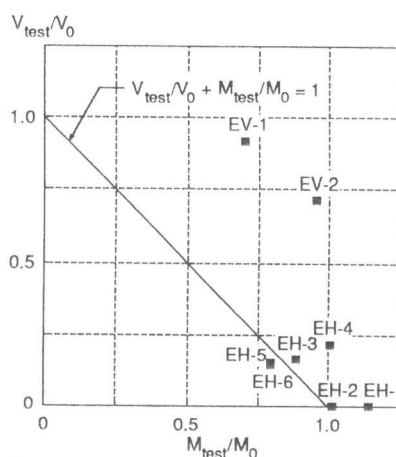


図-12 V_{test}/V_0 と M_{test}/M_0 の関係