

論文

[2096] 鉄筋コンクリート造有開口壁のせん断補強法およびせん断耐力評価に関する実験的研究

正会員 ○ 加藤大介 (新潟大学工学部)

正会員 村上幸靖 (新潟大学大学院)

1. まえがき

筆者らは、連層耐震壁を有する鉄筋コンクリート（以下RC）造建物を靱性設計することを念頭において、その場合に問題となる有開口耐震壁のせん断補強法に関する実験を行ってきた¹⁾（以下1987年度の実験）。その結果、有開口壁のせん断耐力を上昇させる開口横のせん断補強法としてX型筋とハ型筋が有効であることが分かったが、その最大耐力への寄与分は斜め筋の全断面の約半分であった。そこで、本論文では斜め筋の効果をより明らかにするため斜め筋比の高い試験体、さらに開口の偏在による効果を把握するために偏在開口の試験体について実験を行い、設計法に還元するための実験データの整理を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体 対象耐震壁は、階高 3.6m、スパン 5.4m、柱型 60cmx60cm、はり型 30cmx60cm の中低層建物の最下層とし、シアスパン比は弾塑性漸増載荷解析における終局時のシアスパン比 0.8 とした。また、開口周比はRC規準において耐震壁として扱える最大値の 0.4（せん断耐力に対する開口低減率 $\gamma=0.6$ ）とした。試験体は 1/4 スケールの 1 層 1 スパンモデルに縮小したが、上部のはりは、連層耐震壁であることと、片押し形式の載荷においてなるべく一様な分布荷重を加えることの 2 点を考慮し、高い剛性を持たせた。

表 1 (a) (b) に試験体の概要を示す。また、図 1 に試験体 W0-A2、W0-12X13 および W0E-A の配筋図を示す。表 1 (a) は柱型の断面と配筋であるが、主筋は壁の曲げ耐力を上昇させ、耐震壁が確実にせん断破壊するようにD13を 8 本配筋した。また、柱の下半分の帯筋は柱脚部の圧縮破壊や直接せん断破壊で壁としての耐力が決まることを防止するために、試験体 W0E-A の独立柱以外3-φ6-@45としてコンクリートを十分拘束した。表 1 (b) は壁板の断面と配筋であるが、壁筋としてφ4鉄筋を使用した。また、壁厚は 7.5cm、壁筋比を 0.46% である。

実験パラメータは開口の位置と開口横のせん断補強筋の有無である。試験体 W0-A2 はRC規準に従って既往の開口横の補強筋として開口 4 辺に D10 を 1 本ずつ計 4 本配筋したもので1987年度の実験の W0-A に対応するものである。試験体 W0-12X13 は既往の開口補強筋の代わりにせん断補強筋として左右

の開口横に D13 を 6 本ずつ計12本X

表 1 (a) 試験体の柱部分の断面と配筋

試験体	断面	主筋	主筋比	帯筋(下半分)	帯筋比	帯筋(上半分)	帯筋比
共通	(15×15)cm	8-D13	4.52%	3-φ6-@45	1.25%	2-φ6-@45	0.84%

(b) 試験体の壁部分の断面と配筋

試験体	開口周比	壁筋	壁厚	壁筋比	開口補強	斜め筋(58度)	斜筋等価壁筋比
W0-A2	0.4	2-φ4-@75 (共通)	7.5cm (共通)	0.46% (共通)	4-D10	-	-
W0-12×13	0.4				-	12-D13-X型	1.30%
W0E-A	0.4				2-D10, 2-D6	-	-
W	0				-	-	-

型筋として配筋したものである。なお、これは1987年度の試験体 W0-8X10 の X型筋量の約3倍にあたる。試験体 W0E-A は開口の偏在の効果を検討するために W0-A2 の開口を縦にして偏させたものである。また、比較のために無開口の試験体Wについても実験を行った。表1 (b)に以下の式で求めた斜め筋の等価壁筋比を示した。

$$P_{wd} = (\sum a d \cdot \cos \theta) / (b \cdot \rho \cdot \gamma)$$

ここで、 $\sum a d$ は斜め筋全断面積、 θ は水平面からの角度、 b は壁厚、 ρ は柱芯間距離である。試験体の鉄筋およびコンクリートの材料特性を表2 (a)(b)に示す。

2.2 荷重および測定計画 荷重装置を図2に示す。荷重は、壁中央部に上部固定下部ローラー支持のジャッキにより 31tonf の軸力を加えたのち、上部はりに両端ピン支持のジャッキにより左右交番の片押しによる水平力を加えることにより行った。荷重点は壁脚から 120cm の高さとし、荷重履歴は部材角で 1/400、1/200、1/100 をそれぞれ2回ずつ荷重した後、正方向で 1/50 まで荷重するものとした。測定は左右の加力点の水平変位（この平均を試験体の水平変位とした）の他に、各部分の変形、および、鉄筋の歪について行った。

3. 実験結果

3.1 破壊経過 図3 (a)~(d)に各試験体の荷重終了時でのひび割れ図を示す。開口を有する試験体はいずれも正負の1サイクル（部材角1/400）において柱脚部の曲げひび割れ、開口隅角部からのひび割れおよび開口横パネルのせん断ひび割れが観察された。また、試験体 W0-12 X13 では開口上下部分の斜め筋の定着終了部のひび割れが生じた。3サイクル（部材角1/200）ではいずれの試験体も壁パネルのせん断ひび割れが柱頭および柱脚に進展しており、また、柱主筋の一部が柱脚で引っ張り降伏歪に達してい

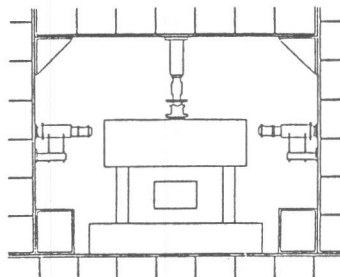


図2 荷重装置図

表2 (a) 加力開始日のコンクリートの性質

試験体名	W0-A2	W0-12X13	W0E-A	W
圧縮強度 (kg/cm ²)	363	392	362	366
圧縮強度時歪 (micro)	2593	2773	2984	2985

(b) 鉄筋の性質

鉄筋の種類	φ4	φ6	D6	D10	D13
σ _y (t/cm ²)	6.29	5.43	3.91	3.46	3.65
ε _y (micro)	3163	2779	2482	2113	2076

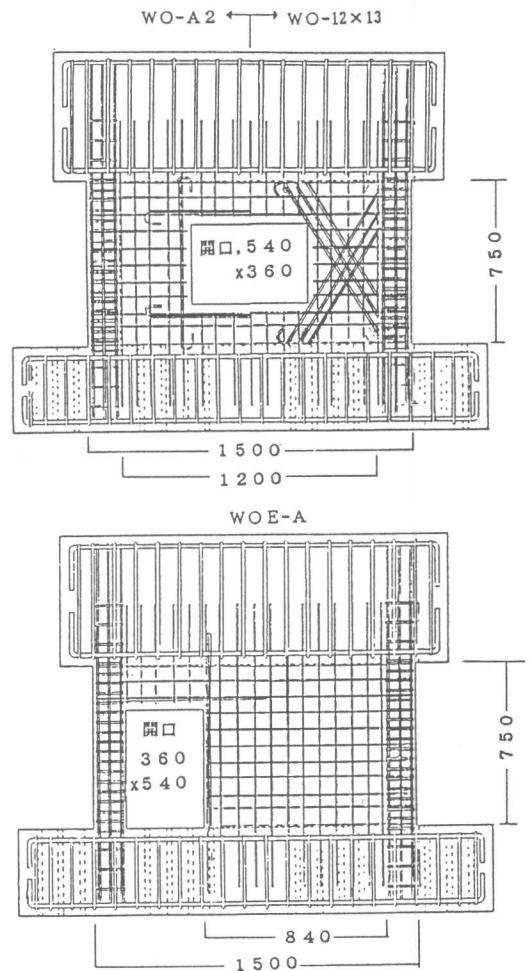


図1 試験体配筋図

る。5 サイクル（部材角1/100）では試験体 WO-A2 と WOE-A では開口横と柱脚部が激しく圧壊し、試験体 WO-12X13 では開口上下の壁パネルのひび割れ幅が増加し、試験体 W では壁脚部のスリップ破壊がみられた。

最終サイクル（部材角1/50）では有開口の試験体はいずれも開口横のせん断破壊による変形が支配的であったが、試験体 WO-12X13 では開口上下部分の斜め筋の定着終了部のひび割れ幅も顕著であった。無開口の試験体 W では壁脚が激しくスリップ破壊した。

3. 2 荷重と変形

図4 (a)～(d)に各試験体の荷重－変形曲線を示す。表3に各試験体の最大耐力時および包絡線上で耐力が最大耐力の80%に低下した時の変形を示す。各試験体とも部材角1/400の繰返しでは過去の最大応答点を指向する復元力特性を示したが、部材角1/200以後の繰返しでは、試験体 WO-A2 と WO-12X13 は過去の最大応答点の耐力の80%程度の点を指向し、履歴ループも変形レベルの増大にともない逆S字型のスリップ性状が顕著となった。しかし、試験体 WO-12X13 の耐力低下は少なかった。試験体 WOE-A と W では5サイクルに急激な耐力の低下が見られた。各変形での耐力を比較すると、無開口の試験体 W が最大耐力以後の耐力低下が最も大きいのに対し、斜め筋のある試験体 WO-12X13 は耐力低下が少なく、部材角1/50までほとんど耐力低下を生じず最も良好な靱性能を示した。なお、柱の軸方向変形より求めた壁の曲げ変形は最大耐力時で9～26%であり少なかった。

4. 実験結果の検討

4. 1 最大耐力の検討 表4に斜め筋のない試験体の最大耐力の計算値と実験値を比較して示す。試験体 WOE-A は加力方向によりせん断抵抗機構が異なるため別々に評価した。計算式は、曲げ耐力は終局強度略算式を、せん断耐力は、無開口とした広沢式²⁾、学会の終局強度設計指針案による強度式³⁾、および塩原による塑性理論式⁴⁾より求めた耐力にそれぞれ開口低減率 γ を乗じたものとしたが、学会式では開口横をそれぞれ分離して計算したせん断耐力も併せて示した。分離した片側柱付き壁は断面積の等しい等価な長方形断面に置き換え、端部に等価壁厚分を柱と考えた。また、壁高さは、実験においてせん断ひびわれの入る領域とし、壁上面から開口下面、および開口上面か

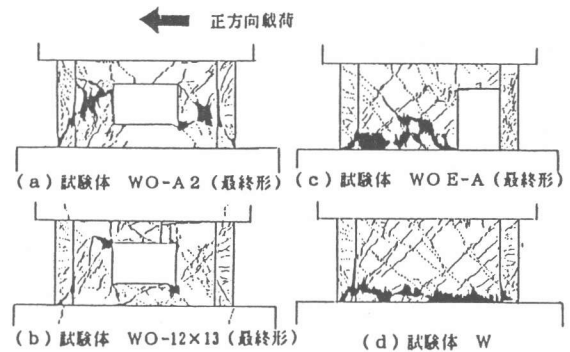


図3 ひび割れ図

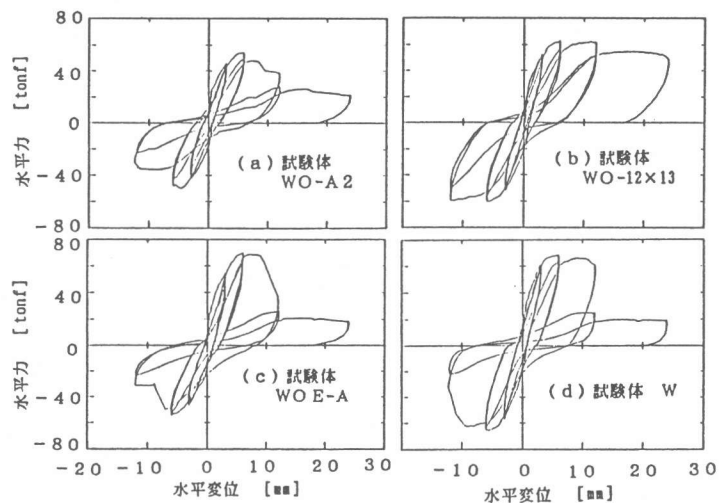


図4 荷重－変形曲線

ら壁脚までとした。なお、軸力は断面積比で分配される初期軸力とした。

各試験体で最大耐力を比較すると、開口を有するものの無開口に対する耐力比は試験体 W0-A2、W0E-A（正負）でそれぞれ78%、102%、79%であり、開口低減率の60%を大幅に上回っているが、これは無開口試験体が壁脚のスリップ破壊のために予想外に耐力が低かったためである。開口のあるもの同士で比較すると、偏在開口の方が中央開口より耐力が高く、また偏在開口のものは壁付きの柱型が圧縮になる側が高かった。開口低減率を用いた計算値はこれらの結果を評価し得ないが、分離した式ではその傾向が僅かに現れている。これらの結果を現実的に評価するためには柱型の効果の評価と作用軸力の評価が重要である。

4.2 コンクリートの応力 Collins & Vecchio⁵⁾により提案されたひび割れコンクリートの平均応力度-平均歪度関係を用いて、図5に示す各領域（試験体 W0-A2 と W0-12X13の例）で測定した各変形から求めた試験体 W0-A2、W0-12X13、W0E-A（正負）の各領域の最大耐力時の主応力図を図6に示す。また、最大耐力時の図6中に示した各領域のコンクリートの平均せん断応力度を表5に示す。結果を見ると試験体 W0-12X13の開口上部の応力がが試験体 W0-A2に比べ高いこと、お

表4 最大耐力の評価 [単位: ton]

試験体名	W0-A2	W0E-A		W	
	正	正	負	正	
実験値	53.5	70.0	54.1	68.6	
曲げ耐力時のせん断耐力	73.8	69.4		73.8	
広沢式 $\alpha \gamma$ (計/実)	38.9 (0.73)	38.9 (0.56)	38.9 (0.72)	64.8 (1.06)	
学会式	無開口 $\alpha \gamma$ (計/実)	54.1 (1.01)	54.1 (0.77)	54.1 (1.00)	90.2 (1.31)
	2枚の壁 (計/実)	48.1 (0.90)	53.9 (0.77)	51.8 (0.96)	-
	塩原式 $\alpha \gamma$ (計/実)	50.0 (0.93)	50.0 (0.71)	50.0 (0.92)	83.3 (1.21)

表3 変形能の比較

試験体名		W0-A2	W0-12X13	W0E-A		W
加力方向		正	正	正	負	正
最大耐力時	荷重 (t)	53.5	62.8	70.0	54.1	68.6
	変形 (mm) 部材角 (rad)	6 1/200	6 1/200	6 1/200	-6 -1/200	6 1/200
最大耐力時の80%時	荷重 (t)	42.8	50.2	56.0	43.3	54.9
	変形 (mm) 部材角 (rad)	9.1 1/132	24.0 1/50	10.0 1/120	8.1 1/148	12.0 1/100

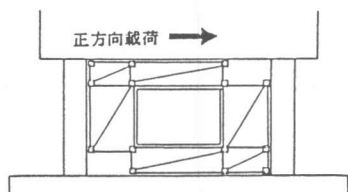


図5 W0-A2とW0-12x13のパネルの測定位置

表5 耐震壁各パネルの平均せん断応力度の測定歪による推定 [単位: kg/cm²]

試験体名		W0-A2	W0-12X13	W0E-A		W
加力方向		正	正	正	負	正
実験値		89.4	103.4	94.3	72.9	67.8
各領域の断面平均均力度	1	63.1	30.9	-0.4	-101.7	114.0
	2	113.6	160.9	142.0	-105.9	58.1
	3	129.2	135.1	128.2	-64.4	84.1
	4	102.6	167.7	148.6	1.8	89.7
	5	127.9	174.8	136.1	-41.1	15.6
	6	26.7	25.4	9.1	-37.3	145.5
	7	-	-	127.8	-54.6	117.5

表6 (a) 耐震壁各パネルの壁筋の負担力 [単位: ton f、()内は補強筋が降伏する場合に対する比]

試験体名		W0-A2	W0-12X13	W0E-A		W
加力方向		正	正	正	負	正
壁筋	引張力	正加力側壁 1.57 (38%)	2.13 (52%)	-	-	-
	圧縮力	負加力側壁 1.53 (37%)	0.60 (15%)	-	-	-
	中計	3.10 (38%)	2.73 (34%)	4.20 (43%)	1.06 (11%)	5.85 (42%)
壁筋	引張力	正加力側壁 2.70 (64%)	0.97 (24%)	-	-	-
	圧縮力	負加力側壁 2.51 (61%)	2.22 (54%)	-	-	-
	中計	5.21 (64%)	3.19 (39%)	4.45 (64%)	3.92 (60%)	2.45 (27%)

(b) 斜め筋の負担力

試験体名		W0-12X13
斜め筋	引張力	正加力側壁 5.53 (76%)
	圧縮力	負加力側壁 11.63 (80%)
斜め筋	引張力	正加力側壁 1.11 (15%)
	圧縮力	負加力側壁 5.56 (77%)
中計		18.30 (64%)

よび試験体 WOE-A の主応力方向が柱型の存在により正負で明確に異なることが分かる。また、壁の平均せん断応力度は圧縮力が卓越する領域の方が引っ張り力が卓越する領域に比べ高くなっていることがわかるが、いずれも実験値と比較すると計算値はかなり高い。この理由は、実験ではひび割れ本数が少なく一様なひび割れを仮定した仮定に合わないこと、および、コンクリート強度が高いためにコンクリートの平均応力度-平均歪度関係がCollinsらの提案式と異なっている可能性があること、等が考えられる。

4. 3 補強筋の応力 本節では最大耐力時における壁横筋と斜め筋の応力を推定し、最大耐力に対する効果を検討する。壁横筋は各開口横（無開口は壁全体）の中央に添付した歪ゲージの値より応力を算出し、1本当たりの平均を求め、対象部分を横切る全ての横補強筋の本数を乗じて横補強筋による引っ張り力とした。また、斜め筋は壁面高さ方向の中央を通る水平面位置での歪ゲージの値より同様に求めた。ただし、斜め筋の応力はその水平方向成分とした。なお、補強筋の応力は鉄筋の応力度-歪関係を完全弾塑性復元力特性にモデル化し実際に実験で得られた歪の履歴を与えることにより求めた。

表6(a)(b)に最大耐力時の壁横筋と斜め筋の応力を、正加力側の開口横部分（正加力で引っ張り力が卓越する側）と負加力側の開口横部分別に、さらに、斜め筋については引っ張りおよび圧縮を受けるもの別に示す。（）内は補強筋が降伏する場合に対する比であるが、多くのせん断補強筋が降伏レベルに達していない。斜め筋については引っ張り力の方が圧縮力より大きいが、斜め筋の応力は全て降伏したとする場合の64%であった。

4. 4 斜め筋の効果の検討 表7に試験体 W0-A2 と W0-12X13 のせん断耐力の計算値と実験値を比較して示す。計算式は、斜め筋を無視した無開口として求まる広沢式 Q_s に開口低減率 γ を乗じたものに、斜め筋の効果を算入した以下の式で求めた。

$$Q_{su} = \gamma \cdot Q_s + \sum (ad \cdot \sigma_y) \cdot \cos \theta$$

ここで、 σ_y は斜め筋の降伏応力度、 $\sum ad$ は斜め筋全断面積、 θ は水平面からの角度であるが、斜め筋は引っ張りおよび圧縮両方に有効であると考えた。斜め筋の効果は、試験体 W0-12X13 の試験体 W0-A2 からの計算値と実験値の増分を比較して求めると30%であった。これは1987年の実験の52~71%と比べ低くなっている。この理由は試験体としての同一変形で比べると斜め筋量が多くなれば定着端でのひび割れにより斜め筋の軸歪が小さくなるためである。

そこで、斜め筋の効果をより詳細に検討するために、水平変位と各パネルの各方向別の斜め筋の負担水平力の関係の包絡線を図7に示す。図中には斜め筋が全て降伏したときの水平力と試験体 W0-12X13 の試験体 W0-A2

からの水平力増分も示した。図によると斜め筋の

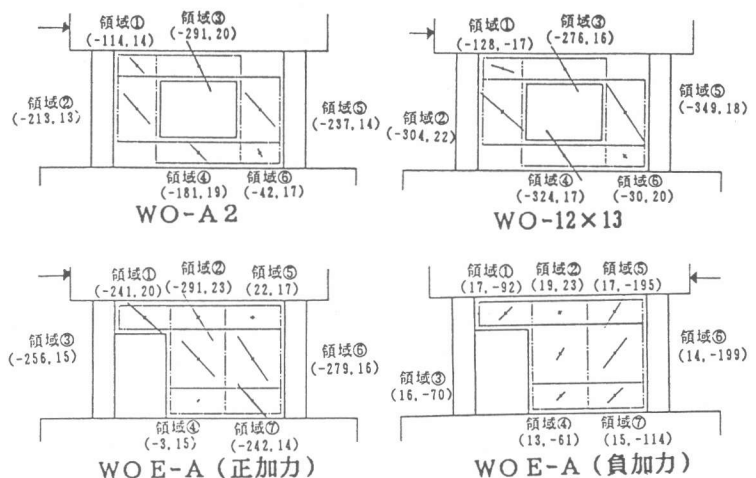


図6 試験体各領域の主応力図（単位：kg/cm²、引張：正）

応力は実験終了まで降伏レベルに達しないが、試験体の耐力増分は最終的に降伏レベルの値に達している。最大荷重時でみると試験体の耐力増分は斜め筋の引っ張り力による耐力増分とほぼ等しいことが分かる。これは1987年の実験と対応する。すなわち、斜め筋の効果としては引っ張り筋分だけ有効であり、その限界は定着或は他の破壊モードにより定まると言える。

5. まとめ

開口を有する耐震壁の静加力実験を行い、せん断補強としての斜め筋の効果と開口偏在の効果を検討し、以下の結論・今後の課題を得た。

(1) 実験値における斜め筋による最大耐力の増分は引っ張りと圧縮に有効だとした計算値に対して見かけ上 30% であるが、引っ張り筋による耐力増分量とほぼ対応しており、斜め筋の効果としては引っ張り筋分だけ有効であり、その限界は定着或は他の破壊モードにより定まると言える。

(2) 斜め筋は靱性能を改善するのに有効であった。これは、斜め圧縮筋のコンクリートの負担を軽減する効果であり、有開口耐震壁の靱性設計において等価コンクリート断面としての評価が可能である。

(3) 開口偏在のものは中央開口より耐力が高く、また加力方向で比較すると壁付きの柱型が圧縮になる側が高かった。これらの結果を現実的に評価するためには柱型の効果の評価と作用軸力の評価が重要である。

[謝辞]

本研究は文部省科学研究費補助金・試験研究(1) (課題番号：62850103、研究代表者：東京大学青山博之教授)により行った。実験およびデータ解析を行うに当たり児玉義昭氏(森本組)と金原和武氏(構造計画研究所)に協力いただいた。ここに関係各位に謝意を表します。

[参考文献]

- (1) 加藤大介：鉄筋コンクリート造有開口壁のせん断補強法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集第10巻第3号、1988
- (2) 広沢雅也：既往の鉄筋コンクリート造耐震壁に関する実験資料とその解析、建築研究所資料、No. 6, 1975
- (3) 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)、建築学会
- (4) 塩原等：塑性理論を応用した鉄筋コンクリート耐震壁の終局強度算定方法、コンクリート工学論文、Vol. 25, No. 8, Aug., 1987
- (5) Vecchio, F. J., and Collins, M. p., "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear", ACI Journal, V. 83, No. 2, Mar.-Apr., 1986, pp219-231

表7 X型筋の効果

試験体名		WO-A2	WO-12×13
加力方向		正	正
計算値	X型筋以外のせん断耐力 [t]	38.9	40.0
	X型筋の寄与 [t]	0.0	29.5
	せん断耐力 [t]	38.9	69.5
	WO-A2からの増減 [t]	0.0	+30.6
実験値	最大耐力 (実験値/計算値) [t]	53.5 (1.37)	62.8 (0.91)
	WO-A2からの増減 (実験値/計算値) [t]	0.0	9.3 (0.30)

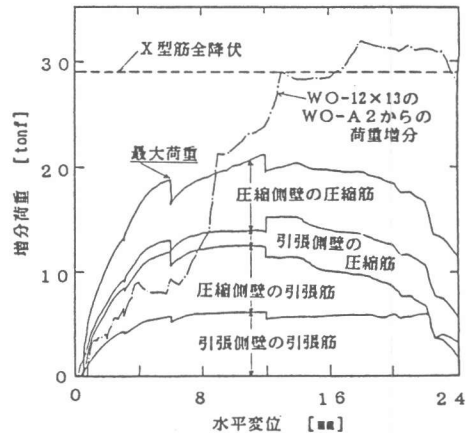


図7 X型筋による荷重増分