

# 論文 高強度鉄筋コンクリート梁の最小せん断鉄筋規準に関する研究

尹 永洙<sup>\*1</sup>・張 一泳<sup>\*2</sup>・李 昇勲<sup>\*3</sup>

**要旨：**67MPaおよび87MPaの強度を持つ高強度および超高強度鉄筋コンクリート梁に対して、圧縮強度の増加による最小せん断鉄筋の役割と、それによるせん断挙動を検討することが本研究の目的であり、全部で8個の実物の大きさの実験供試体に対して実験を行った。最小せん断鉄筋比はACI 89規準および最近改正されたカナダのCSA 94規準に基づいており、韓国(KCI 88)および日本(JSCE 86)の規準も検討した。終局状態の部材の挙動、じん性および保有耐力などのせん断の諸特性を分析し、また破壊形状を考察した。今後の高強度コンクリートを用いた構造物のせん断設計をするための基礎資料を提供したい。

**キーワード：**高強度コンクリート、せん断強度、最小せん断鉄筋、じん性、保有耐力

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート梁のせん断挙動に対する研究は多くの研究者達の努力にも拘わらず、今でも明確に究明されていない複雑な問題の一つである。鉄筋コンクリート構造物の設計において、必ず防止しなければならないことはせん断挙動による脆性破壊であり、このような挙動は鉄筋コンクリート部材の耐力を曲げ耐力以下に減少させるばかりでなく、部材のじん性を著しく減少させるためである。また、最近の構造物は超高層化、大型化、そして特殊化されつつあり、コンクリートの高強度化は世界的にも積極的な研究が行われている[1-5]。したがって、高強度コンクリートを構造物に使用する前にコンクリート圧縮強度の増加による部材のせん断性能および破壊形状に対する検討を行わなければならない。高強度コンクリートの引張強度は普通強度のコンクリートのそれより若干大きくなり、せん断ひびわれ発生時のせん断強度も増加するために最小せん断補強筋の量も再検討する必要がある。また高強度コンクリートの場合は、骨材を貫通するひびわれ面が生じるため斜めひびわれ発生以後の保有せん断耐力が普通強度コンクリートに比べて減少することが知られている。

そこで本研究では、コンクリート梁の高強度化を念頭において、最近改正されたACI 89[6]およびCSA 94[7]の最小せん断鉄筋の規準に対して、実物体の寸法の実験を通じて高強度コンクリート梁のせん断耐力と挙動を分析した。

## 2. 最小せん断鉄筋に関する各国の規準

鉄筋コンクリート梁の最小せん断鉄筋量における規準は以下の通りである。

ACI 83[8]、CSA 84[9]およびKCI 88[10]の場合：

$$A_v = \frac{0.35}{f_y} (b_w s) \quad (1)$$

\* 1 三星建設（株）技術研究所先任研究員、工博（正会員）

\* 2 金鳥工科大学助教授 土木工学科、工博（正会員）

\* 3 三星建設（株）技術研究所主任研究員、工修（正会員）

JCI 86 [11] の場合 :

$$A_v = 0.0015(b_w s) \quad (2)$$

CSA 94 の場合はコンクリートの圧縮強度の関数で表せる。

$$A_v = \frac{0.06\sqrt{f_c}}{f_y} (b_w s) \quad (3)$$

ACI 89 (1992年改正) の場合は次の二つの方法の中から一つを選択する。

$$A_v = \frac{0.35}{f_y} (b_w s)$$

ここで、せん断抵抗強度は  $V_c = 0.167\sqrt{f_c} b_w d$  で求められ、 $V_c \geq 0.167\sqrt{f_c} b_w d$  を満足しなければならない。

または、 $f_c' = 69 \text{ MPa}$  を基準として

$$A_v = \frac{0.35}{f_y} (b_w s) \quad (f_c' \leq 69 \text{ MPa} \text{ の場合})$$

$$A_v = \frac{f_c'}{35} \cdot \frac{0.35}{f_y} (b_w s) \leq \frac{1.05}{f_y} (b_w s) \quad (f_c' > 69 \text{ MPa} \text{ の場合}) \quad (4)$$

これらの各規準を図式化し、

図-1 に表した。ここで、

$A_v$  : 最小垂直せん断鉄筋量

$b_w$  : 腹部の幅

$s$  : せん断鉄筋の間隔

$d$  : 梁の有効高さ

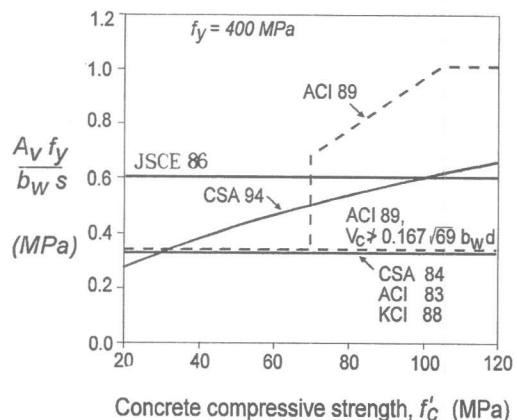
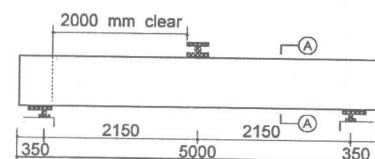


図-1 最小せん断鉄筋に関する各規準

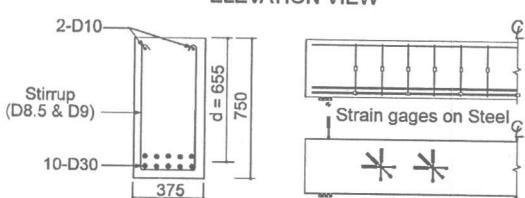
### 3. 実験

#### 3.1 実験供試体の計画

本研究では高強度および超高強度コンクリートを用いて各強度別に4個ずつ合計8個の実験供試体を作製した。強度別のコンクリートの平均圧縮強度は67MPaと87MPaであり、圧縮強度別にせん断補強筋の量を変化させたことが主要変数である。また、せん断メカニズムが主にはり作用によって伝達される場合は、一般的にせん断スパン比が2.5以上であることから、本実験ではせん断スパン比を3.2とした。



ELEVATION VIEW



SECTION A-A

INSTRUMENTATION

図-2 実験供試体の設置および寸法

実験供試体の設置および寸法は図-2に表した。

実験供試体の断面は375×750mm、純径間は4.3mである。すなわち、せん断スパン比、載荷装置の能力(UTM 200ton)、せん断破壊の誘導、Under Reinforced設計およびせん断ひびわれ発生時の純粋せん断メカニズムによる影響だけを考慮するために、縦方向のひびわれ防止用の鉄筋配筋は避けながら実験供試体の最適断面を決定した。また、支圧破壊の防止と主鉄筋の定着の確保のために両端に350mmずつ余裕長さを設けた。本実験はコンクリート強度別に、高強度コンクリート実験供試体はM-シリーズ、超高強度コンクリート実験供試体はH-シリーズと区分しており、各実験供試体の諸特性は表-1に示した。

表-1 各実験供試体の諸特性

Beam Specimens	Concrete Compressive Strength (MPa)	Shear Reinforcement			
		Size	$A_v f_y / b_w s$ (MPa)	Spacing (mm)	Code Provisions
M-0	67	-	0.0	-	
M-1		D8	0.35	325	ACI83, CSA84, KCI88
M-2		D9.5	0.50	325	CSA94
M-3		D9.5	0.70	230	ACI89
H-0	87	-	0.0	-	
H-1		D8	0.35	325	ACI83, CSA84, KCI88
H-2		D9.5	0.60	270	CSA94, JSCE86
H-3		D9.5	1.00	160	ACI89

### 3.2 コンクリートおよび鉄筋の材料特性

図-3に示すようにコンクリート円柱供試体の圧縮強度の試験結果、高強度コンクリート(M-シリーズ)と超高強度コンクリート(H-シリーズ)の平均圧縮強度は67MPaと87MPaであり、また平均割裂引張強度は4.6MPaと6.1MPaが得られ、平均曲げ引張強度は5.9と6.9MPaである。各実験供試体の引張鉄筋はD30(SD40, 10本)を2段配置し、主鉄筋比は0.028である。すなわち、主鉄筋比を大きくしてコンクリート圧縮強度とせん断補強筋の有無および量に拘わらずせん断破壊が先行させるためであるが、基本的には釣合鉄筋比以下となるように設計を行った。せん断補強筋は正確な量を算定するためにD8とD9.5を用いた(直径基準)。図-4に鉄筋の材料特性を示した。

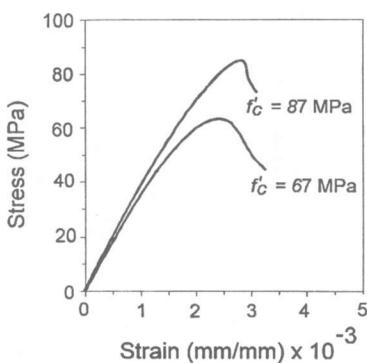


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

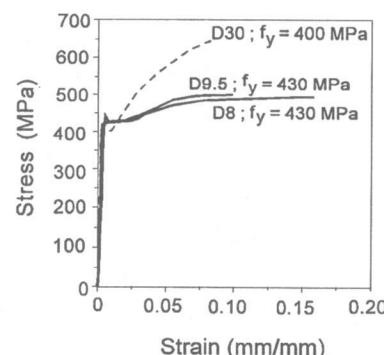


図-4 鉄筋の応力-ひずみ関係

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 終局せん断耐力

図-5で示したようにせん断補強筋がない場合(M-0とH-0)は、コンクリートの圧縮強度が増加することによって終局せん断耐力(最大耐力)は増加しており、強度が67MPaの高強度コンクリート場合は $A_v f_y / b_w s$ が0.35-0.5(MPa)である時に最も大きい増加の傾向が見られた。また、強度が87MPaの超高強度コンクリート梁の場合は、せん断補強筋の量と終局せん断耐力がほぼ比例して増加した。

### 4.2 じん性特性

図-6に各実験供試体のじん性特性をせん断力とせん断ひずみとの関係として表した。コンクリート強度が大きいほど斜めひびわれ発生時のせん断力は増加した。また、斜めひびわれ発生時および破壊時のせん断力もせん断補強筋の量によって増加した。すなわち、せん断補強筋の適切な配筋は、部材のじん性を増加させる因子となる。しかも、その量に比例して増加することが予想される。

### 4.3 保有せん断耐力

保有せん断耐力というのは斜めひびわれ発生時の脆性破壊をある程度延長させる能力であり、終局せん断強度( $V_u$ )と斜めひびわれ発生時のせん断強度( $V_{cr}$ )との差( $V_u - V_{cr}$ )として定義できる[4]。このような値は、斜めひびわれ発生時から終局破壊に至る時までの部材が持つてゐるせん断耐力の量を推定する値であり、また、 $V_u / V_{cr}$ の指数形式で表す時もある。

表-2で示したように、全体保有せん断耐力(Total Reserved Shear Strength)はコンクリート強度に拘わらずせん断補強筋の量が多くなるほど増加した。もし、せん断補強筋が降伏した以降の硬化特性の効果を考慮していないければ、主引張鉄筋の影響を含むコンクリートだけが持つ保有せん断耐力は( $V_u - V_s$ ) -  $V_{cr}$ と $(V_u - V_s) / V_{cr}$ の形で表せ、これらの値もせん断補強筋の量が増加すればコンクリートの圧縮強度に拘わらず増加する傾向が見られた。

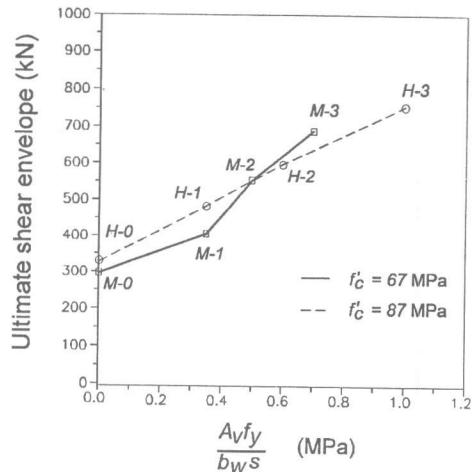


図-5 せん断補強筋による終局せん断耐力の増加

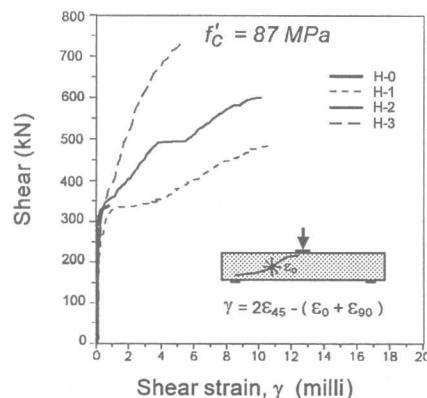
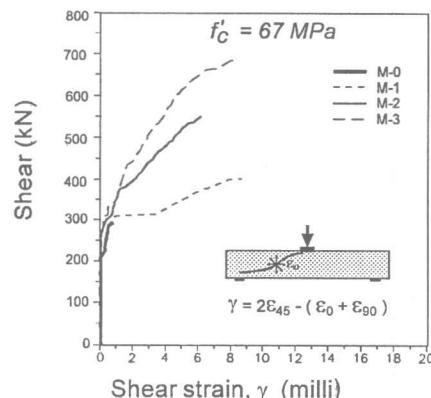


図-6 せん断力とせん断ひずみ

これはせん断補強筋によっていろいろなせん断メカニズムを向上させる効果があるためである。例えば、せん断補強筋が主引張鉄筋を支持しながらコンクリートの割裂ひびわれを防止し、だば効果を増加させる。また、斜めひびわれの幅と進展を抑える効果があり、コンクリート圧縮部の拘束力および骨材のかみ合いによるせん断抵抗力（せん断伝達力）も増加させる。しかし、M-1とH-1の場合は相対的に低いコンクリートだけの保有せん断耐力を示しており、少ないせん断補強筋の量では前述したせん断メカニズムの上昇効果は期待できないのである。

表-2 各実験供試体の保有せん断耐力

Beam Specimens	$V_{cr}$ (kN)	$V_s$ (kN)	$V_u$ (kN)	全体保有せん断力		コンクリート保有せん断力	
				$V_u - V_{cr}$ (kN)	$V_u / V_{cr}$	$(V_u - V_s) - V_{cr}$ (kN)	$(V_u - V_s) / V_{cr}$
M-0	289.1	0.0	295.8	6.7	1.02	6.7	1.02
M-1	304.7	86.0	404.8	100.1	1.33	14.1	1.05
M-2	306.9	122.8	551.6	244.7	1.79	121.9	1.40
M-3	333.6	171.9	689.4	355.8	2.07	183.9	1.55
H-0	311.4	0.0	326.9	15.5	1.05	15.5	1.05
H-1	322.5	86.0	482.6	160.1	1.50	74.1	1.23
H-2	333.6	147.4	598.3	264.7	1.79	117.3	1.35
H-3	355.8	245.6	778.4	422.6	2.19	177.0	1.50

#### 4.4 破壊形状

各実験供試体の最終破壊形状を図-7に示した。

載荷荷重の初期段階においては、各実験供試体とともに円柱供試体の試験から得られた曲げ引張強度の値に基づく予想荷重値に達した時に、梁の中央部に初期曲げひびわれが発生し、荷重が増加するとせん断スパンの全区間ににおいて曲げひびわれが発生した。

せん断補強筋がないM-0とH-0の場合、斜めひびわれ発生時の荷重はほとんど終局耐力値に近く、支点部付近の曲げひびわれが加力点に向かって斜めひびわれとして成長した。あるいは、せん断スパンの中間部において急に斜めひびわれが発生した。この斜めひびわれは荷重の増加とともに、さらに進展してひびわれの幅は大きくなり、引張鉄筋と交差する部分に応力が集中されて引張鉄筋に沿う割裂ひびわれが発生した。さらに、加力点付近において、コンクリートの圧縮破壊が発生して終局破壊した。

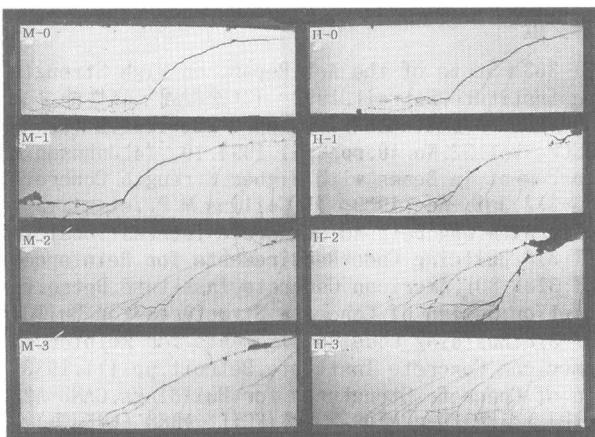


図-7 終局破壊の形状

このようにせん断補強筋がない実験供試体の破壊形状はコンクリートの圧縮強度が大きいほど爆発的な脆性破壊をしており、破壊面はもっとも滑らかな形状である。

コンクリート強度の増加とは関係なく、同じ量の最小せん断鉄筋が補強されたM-1とH-1の場合、最小せん断補強筋だけではどのような効果も得られなかった。破壊面の形状が緩やかな角にならなくて、一つのせん断補強筋が破裂しながら隣の補強筋も連鎖的に爆音とともに破断した。すなわち、一つの斜めひびわれの形成で終局状態に至り、また引張鉄筋に沿う割裂ひびわれの発生を制御することもできなかった。コンクリート強度によってせん断補強筋の量も増加させたM-2、M-3、H-2およびH-3の実験供試体を見ると、適当な量でせん断補強した場合において、せん断補強筋のせん断抵抗によってひびわれの進展と幅を制御して、斜めひびわれ発生以後も継続的な耐力を保つようになった。すなわち、斜めひびわれ発生以後も耐力の再分配が行われ、対称的なひびわれが発生して最終的には比較的大きな耐力で破壊された。

## 5.まとめ

(1) せん断補強筋がない場合、コンクリート圧縮強度が増加することによって斜めひびわれ発生時および終局破壊時のせん断強度は大きくなる。(2) せん断補強筋の適切な配筋は、部材のじん性を増加させる因子となる。しかも、その量に比例して増加することが予想され、耐力の再分配など効率の良い挙動となる。(3) しかし、コンクリート圧縮強度とは無関係に、一定値の最小せん断鉄筋量を規定したACI83、CSA84、KCI88およびJSCE86の規準においては、高強度および超高強度コンクリートを用いた場合、(2)のような安定した挙動は期待できないと思われる。すなわち、コンクリート強度の増加に伴って最小せん断鉄筋量も増加させるべきであり、コンクリート強度別の最小せん断鉄筋量の新たな規準を設ける必要がある。(4) 今後の超高強度化の傾向にしたがって、コンクリート強度の上下限の基準値を69MPaとしたACI318-89の規準も再検討する必要があると思われる。

## 謝辞

本研究は、韓国建設交通部と建設技術研究院の建設技術研究開発事業の一環として行われた研究課題”国内事情に合う高強度コンクリートの開発および実用化研究”的一部であり、ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- (1) ACI 363 : State of the Art Report on High Strength Concrete", ACI363R-92, American Concrete Institute, Detroit, 1992 (2) 邊根周：高性能コンクリートの研究動向および展望、韓国コンクリート学会誌、第6券1号、pp.2-23、1994.2 (韓国語) (3) コンクリート工学：小特集New RC, JSCE, Vol.32, No.10, pp.6-61, 1994.10 (4) Johnson, M.K. and Ramirez, J.A.: Minimum Shear Reinforcement in Beams with Higher Strength Concrete, ACI Structure Journal, Vol.86, No.4, pp.376-382, Jul.-Aug. 1989 (5) Collins, M.P., et al.: Structural Design Consideration for High-Strength Concrete, ACI, Concrete International, Vol.15, No.5, pp.27-34, May 1993 (6) ACI 318:Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318M-89/ACI 318R-89), American Concrete Institute, Detroit, pp.353, 1989 (7) Canadian Standard Association:Design of Concrete Structures for Buildings, CAN3-A23, 3-M94 (Proposal) (8) ACI 318:Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-83), American Concrete Institute, Detroit, pp.111, 1983 (9) Canadian Standard Association: Design of Concrete Structures for Buildings, CAN3-A23, 3-M84, pp.281, Rexdale, Ontario, 1984 (10) 韓国コンクリート標準示方書(KCI)、1988 (韓国語) (11) 日本コンクリート標準示方書(JSCE)、1986(1991年改正) (12) ACI-ASCE 426:Shear Strength of Concrete Members, Proceedings of ASCE, Vol. 99, No. ST6, pp.1091-1187, Jun. 1973