

論文 中空断面 RC 部材のせん断耐荷挙動に関する検討

井上 晋*1・家村 浩和*2・田中 克直*3

要旨：中空断面 RC はり部材に対してせん断スパン有効高さ比を変化させた載荷試験を実施し、そのせん断耐荷性状を中実断面の実験結果と比較・検討した。また、そのせん断耐荷挙動を Collins らの提案する修正圧縮場理論を用いて解析的に検討し、スターラップひずみ、コンクリートの主圧縮ひずみ等の解析値を実験値と比較した。これらの結果をもとに、コンクリートが負担するせん断力に関する考え方について論じた。

キーワード：中空断面, 修正圧縮場理論, せん断耐荷挙動, コンクリートのせん断抵抗

1. はじめに

高橋脚を設計する場合、橋脚の自重を軽減し、橋脚に作用する地震力を低減することを目的として、中空断面が採用されることが多い。しかしながら、中空断面では断面内に空間があるため、主鉄筋および帯鉄筋によって囲まれた部分のコンクリートが十分に拘束されず、さらには、ウェブ幅の減少と相まって、地震荷重作用時のせん断耐力、特にコンクリートのせん断耐力が著しく低下することが懸念される。従って、中空断面を採用するに際しては、そのせん断抵抗メカニズムを明らかにしておくことが重要となる。

本研究では、上述の点に関する基礎資料を得ることを目的として、中空断面 RC はり部材に対してせん断スパン有効高さ比を変化させた正負交番載荷試験を実施し、そのせん断耐荷挙動を中実断面と比較・検討することにより、中空断面特有の問題点を整理した。さらに、Collins らの提案する修正圧縮場理論[1]を用いて、スターラップひずみ、コンクリートの主圧縮・引張ひずみ等を解析し、実験値と比較することにより、そのせん断耐荷挙動について検討した。これらの結果をもとに、正負交番荷重下のコンクリートが負担するせん断力に関する考え方について論じた。

2. 中空断面 RC はり部材の載荷試験

2.1 試験概要

本研究で用いた供試体の断面形状・寸法を図-1に示す。中空断面はりでは、 $20 \times 20 \text{cm}$ の断面内に $12 \times 10 \text{cm}$ の中空部を設けた。なお、比較のために用いる中実断面はりの外形寸法は中空断面と同一とした。載荷試験の曲げスパン長は一律 60cm とし、せん断スパン長を 45cm , 55cm , 65cm (せん断スパン有効高さ比 $a/d=2.51, 3.07, 3.63$) の3通り設けた。コンクリートの設計圧縮強度は $f'_c=350 \text{kgf/cm}^2(34.3 \text{N/mm}^2)$ とし、軸方向鉄筋として 5-D10 (SD295A, $f_{sy}=3380 \text{kgf/cm}^2(331 \text{N/mm}^2)$) を対称に配置した(鉄筋比 $p=1.0\%$)。また、いずれの供試体も一方単調荷重下ではせん断破壊が先行しないように、 135° フック付き $\phi 6 \text{mm}$ 閉合矩形スターラップ ($f_{wy}=3760 \text{kgf/cm}^2(368 \text{N/mm}^2)$) を 9cm 間隔で配置している。

*1 大阪工業大学助教授 工学部土木工学科, 工博 (正会員)

*2 京都大学教授 工学部土木工学科, 工博

*3 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻

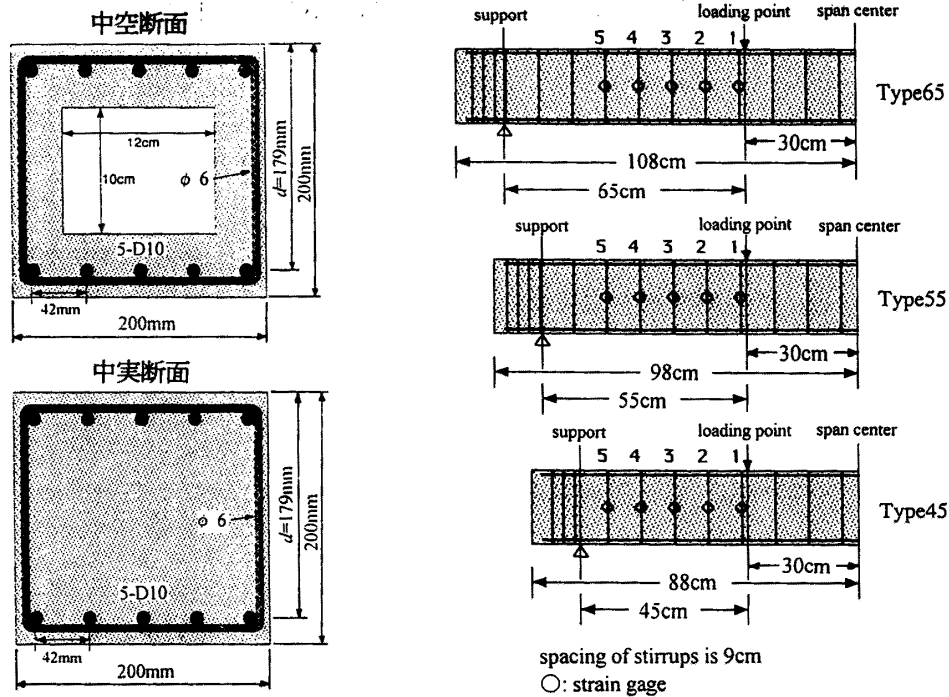


図-1 供試体の断面形状・寸法

載荷方法は変位制御方式による対称2点載荷の一方単調載荷試験（Aタイプ：中空のみ）および正負交番載荷試験（Bタイプ：降伏変位 $\delta_y = 7\text{mm}$ の整数倍で各1回ずつの正負交番繰返し）とし、荷重、スパン中央変位のほかスターラップのひずみ（図-1参照）、せん断スパン内で載荷点より10cmおよび19cmの位置におけるコンクリートの主圧縮・主引張りひずみを計測した。載荷試験に用いた供試体の詳細を表-1に示す。

2.2 試験結果および考察

(1) ひび割れ性状および破壊形式

図-2にBタイプの供試体の1 δ_y 載荷終了後のせん断スパンのひび割れ状況を示す。中空は

表-1 供試体の詳細および実験結果

供試体	断面形状	せん断スパン比 a/d	載荷方法	*1	*1	*1	*1	曲げ降伏荷重実測値 P_y (tonf)	最大荷重実測値 P_{max} (tonf)	*2 破壊形式
				曲げ破壊荷重計算値 $P_{u,cal}$ (tonf)	せん断破壊荷重計算値 $P_{s,cal}$ (tonf)	V_{cd} (tonf)	V_{sd} (tonf)			
H45A	中空	2.51	一方向	9.06	11.06	1.85	3.68	10.39	12.46	FF
H55A	中空	3.07	一方向	7.47	11.23	1.94	3.68	8.77	10.16	FF
H65A	中空	3.63	一方向	6.27	11.07	1.86	3.68	7.15	8.48	FF
H45B	中空	2.51	正負交番	9.08	11.11	1.88	3.68	9.45	11.84	FS
S45B	中実	2.51	正負交番	9.01	13.93	3.29	3.68	9.71	11.84	FS
H55B	中空	3.07	正負交番	7.37	10.94	1.79	3.68	8.55	9.38	FS
S55B	中実	3.07	正負交番	7.37	13.93	3.29	3.68	9.45	9.84	FS
H65B	中空	3.63	正負交番	6.34	11.29	1.97	3.68	7.19	8.06	FS
S65B	中実	3.63	正負交番	6.27	14.18	3.41	3.68	7.78	8.20	FF

*1 土木学会コンクリート標準示方書による（ただし部材係数 $\gamma_b = 1.0$ ）

*2 FF：曲げ破壊，FS：曲げ降伏後のせん断破壊

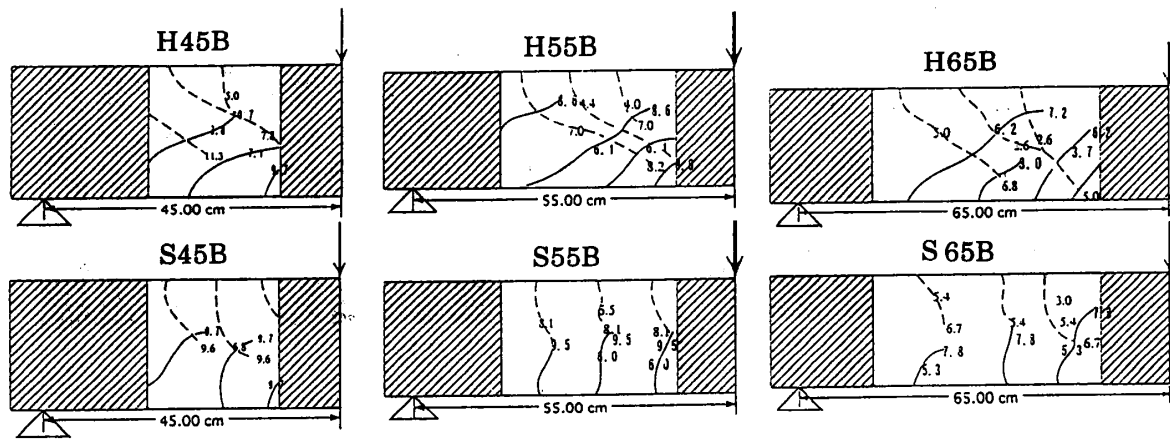


図-2 せん断スパンのひび割れ性状 (1 δ 終了時)

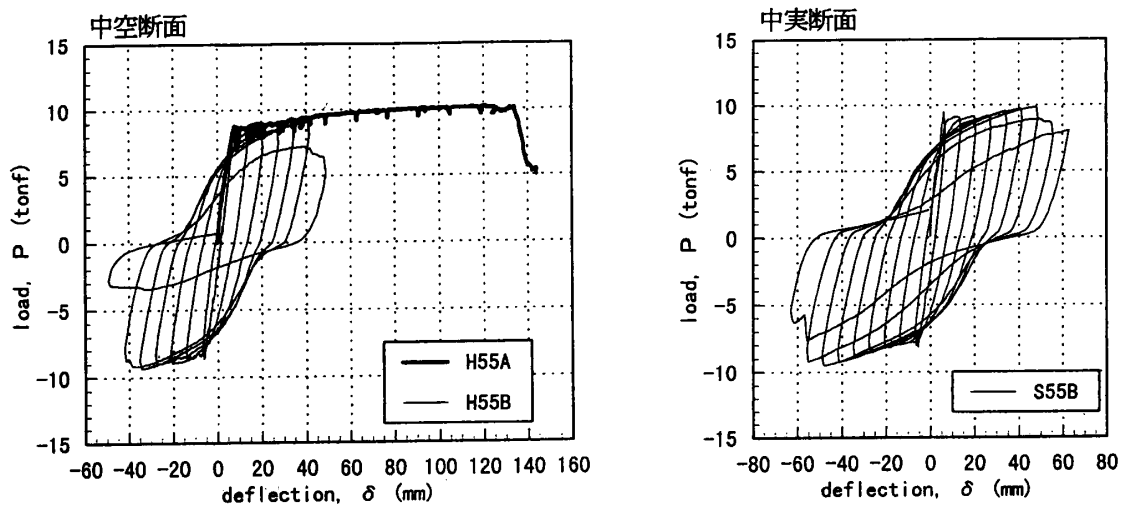


図-3 荷重-スパン中央変位関係 ($a/d=3.07$)

りと中実はりではひび割れ状況が異なり、前者では a/d によらずいずれも斜めひび割れが載荷初期段階から卓越しているのに対し、後者では S45B を除き、1 δ 終了段階では顕著な斜めひび割れは認められない。また、破壊形式は、一方向載荷の A タイプの供試体はすべて曲げ破壊であったが、B タイプの正負交番載荷では、S65B を除き、すべて曲げ降伏後の繰返しによってコンクリートが負担するせん断力が著しく低下し、最終的にはせん断破壊を呈した。

せん断スパン内のひび割れ性状が中空と中実で異なるのはウェブ幅に起因するものであり、コンクリートの負担せん断力が小さい中空はりで斜めひび割れが初期段階から卓越するのは当然のことであるが、中実断面においても B タイプ載荷で最終的にせん断破壊を生じたことは、繰返し荷重下のコンクリートが負担するせん断力に関する現行の考え方について再考の余地があることを示しているといえる。特にこのことはウェブ幅の薄い中空断面部材に関しては重要となる。

(2) 荷重-変位関係

図-3 に荷重-スパン中央変位関係の一例を示す。また、図-4 にスパン中央変位に占める曲げ変形とせん断変形の割合を示したものの一例を示す。なお、ここでいう曲げ変形とはスパン中央部分の曲率の測定値から算出したものであり、せん断変形は簡便化のため単に全変形から曲げ変形を差し引くことによって求めた。

図-3 より明らかなように、中空断面はりでは耐力が急激に低下し始める変位が対応する中実

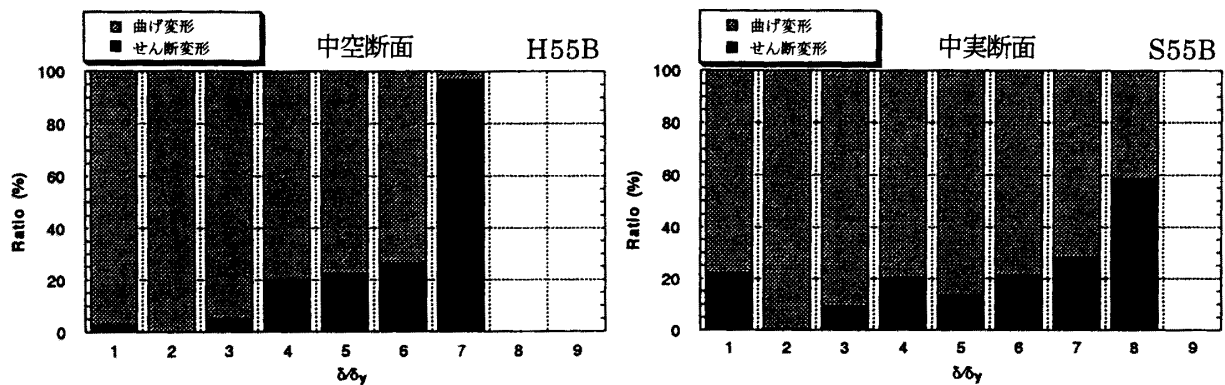


図-4 スパン中央変位に占める曲げ変形とせん断変形の割合 ($a/d=3.07$)

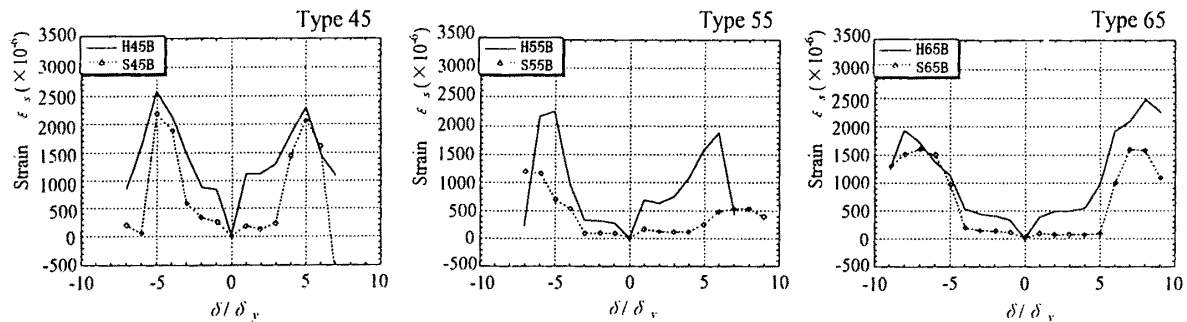


図-5 各変位振幅におけるスターラップひずみ

断面はりより小さく、また、耐力低下の度合いもより急激になることがうかがえる。一方、図-4に示すように、中空断面はりにおいてせん断変形が全変形に占める割合は、 $3 \delta_y$ 程度までの荷重初期段階では非常に小さいものの、終局状態に近い段階 (H55Bでは $7 \delta_y$) では極めて大きくなっている。曲げ変形の算定の際に塑性ヒンジ領域を曲げスパン内に限定したため、実際のせん断変形は図中に示したのものよりも若干小さくなると思われるが、図-4の結果は、中空断面はりでは塑性変形が荷重途中よりせん断スパン側に移行していくことを示しており、中実断面はりとは比べてせん断変形が無視し得ないものとなることがわかる。

3. せん断耐荷挙動に関する検討

図-5にせん断スパン内荷点より10cm位置 (測定点2: 図-1参照) における各変位段階でのスターラップひずみを示す。中空断面はりのスターラップひずみは $1 \delta_y$ 時でも顕著な斜めひび割れの進展により 500×10^{-6} 程度以上の値を示しているが、中実断面はりでは $3 \delta_y$ 程度までのひずみ値は非常に小さい。しかしながら、中空断面のみならず、中実断面においても変位の進行とともにスターラップひずみが増加していく傾向がうかがえる。

現行の土木学会コンクリート標準示方書設計編[2]では、RC棒部材の設計せん断耐力 V_{yd} は、せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力 V_{cd} とせん断補強鋼材により受け持たれる設計せん断耐力 V_{sd} の和で与えられている。本研究で用いた供試体の V_{cd} と V_{sd} の内訳は表-1に示したとおりであるが、図-6に示すスターラップひずみの履歴の一例を見てみると、変位振幅の増加とともにひずみ値が増大し、作用せん断力が $V_{cd} + V_{sd}$ に達する前にスターラップが降伏してしまっていることがわかる。このことは正負交番繰返しによってコンクリートのせん断抵抗が徐々に低下していき、ほとんどの供試体が最終的にせん断破壊を生じたことを裏付けている。

一方、Collinsらは修正圧縮場理論[1]によってせん断抵抗メカニズムを説明している。この理

論は、ひび割れ間のコンクリートの引張抵抗、ひび割れ発生後の圧縮強度の低下等を考慮していること、すなわち、ひび割れの生じたコンクリートを固有の応力-ひずみ関係を有する材料として取り扱っているところに特徴がある。この理論によると、RC部材のせん断抵抗力は次式で表される。

$$V = V_c + V_s = f_t b_w j d \cot \theta + (A_w f_w / s) j d \cot \theta \quad (1)$$

ここに、 f_t : コンクリートの主引張応力、 b_w : ウェブ幅、 $j d$: 圧縮合力作用位置から引張鉄筋図心位置までの距離、 θ : 圧縮斜材角 (せん断ひび割れの角度)、 A_w : せん断補強筋の断面積、 f_w : せん断補強筋の応力、 s : スターラップ配置間隔である。

この理論は、純せん断を受ける部材を対象に導かれたものであるが、断面切断法等の通常の曲げ解析と組み合わせることにより、曲げモーメント・軸力・せん断力同時作用下のスターラップ等のひずみを求めることができる (詳細については文献[1]参照)。

図-7にスターラップのひずみおよびコンクリートの主圧縮ひずみを解析した結果の一例を実測値と併せて示す。これらの図よりスターラップのひずみおよびコンクリートの主圧縮ひずみは、修正圧縮場理論を用いた解析により程良い精度で推定できることがわかる。

図-8は V_c および V_s が作用せん断力 V に占める割合について調べたものの一例である。なお、図中の V_s はスターラップひずみの実測値および解析値より求め、 V_c は V から V_s を差し引いたものである。この図より、 V_s が増加し始める時点、すなわちせん断ひび割れ発生時のせん断力は実測値と修正圧縮場理論による解析値ならびにコンクリート標準示方書より計算される値 V_{cd} でほぼ等しいこと、その後の V_s が V に占める割合は解析値の方がより急激に増加し、全体的に実測

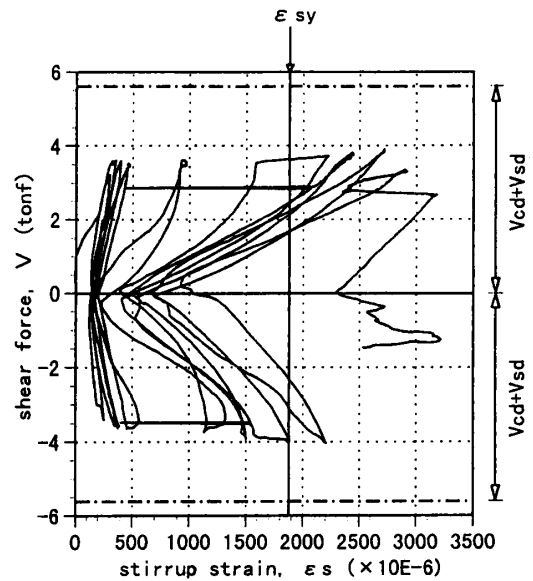
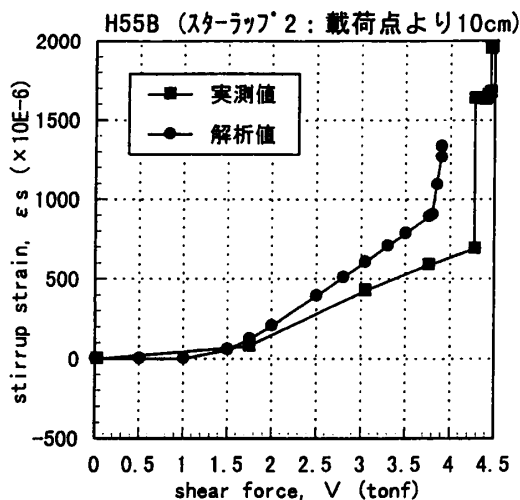
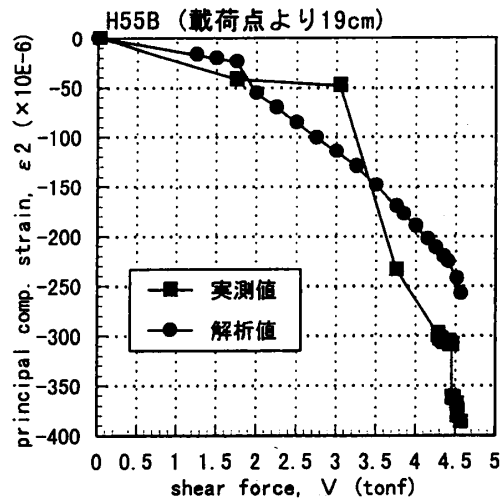


図-6 スターラップひずみの履歴の一例 (H65B, 載荷点より10cm)



(a) スターラップひずみ



(b) コンクリートの主圧縮ひずみ

図-7 修正圧縮場理論による解析値と実測値の比較

値を安全側に評価していること、 V_c の実測値はその後もある時点までは増加し、解析値や示方書による V_{cd} よりもかなり大きな値を示すものの、最終的には急激に低下し、その挙動を修正圧縮場理論による解析値がとらえていること、等がうかがえる。なお、ここにあげた傾向は最終的にせん断破壊したすべての供試体に共通して認められた。

以上のことより、示方書におけるコンクリート負担せん断力 V_{cd} は、一方向荷重下では十分安全側の値を与えるものの、正負交番繰返しを受ける場合は、最終的にコンクリートのせん断抵抗が V_{cd} をかなり下回ることが考えられる。特にウェ

ブ幅の薄い中空断面部材の場合はこのことに対する配慮が重要となり、例えば、日本建築学会[3]のようにコンクリートのせん断抵抗を $p_w f_{wy}$ (p_w : せん断補強筋比) の増加に伴って減少させるという考え方も参考となる。一方、修正圧縮場理論による解析は、荷重の進行に伴うせん断抵抗挙動を逐一追跡でき、さらに、曲げとせん断の影響を同時に考慮できるという利点を有する。本解析結果は実験におけるコンクリートの負担せん断力の低下減少を程良くとらえており、今後の設計法を考える上で参考となると思われる。

4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下のようなものである。

- (1) 中空断面はりは、一方向荷重下では曲げ破壊するのに対し、正負交番荷重下ではすべて曲げ降伏後の繰返しによるコンクリートのせん断抵抗の減少により、最終的にせん断破壊を呈した。中実断面はりも、 a/d のもっとも大きい供試体 (S65B) を除き、同様の破壊を生じた。
- (2) 中実断面はりの正負交番荷重下の終局変位は対応する中実はりと比較して若干小さくなり、また、その後の耐力低下もより急激となる。また、スターラップひずみの増加も中実断面はりに比べて荷重初期段階から大きく、最終的にせん断破壊した供試体では、作用せん断力がほとんど増加しないにもかかわらず、正負交番繰返しにより降伏ひずみに至る。
- (3) 土木学会コンクリート標準示方書で与えられるせん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力 V_{cd} は、コンクリートの負担せん断力に対して安全側の値を与えるものの、正負交番繰返しを受ける場合、最終的にコンクリートの負担せん断力は V_{cd} 以下に低下する。したがって、このことに対する配慮が必要であり、修正圧縮場理論による解析はその参考となる。

参考文献

- [1] Collins, M. P. and Mitchell, D.: Prestressed Concrete Structures, Prentice Hall, 1991
- [2] 土木学会: コンクリート標準示方書 [平成3年版] 設計編, 1991.11
- [3] 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

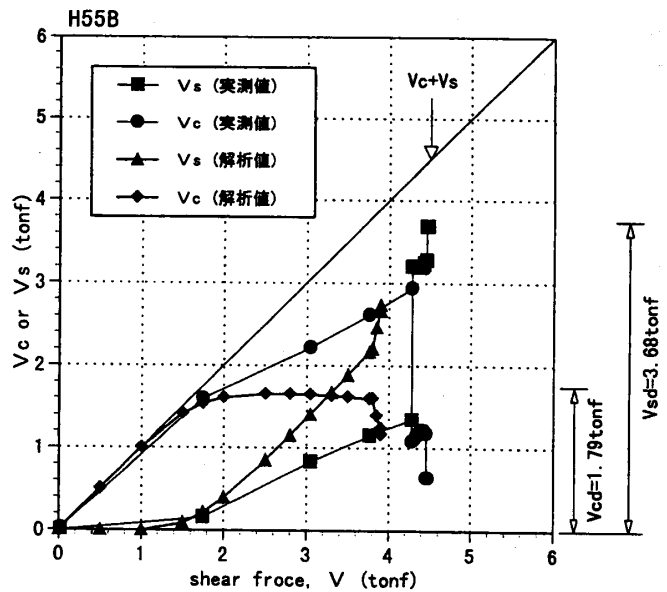


図-8 作用せん断力 V に占める V_c および V_s の割合 (H55B)