

# 論文 鉄筋コンクリートはり部材のせん断耐力における コンクリート強度の影響

藤田 学<sup>\*1</sup> 大館 武彦<sup>\*2</sup>

**要旨:** 高強度コンクリート部材の特徴を活かした設計を行うには、その破壊形態、耐力的に把握する必要があるが、特に、せん断耐力に関しては、寸法効果などのメカニズムが明らかになっていない。本研究では、鉄筋コンクリートはり部材のせん断特性に及ぼす部材寸法ならびにコンクリート強度の影響を明らかにするため、せん断補強鉄筋のないRC単純はり部材のせん断破壊実験を行った。その結果、せん断強度の寸法効果は、コンクリート圧縮強度に依存し高強度コンクリートになるほど部材寸法の影響が大きくなる傾向がある。ただし、せん断スパン比に対する低下率には、コンクリート強度による顕著な差はないことを実験的に示すことが出来た。

**キーワード:** 高強度コンクリート、寸法効果、せん断スパン比、圧縮強度

## 1. はじめに

せん断補強鉄筋のない鉄筋コンクリート（以下、RC）はり部材のせん断強度における寸法効果は、従来からも確認されており、寸法効果を考慮したせん断耐力算定式の提案もなされている。<sup>1)</sup> 高強度コンクリートの領域における、せん断強度の寸法効果については、最近になって、研究が盛んになってきているもののデータの蓄積も少なく、高強度コンクリートまで網羅するせん断耐力式の確立には至っていないのが現状である。著者らは、これまでにコンクリート強度（高強度コンクリートの領域まで網羅）および部材有効高さをパラメータとした、せん断補強鉄筋のないRCはり部材のせん断試験を行っており<sup>2)</sup>、その結果、せん断強度の寸法効果の割合は、コンクリートの圧縮強度に依存し、高強度になるほどその低下率が大きくなることを確認している。

本研究では、RCはり部材のせん断特性に及ぼすコンクリート強度の影響を明らかにするため、コンクリート圧縮強度 $f'_c$ 、有効高さ $d$ およびせん断スパンと有効高さの比（以下、せん

断スパン比）をパラメータとしたせん断補強鉄筋のないRC単純はり部材のせん断破壊試験を行った。これまでの成果に加えて、本試験の結果を追加し、試験結果の信頼性を高めるとともに、既往の文献のデータ<sup>3)4)5)</sup>を含めた検討を行った。本稿は、破壊機構と斜めひび割れ発生時における公称せん断応力度（以下、せん断強度） $\tau$ の寸法効果およびせん断スパン比の関係について、コンクリート圧縮強度との相互関係の視点から検討を行った結果について報告する。

## 2. 実験概要

試験体形状寸法を表-1、図-1に示す。試験体番号のL、M、Uはコンクリート圧縮強度のパラメータを示す。寸法効果に着目した試験体は、せん断スパン比 $(a/d=3)$ と引張鉄筋比 $(P_t=1.5\%)$ を一定とし、コンクリート圧縮強度 $f'_c$ および有効高 $(d=25\sim 100\text{cm})$ をパラメータとした。せん断スパン比に着目した試験体については、有効高さ $(d=50\text{cm})$ と引張鉄筋比 $(P_t=1.5\%)$ を一定とし、コンクリート圧縮強度 $f'_c$ およびせん断スパン比 $(a/d=2\sim 4)$ をパラメータとした。

\*1 住友建設(株) 技術研究所 工修 (正会員)

\*2 住友建設(株) 技術研究所

なお、高強度コンクリートの製作には高性能AE減水剤、シリカフュームを使用した。引張鉄筋にはSD345を使用し、各諸元は、降伏強度 $388\text{N/mm}^2$ 、引張強度 $555\text{N/mm}^2$ およびヤング係数 $196\text{kN/mm}^2$ である。各試験体とも鉄筋径の合計と部材断面幅との比をほぼ同値に設定しており、引張鉄筋端部には直角フックを付けている。また、せん断補強鉄筋は配置せず、端部のみ引張鉄筋の拔出し防止のスターラップを配置した。載荷スパンは、有効高さ $d$ に等しくし、はりが破壊に至るまで単調に増加させた。試験体数は、各3体とし、計45体について行った。

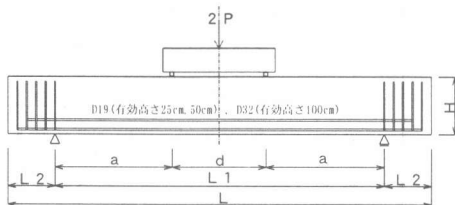


図-1 試験体図

表-1 試験体寸法図

CASE	L cm	L1 cm	L2 cm	H cm	b cm	a cm	d cm	Pt %	Fc N/mm <sup>2</sup>
L-25-3	275	175	50	30	15	75	25	1.53	36.1
L-50-3	450	350	50	60	15	150	50	1.53	36.1
L-100-3	900	700	100	113	35	300	100	1.36	34.3
M-25-3	275	175	50	30	15	75	25	1.53	67.1
M-50-3	450	350	50	60	15	150	50	1.53	67.1
M-100-3	900	700	100	113	35	300	100	1.36	56.9
U-25-3	275	175	50	30	15	75	25	1.53	97.5
U-50-3	450	350	50	60	15	150	50	1.53	97.5
U-100-3	900	700	100	113	35	300	100	1.36	99.1
L-50-2	350	250	50	60	15	100	50	1.53	36.1
L-50-4	550	450	50	60	15	200	50	1.53	36.1
M-50-2	350	250	50	60	15	100	50	1.53	67.1
M-50-4	550	450	50	60	15	200	50	1.53	67.1
U-50-2	350	250	50	60	15	100	50	1.53	97.5
U-50-4	550	450	50	60	15	200	50	1.53	97.5

### 3. 実験結果

#### 3.1 圧縮強度と寸法効果の関係

せん断スパン比 $a/d=3$ の試験体において、いずれの試験体も有効高さ $d$ に依ることなく破壊形態は斜めひび割れ破壊であった。破壊時におけるひび割れ発生状況は、有効高さが大きい試験体では、高強度のコンクリートになるほど、ひび割れの局所化が生じ、中立軸位置で普通強度コンクリートに比べひび割れ本数が減少する傾向が観察された。また、全試験体の桁断面中心における破壊ひび割れの水平面に対する角度は

高強度コンクリートになるにしたがい大きくなっており、ひび割れが水平に進展する起点は、有効高さが大きくなるほど、載荷点側に寄る傾向が観察された。破壊に至る状況は、そのほとんどが、発生していた斜めひび割れが、引張鉄筋と交差する位置から引張鉄筋に沿って端部方向に水平に進展するとともに、交差部において鉛直方向に開口し、かつ部材が鉛直方向にずれ、それが起点となり載荷点付近まで一気に貫通するとほぼ同時に、桁上縁部から斜めひび割れに向かって縦方向のひび割れが進展し急激な破壊となった。普通強度コンクリートでは全ての試験体において、斜めひび割れ発生とともに破壊に至り荷重が低下したため、斜めひび割れ発生時が最大耐力と等しくなったが、高強度コンクリートの試験体の一部には、斜めひび割れ発生後も、タイドアーチを形成してさらに荷重が増加したものもみられた。ただし、タイドアーチを形成した試験体においても、変形が進行するに従い、斜めひび割れ発生側の桁上縁部より斜めひび割れに向かって縦方向のひび割れ(図-7)が進展し、最終的に発生していた斜めひび割れが引張鉄筋と交差する位置から引張鉄筋に沿って端部方向に進展するとともに、荷重が低下した。なお、斜めひび割れ発生時における引張鉄筋は、ほとんどの試験体で降伏ひずみ( $1980 \times 10^{-6}$ )に達していなかった。図-2、図-3、図-4に、せん断スパン比 $a/d=3$ の試験体における斜めひび割れ発生時の公称せん断応力度(せん断強度、 $\tau = V/bd$ )と有効高さ $d$ およびコンクリート圧縮強度 $f_c$ との関係を示す。図中には、著者らの実験結果と既往の文献によるデータ( $a/d=3$ の試験体)を併せて示した。既往の研究の引張鉄筋比は $Pt=0.56 \sim 2.65\%$ の範囲にあるためデータを使用するに際して、式(1)<sup>1)</sup>を用いて、本実験と同じ $Pt=1.5\%$ に補正した。ただし、式(1)におけるコンクリート圧縮強度の適用範囲の上限は $80\text{N/mm}^2$ であるが、 $80\text{N/mm}^2$ 以上のコンクリートについても、同一鉄筋比の試験データが少ないため同様の補正を行った。

$$V_{ca} = \beta_a \cdot \beta_p \cdot f_{ca} \cdot b \cdot d \cdot (0.75 + 1.4 / (a/d)) \quad (1)$$

ただし、

$$f_{ca} = 0.20 \sqrt[3]{f'c} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$\beta_a = \sqrt[3]{1/d} \quad (d:m)$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100P/t}$$

b.: 腹部の幅 d: 有効高さ

a.: せん断スパン

図-2に、せん断強度 $\tau$ とコンクリート圧縮強度との関係を示す。せん断強度は、コンクリート圧縮強度が高くなるほど単純に増加するのではなく、あるコンクリート圧縮強度以上になると、ほとんど増加しなくなる。せん断強度が増加しなくなる時の、コンクリート圧縮強度は有効高さにより異なる。

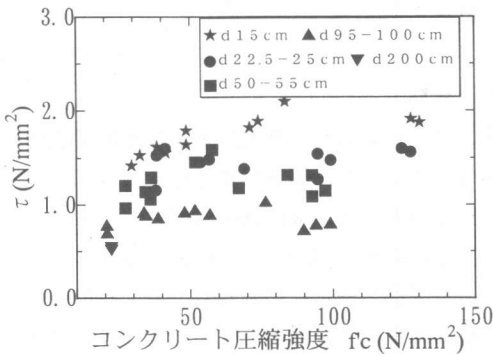


図-2 せん断強度と  
コンクリート圧縮強度の関係

図-3は、(せん断強度 $\tau/f'c^{(1/3)}$ )とコンクリート圧縮強度 $f'c$ との関係を示したものである。図中で、破線は式(1)による計算値を $f'c^{(1/3)}$ で除したものである。コンクリート圧縮強度の影響がなければ、縦軸はコンクリートの圧縮強度の1/3乗で除しているため、有効高さが同じ試験体については、コンクリート圧縮強度に依存することなく一定値を示すと考えられる。実験結果によると、有効高さ $d=15\text{cm}$ の試験体(図中★)は、コンクリート圧縮強度が、 $80\text{N/mm}^2$ 付近までは式(1)による計算値とほぼ適合しているが、有効高さ $d=100\text{cm}$ の試験体(図中▲)では、 $40\text{N/mm}^2$ 付近

より計算値を下まわり始めている。また、有効高さが $d=25\text{cm}$ および $d=50\text{cm}$ の試験体に関しても、同様にコンクリート圧縮強度が高強度になると、 $\tau/f'c^{(1/3)}$ が低下する傾向がみられたことから、 $\tau/f'c^{(1/3)}$ は、コンクリート圧縮強度の影響を受けており、高強度になると普通強度に比べてより低下している。しかも、 $\tau/f'c^{(1/3)}$ は、有効高さが大きいほど低い圧縮強度の段階から低下している。

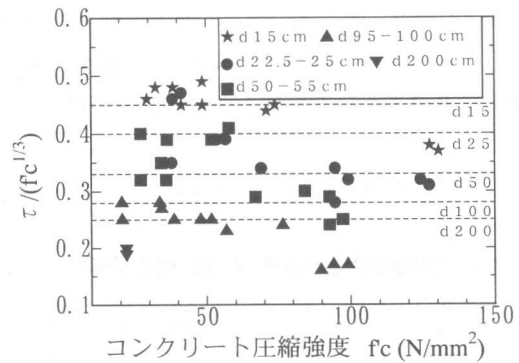


図-3 (せん断強度 $\tau/f'c^{(1/3)}$ )と  
コンクリート圧縮強度 $f'c$ との関係

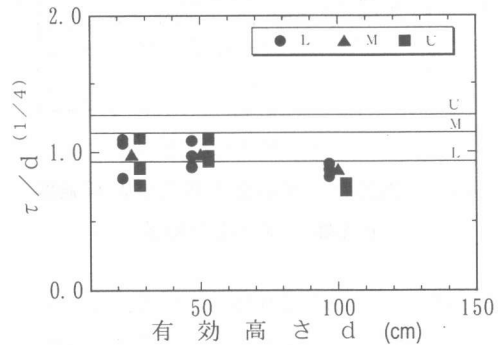


図-4 (せん断強度 $\tau/d^{(1/4)}$ )と  
有効高さ $d$ との関係

図-4に、(せん断強度 $\tau/d^{(1/4)}$ )と有効高さ $d$ との関係を示す。図中の実線は、式(1)による計算値を有効高さの1/4乗で除しており、有効高さに関係なく一定となる。(せん断強度 $\tau/d^{(1/4)}$ )の値は、コンクリート圧縮強度によって異なるため、図中には、著者らが行った実験の中

で3種類のコンクリート圧縮強度（L：36.4N/mm<sup>2</sup>，M：67.1N/mm<sup>2</sup>，U：92.9N/mm<sup>2</sup>）の実験結果のみを示した。著者らの実験によると、試験体L，M，Uにおいて、有効高さ25cmと50cmでは、（せん断強度 $\tau/d^{(1/4)}$ ）の値にほとんど変化はみられなかったが、有効高さが100cmになると（せん断強度 $\tau/d^{(1/4)}$ ）の値が低下している。低下の割合は、コンクリート強度L，Mとも同程度であるが、高強度コンクリートであるUは、L，Mに比べてわずかではあるが大きい結果となった。また、コンクリート強度Lの場合、（せん断強度 $\tau/d^{(1/4)}$ ）の値は、いずれの有効高さにおいても式(1)とほぼ同程度であったのに対し、高強度コンクリートになると有効高さに依らず式(1)を下まわった。

### 3.2 圧縮強度とせん断スパン比の関係

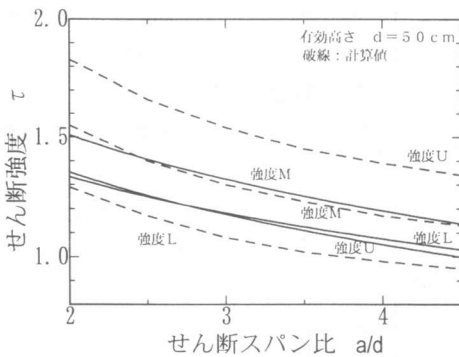


図-5 斜めひび割れ発生時のせん断強度とせん断スパン比の関係

有効高さd=50cmの試験体について、コンクリートの圧縮強度とせん断スパン比をパラメータにした試験を行った。パラメータとなるせん断スパン比a/dは、a/d=2, 3, 4とした。破壊形態は、a/d=3の試験体は前述のとおり斜めひび割れ破壊であったが、a/d=2の試験体は全ての試験体でせん断圧縮破壊、a/d=4は斜めひび割れ破壊であったが曲げ破壊した試験体も数体みられた。a/d=2の試験体は、半数以上がせん断スパンの両側に発生した斜めひび割れが、進展するものの、載荷点付近で突き抜けず、タイドアーチを形成

し、桁上縁からの縦方向ひび割れを生じることなく荷重が増加、最終的にせん断圧縮破壊となった。図-5は、斜めひび割れ発生時のせん断強度とせん断スパン比との関係を示す。図中の実験値は、著者らの実験結果を基に回帰計算した結果であり、計算値は基本式(1)より求めた結果である。コンクリート強度Lの場合、せん断強度は、いずれのせん断スパン比a/dにおいても、実験値は計算値を上まわっている。コンクリート強度Mの場合は、実験値は計算値とほぼ等しい値となっている。しかし、コンクリート強度Uの場合は、実験値は計算値をはるかに下まわる結果となった。ただし、いずれのコンクリート強度の場合も、実験結果の曲線はほぼ同じ傾きを有しており、せん断スパン比a/dに対するせん断強度の低下率には大きな差がないことが確認された。

### 4. 考察

コンクリートのせん断強度およびその寸法効果がコンクリート圧縮強度に依存する要因について検討を行った。図-6に有効高さd=25cm，有効高さd=50cm，有効高さd=100cmの試験体について、コンクリート圧縮強度L，M，Uの支間中央部の荷重～変位曲線を比較した。有効高さd=25cm，50cmでは、L，M，Uの試験体ともに、斜めひび割れ破壊に至るまで荷重～変位曲線の傾きは、ほぼ等しくなっている。これに対して強度Uのd=100cmの試験体は、250kN付近で曲げひび割れが急激に進展し、変形が進行している。3体の試験体について同様の現象を確認しており、曲げひび割れの進展あるいは局所化に伴う変形の相違もせん断強度低下の要因と考えられる。図-7に、U-100-3の破壊時とほぼ同等のせん断強度となる荷重時のひび割れ図を示す。荷重～変位曲線では、同じ有効高さの試験体においてコンクリート強度による荷重～変位曲線の傾きの差は見られなかったが、ひび割れの進展に違いが見られた。有効高さd=100cmの試験体で比べるとU-100-3に比べてL-100-3はひび割れ

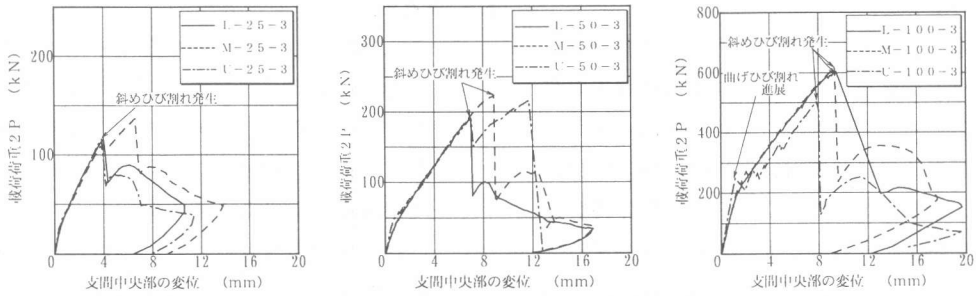


図-6 荷重～変位曲線

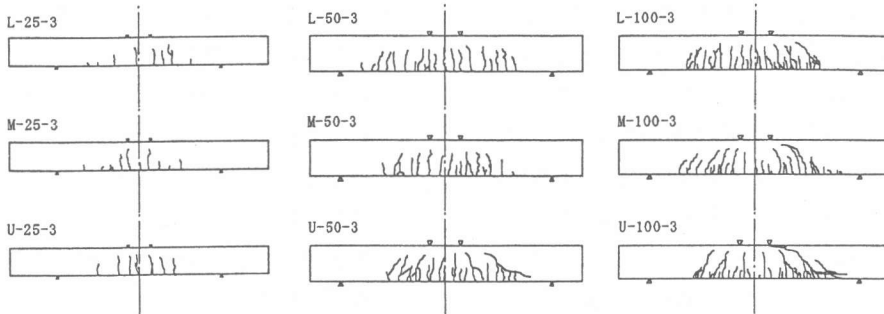


図-7 U-100-3の破壊時と同等のせん断強度となる破壊時のひび割れ進展図

が多く、分散しているのに対して、U-100-3はひび割れが局所的に進展している。高強度コンクリートが、普通強度コンクリートに比べ局所化する傾向は、有効高さが大きい試験体ほど顕著に現れる。同じ有効高さの場合でも高強度のコンクリートの方が、また同じ圧縮強度の場合、有効高さの大きい方が、ひび割れの局所化と急激なひび割れ進展によりせん断強度が低下することを示している。

斜めひび割れ破壊に至るプロセスは、部材寸法、コンクリート強度に関わらず全試験体に共通して、主鉄筋に沿ったひび割れが起点となり

起こった。さらに、斜めひび割れ発生直後の斜めひび割れは鉛直方向に大きくずれ、水平方向にはほとんどずれていないことを確認した。本試験では、斜めひび割れ破壊の起点が、載荷点方向に突き抜けるひび割れと端部の主鉄筋に沿った水平方向のひび割れのどちらが起点となっているか確認するための一手法として、加速度計を用い、生じた波形による判定を試みた。図-8にひび割れ発生時の加速度波形の一例を示す。試験により得られた、加速度の波形によると引張鉄筋に沿った水平方向のひび割れが載荷点方向のひび割れよりもわずかながら早く立

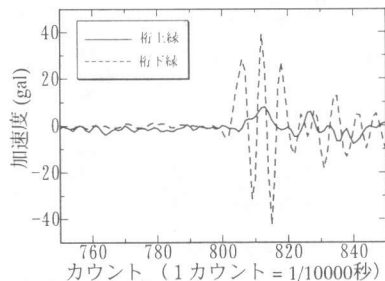
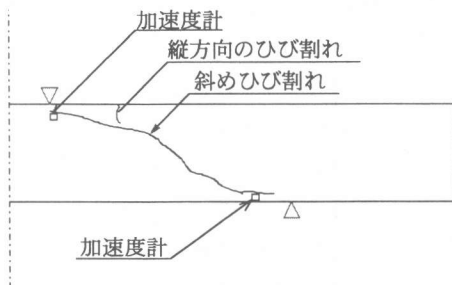


図-8 斜めひび割れ発生時の加速度の波形 (U-50-3)

ち上がっている。

高強度コンクリートになると、普通強度のコンクリートに比べ、自己収縮による初期応力が大きいこともせん断強度低下の一要因と考えられる。著者らの試験では、全ての試験体の支間中央部、端支点部について、試験体製作時から試験開始時まで、鉄筋ひずみを経時計測することで、コンクリートが受けた（自己収縮ひずみ＋乾燥収縮ひずみ）を定量的に確認した。

なお、試験体の養生条件は、全て同一とした。

図-9には、縦軸にせん断強度の比（実験値／計算値）、横軸に支間中央部の鉄筋の初期ひずみとの関係を示す。鉄筋の初期ひずみが、 $200 \times 10^{-6}$ 程度までは、せん断強度の比（実験値／計算値）は、ほとんどの試験体で1.0以上となっているが、 $300 \times 10^{-6}$ 付近になると、（実験値／計算値）の値は、0.7～0.9程度まで減少している。本試験において、鉄筋ひずみ $200 \times 10^{-6}$ 程度までは普通コンクリート、鉄筋ひずみ $300 \times 10^{-6}$ 程度は高強度コンクリートの場合の初期ひずみである。このことから、コンクリートが高強度になるほど初期ひずみが大きくなり、せん断強度は低下することが確認された。しかしながら、同じコンクリート強度の場合は、有効高さによる初期の鉄筋ひずみに差がみられなかったため、初期ひずみが有効高さに及ぼす影響とは関連付けることは出来なかった。

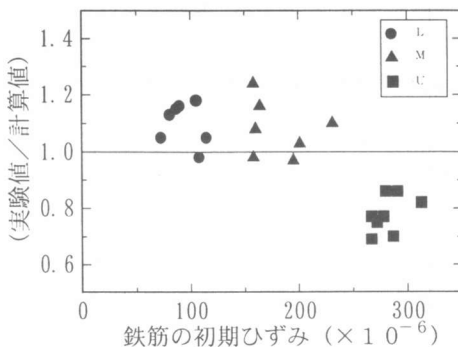


図-9 (実験値／計算値)と鉄筋ひずみの関係

## 5. まとめ

- (1) 斜めひび割れ発生時のせん断強度は、有効高さ  $d$  が同じ試験体については圧縮強度が高くなるほど単純に増加するのではなく、ある圧縮強度で最大となり、高強度になると逆に低下する傾向がある。また、いずれのコンクリート強度の場合もせん断スパン比によるせん断強度の低下率には大きな差はないことを確認した。
- (2) 高強度コンクリートおよび部材寸法が大きくなると、ひび割れの局所化と急激な進展を生じ、せん断強度を低下させると考えられる。
- (3) コンクリート強度が高くなるほど初期に生じるひずみが大きくなるのが、せん断強度を低下させる一要因であることが確認された。

## 参考文献

- 1) 二羽淳一郎ほか：せん断補強筋を用いないRCはりせん断強度式の再評価，土木学会論文集，第372号，V-5，PP.167-176，1986
- 2) 藤田学ほか：高強度コンクリートはり部材の寸法効果に関する実験的検討，コンクリート工学論文集，Vol.20，No.3，PP349-354，1998
- 3) 河野広隆ほか：鉄筋コンクリート橋脚のせん断力照査におけるコンクリート負担分に関する検討，土木技術資料39-2，PP38-43，1997
- 4) 松井祐一ほか：超高強度コンクリートを用いたRC梁部材のせん断耐力に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.17，No.2，PP.655-660，1995
- 5) 高強度コンクリート部材の設計法に関する共同研究報告書，建設省土木研究所共同研究報告書整理番号第122号，1995.3