

論文 鋼板巻き立て補強橋脚の変形性能に関する検討

鈴木直人^{*1}・幸左賢二^{*2}・藤井康男^{*3}・澤田吉孝^{*4}

要旨：既設 RC 橋脚の耐震補強として鋼板巻き立て補強工法が多く行われているが、その終局に至るメカニズムや終局じん性率の評価方法については未だ不明確な点も多い。本論では、既往の鋼板巻き立て補強橋脚の正負交番載荷試験データを収集し、鋼板の効率、塑性ヒンジ長、終局状態に着目した変形性能の評価を行った。さらに、実験値と比較することにより、耐力比を用いた評価式や道路橋示方書式の、鋼板巻き立て補強橋脚に対する適用性やその修正方法について検討を行った。

キーワード：RC 橋脚、じん性率、鋼板巻き立て、塑性ヒンジ

1. はじめに

既設 RC 橋脚の耐震性を向上させるための有効な方策として、鋼板巻き立て工法による補強が従来より多く行われている。RC 部材の周囲に鋼板を巻き立てることによって、せん断ひび割れの開口を防ぎせん断耐力を増加する効果が得られ、また、基部を拘束することにより軸方向鉄筋のはらみだし、座屈抑制効果が得られる。従来から鋼板巻き立て補強の効果については多くの交番載荷試験が実施され、十分その有効性が確認されている。しかし、鋼板を巻き立てた場合の終局に至るメカニズムや、鋼板巻き立て量と終局じん性率の評価方法等はいまだ不明確な点も多い。

本論は、阪神高速道路公団における鋼板巻き立て補強供試体の正負交番載荷試験結果¹⁾を中心に、既往の鋼板巻き立て補強橋脚の正負交番載荷試験事例を収集、整理し、以下の点に着目して検討を行ったものである。

- 1) 鋼板を巻き立てた場合の、鋼板の効率、塑性ヒンジ長の変化、終局にいたる挙動の評価
- 2) 既往のじん性率評価式の鋼板巻き立て補強橋脚に対する適用性と補正方法

2. 既往の実験結果の整理

阪神高速道路公団では、既設 RC 橋脚の耐震性向上効果の確認を目的に、鋼板巻き立て補強工法による正負交番水平載荷試験を行っている。

ここでは、阪神公団での実験に加え、建設省土木研究所²⁾、首都高速道路公団³⁾、JR⁴⁾、⁵⁾、⁶⁾での実験データを整理することにより、鋼板巻き立て補強橋脚の終局挙動、変形性能を評価するものとした。収集した供試体の諸元を図-1に示す。供試体の鋼板巻き立て量は帯鉄筋比に換算すると $p_w' = 0.1 \sim 2.3\%$ となっており、道路橋における補強レベル ($p_w' < 1.0\%$) と比べると若干高いものが多い。また a/d は 2.5 以上の供試体が多く、阪神公団、土木研究所の実験例は $a/d = 5$ 程度となっている。

じん性率評価式の適用性を検討するにあたり、これらの実験結果からじん性率を整理したが、基部リング補強等の特殊な実験に関しては、じん性率評価法の検討対象外とした。また、供試体のじん性率は、各研究機関により定義が異なるため、ここでは、各実験で得られた荷重-変位曲線をもとに、統一した基準によりじん性率を再評価した。降伏点は材料定数を補正した上

*1 建設技術研究所 大阪支社 工修 (正会員)

*2 阪神高速道路公団 工務部 Ph.D (正会員)

*3 阪神高速道路公団 工務部 (正会員)

*4 建設技術研究所 大阪支社

で降伏荷重 P_y を求め、荷重-変位曲線上で P_y に達した点を降伏変位 δ_y とした。最大荷重後に再び P_y まで低下した点を終局変位 δ_u とし、じん性率は $\mu = \delta_u / \delta_y$ により定義した。

また、縮尺率の小さい実験の場合、鉄筋抜け出しの影響が無視できない場合もあるが、抜け出しによる影響の分離が困難な実験もあり、ここでは δ_u 、 δ_y とともに鉄筋の抜け出し量を含んだ形となっている。

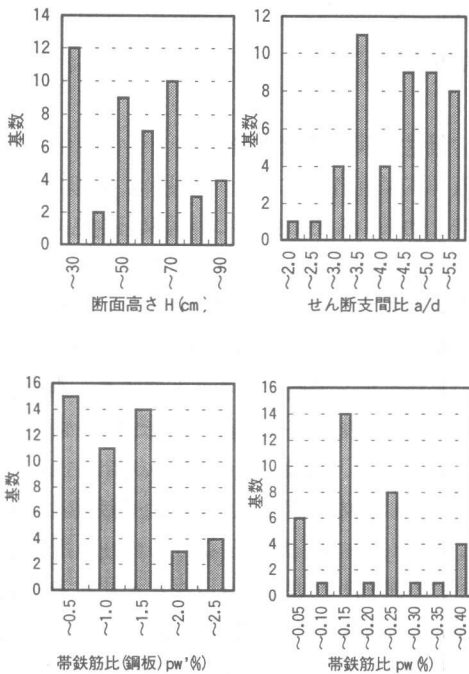


図-1 供試体諸元の分布

3. 鋼板巻き立て補強橋脚の耐荷力特性

(1) 鋼板巻き立て補強橋脚の破壊性状

RC 橋脚に鋼板巻き立てを施すことにより、いずれの実験例でも大きな変形性能の向上が確認されている。実験における破壊状況をみると、 $1\delta_y \sim 2\delta_y$ 程度で鋼板とコンクリートの付着切れが起こり、その後、基部コンクリートの圧壊により鋼板がスカート状にはらみだし、軸方向鉄筋の座屈、破断により耐荷力が低下している。また、一般的な RC 橋脚と異なり、軸方向鉄筋の破断が先行し、終局となっている場合も

多い。また終局時の供試体の状況を見ると、鋼板巻き立て橋脚は損傷範囲が RC 構造に比較して狭いことが示唆されている。

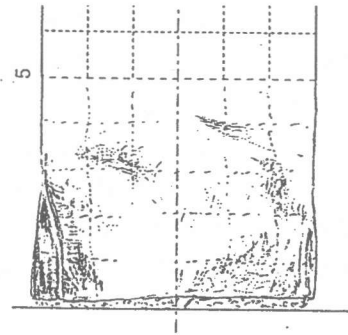


図-2 鋼板巻き立て補強橋脚の破壊状況

(2) 供試体の破壊モード

ここでは、収集した文献の記述をもとに、基部の拘束状況と供試体の破壊モードとの関係を考察する。図-3に基部の拘束状況と供試体の破壊モードの関係を示す。基部を H 鋼やスタッド等により強く拘束した場合、ほとんどの供試体が鉄筋破断により終局となっていることがわかる。また、鋼板巻き立てのみの場合について、帯鉄筋比と破壊モードの関係を図-4に示す。 $p_w=1.0\%$ を超えると鉄筋破断先行の供試体があり、帯鉄筋比が大きいほど鉄筋破断先行の割合が増加している。

阪神公団の供試体を対象とし、帯鉄筋比 $p_w = 0.11\% \sim 2.0\%$ と変化させ、道路橋示方書に示される手法により、コンクリートの終局ひずみ ϵ_{cu} と、 ϵ_{cu} 時の軸方向鉄筋のひずみ ϵ_{su} を計算した結果を図-5に示す。帯鉄筋比が増加するとその拘束効果により終局ひずみは増加する、通常の補強レベル $p_w = 1.0\%$ 以下では ϵ_{cu} に達した時点での引張鉄筋ひずみは 10% 以下となっており、コンクリートの圧壊が先行している、しかし、 $p_w > 1.0\%$ の高帯鉄筋比の場合は、引張鉄筋ひずみが破断ひずみ 16~20% に達するため、鉄筋の破断が先行する可能性がある。

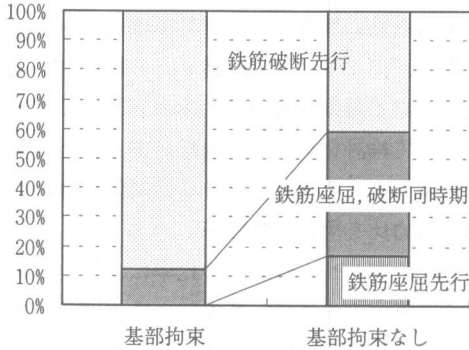


図-3 基部の拘束状況と破壊モード

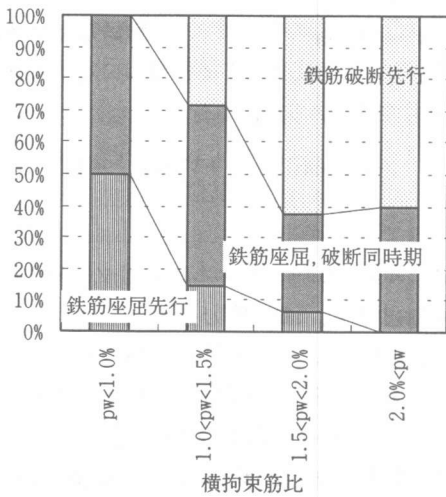


図-4 帯鉄筋比と破壊モード

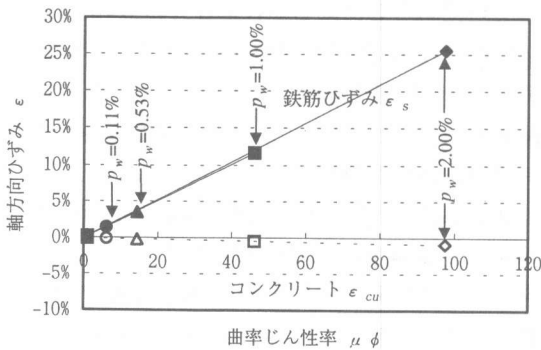


図-5 コンクリート終局ひずみと鉄筋ひずみの関係

(3) 帯鉄筋と鋼板のせん断補強効果

図-6 に阪神公団で実施した鋼板巻立供試体の、供試体側面の帯鉄筋ひずみと鋼板ひずみを示す。両ひずみゲージは同じ高さには設置されている。いずれの供試体も鋼板ひずみは帯鉄筋ひずみの 1/2~1/3 のひずみしか発生していないことがわかる。

コンクリートの内部に配筋される帯鉄筋は、せん断ひびわれに対しひびわれ面をまたぐ比較的わずかな範囲をもって抵抗する。それに対して、鋼板は比較的早くから付着が切れるため、せん断ひびわれの開口に対して鋼板全長をもって抵抗する。このため、同じひびわれ量に対しても、抵抗長の少ない帯鉄筋のほうがひずみが大きくなっているものと考えられる。このことから、せん断補強効果に関しては鋼板の効率を低下させる必要のあることが示唆される(図-7)。

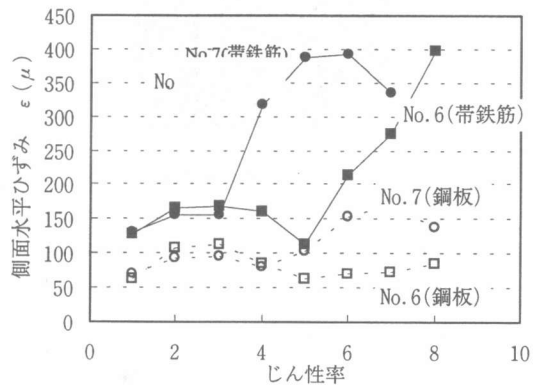


図-6 荷方向側面ひずみとじん性率の関係

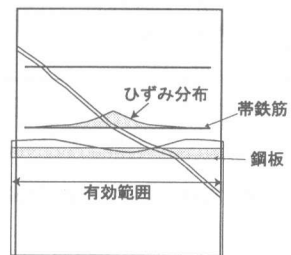


図-7 帯鉄筋と鋼板のせん断抵抗機構

(4) 塑性ヒンジ長の減少

阪神公団における一連の実験結果より求めた実測の軸方向鉄筋座屈長(図- 8)と帯鉄筋比の関係を図- 9 に示す。同実験における RC 供試体の結果も併記した。図をみると帯鉄筋比が大きくなるにつれ、座屈長が直線的に減少する傾向が見られる。同じ帯鉄筋比であれば、鋼板供試体と RC 供試体の間に有意な差異は見られない。

柱筋の座屈挙動を、帯鉄筋や鋼板による横方向の弾性バネに支持された弾性部材の座屈と考えると、横拘束バネが大きくなるほど座屈長が低下する。このようなモデルを考えることにより、帯鉄筋比が大きくなると座屈長は低下する傾向が説明可能であると考えられる。

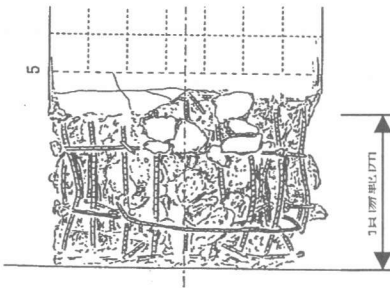


図- 8 供試体の損傷範囲

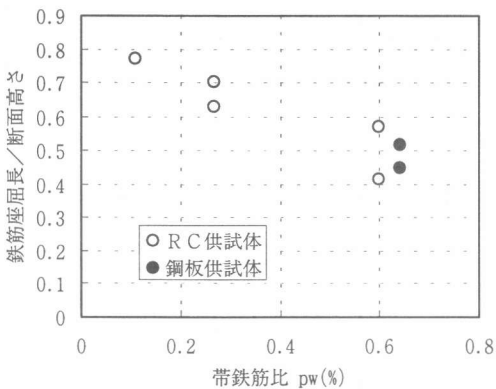


図- 9 帯鉄筋比と鉄筋座屈長の関係

4. じん性率評価式の検討

RC 橋脚のじん性率評価法としては、耐力比(曲げ耐力とせん断耐力の比)を用いた実験式と、断面の $M-\phi$ 関係より解析的に求める方法があ

げられる。鋼板巻立て補強橋脚に対しては、鋼板を帯鉄筋に換算するなどして準用される場合が多いが、ここでは実験結果との比較により、鋼板巻立て補強橋脚のじん性率評価式の適用性について検討を行った。比較対照とした供試体は、基部アンカー等を有する供試体は除いた。

(5) 耐力比を用いた評価法

曲げ耐力とせん断耐力の比率により、じん性率を評価する方法で、基本的には曲げせん断破壊を対象とした評価法である。しかし既往の研究成果⁷⁾によると、式(1)によれば曲げ破壊をする高帯鉄筋比を有する橋脚に対しても一定の有用性が示されている(49体の供試体に対して $\mu_{\text{実験値}}/\mu_{\text{計算値}}$ の平均 1.0, 変動係数 19.8%)。ここでは、鋼板巻立て補強橋脚に対する式(1)の適用性について検討を行う。

$$\mu = 1.63(0.3 \cdot V_c + V_s) / V_{mu} + 5.59 \quad (1)$$

ここで、

V_c : コンクリートのせん断耐力, V_s : 帯鉄筋のせん断耐力, V_{mu} : 曲げ耐力

式(1)のうち、高じん性域におけるコンクリートの負担するせん断耐力の低下を考慮した $0.3V_c$ と帯鉄筋の負担するせん断耐力 V_s は RC 橋脚と同じであると考え、鋼板巻立て橋脚のせん断耐力は $0.3V_c + V_s + AV_s'$ であらわすことができる。ここで V_s' は鋼板のせん断耐力で A はその効率とした。じん性率は $\mu = 1.63(0.3V_c + V_s + AV_s') / V_{mu} + 5.59$ で算定される。そこで、実験のじん性率に最も適合する効率 A を求めると $A=0.8$ となった。よって、鋼板巻立て橋脚のじん性率評価式は式(2)となる。

式(2)による計算値と実験値の関係を図- 10 に示す。 μ (実験値) / μ (計算値) の平均は 1.0 であり変動係数は 25% となった。RC 供試体に比較してばらつきは大きいですが、安全率を考慮することにより鋼板巻立て補強橋脚に対しても適用可能であると考えられる。

$$\mu = 1.63(0.3V_c + V_s + 0.8V_s') / V_{mu} + 5.59 \quad (2)$$

ここで、

V_s : 鋼板のせん断耐力= $2t\sigma_{sy}\cdot d/1.15$, t : 鋼板厚,

σ_{sy} : 鋼板の降伏応力度, d : 有効高さ

適用範囲: 鋼板の帯鉄筋比(%) $0.1 < p_w' < 2.3$, 軸方向応力度 $\sigma_n \leq 2.0\text{Mpa}$, せん断支間比 $a/d \geq 2.5$

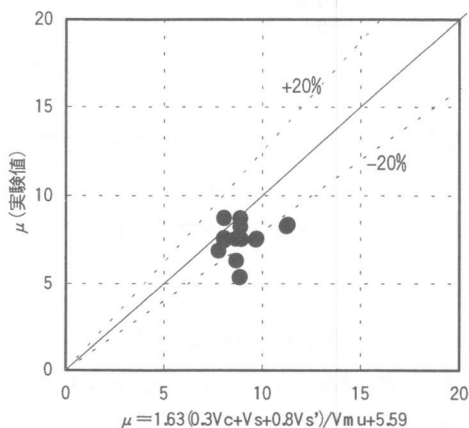


図-10 実験値と計算値の関係

(6) $M-\phi$ 関係による解析的方法

道路橋示方書では、橋脚断面の $M-\phi$ 関係を求め、等価塑性ヒンジ長を考慮した式(3)によりじん性を求めるものとしている。終局曲率 ϕ_u はコンクリートの応力-ひずみ曲線上で、圧縮ひずみが終局ひずみ ϵ_{cu} に達した点としている。(4)の供試体損傷状況からの評価では、帯鉄筋比が多くなると基部の損傷範囲が狭くなる傾向が見られた。これは鋼板巻立て補強橋脚は塑性ヒンジ長が低下していることを示唆しており、ここでは実験値に適合する等価塑性ヒンジ長 L_p の逆算を行った。

$$\mu_u = 1.0 + \frac{(\phi_u - \phi_y)L_p(h - L_p/2)}{\delta_y} \quad (3)$$

ここで

ϕ_u : 終局曲率, ϕ_y : 降伏曲率, δ_y : 降伏変位

RC 橋脚および鋼板巻き立て橋脚に対して、道路橋示方書に従い ϕ_u , ϕ_y , δ_y を計算し、式(3)のもとで実験のじん性率 μ_u に適合する L_p を逆算した。鋼板に関しては降伏応力度の比率

により帯鉄筋換算を行っており、また道路橋示方書では鉄筋の破断等を考慮して体積帯鉄筋の上限値を規定しているが、ここではその上限値は考慮していない。

等価塑性ヒンジ長 L_p /断面高さ D と帯鉄筋比の関係を図-11に示す。RC 供試体、鋼板供試体ともばらつきは大きいですが、高帯鉄筋比になるほど L_p/D が低下する傾向があることがわかる。RC 供試体の場合 L_p/D の平均値は 1.09 となる。平均値-標準偏差 σ を考えると約 0.5 となり道路橋示方書 ($L_p=0.5D$) とほぼ一致する。鋼板供試体の場合相対的に帯鉄筋比が大きいいため L_p/D の平均値は 0.75 と RC 供試体に比較して約 70% となる。

図-11によると帯鉄筋比 $p_w=0.6\%$ の場合 $L_p/D=0.6$ 程度となり、図-9に示す実測の鉄筋座屈長より若干大きめの値となっている。これは、解析上の終局曲率がやや安全側に評価されているため等の理由が考えられる。

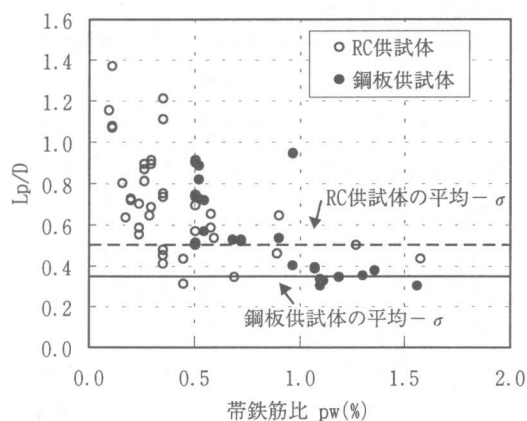


図-11 断面高さと同価塑性ヒンジ長の関係

補強鋼板による帯鉄筋比の増加に伴う等価塑性ヒンジ長の低下を考慮するために、図-12に示すような曲線を設定した。曲線は図-11のほぼ下限値をとるようにしている。

図-13に等価塑性ヒンジ長を図-12とした場合の道路橋示方書による計算値と実験値の関係を示す。ただし道路橋示方書における体積帯

鉄筋の上限値は考慮していない。実験値/計算値の平均=1.38, 変動係数 0.27 となり, 概ね実験におけるじん性率の傾向を評価できている。

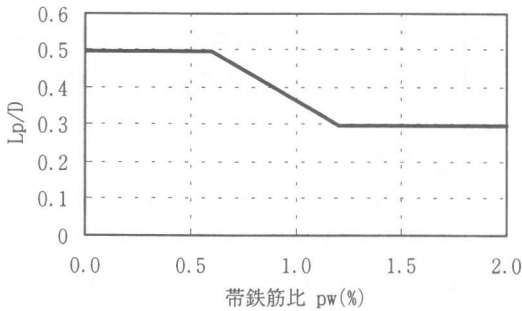


図-12 帯鉄筋比と等価塑性ヒンジ長

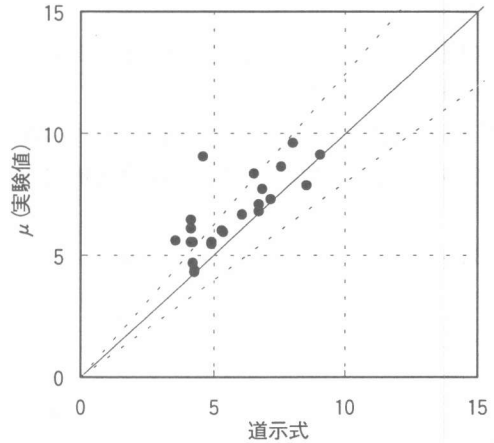


図-13 提案式と実験値の関係

5. まとめ

本検討の結果, 鋼板巻き立て補強橋脚の変形性能に関して以下の点が明らかとなった。

- 1) 基部をH鋼, リング補強等で強く拘束した供試体の多くは軸方向鉄筋の破断によって終局状態となっている。鋼板巻き立てのみの補強でも帯鉄筋比が多くなると軸方向鉄筋の破断が先行する場合もある。
- 2) 供試体の損傷範囲や道路橋示方書の等価塑性ヒンジ長を逆算すると, 帯鉄筋比が多くなると塑性ヒンジ長が低下する傾向が確認できた。RC 供試体と鋼板供試体の平均値の比は約 1:0.7 となる。
- 3) 実験では同位置での鋼板ひずみは帯鉄筋に比較して小さく, せん断補強効果として鋼板の効率を低下させる必要がある。
- 4) 耐力比を用いたじん性率評価式は, せん断耐力に関する鋼板の効率を 0.8 とすることにより鋼板巻き立て補強橋脚に対しても適用可能である。
- 5) 道路橋示方書に示されるじん性率評価式は, 帯鉄筋比に応じて等価塑性ヒンジ長を変化させることにより, 鋼板巻き立て補強橋脚のじん性率を精度よく評価可能であることがわかった。

参考文献

- 1) 幸左堅二, 大塚久哲, 星隈順一, 佐々木協一, 新保弘:RC 橋脚の変形性能向上に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, V-578, pp.43-54, 1997. 11
- 2) 川島一彦, 大塚久哲, 中野正則, 星隈順一, 長屋和宏:鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強法とその設計, 橋梁と基礎, pp.27-34, 1996. 1
- 3) 中野博文, 佐々木一哉, 堤貞博:鋼板補強した RC 橋脚の基部に着目した静的交番載荷試験, 土木学会第 52 回年次学術講演会 V, pp.646-647, 1997. 9
- 4) 谷村幸裕, 宮村正博, 奥井明彦, 佐藤勉, 渡辺忠明:RC 柱の鋼板巻き補強における鋼板分割の影響に関する実験的研究, 土木学会第 51 回年次学術講演会 V, 1996.9
- 5) 西川佳裕, 渡辺忠明, 佐藤勉, 谷村幸裕:鋼板巻き補強柱部材の変形性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.1505-1510, 1996
- 6) 金子昌生, 山田淳, 宇佐見健太郎:既設 RC 橋脚の耐震性向上に関する実験的検討, 土木学会第 51 回年次学術講演会, V-528, pp.1054-1055, 1996. 9
- 7) 幸左堅二, 鈴木直人:耐力比を用いた RC 橋脚のじん性率評価式の検討, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1383-1390, 1998. 3