

論文 正負交番载荷を行った壁式 RC 橋脚の補修効果に関する実験的研究

渡邊一悟*1・畑山 朗*1・岸 徳光*2・長谷川 正*3

要旨：地震により被災した RC 橋脚を補修した場合の、損傷程度に応じた補修効果を定量的に把握することを目的として、実構造物の 1/4 程度の試験体を用いた正負交番载荷実験を行った。载荷実験は、予備载荷により所定の損傷を与えた試験体にエポキシ樹脂注入または無収縮モルタル断面修復を施した後に、再度载荷する方法で実施した。実験の結果、補修後の試験体は、初降伏変位時の剛性は低下するものの、靱性能、エネルギー吸収量が向上し、補修前の試験体と同程度以上の耐震性能を有すること等が明らかとなった。

キーワード：RC 橋脚，補修，正負交番载荷，樹脂注入，断面修復

1. はじめに

1995 年に発生した兵庫県南部地震では、多くの RC 橋脚が甚大な被害を受けた。特に、設計施工年次が古く、横拘束筋量の少ない橋脚の被害が多いことから、部材降伏以降の塑性変形性能の重要性が認識され、それまでの震度法による耐震設計に加え、塑性変形性能に着目した地震時保有水平耐力法による耐震設計法が本格的に導入された¹⁾。この設計手法の導入により、現在では RC 橋脚の耐震性能は飛躍的に向上している。

しかしながら、塑性領域における損傷を許容するということは、被災後に構造物を供用するために、機能復旧を目的とした補修を行う必要があることを意味している。

また、損傷した RC 橋脚の補修に関しては、実験的研究²⁾³⁾が行われているものの、補修効果を定量的に把握するまでには至っていないのが現状である。著者らは、被災後の RC 橋脚の耐震性能および補修効果を定量的に把握することが合理的・経済的な補修工法の実現に繋がるものと判断し、実構造物の 1/4 程度の壁式 RC 橋脚試験体を製作して、予備载荷により所定の損傷を与えて、正負交番载荷実験を行い、補修回復に関する評価、検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験方法

本研究では、検討対象として道路橋で一般的に見られる RC 壁式橋脚を想定し、実構造物に極力近い条件を再現するため、上部工死荷重に相当する鉛直軸力 150 kN を鉛直载荷ジャッキにて一定に保持した状態での水平方向正負交番载荷実験を行うこととした。写真 - 1 には、実験装置の全景を示している。交番载荷は、まず、軸方向鉄筋の降伏ひずみを材料試験より得られた 1890μ と設定し、橋脚基部の引張側鉄筋ひずみが降伏ひずみに達するまでひずみ制御にて载荷を行った。

この時点における载荷点変位を降伏変位 δ_y 、水平荷重を降伏荷重 P_y と定義し、その後の载荷



写真 - 1 実験装置全景

*1 北海道開発土木研究所 構造研究室研究員 (正会員)

*2 室蘭工業大学 建設システム工学科教授 (正会員)

*3 (株)長大 札幌支店 技術部門

では片振幅を降伏変位の整数倍 ($2\delta_y, 3\delta_y, \dots$) で漸増させる変位制御とし、各変位振幅毎に 3 回繰り返し載荷する方法とした。

終局変位は、各変位振幅の 1 回目載荷時における正負いずれかの載荷荷重が降伏荷重 P_y を下回った時点の載荷点変位と定義している。

補修試験体の場合は、補修前の予備載荷として正負交番載荷により所定の損傷を与えた後、変位零を保持した状態でひび割れ部へのエポキシ樹脂注入または無収縮モルタルを用いた断面修復を行い、再度正負交番載荷実験を行った。

なお、補修試験体の場合には、予備載荷の時点で主鉄筋ひずみゲージが使用不可能となることから、補修を行わない基準試験体の降伏変位 δ_y を基準変位として交番載荷を行うものとした。

2.2 試験体および補修概要

試験体は、道路橋で一般的に見られる壁式 RC 橋脚を想定し、実橋脚の 1/4 程度の規模とした。図 - 2 には試験体の配筋概要図を示している。

試験体形状は、躯体高 2.0 m、断面寸法 0.38 × 1.14 m の長方形断面（辺長比 1:3）であり、引張主鉄筋比は $P_t = 0.45\%$ 、横拘束筋の体積比は $\rho_s = 0.2\%$ である。

補修を行う試験体は、補修前の損傷状況として、

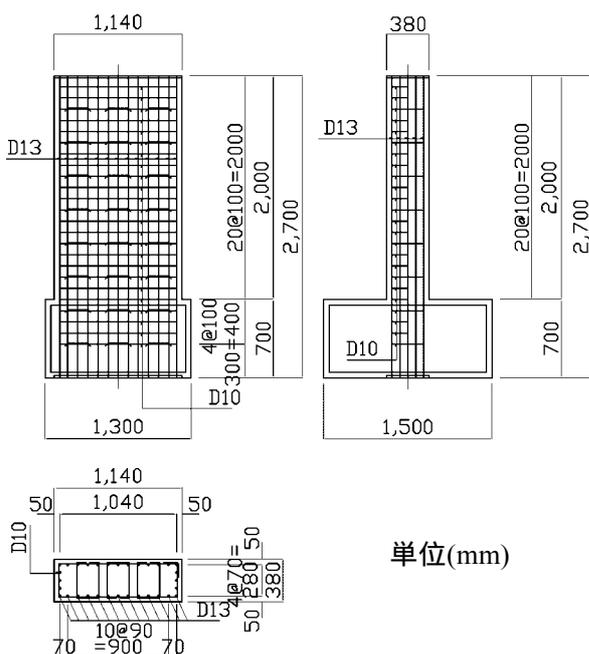


図 - 2 試験体の形状配筋概要図

1) 水平ひび割れのみが発生している段階、2) かぶりコンクリートが膨らみ出す前の段階、3) かぶりコンクリートが剥離し、鉄筋が座屈している段階、の 3 ケースを想定し、基準試験体の載荷実験における損傷状況より、それぞれ $3\delta_y, 5\delta_y, 7\delta_y$ まで予備載荷を実施した後に、強制的に変位を零に保持した状態で補修を施し、本載荷を行うものとした。

表 - 1 には試験体の一覧を示している。表中の試験体名の第 1 項は躯体高、第 2 項は修復の有無 (N: 無補修, R: 樹脂注入, M: 断面修復)、第 3 項は予備載荷時最大変位振幅である。実験に用いた試験体は、 $3\delta_y$ および $5\delta_y$ の予備載荷実施後にひび割れへのエポキシ樹脂注入を行った 2.0-R-3 試験体、2.0-R-5 試験体、 $5\delta_y$ および $7\delta_y$ の予備載荷実施後にかぶりコンクリートを除去し、無収縮モルタルを用いて断面修復を行った 2.0-M-5 試験体、2.0-M-7 試験体、および基準試験体となる 2.0-N 試験体の計 5 体である。

補修範囲は、ひび割れが顕在化している部分のみとし、予備載荷 $3\delta_y, 5\delta_y$ の試験体では基部から 300 mm の範囲、予備載荷 $7\delta_y$ の試験体では基部から 500 mm の範囲とした。なお、各供試体ともに断面の増加は行っていない。

また、表 - 2 には補修に用いた材料の物性値を示している。実験時の材令におけるコンクリートの平均圧縮強度は $f_c = 31.5$ MPa、平均弾性係数は 3.18 GPa、鉄筋は SD345 材を用い、引張試験による平均降伏点強度は 389 MPa であった。

表 - 1 試験体一覧表

試験体	予備載荷	補修方法
2.0-N	-	-
2.0-R-3	$3\delta_y$	エポキシ樹脂注入
2.0-R-5	$5\delta_y$	エポキシ樹脂注入
2.0-M-5	$5\delta_y$	無収縮モルタル断面修復
2.0-M-7	$7\delta_y$	無収縮モルタル断面修復

表 - 2 補修材料物性値一覧表

材料名	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
エポキシ樹脂	60.0以上	30.0以上
無収縮モルタル	32.6 (材令3日)	

3. 実験結果および考察

3.1 試験体損傷状況

(1) 2.0-N 試験体

基準試験体である 2.0-N 試験体の損傷は、 $1\delta_y$ ~ $3\delta_y$ 載荷時に高さ方向に 100 mm 程度の間隔の水平ひび割れが基部から 1200 mm 程度の範囲に発生した。 $3\delta_y$ 載荷以降では、基部から 300 mm 程度の範囲に損傷が集中し、それより上方ではほとんど損傷の進展は確認されていない。 $5\delta_y$ 載荷時には基部近傍のかぶりコンクリートに膨らみ出しは見られないものの、ハンマーによる打音から、軸方向鉄筋の付着切れによるかぶりコンクリートの浮きを確認できる状態であった。

その後、 $6\delta_y$ 載荷でかぶりコンクリートが膨らみ出し、 $7\delta_y$ 載荷では広い範囲でかぶりコンクリートが剥落した後、 $8\delta_y$ 載荷時に主鉄筋が破断することで荷重が低下し、終局状態に至った。かぶりコンクリートの剥落は、基部から 300 mm 程度の範囲で生じている。写真 - 2 には 2.0-N 試験体の終局時における損傷状況を示している。

(2) 2.0-R-3 試験体

予備載荷 ($3\delta_y$) 終了時の損傷は、高さ方向に 100mm 程度の間隔で水平ひび割れが生じている状態であった。

補修後の載荷における損傷は、2.0-N 試験体が終局に至った $8\delta_y$ 載荷時までは、かぶりコンクリートの剥離等は確認されていない。その後、 $9\sim 10\delta_y$ 載荷時にかぶりコンクリートが広範囲で剥落し、 $11\delta_y$ 載荷時に複数の主鉄筋の破断により荷重が大幅に低下し、終局に至った。

かぶりコンクリートの剥落は、基部から 300 mm 程度の範囲で生じている。写真 - 3 には、2.0-R-3 試験体の終局時における損傷状況を示している。

(3) 2.0-R-5 試験体

予備載荷 ($5\delta_y$) 終了時の損傷は、基部から 300 mm 程度の範囲のかぶりコンクリートに浮きが生じている状態であった。

補修後の載荷における損傷は、 $8\delta_y$ 載荷時までは 2.0-R-3 試験体と同様に、かぶりコンクリ

ートの剥離等は確認されていない。

その後、 $9\delta_y$ 載荷時にかぶりコンクリートの膨らみ出しが見られたが、注入したエポキシ樹脂がかぶりコンクリートの剥落を防止し、 $10\delta_y$ 載荷時においても膨らみが大きいもののかぶりコンクリートが剥落しない特徴的な損傷形態を示した。かぶりコンクリートの剥落は $11\delta_y$ 載荷時に生じた。 $12\delta_y$ 、 $13\delta_y$ 載荷では複数の主鉄筋が破断し、終局状態に至った。

かぶりコンクリートが剥落した範囲は、2.0-N、2.0-R-3 試験体の場合に比較して広く、基部から 500 mm 程度であった。写真 - 4 には、2.0-R-5 試験体の終局時における損傷状況を示している。



写真 - 2 2.0-N 試験体損傷状況



写真 - 3 2.0-R-3 試験体損傷状況



写真 - 4 2.0-R-5 試験体損傷状況



写真 - 5 2.0-M-5 試験体損傷状況



写真 - 6 2.0-M-7 試験体損傷状況

(4) 2.0-M-5 試験体

予備載荷 ($5\delta_y$) 終了時の損傷は、2.0-R-5 試験体と同様に、基部から 300 mm 程度のかぶりコンクリートに浮きが生じている状態であった。

補修後の載荷における損傷は、 $6\delta_y$ 載荷時に、無収縮モルタル部と既設部との境界でひび割れ幅の拡大が見られた。 $8\delta_y$ 載荷時には無収縮モルタルに膨らみ出しが発生し、 $9\delta_y$ 載荷時に広範囲で無収縮モルタルが剥落した。その後の載荷で徐々に荷重が低下し、 $11\delta_y$ で終局状態に至った。

かぶりコンクリートの剥落は、断面を修復した基部から 300 mm の範囲のみで生じており、剥落部と既設部との境界は明瞭であった。写真 - 5 には、2.0-M-5 試験体の終局時における損傷状況を示している。

(5) 2.0-M-7 試験体

予備載荷 ($7\delta_y$) 終了時の損傷は、基部から 300 mm 程度のかぶりコンクリートが剥

表 - 3 実験結果一覧

試験体	変位 (mm)		荷重 (kN)		終局塑性率											
	δ_y	δ_u	P_y	P_a												
2.0-N	12.2	97.6	94	126	8											
2.0-R-3	12.2	134.2	76	131	11											
2.0-R-5	12.2	158.6	74	13	2.0-M-5	12.2	134.2	76	135	11	2.0-M-7	12.2	134.2	72	133	11
2.0-M-5	12.2	134.2	76	135	11											
2.0-M-7	12.2	134.2	72	133	11											

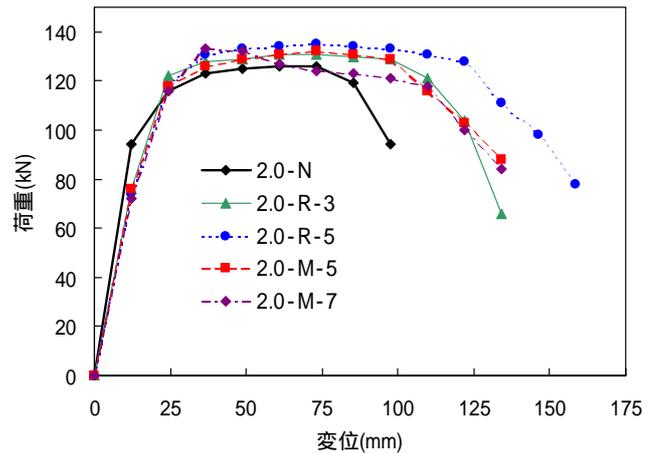


図 - 3 荷重 - 変位関係包絡線

落し、主鉄筋には既に座屈が生じていた。また、基部から 500 mm 程度のかぶりコンクリートに浮きが生じている状態であった。

補修後の載荷における損傷は、 $5\delta_y$ 載荷以降、補修部の無収縮モルタルに部分的な剥離が生じた。その後、変位振幅の増加に伴って徐々に剥落範囲が拡大し、 $9\delta_y$ 載荷時には無収縮モルタルが広範囲で剥落するとともに荷重が低下し、 $11\delta_y$ で終局状態に至った。

かぶりコンクリートの剥落は、断面を修復した基部から 500 mm の範囲のみで生じており、剥落部と既設部との境界は明瞭であった。写真 - 6 には、2.0-M-7 試験体の終局時における損傷状況を示している。

3.2 荷重 - 変位関係

表 - 3 には実験結果の一覧を、図 - 3 には荷重 - 変位関係の包絡線（繰り返し載荷 1 回目、押引平均）を示している。表中の δ_y 、 P_y は主鉄筋降伏時の載荷点水平変位、載荷荷重を、 P_a は載荷荷重の最大値（押引平均）を、 δ_u は終局時

の水平変位を示している。

表および図より、補修後の試験体の $1\delta_y$ 載荷時の荷重 P_y は、いずれの試験体の場合も 2.0-N 試験体の 76~80% 程度と小さな値を示しており、初期剛性が低下していることがわかる。これは、目視可能かつ樹脂注入可能なひび割れのみが補修され、ヘアクラック的なひび割れは無補修状態であること、モルタル補修の場合には断面修復部のみが補修されたことによるものと推察される。

$2\delta_y$ 載荷時には、補修を行った各試験体の載荷荷重は 2.0-N 試験体を上回る値を示しており、最大荷重 P_a も 5~7% 増加する結果が得られた。

なお、2.0-M-7 試験体は、無収縮モルタルの剥落が生じた $5\delta_y$ 載荷以降、徐々に載荷荷重が低下していることがわかる。一方、2.0-R-3、2.0-R-5、2.0-M-5 試験体では、2.0-N 試験体が終局状態に至る $8\delta_y$ 載荷時においても荷重の低下は見られなかった。

また、終局変位 δ_u を降伏変位 δ_y で除して評価する終局塑性率は、2.0-N 試験体が 8 であるのに対して、2.0-R-3、2.0-M-5、2.0-M-7 試験体では 11、2.0-R-5 試験体では 13 を示し、補修前と比較して大きな靱性能を示す結果が得られた。

図 - 4 には、載荷開始から $1\delta_y$ までの荷重 - 変位関係を示している。図より、2.0-N 試験体では、ひび割れが発生するまでの剛性（変位 0~3 mm）とひび割れ発生以降の剛性（変位 3~12 mm）に明瞭な差が認められる。一方、補修を行った各試験体では、載荷開始から 2.0-N 試験体のひび割れ発生後とほぼ等しい剛性を示すことがわかる。これは、上述と同様に 2.0-R-3、2.0-R-5 試験体では、予備載荷後の除荷により樹脂注入が不可能なヘアクラック的な微細なひび割れが残留していること、2.0-M-5、2.0-M-7 試験体では、断面修復部以外のひび割れの補修は行っていないことによると考えられる。

なお、図中の載荷開始点が異なるのは、変位を零に保持した状態で補修を行っていることによる初期導入力の影響であるものと考えられる。

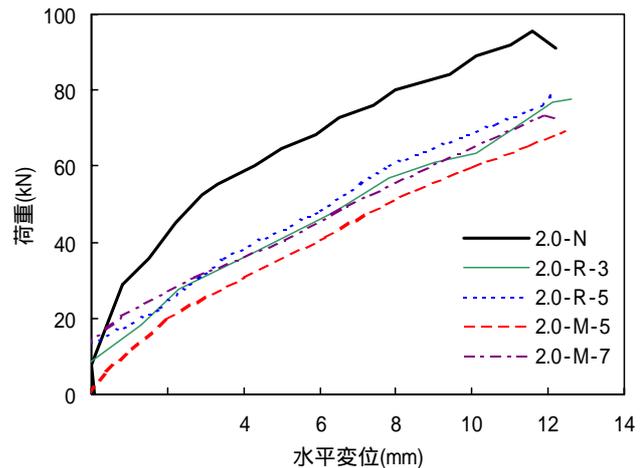


図 - 4 荷重 - 変位関係 ($1\delta_y$ まで)

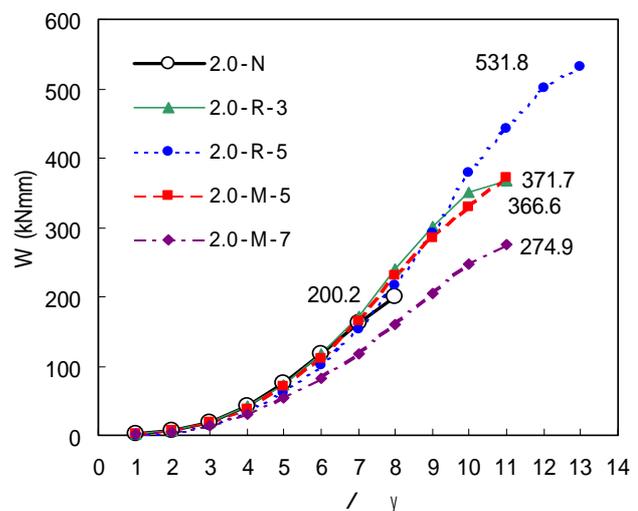


図 - 5 履歴吸収エネルギー量 (終局時)

3.3 履歴吸収エネルギー量

図 - 5 には、各試験体の終局変位までの履歴吸収エネルギーの累積値と変位振幅 (δ/δ_y) との関係を示している。

各試験体の終局時における履歴吸収エネルギー量の累積値は、2.0-N 試験体が 200.2 kNmm ($8\delta_y$) であるのに対し、2.0-R-3 試験体が 366.6 kNmm ($11\delta_y$)、2.0-R-5 試験体が 531.8 kNmm ($13\delta_y$)、2.0-M-5 試験体が 371.7 kNmm ($11\delta_y$)、2.0-M-7 試験体が 274.9 kNmm ($11\delta_y$) であり、基準試験体と比較して 1.4~2.6 倍と大きな値を示す結果が得られた。

しかしながら、2.0-N 試験体が終局となる $8\delta_y$ 載荷時に着目すると、この段階では、2.0-R-3、2.0-R-5、2.0-M-5 試験体は 2.0-N 試験体の 1.1~1.2 倍程度の値を示しているが、2.0-M-7 試験体

はかぶりコンクリートの剥落が発生する $5\delta_y$ 載荷以降の履歴吸収エネルギー量が小さく、累積値で 2.0-N 試験体の 0.8 倍程度の値を示した。

このように、基準試験体 2.0-N が終局となる $8\delta_y$ 載荷時点では、補修前の損傷程度が小さいほど履歴吸収エネルギー量が大きく、かぶりコンクリートが膨らみ出す前の段階で補修を行った試験体では、補修前と同等以上の履歴吸収エネルギー量を示すことが明らかになった。

3.4 等価粘性減衰定数

図 - 6 には、各変位振幅の履歴曲線から算出される等価粘性減衰定数を示している。

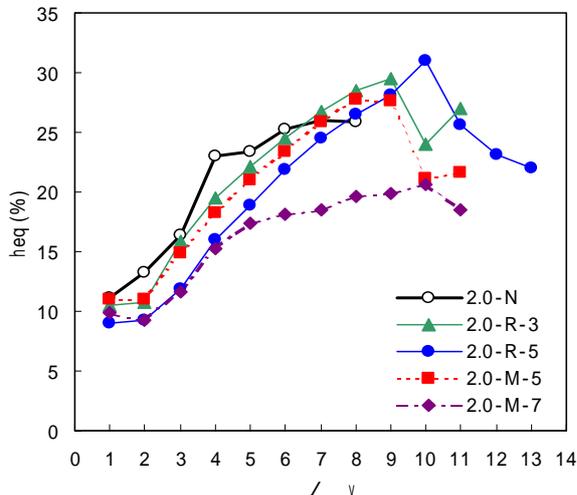


図 - 6 等価粘性減衰定数

基準試験体となる 2.0-N 試験体の等価粘性減衰定数 h_{eq} は、 $1\delta_y$ 載荷時の 11 % から徐々に増加し、最大値は 26 % を示している。

2.0-R-3 試験体は、 $6\delta_y$ 載荷時までは 2.0-N 試験体より小さな値を示すが、 $7\delta_y$ 載荷以降で 2.0-N 試験体の値を上回っており、最大値は 29 % であった。

2.0-R-5 試験体は、 $7\delta_y$ 載荷時までは 2.0-N 試験体より小さな値を示すが、 $8\delta_y$ 載荷時には 2.0-N 試験体の値を上回っている。その後、 $10\delta_y$ 載荷時に最大値 31 % を示した後、減少に転じ、終局となる $13\delta_y$ 載荷時では 22 % を示す。

2.0-M-5 試験体は、 $6\delta_y$ 載荷時までは 2.0-N 試験体より小さな値を示すが、 $7\delta_y$ 載荷以降で 2.0-N 試験体の値を上回っており、最大値は

28 % であった。

2.0-R/M-5 試験体を比較すると $9\delta_y$ まではモルタル補修の場合が大きい値を示すが、それ以降は樹脂注入の場合の値が大きいことが分かる。

2.0-M-7 試験体は、他の試験体と比較して小さな値を示しており、特に $5\delta_y$ 載荷以降の増加量が小さいことがわかる。 h_{eq} は 10 ~ 21 % を示した。これは、予備載荷の段階で主鉄筋に座屈が生じていること、 $5\delta_y$ 載荷時以降に無収縮モルタルの剥落が生じていることによるものと考えられる。

4. まとめ

被災後の RC 橋脚に対する合理的・経済的な補修技術を確立することを目的として、予備載荷後に補修を施した RC 橋脚試験体を用いた載荷実験を実施した。本研究で得られた結果を要約すると以下のように示される。

- 1) エポキシ樹脂注入、無収縮モルタル断面修復により補修を行うことで、変形性能は補修前以上に回復する。また、水平荷重についても $2\delta_y$ 載荷以降では補修前以上の値を示す。
- 2) 降伏時の荷重は、微細なひび割れの補修が不可能であることから、補修前と比較して低下し、76 ~ 80% の値を示す。
- 3) 予備載荷においてかぶりコンクリートの剥離が生じたケースでは、終局塑性率は向上するものの、エネルギー吸収性能、減衰性能は補修前の状態まで回復しない。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 耐震設計編，平成 8 年度版，1996.12
- 2) 海原ほか：大変形領域の交番載荷により損傷した高じん性 RC 柱の補修効果に関する試験結果，第 2 回耐震補強・補修技術，耐震診断技術に関するシンポジウム，pp71-78，1998.7
- 3) 鈴木，平澤：RC 正方形断面柱の補修効果に関する基礎的一実験，土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集，pp1128-1129，1996.9