

論文 梁端下端筋限定曲げ降伏機構に関する研究

大久保全陸¹ ・ 松岡忠生²

要旨：正負の繰返し曲げせん断応力を受ける鉄筋コンクリートフレーム構造の梁端部の耐震設計において、上端筋を曲げ降伏させず、下端筋に引張と圧縮の降伏を交互に生じさせる新しい曲げ抵抗機構の実現の可能性とその場合のエネルギー消費特性を検討するため、梁端下端のコンクリートを柱から絶縁し、下端筋だけが曲げ抵抗に関係するディテールを実験と解析によって検討した。その結果、下端筋の引張と圧縮の降伏による曲げ抵抗機構が計画できる可能性があること、またこの機構では主として下端筋の塑性変形によってエネルギーが消費されること等を示した。

キーワード：曲げ抵抗機構、エネルギー消費、下端筋、圧縮降伏

1. 序論

鉄筋コンクリートフレーム構造の耐震設計では、地震時には各層の梁端に曲げ降伏ヒンジが形成されるようにし、そのヒンジ領域における塑性変形によって地震エネルギーを消費する全体降伏型の抵抗機構を計画することが望ましいとされ、その概念に基づく耐震設計が普及しつつある。

しかしながら、1995年の兵庫県南部地震の経験によると、全体降伏型の理念に基づいて設計された鉄筋コンクリートフレーム構造の建物が実地震において確かに計画通りの挙動をしたと思われるものの、ひび割れやコンクリートの圧壊が各層の梁とスラブに多数生じたため、計画通りとはいえ、震後の補修費の見積りが過大となり、解体新築の一要因となった例があるなど、全体降伏型の耐震設計方法に対しては問題点もある。[1] また、梁降伏型の耐震設計では、梁端の上端が引張となる曲げ応力を受ける場合に、スラブの協力による梁の曲げ強度上昇とその評価法に関する課題が未解決の段階にある問題点もある。

以上の2つの問題点に共通する要因は、従来の梁降伏型骨組では、地震時の繰返し荷重下において梁端の上端筋が曲げモーメントによって引張降伏するように計画されていることである。そこで、上記の問題点を解決するための一つの方法として、本研究では、地震時に梁は下端筋だけが引張と圧縮の降伏を繰返すことによってその塑性変形でエネルギーを消費し、梁の上端筋には塑性変形を生じさせないコンセプトに基づくディテール設計の可能性を検討することとする。本論文では、図1に示す梁端下端にスリットを設けてコンクリートを柱から絶縁し、曲げによる断面圧縮力は全て鉄筋が負担する機構を検討の対象とする。

2. 試験体

2.1 試験体の設計方針

試験体の基本形状を図1に示す。梁は断面20x40cmで、梁端下端に深さ20cm、幅7.5cmのスリットを設けて梁端のコンクリートを柱から絶縁する。また、上端筋は引張降伏しないように計画するため下端筋より多く配筋する。梁のせん断力に対しては、梁下端が圧縮となる荷重時には梁端の

*1 九州芸術工科大学教授 芸術工学部環境設計学科、工博(正会員)

*2 九州芸術工科大学大学院生 生活環境専攻博士前期課程

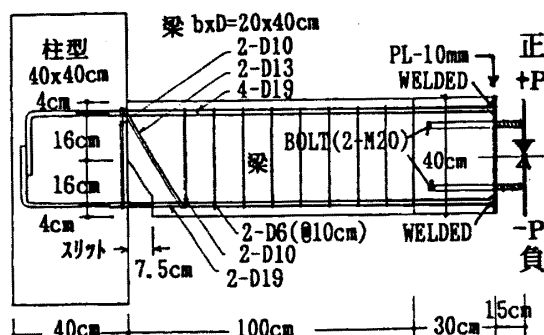
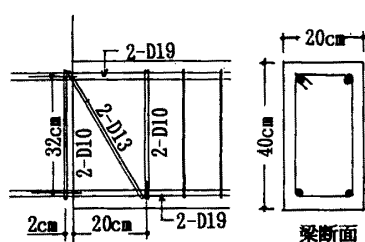


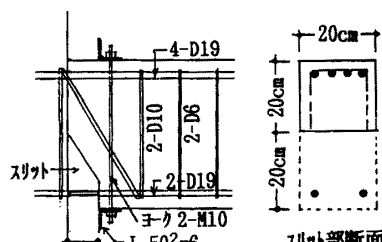
図1 梁端下端スリット付試験体(No.3)

表1 材料試験結果

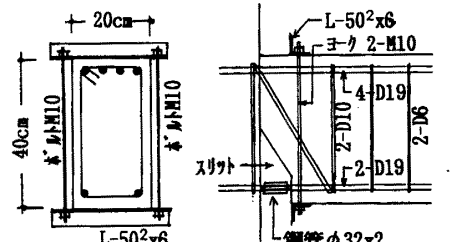
鉄筋	σ_y (MPa)	σ_t (MPa)	E_s ($\times 10^5$ MPa)
D19	393	591	1.71
D13	355	510	1.74
D10	371	531	1.72
D6	422	566	1.85
コンクリート	σ_B (MPa)	ϵ_B (%)	E_c ($\times 10^4$ MPa)
	26.0	0.28	2.04



(a) No. 1 試験体



(b) No. 2, No. 4 試験体



(c) No. 5 試験体

図2 梁端部詳細図(No.1, No.2, No.4, No.5)

鉄筋トラスで抵抗させることとし斜め筋を配置する。

2.2 試験体の種類

図1と図2示す5体の試験体を実験の対象とした。No.1は梁の上端筋と下端筋が交互に引張降伏する従来思想の梁である。No.2からNo.5の4体が本研究で主対象とするスリット付試験体である。スリットは、同形の発泡スチロールを予め型枠に取り付けてコンクリートを打設して成形し、実験時にはこれを除去した。No.2, 4, 5試験体では被りコンクリートの剝落と下端筋の座屈を遅延させるために図2のように梁の外部にヨークを取り付けた。また、No.5では下端筋の座屈強度の改善を目的として下端筋を鋼管で覆い、鋼管と鉄筋との間にはポリエステル系接着剤を注入した。

2.3 使用材料の性質

本実験で使用された鉄筋とコンクリートの材料試験結果を表1に示す。コンクリートは粗骨材寸法13mmの普通コンクリート(レミコン)を使用した。

3. 加力測定方法

図1に示す試験体の柱に相当する部分を試験床に固定し、片持ち梁の先端(柱面から145cm)で梁にせん断力を加える加力方法とした。荷重(作用せん断力)、加力点での梁の変形、梁主筋位置での梁軸方向の各区間の変形、鉄筋の歪等を測定した。No.2は一方向単調載荷とした。他の試験体は、下端筋の正負降伏時変形を基準としてその整数倍で変位漸増する正負繰返し加力とした。

4. 各試験体の荷重変形関係と破壊性状

図3aから図3dに各試験体の荷重変形曲線を示す。従来型のNo.1試験体では正加力時に上端筋が引張降伏し、負加力時に下端筋が引張降伏し、 $R=1/40$ まで安定した曲げ降伏型の挙動を示した。

梁端下端にスリットを設けたNo.2からNo.5の各試験体では、予想通り正加力時に下端筋が圧縮降伏した(図中のBCY点)。下端筋が圧縮降伏後、剛性は低下したが変形の増加に伴って荷重が上昇し、約 $R=1/60$ で下端筋の座屈が観察された。また、ほぼ同時に上端筋が引張降伏し、荷重が

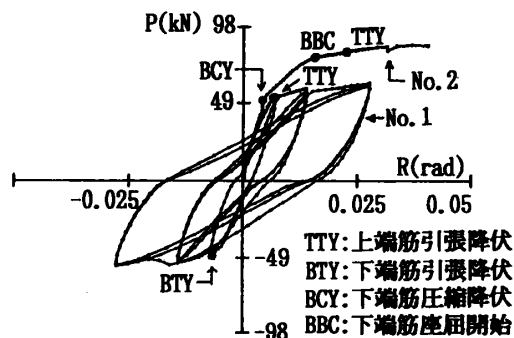


図3a 荷重変形曲線(No. 1, No. 2)

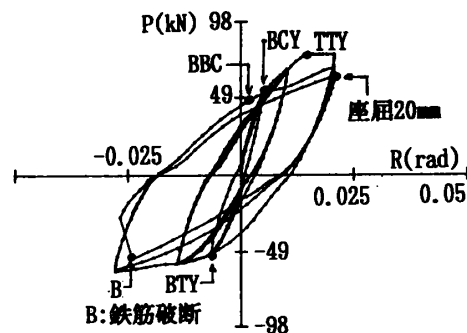


図3b 荷重変形曲線(No. 3)

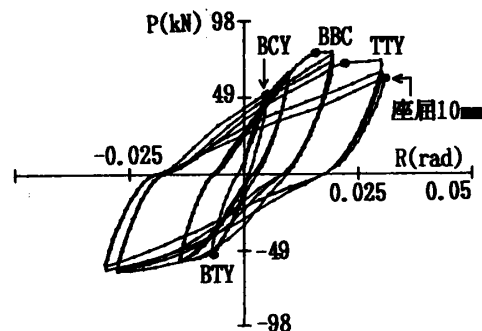


図3c 荷重変形曲線(No. 4)

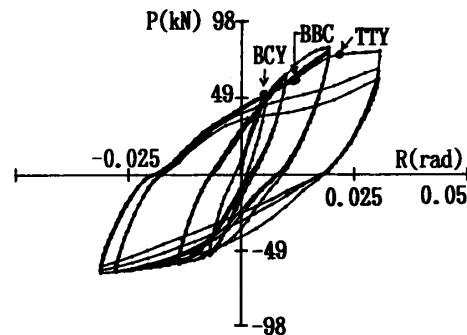


図3d 荷重変形曲線(No. 5)

一定になった。下端筋圧縮降伏後のこの荷重上昇は実験計画時に予測できなかった点であり、その原因について次章で分析するが、スリット上部のコンクリートの圧縮抵抗に起因している。

下端筋の被りコンクリートの剝落が拘束されていないNo. 3試験体では、 $R=1/50$ の変形での3回の繰り返し加力中に下端筋の座屈による変形(軸と直交方向)が約20mmとなり、この時点で約20%の荷重低下が生じた。下端筋の被りコンクリートの剝落を拘束したNo. 4とNo. 5では、 $R=1/50$ の変形での繰り返しによる荷重低下は少なく、 $R=1/35$ の変形での繰り返し加力中に下端筋の座屈(約10mm)が進み、顕著な荷重低下が生じた。以上のNo. 3からNo. 5試験体の比較により、下端筋の被りコンクリートを拘束し、その剝落を防止すると、圧縮鉄筋の座屈遅延に効果があることが分る。

スリットを設けたNo. 3, 4, 5の各試験体の負加力時(下端筋引張)の挙動は、従来型のNo. 1の負加力時の挙動とほぼ同様である。しかし、被りコンクリートが拘束されていないNo. 3では、正加力時に座屈した下端筋が負加力時に引張力を受けて引き伸ばされる際に、 $R=1/40$ (図4cのB点)で鉄筋の破断が生じており、この機構においては下端筋の座屈防止が重要であることが分かる。

5. 梁端の曲げ抵抗機構

5.1 下端筋圧縮降伏後の荷重上昇に関する検討

梁端部25cmの区間において上下主筋位置で測定した梁軸方向の区間変形 δ_{TOP} と δ_{BOT} を基にして決定した見かけの曲げ中立軸位置の挙動の一例(No. 2単調載荷)を図4に示す。

図に観られるように、見かけの中立軸位置は加力の初期からスリット上部のコンクリート断面内に位置し、スリット上部コンクリートの一部が終始圧縮変形を受けている。このコンクリートの圧縮力が曲げ強度に及ぼす影響を上下

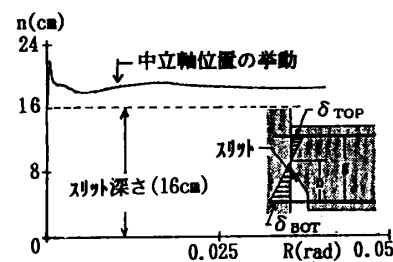


図4 見かけの中立軸位置(No. 2)

主筋に貼付した歪ゲージの測定値を用いて分析する。この分析では、1)スリット上部のコンクリートには、上端筋の引張力 $T_s (=a_t \sigma_t)$ から下端筋の圧縮力 $C_s (=a_c \sigma_c)$ を差し引いた分だけの圧縮力が作用している、2)その圧縮応力度は中立軸以下のコンクリート断面内に三角形分布で作用する、と仮定した。この仮定に基づいて分析された梁端のモーメント M と回転角 θ の関係を図5に示す。図中の実線AはNo. 2試験体の実測値であり、実線B及びCは 圧縮鉄筋の応力歪関係の仮定において歪硬化後の応力度上昇を無視した場合と考慮した場合の分析値である。また、実線Dは スリット上部コンクリートが圧縮力を分担しないと仮定した場合のものである。以上の分析から、スリット付き試験体の正加力時における圧縮鉄筋降伏後の顕著な荷重上昇の原因は、スリット上部コンクリートが負担している圧縮力の影響によるものであることが分る。なお、以上の挙動は繰返し加力を行った他の試験体についても基本的には同じである。

5.2 スリットの深さの調節による曲げ強度の調整

梁端のスリットを試験体の場合より更に深くし、スリット上部コンクリートの曲げ応力分担を減少させることにより、圧縮鉄筋降伏後の荷重上昇を緩和することができると考えられる。そこで、本章ではFEM非線形解析によりスリットの深さを变化させたモデルをとりあげて数値解析を行った。解析では図1と同形のモデルを使用し、スリットの深さだけを変化させた。解析には汎用平面応力解析プログラム(MARC-K5.2)を使用した。解析では鉄筋とコンクリートの1軸応力歪関係は材料試験結果を参考にして非線形モデルとし、鉄筋では歪硬化域での応力度上昇を考慮した。鉄筋とコンクリートの付着にはバイリニアの応力滑り関係を有するボンドリンクを採用した。有限要素解析による荷重変形関係を図6に示す。

図の実線Aは No. 2試験体(スリット深さ0.5D)の実験結果を示し、実線Bは 同試験体の解析結果である。実線C, D, Eは それぞれスリットの深さを0.6D, 0.7D, 0.8Dとした場合の解析値である。図からスリットの深さの調節により下端筋圧縮降伏後の荷重上昇が管理でき、スリットの深さを0.7Dとすると圧縮筋降伏後の荷重上昇が緩和された望ましい性状の曲げ抵抗機構が得られることが分かる。しかし、この点に関しては、有限要素解析では圧縮鉄筋の座屈による応力度低下の影響が考慮されていないので、実験による検討が必要である。また、曲げ強度上昇を抑えるための所要スリット深さについては上下の主筋量が関係するの

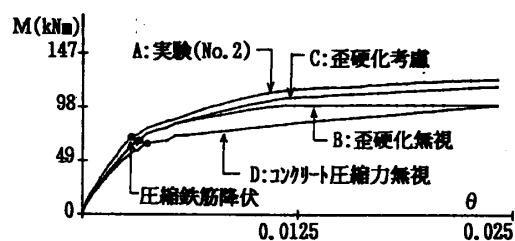


図5 抵抗モーメント M と回転角 θ の関係

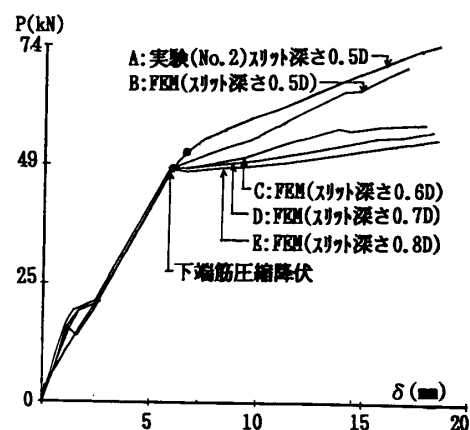


図6 FEM解析による荷重変形関係

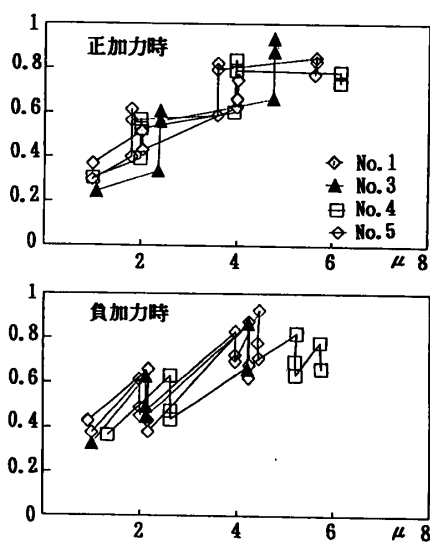


図7 基準化ループ面積と塑性率 μ

でその検討も必要となる。

6. エネルギー消費性状

6.1 ループ面積

繰り返し加力時の荷重変形曲線の面積を正負各サイクルについて求めた結果を図7に示す。図の縦軸は荷重変形曲線を各サイクルの最大荷重点の荷重と変形で基準化したループ面積であり、横軸は鉄筋降伏時の変形を基準とした塑性率である。図によると、各試験体間に大きな差は観られず、正負加力時ともスリットを有する試験体のループ面積は従来型の梁とほぼ同等である。

6.2 下端筋の歪挙動

図8に従来型のNo. 1とスリットを設けたNo. 5の下主筋の歪挙動を比較して示す。従来型梁のNo. 1では、下端筋は負加力時に引張降伏するが、正加力時には圧縮降伏しないため、正負繰返し加力による歪挙動のループ面積はあまり大きくはない。

一方、スリットを有する試験体では、下端筋が正負繰返し加力中に圧縮と引張の降伏を交互に繰返すため、図に観られるようにループ面積が極めて大きな歪挙動となっている。

6.3 梁の変形成分に関する分析

上下主筋レベル位置で測定した梁軸方向各区間の軸方向変形 δ_{TOP} 、 δ_{BOT} を用いて各区間の曲率を算出し、その曲率による加力点の曲げ変形 δ_B を求める。加力点位置で直接測定した梁の曲げせん断変形 δ から前記の δ_B を差し引いた値を梁のせん断変形 δ_s とする。スリットを含む梁端25cmの区間の曲率による加力点位置の曲げ変形を求め、その値を δ_{BE} とする。従来型試験体No. 1とスリットを有する試験体No. 5について、以上の各変形成分を比較して図9に示す。

図から従来型梁のNo. 1に比べて梁端にスリットを設けたNo. 5試験体では、下端筋が圧縮となる正加力時においてスリットを含む梁端部の曲げ変形 δ_{BE} の占める割合が大きくなっており、梁端部において顕著なエネルギー消費がなされていることが分かる。

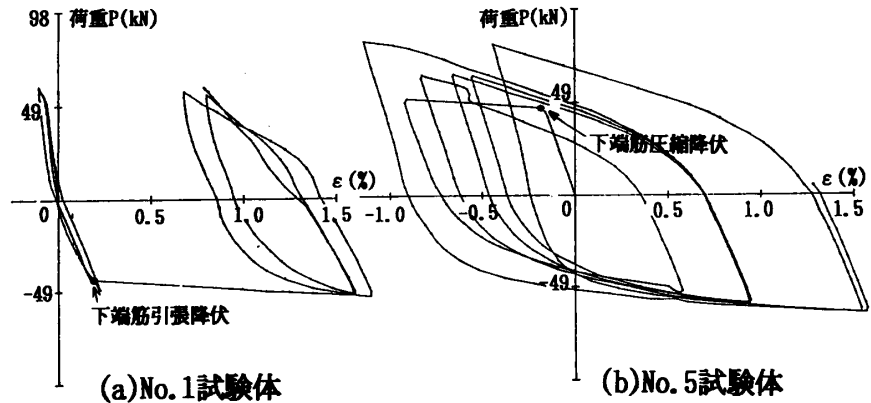


図8 梁下端筋の歪挙動

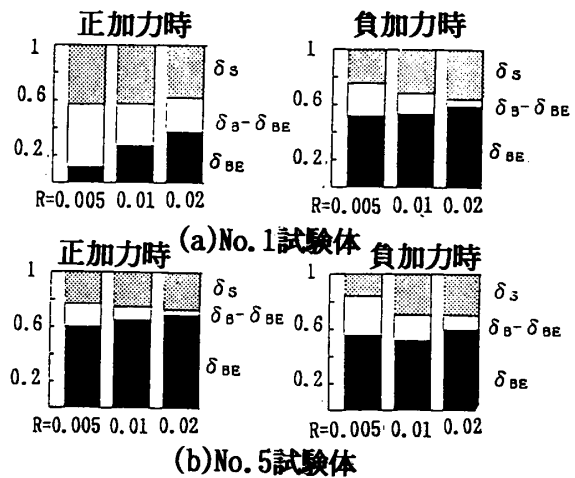


図9 梁部材の変形成分

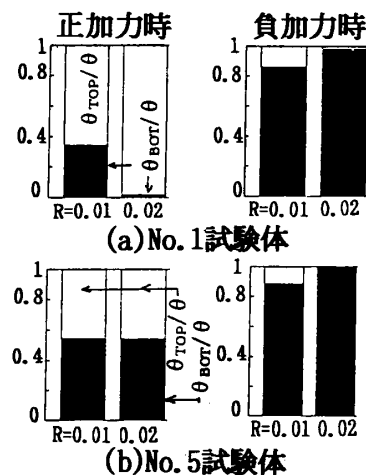


図10 回転角成分の分析

6.4 梁端の撓角に関する分析

梁端25cmの区間における上下主筋位置での軸方向変形 δ_{TOP} , δ_{BOT} と上下主筋間距離 g を用いて δ_{TOP} と δ_{BOT} のそれぞれによって生じる梁端の撓角 $\theta_{TOP}(=\delta_{TOP}/g)$, $\theta_{BOT}(=-\delta_{BOT}/g)$ を求め、それらが梁端の実撓角 $\theta(=\delta_{TOP}-\delta_{BOT}/g)$ に対して占める割合を求めた結果を図10に示す。

図から、スリット有無の差は正加力時に顕著に表れ、スリットを設けたNo.5では、従来型梁のNo.1に比べて下端筋の軸方向圧縮変形に起因する撓角 θ_{BOT} がかなり大きくなっていることが分かる。

以上の本章での検討により、梁端にスリットを設けた梁では、正加力時において梁部材としてのトータルの履歴消費エネルギーは従来型の梁とほぼ同等であるが、その消費エネルギーの多くは梁端下端筋の軸方向圧縮変形によって占められていることが分かった。

7. セン断力伝達機構

梁端にスリットを設けた試験体では、梁部材に作用するせん断力 Q を図1に示した梁端の鉄筋トラス機構によって柱に伝達することを考えて斜め筋を配筋した。斜め筋に貼付した歪ゲージの測定値を基に斜め筋が負担するせん断力 Q_D の割合について検討する。実験中、斜め筋は引張降伏することなく、弾性範囲内の歪挙動を示していた。

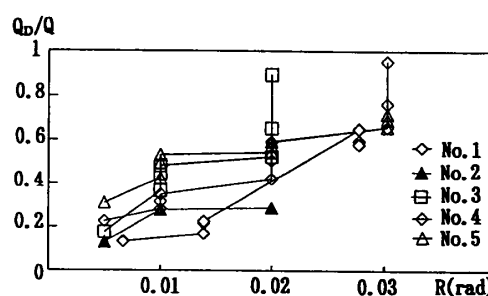


図11 梁端トラス筋のせん断力伝達割合

図11に各試験体の正加力時における斜め筋のせん断力負担割合($=Q_D/Q$)と部材変形 R との関係を示す。斜め筋の歪測定値に基づく鉄筋トラス機構のせん断力負担割合は、部材角 R の増加に伴って増加しており、変形が大きくなるとせん断力の大部分が斜め筋によって伝達されている。斜め筋によって伝達されるせん断力以外のせん断力伝達としては、スリット上部のコンクリートの骨材かみ合い作用と主筋のダボ作用等が考えられる。

8. 結び

本論文での検討の結果、

1) 梁端下端にスリットを設けた試験体で観察された下端筋圧縮降伏後の曲げ強度上昇は、スリット上部のコンクリートの曲げ圧縮力の負担によるものである。この曲げ強度上昇はスリットの深さの調節によって管理できる可能性がある。

2) 梁端にスリットを設けた試験体では梁部材としての履歴エネルギーの多くがスリットを含む梁端区間の下端筋の塑性変形によって消費されている。

3) 梁端にスリットを設けた梁のせん断力伝達は斜め筋の配筋によって可能となる、等を示した。しかし、スリットを設けた梁の曲げ抵抗機構に関しては、安定した挙動を確保するための下端筋の座屈遅延策、柱梁接合部内での下端筋の定着付着機構の解明等、今後の課題が残されている。

〔文献〕1) 平成7年(1995年)兵庫県南部地震被害調査報告(ジュネス六甲), 新井組技術研究報告集第8号, 1995. 10.