

論文 繰り返し荷重を受ける RC はり断面のせん断変形挙動に関する解析的研究

橋本伸一*1・中村光*2・檜貝勇*3

要旨：曲げ降伏後の RC 断面のせん断変形挙動を、拡張した修正圧縮場理論を用いて解析的に評価した。一方向荷重において本論文では、せん断補強鉄筋量、モーメント-せん断力比をパラメータとして取り上げ、せん断変形挙動およびその影響を論じ、繰り返し荷重においては、その挙動を解析的に追うと同時に、繰り返しがせん断変形に及ぼす影響について検討することで、曲げ降伏後の RC 断面の挙動にせん断変形が大きな影響を及ぼすことを明らかにした。

キーワード：せん断変形挙動、拡張した修正圧縮場理論、曲げ降伏、繰り返し荷重

1. はじめに

RC 部材の挙動を正確に把握するためには、部材の全体変形挙動に占める、曲げ変形とせん断変形それぞれの割合およびその影響を適切に評価することが必要である。例えば、曲げ降伏後繰り返し荷重を受けせん破壊する RC 部材を考えれば、その挙動を評価するためには、全体変形の内での曲げ変形およびせん断変形の役割を明確にした上で[1]、さらに、せん断変形が及ぼす影響について論じる必要があると考えられる。部材変形のうち曲げ変形は平面保持の仮定に基づく曲げ理論により評価することが可能である。それに対して RC 断面のせん断変形はその複雑さゆえに、あるいはせん断変形を明確に取り扱う理論が見あたらないという理由のために、従来ほとんど評価されていなかった。

そこで本研究では、力の釣合および変形の適合条件を用いて RC 断面のせん断問題を一般的に取り扱う修正圧縮場理論を拡張した手法を用いることで、一方向荷重ならびに繰り返し荷重を受ける RC 断面が曲げ降伏する場合のせん断変形挙動について解析的に評価することを試みた。

2. 拡張した修正圧縮場理論の解析方法

2.1 解析方法

拡張した修正圧縮場理論に基づく解析方法[2]は、Collins らにより提案された修正圧縮場理論[3]を、曲げ・軸力・せん断力を受ける RC 部材に対し、その曲げ・せん断挙動を精度よく評価できるように拡張したものである。その解析手順は簡単には以下の通りである。図-1 に示すような RC 矩形断面を薄い層に分割し、図-1 (c) (d) のように、軸ひずみ分布は直線、せん断応力分布は断面内で一定の仮定を与える。その後、各々の鉄筋コンクリート層に与えられる軸ひずみ・せん断応力に対し修正圧縮場理論を用いることで、各層の力の釣合条件ならびに変形の適合条件を満たす解を求める。この各層で得られた解より断面力を算定し、与えられた外力との力の釣合を考えることで、断面としての唯一の解を求める方法である。著者らが従来用いてきた手法[2]はコンクリートに対し各層で同一の応力-ひずみ曲線を与えるものであったが、本解析では各層における材料の応力-ひずみ関係に、任意の除荷経路を仮定し、各層で異なる応力ひずみ曲線を与

*1 山梨大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (正会員)

*2 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)

*3 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)

えることにより、繰り返し荷重下における解析にも適応できるよう展開した。本手法を用いれば、2軸応力状態下でのRC断面の軸方向ひずみならびにせん断ひずみの性状を得ることができると、せん断変形の影響を検討することが可能になる。

なお本論文では、解析より得られる軸方向ひずみの傾き（曲率）が曲げ変形、せん断ひずみがせん断変形とそれぞれ等価であると仮定し、曲率量・せん断ひずみ量を用いて曲げ変形・せん断変形の影響を論じることとする。したがって、本論文での曲げ変形量は曲率量に、せん断変形量はせん断ひずみ量に対応している。

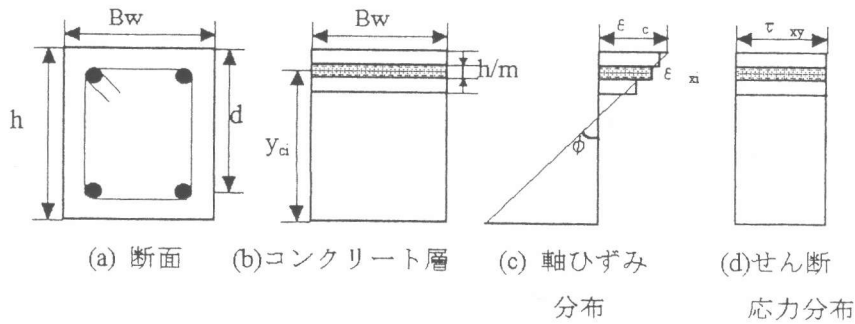


図-1 解析断面の仮定

2.2 材料モデル

コンクリートの応力ひずみ関係は図-2に示すように、圧縮領域においては最大圧縮応力(f_c)までを2次曲線とし、その後直線的に応力が零まで減少するモデルを用いている。主圧縮強度(f_{2max})は、Collinsらの提案した式[3]を用い、主引張ひずみにより低下させた。一方、引張領域においては、応力は最大引張応力(f_t)までは、初期勾配($2f'_t/\epsilon_{co}$)で増加すると仮定し、その後テンスションスティフニング効果を考慮した、有効高さ(d)を関数として含む引張軟化曲線を用いたモデル[2]を仮定した。

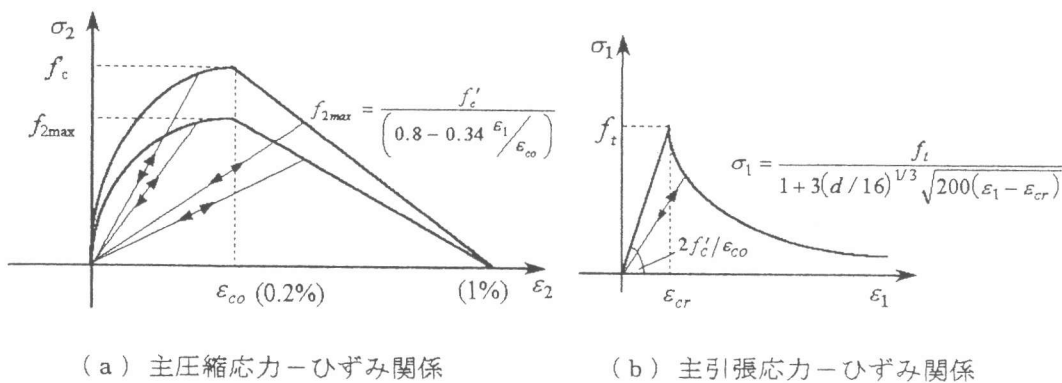


図-2 コンクリートの応力-ひずみ関係

除荷時の応力ひずみ曲線は、圧縮側、引張側ともに、簡単のために除荷点から線形に原点にもどる原点指向型とした。ただし、圧縮側の応力ひずみ曲線は、主引張ひずみにより主圧縮強度(f_{2max})が変化することで、その形状が変化したが、除荷時、再除荷時において形状に変化が生じた場合は、除荷点のひずみの値を既定値として、応力の値は形状変化に従いそのつど変化させることとした。

鉄筋に対しては、引張・圧縮とも降伏点までは線形を保ち降伏点を超えると一定の降伏応力と

なる *bi-linear* 型を仮定した。除荷時の応力ひずみ曲線は、単調荷重時の降伏線に交わるまでは初期剛性で応力が増加し、それ以降は降伏線上を移動する応力-ひずみ曲線を仮定した。

2. 3 解析モデル

解析に用いたモデルは、図-3に示すような幅20cm、有効高さ16cmのRC矩形断面であり、断面積 3.3cm^2 の引張鉄筋(引張鉄筋比1.03%)と圧縮鉄筋を、断面積 2.2cm^2 の中間鉄筋を配置したモデルである。解析はこの断面モデルを断面高さ方向に20等分割して行った。解析に用いた材料定数としては、コンクリートの圧縮強度(f_c)を 280kgf/cm^2 、圧縮強度時のひずみを -0.002 、引張強度(f_t)を 28kgf/cm^2 とし、鉄筋は降伏強度(f_y) 3500kgf/cm^2 、ヤング率(E_s)

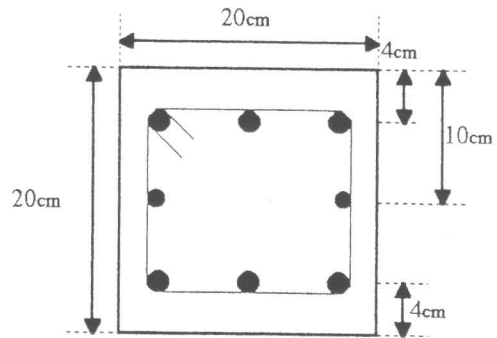


図-3 解析モデル

$2.0 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$ を仮定した。解析は上記モデルを基本断面とし、一方向載荷に対しては、せん断補強鉄筋比、モーメント-せん断力比 $M/(V \cdot d)$ (構造的には柱の場合 a/d (a :せん断スパン長さ d :断面の有効高さ) と同一) をパラメータとして行い、せん断変形の影響を検討した。

3 曲げ降伏後の挙動に対するせん断変形の影響

3. 1 せん断補強鉄筋の影響

図-4および図-5に、せん断補強鉄筋比を0%、0.10%、1.00%と変化させたときに、解析より得られたせん断力-曲率関係および、せん断力-せん断ひずみ関係を示す。また図-4では、曲げ理論に対する関係を実線で併せて示している。なお図中のせん断ひずみは分割した断面に対して得られる各層のせん断ひずみを平均した値である。本解析では、引張鉄筋降伏はせん断力が約1.8tfの時に生じているが、その時点までは、せん断補強鉄筋量の違いは解析上認められず、またせん断変形もほとんど生じていない。それに対し、引張鉄筋降伏後では、せん断補強鉄筋量の違いが徐々に表れている。すなわち、

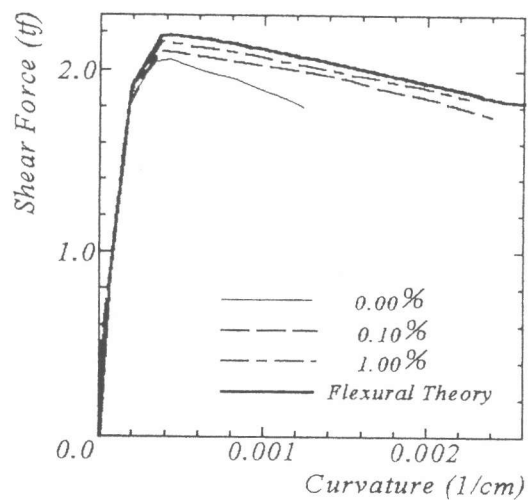


図-4 せん断力-曲率関係

せん断ひずみは、引張鉄筋降伏後から徐々に増加しはじめ、せん断補強鉄筋量が少ないほどせん断変形の増加量が多くなる。またこの時、せん断変形量は、最大耐力に顕著な影響を及ぼし、せん断変形量が大きくなるほど、耐力を低下させることが明らかになった。さらに最大耐力以降について考えれば、せん断補強鉄筋比の違いにより、せん断変形挙動は著しく変化し、せん断変形量はせん断補強鉄筋比が小さくなるにつれて、顕著に増加する。一方、曲げ変形量はせん断変形量が増加するほどには、顕著に増加しない結果となった。このことは、図-6に示すせん断ひずみ-曲率関係からも明らかである。したがって本解析結果によればせん断変形の影響は、引張鉄筋降伏後顕著になりせん断変形量が大いほど耐力を低下させること、ならびにせん断補強鉄筋量が少ない場合には、最大耐力以後の挙動はせん断変形に大きく依存する可能性があること

が示された。またせん断ひずみを考慮できる本解析において、せん断補強鉄筋のコンファインド効果によるコンクリートの応力-ひずみ関係の変化を考えていないにもかかわらず、せん断補強鉄筋量により解析値に大きな変化が生じたことは、せん断補強鉄筋の役割として、曲げ降伏後のせん断変形を抑制する効果はかなり重要であることを示唆するものと考えられる。なお、せん断補強鉄筋量がある程度存在すれば、図-4に示すように、せん断変形の程度はかなり小さくなるため、せん断力-曲率関係は、曲げ理論とほとんど一致することになる。

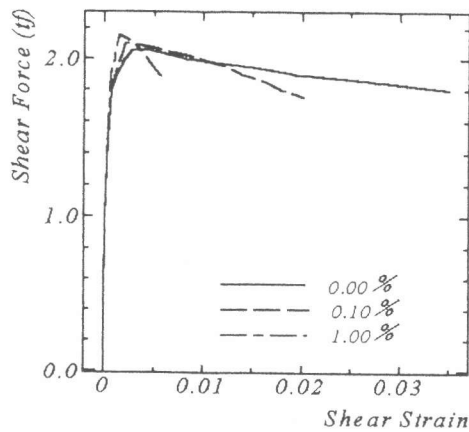


図-5 せん断力-せん断ひずみ関係

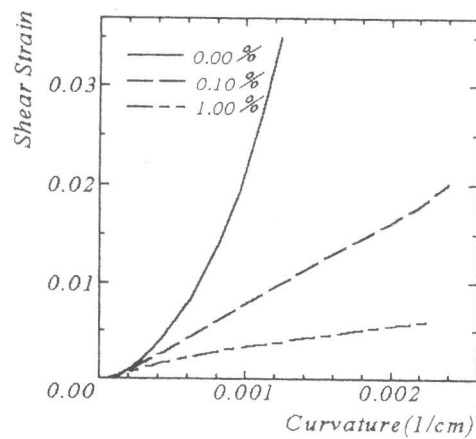


図-6 せん断ひずみ-曲率関係

3.2 モーメント-せん断力比の影響

せん断補強筋がない断面に対し $M/(V \cdot d)$ (構造的には柱の場合 a/d) を、3.5、5、7に変化させて解析を行い、せん断スパン比とせん断変形の関係を検討した。解析より得られたせん断力-曲率関係ならびにせん断力-せん断ひずみ関係をそれぞれ図-7、図-8に示す。解析結果によれば引張鉄筋降伏後 $M/(V \cdot d)$ が小さいほど、せん断変形の影響が顕著になる。また図-7で曲げ理論により算出した値をそれぞれ細線で示しているが、 $M/(V \cdot d)$ が小さくなりせん断変形量が大きくなるほど耐力ならびに最大耐力以降の挙動が曲げ理論値と大きく異なり断面の挙動がせん断変形に大きく支配されていることが示されている。このことは、図-9に示すせん断ひずみ曲率関係において、同曲率レベルに対し $M/(V \cdot d)$ が小さいほどせん断ひずみが増加していることから明らかである。以上のパラメータ以外にも軸力および引張鉄筋比をパラメータとした検討も行ったが、これらの場合、軸力が大きくなるほどあるいは引張鉄筋量が多くなるほど、せん断変形量が顕著に増加し、せん断変形の影響が上記の解析結果と同様に現れることを確認した。せん断補強鉄筋比、モーメントせん断力比、軸力、引張鉄筋比のパラメータは、い

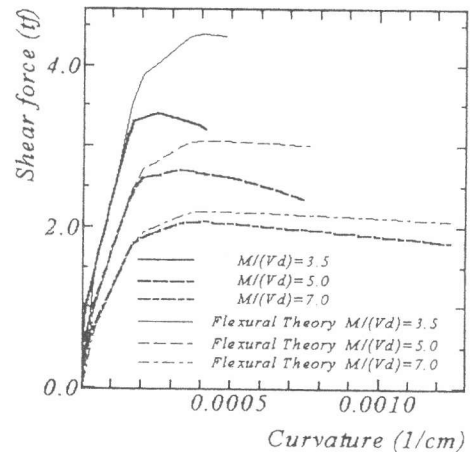


図-7 せん断力-曲率関係

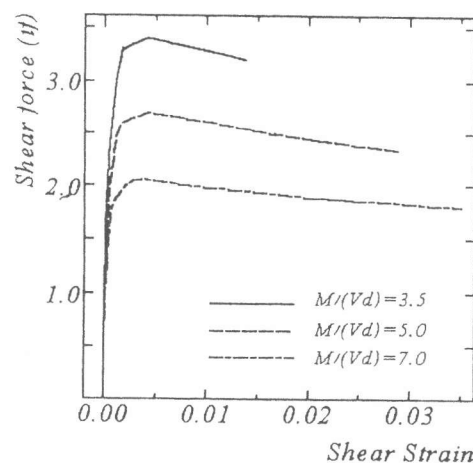


図-8 せん断力-せん断ひずみ関係

づれもせん断耐力算定式[4]あるいは曲げせん断破壊型 RC 柱の靱性算定式[5]に考慮されている要因である。本解析では、それらのパラメータがせん断変形と密接な関係にあることが示されており、今後せん断変形の影響を明確にすることが上記算定式の精度を向上させていくために、重要な条件の一つとなることが予想される。

4. 繰り返し荷重下における RC 断面のせん断変形挙動

$M/(V \cdot d)=7.0$ (柱の場合 $a/d=7.0$ に対応), 軸力 0 の条件のもとで繰り返し載荷を行い、繰り返し荷重下でのせん断変形挙動を調べた。繰り返し載荷は、引張鉄筋降伏時の曲率を ϕ_y とし、 $\phi_y \rightarrow -\phi_y \rightarrow 2\phi_y \rightarrow -2\phi_y \rightarrow \dots$ のように曲率を ϕ_y の整数倍で逐次増加させて行った。解析より得られた、せん断力-曲率関係ならびにせん断力-せん断ひずみ関係を図-10、図-11 に実線で示す。また図中、単調載荷したときに得られた結果を併せて点線で示す。図-10 に示すせん断力-曲率関係によれば、繰り返し載荷を行った場合繰り返しサイクル毎に、単調載荷の場合よりも耐力が低下しているのが分かる。これは前章で述べたように、せん断変形が耐力に影響を及ぼしたものと推測され、繰り返し載荷を行うことで、単調載荷の場合よりもせん断変形が増加することを意味する。このことは、図-11 に示すせん断力-せん断ひずみ関係において、せん断変形が再載荷の場合除荷点には戻らず、若干づつ増加していることから分かる。一方、図-11 の繰り返し載荷中のせん断変形について見てみれば、せん断変形が荷重除荷時に荷重が小さくなったときに、著しく増加することが示されている。また荷重方向が反転しある程度荷重が増加していくと、一度増加したせん断変形が逆に減少していく結果が得られた。繰り返し載荷中のせん断変形挙動については、衣笠ら[1]が実験結果に基づき、①載荷の方向を変えたことによりせん断抵抗機構が一時的に消滅しせん断変形成分が増加する領域、②変形の増加とともにせん断抵抗機構が再形成され、せん断変形成分が減少する領域が存在することを指摘しているが、今回の解析結果では衣笠らの報告とほぼ同様なせん断変形挙動が示されている。

図-12 に繰り返し載荷を行った場合の $+\phi_y, +2\phi_y, +3\phi_y$ 時の解析により得られた断面のせん断ひずみ分布を示す。図によれば繰り返しを行うことで、断面中央より上部(断面上部の軸方向ひ

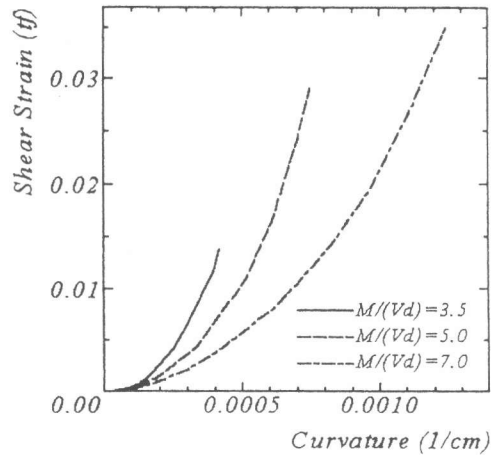


図-9 せん断ひずみ-曲率関係

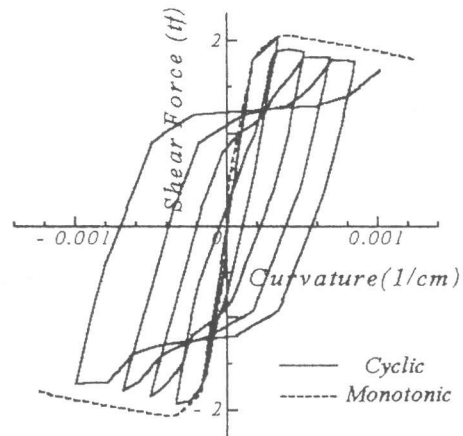


図-10 せん断力-曲率関係

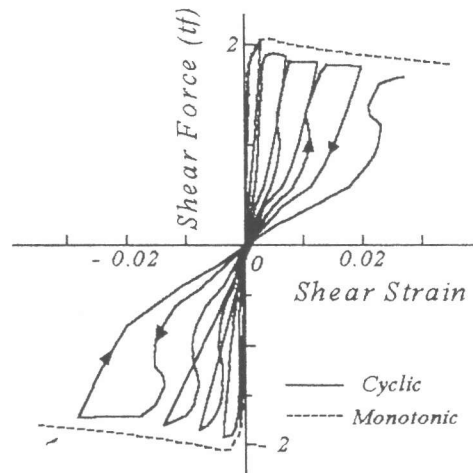


図-11 せん断力-せん断ひずみ関係

ずみが圧縮)のせん断ひずみが徐々に増加していくことが分かる。このような現象は単調載荷時には得られないものであり、このことが繰り返し載荷の場合にのみ得られる特徴である。

なお、今回の解析では、図-1に示すように断面のせん断応力分布は簡単のために一定と仮定しており、解析結果もこの仮定の影響を大きく受けていると考えられるが、適切なせん断応力分布を仮定した上で解析を行えば、本手法によりRC断面の挙動に及ぼすせん断変形の影響を定量的に評価することが可能となると思われる。

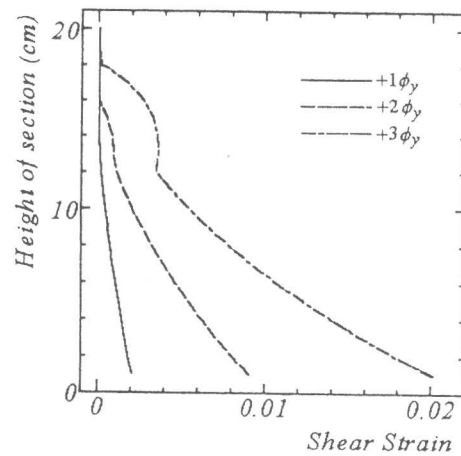


図-12 せん断ひずみ分布

5. 結論

拡張した修正圧縮場理論に基づく解析手法により、一方向荷重ならびに繰り返し荷重下におけるせん断変形挙動を調べることにより、以下の結論を得た。

- (1) せん断変形は、耐荷力に顕著な影響を及ぼし、せん断変形が大きいほど耐荷力が小さくなる傾向が解析的に示された。
- (2) 最大耐力以降のせん断ひずみは、せん断補強鉄筋量が少ないほど、モーメントーせん断力比が小さいほど、軸力が大きいほど、引張鉄筋量が大きいほど顕著に増加する。
- (3) 本解析に用いたコンクリートの応力-ひずみ関係は、コンファインド効果を考慮したものではないが、せん断補強鉄筋量の違いによる解析値には大きな変化が生じた。この結果は、曲げ降伏以降におけるせん断補強鉄筋の役割として、せん断変形を抑制させる効果が大きいことを予想させる。
- (4) 繰り返し荷重下においては、繰り返しを経験していくほどせん断ひずみが増加する傾向を示す。このことが繰り返し載荷を行った場合の復元力を低下させる要因となっている。
- (5) 繰り返しを行うことで、断面のせん断ひずみ分布形状は単調載荷の場合と徐々に異なる傾向を示す。

参考文献

- [1]衣笠秀行、野村設郎： 正負繰り返し履歴破壊とせん断破壊の破壊メカニズムの相違の検証、コンクリート工学論文集、第6巻第2号、1995、7、pp.82-96
- [2]中村光、檜貝勇： 拡張した修正圧縮場理論によるRCはり断面のせん断耐荷力評価、土木学会論文集、No.490 /V-23、1994、5、pp.157-166
- [3]Frank J.Vecchio and Michael P.Collins： The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear、ACI Journal、March-April、pp.219-231、1986
- [4]二羽淳一郎、山田一字、横沢和夫、岡村甫： せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集、No.372 /V-5、1986、pp.167-176
- [5]中村光、二羽淳一郎、田辺忠頭： 解析的研究に基づくRC部材の塑性変形能定量化、土木学会論文集、No.442 /V-16、1992、2