

論文

[2159] 繰り返し曲げを受ける RC 単純梁の累積消費エネルギー量の算定

正会員 魚本健人 (東京大学生産技術研究所)

正会員○矢島哲司 (芝浦工業大学土木工学科)

本郷和徳 (芝浦工業大学大学院)

1. はじめに

大地震等において、鉄筋コンクリート（以下、RCと略す）構造物が塑性変形を繰り返し受けた場合、被災後のその構造物の損傷程度および余力をより適切に評価する必要があると考えられる [1]、[2]。筆者等は前報 [3] において、RC梁の累積された損傷・劣化の程度は累積消費エネルギー量と密接な関係があることを実験によって以下のように明らかにした。

図-1、図-2は、前報の試験結果である。荷重方法はいずれも変位制御で動的（sin波形、荷重速度；0.1~0.4Hz）に行なった。また、静的一方向荷重によって引張鉄筋が降伏して部材の剛性が変化した降伏変位  $\delta_y$  (8mm、荷重；3.51t) を基に、5種類の同一変位による正負交番繰り返し荷重を破壊まで行なった。1サイクル当たりの消費エネルギー量は、測定した荷重および部材中央の変位計（2個）より求めた1サイクルの荷重(P)~変位( $\delta$ )曲線を20次関数に近似させ、ループに囲まれた面積( $\Delta W$ )を計算して求めた。なお、図-1は1サイクル当たりの消費エネルギー量と繰り返し回数との関係を示したものである。図中の数字は破壊時までの繰り返し回数(N)である。また、破壊回数は、通常、復元力が最大荷重の80%以下に低下した時点か、あるいは降伏変位における荷重以下に低下した時点破壊とするのが一般的であるが、前報の実験においては荷重が0付近まで大きく低下するか、または鉄筋が切断した時点破壊とした。荷重変位の大きい  $\pm 4\delta_y$ 、 $\pm 5\delta_y$  の場合は、荷重回数の増加にともない消費エネルギー量は減少したが  $\pm 1\delta_y \sim \pm 3\delta_y$  においては、繰り返し回数の増加にもかかわらず破壊時までほぼ一定の値を示した。図-2は消費エネルギー量を破壊時まで加算した累積消費エネルギー量 ( $\Sigma \Delta W$ ) と繰り返し回数との関係を示したものである。図に示されるように、荷重変位が  $\pm 1\delta_y \sim \pm 5\delta_y$  と異なっているにもかかわらずほぼ同一の値 ( $3.3 \times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ ) を示した。

一般にRC部材は、断面性能、荷重条件等が異なれば破壊形態が異なり、変形性能やその挙動が複雑になり、塑性域での挙動を的確に捉えることが難しいと考えられる。しかし、前報の繰り返し

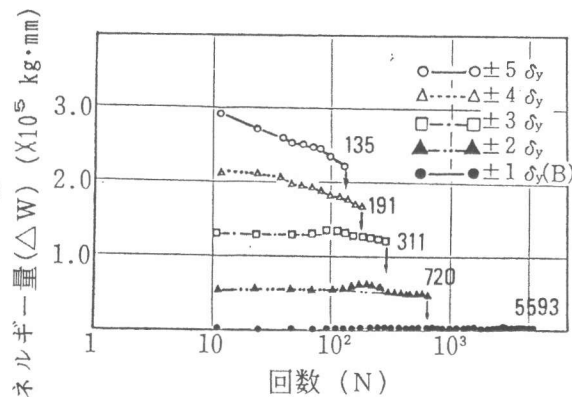


図-1 消費エネルギーと繰り返し回数

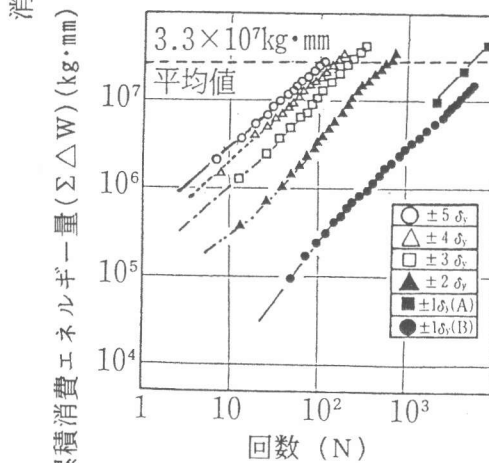


図-2 累積消費エネルギー量

返し載荷された試験体の破壊形態は、 $\pm 5 \delta y$ の試験体を除きいずれも鉄筋の破断であった。このような破壊となったのは、試験体の腹鉄筋比(0.97%)が比較的大きく、この拘束によってコンクリートの塑性変形性能が改善され、大変形の繰返しにもかかわらずコンクリートは圧壊せず繰返し回数の増加とともに主筋が部材の曲げ耐力を支配したためと考えられる。このような破壊形態において、いずれもほぼ同じ総消費エネルギー量に到達した時点で破壊していることからこの値は部材が消費し得る最大消費エネルギー量 ( $W_0$ ) を示しているものと推定される。この値が求めれば、例えば1回の地震等による累積消費エネルギー量が求めればこれが何回生じた場合に破壊するかを求めることが出来ると考えられる。

そこで本文は、実験によって求められた破壊回数および最大消費エネルギー量を簡単な履歴モデルと材料学の視点から破壊エネルギーを用いて算定した。なお、本文では前報で報告した試験体(単純梁)を解析の対象とした。

## 2. 解析

### 2.1 解析の考え方

そこで解析では、最大消費エネルギー量 ( $W_0$ ) を(1)式に示すように破壊時までの繰返し載荷回数 ( $N$ ) と破壊時までの消費エネルギー量の1サイクル当たりの平均値 ( $\Delta W$ ) との積に等しいと仮定して求める。

$$W_0 = \int dW = \Delta W \cdot N \quad (1)$$

ここで、消費エネルギー量の1サイクル当たりの平均値 ( $\Delta W$ ) は、提案する簡単な  $M \sim \phi$  履歴モデルから求める。また、破壊回数 ( $N$ ) の算定は部材の破壊が鉄筋の疲労破断によって破壊していることから、鉄筋の疲労破断回数より求める。さらに、鉄筋の疲労破断回数は鉄筋の静的破断に要するエネルギー量 ( $W_{su}'$ ) と繰返し載荷された鉄筋の塑性変形に消費されたエネルギー量 ( $\Delta W_{sp}$ ) との関係から求める。

### 2.2 消費エネルギー量の1サイクルあたりの平均値 ( $\Delta W$ ) の算定

正負繰返し載荷された  $M \sim \phi$  のモデル化は数多く試みられているが [4]、本研究においては図-3に示すように、繰返し載荷による部材耐力の低下は無視し、簡単なモデルとした。

また、前述の実験結果に示されるように(図-1)、破壊時までの1サイクル当たりの消費エネルギー量は  $\pm 1 \delta y \sim \pm 3 \delta y$  においては、ほぼ一定の値を示しているが、載荷変位の大きい  $\pm 4 \delta y$ 、 $\pm 5 \delta y$  の場合は、載荷回数の増加にともない消費エネルギー量は減少して一定値ではないが、本研究においては載荷の初めから破壊時までを同一の消費エネルギー量と仮定した。このモデル化によって求められる消費エネルギー量は(2)式で与えられる。

$$\Delta W = 2(i-1)\phi y \cdot My \quad (2)$$

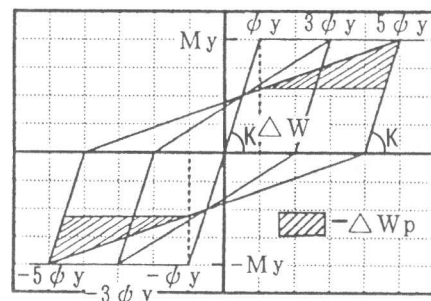


図-3  $M \sim \phi$  履歴モデル

$\Delta W$  : 1 サイクルあたりの消費エネルギー量

$\phi_i$  : 載荷曲率                       $\phi_y$  : 降伏曲率

$M_y$  : 降伏モーメント               $i$  : ( $\phi_i / \phi_y$ )

ただし、 $\phi_i > \phi_y$

### 2.3 破壊回数 (N) の算定

部材の破壊が鉄筋の疲労破断によって破壊していることから、部材の破壊回数の算定のために、鉄筋の疲労破断回数を求める。一般に鋼材の疲労破断回数の算定は、疲労試験による  $S(\varepsilon) \sim N$  曲線によって求めるか [5]、あるいは繰返しによる塑性ひずみ振幅 ( $\varepsilon_{pa}$ ) と破壊までの繰返し回数 ( $N_r$ ) の関係を用いた Manson-Coffin 式 [6] によって求められる。しかし、エネルギーによる疲労理論 [7] によれば、繰返し載荷された金属の初めから破壊までの疲労過程に費やされる「比破壊エネルギー (単位容積当たりのエネルギー量)」は、与えられた金属に対して不変の大きさであり、荷重の形式と条件には依存せず、塑性変形の場合に破壊にあずかる金属の領域によって不可逆的に消費されるエネルギー量に関係するとされている。この比破壊エネルギーは、真応力～真ひずみ線図等によって静的引張試験データからも決定することができることが計算および実験によって証明されている。また、この比破壊エネルギーは、「破壊」と「熱による金属の融解」がエネルギー的に類似性があるとの仮説から熱力学的手法によっても求めることが出来ることが証明されている。そこで本研究は、エネルギーによる疲労理論から、(3) 式に示すように、RC 部材中の鉄筋が塑性変形をとまなう繰返し載荷により疲労破断する場合、鉄筋の真応力～真ひずみ履歴ループのヒステリシスエネルギー量 ( $\Delta W_s$ ) 中の塑性域の仕事量 ( $\Delta W_{sp}$ ) が鉄筋の破断に影響及ぼすと考え、繰返しによる鉄筋の塑性仕事の累積量が静的引張破壊に要するエネルギー量 ( $W_{su}'$ ) に到達した際に疲労破断が生ずると仮定した。なお、 $W_{su}'$  は鉄筋の静的引張試験 (真応力～真ひずみ) より求める。

$$W_{su}' = \Delta W_{sp} \cdot \alpha N \quad (3)$$

$\Delta W_{sp}$  : 鉄筋の 1 サイクル中の塑性仕事量

$\alpha$  : 破壊確率等から決まる係数

(本解析では  $\alpha = 1.0$ )

$N$  : 破断までの繰返し回数

$W_{su}'$  : 鉄筋の静的破壊に要するエネルギー量

### 2.4 鉄筋の塑性仕事量 ( $\Delta W_{sp}$ ) の算定

鉄筋の塑性仕事量は次のような仮定によって求めた。正負繰返し曲げを受ける梁の曲げ降伏後の挙動は、数サイクルでコンクリートの引張耐力はなくなり、それ以後は主鉄筋が部材耐力を支配し、圧縮側のコンクリートの塑性仕事量はないものと仮定すると、繰返し載荷された部材の鉄筋の塑性仕事量は梁の塑性域における消費エネルギー量 ( $\Delta W_p$ ) と等しいと考えられる。その仮定の根拠は以下に示す通りである。図-4

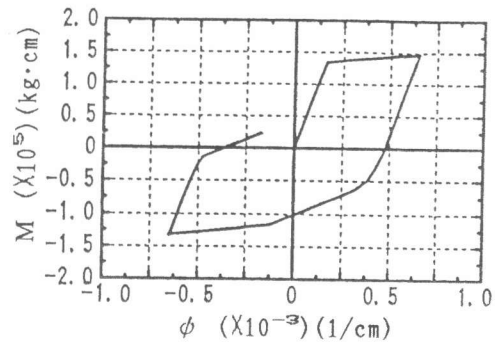


図-4 M～ $\phi$  曲線

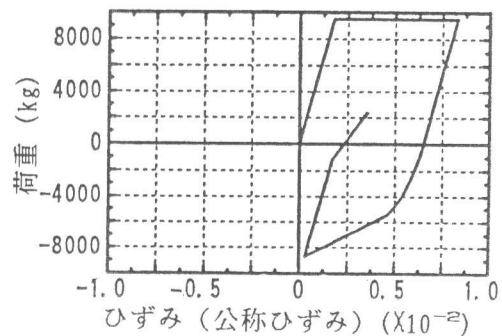


図-5 引張鉄筋の P～ $\varepsilon$  曲線

は松本の解析 [ 8 ] によって求められた  $\pm 4 \phi y$  の荷重の場合の 1 サイクル目の  $M \sim \phi$  履歴曲線であり、図-5、図-6 はそれに対応する引張鉄筋、圧縮鉄筋の荷重 ( $P$ ) ~ ひずみ ( $\varepsilon$ : 公称ひずみ) 曲線である。履歴ループ中に消費されるエネルギー量のうち圧縮鉄筋、引張鉄筋およびコンクリートが受け持つ分担率を計算すると、消費エネルギー量 ( $\Delta W_1$ ) は力量となり、単位長さ当たり  $\Delta W_1 = 165.7 \text{ kg}$  で、引張鉄筋および圧縮鉄筋のひずみ消費エネルギー量 ( $\Delta W_{st}, \Delta W_{sc}$ ) はそれぞれ  $91.0 \text{ kg}$ 、 $68.3 \text{ kg}$  であり、鉄筋によって費やされる割合は全消費エネルギー量の  $96.1\%$  である。また、 $\pm 2 \phi y \sim \pm 5 \phi y$  の場合においても同様な結果 ( $95.3\% \sim 96.2\%$ ) であった。なお、図には示さないが 2、3 サイクル目における計算結果においては、鉄筋の消費エネルギー量の分担割合は  $99\%$  以上であり、圧縮側のコンクリートの塑性変形による仕事量を計算に入れずに上記のように仮定した。そこで、前述の  $M \sim \phi$  履歴モデルの各変位におけるループ中の塑性域におけるエネルギー量 ( $\Delta W_p$ ) は図-3 中の曲率が  $\phi y$  をこえた斜線面積で表され、鉄筋の塑性仕事量と等価のその値は (4) 式より求まる。この  $\Delta W_p$  を用いて (5) 式より破壊回数を求める。

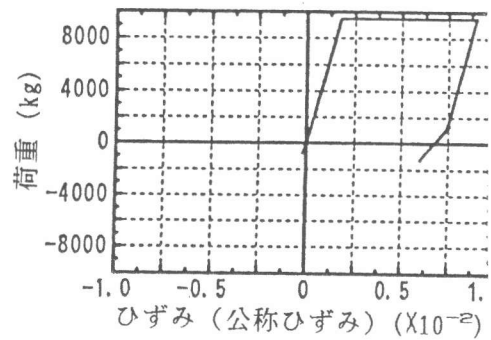


図-6 圧縮鉄筋の  $P \sim \varepsilon$  曲線

$$\Delta W_p = 2 \phi y \cdot My(i-1)^2 / (2i-1)^2 \quad (4)$$

$\Delta W_p$ : 1 サイクルあたりの塑性仕事量

$$W_{su} = \Delta W_p \cdot N \quad (5)$$

$W_{su}$ :  $W_{su}' \cdot (A_s + A_{s'})$

$A_s, A_{s'}$ : 上、下縁の主鉄筋の断面積

以上の考え方から本研究では、解析によって 1 サイクル当たりの消費エネルギー量、破壊回数および最大消費エネルギー量等を求め、実験値との比較検討を行ない算定方法の妥当性について検討した。

### 3. 試験体諸元

試験体は実験で用いたものを対象とし、その寸法は図-7 に示す通り、 $15 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 250 \text{ cm}$  で、スパンは  $210 \text{ cm}$ 、曲げスパンは  $45 \text{ cm}$ 、 $a/d$  は  $5.16$  である。配筋は、主鉄筋は  $D13$  (SD345; 降伏点  $368 \text{ N/mm}^2$ 、引張強さ  $561 \text{ N/mm}^2$ )

を使用し、上下 2 本ずつ配置し、スターラップは  $D10$  (SD295A; 降伏点  $370 \text{ N/mm}^2$ 、引張強さ  $498 \text{ N/mm}^2$ ) を  $10 \text{ cm}$  ピッチで配筋した。なお引張鉄筋比 ( $P$ ) は  $1.05$  (%) で圧縮鉄筋比 ( $P'$ ) と同じ ( $P/P' = 1.0$ ) である。また腹鉄筋比は  $0.97$  (%) である。コンクリートの強度は  $417 \text{ kg/cm}^2$  である。

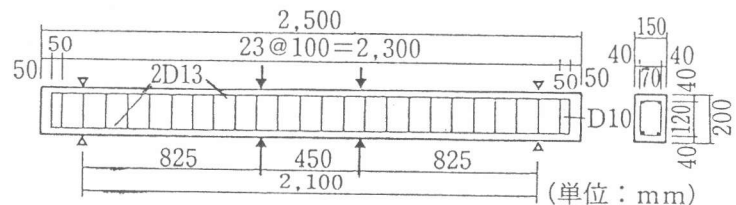


図-7 試験体

表-1 算定結果

Wsu : 4631kg

変位	算定値				実験値				
	M~φ				P~δ		P~δ		
	ΔW (kg)	ΔWp (kg)	※Wsp (kg)	破壊回数・N Wsu/ΔWp	ΔW (kg·cm)	W <sub>o</sub> (kg·cm) (ΔW・N)	ΔW (kg·cm)	破壊回数 N	W <sub>o</sub> (kg·cm)
±2φy	43.45	4.83	5.69	959	4864	4.67×10 <sup>5</sup>	5022	720	3.617×10 <sup>5</sup>
±3φy	86.91	13.90	14.15	333	9728	3.24 "	12288	311	3.822 "
±4φy	130.36	23.94	22.22	193	14592	2.82 "	18553	191	3.544 "
±5φy	173.81	34.33	30.47	135	19456	2.63 "	25095	135	3.388 "
						3.34 "		平均値	3.593 "

※松本の解析による鉄筋のヒステリシスループより算定

4. 算定結果と考察

4.1 1サイクルあたりの消費エネルギー量(ΔW)および塑性消費エネルギー量(ΔWp)

実験においては、前述のように荷重(P)～たわみ(δ)によって消費エネルギー量等を求めているため、解析値と実験値の比較はモーメント

(M)～曲率(φ)の解析値をモールの定理を利用してP～δに換算して行なった。また、降伏モーメントおよび曲率は前記の松本の解析方法を用いて求めたが、それらの値は My:1.337×10<sup>5</sup>kg·cm, φy:0.163×10<sup>-3</sup>(1/cm)、(降伏荷重:Py=3.24t、降伏変位:δy=7.5mm)である。

図-8は解析による±4φyの履歴モデルを上記のP～δで換算したものと実験結果と併記した図である。図中のNの数字は実験値の繰返し回数である。また、(2)式、(4)式より算定された±2φy～±5φyの各1サイクルあたりの(ΔW)および(ΔWp)の値は表-1に示してあるが、図-8および表-1に示されるように、各変位ともΔWの算定値は実験値より小さく、実験値に対するその比は±2φyが0.97その他は0.79である。なお、表-1には前記の松本の解析によって求めた鉄筋の履歴ループから算定した1サイクル当たりの鉄筋の塑性仕事量 [Wsp=ΔWsp(A<sub>s</sub>+A<sub>s</sub>')] ; 2、3サイクルの値の平均値]も参考のため併記したが、ΔWpとほぼ同一の値を示している。

4.2 鉄筋の静的破壊に要するひずみエネルギー量(Wsu)

図-9にはD13mmの鉄筋の引張試験によって求められた破断時までの真応力～真ひずみとひずみエネルギー量(Wsu';試験片3本の平均値)を示す。静的破壊に要するひずみエネルギー量(Wsu)はこの値に上、下縁の主鉄筋断面積を乗

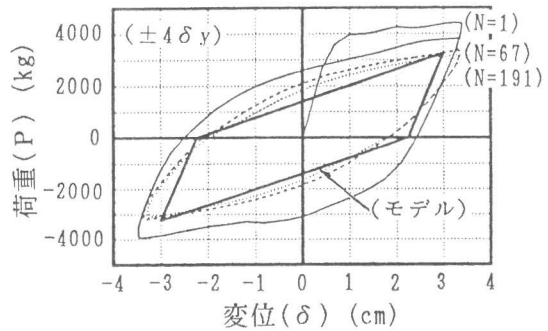


図-8 荷重～変位 履歴曲線 (±4φy)

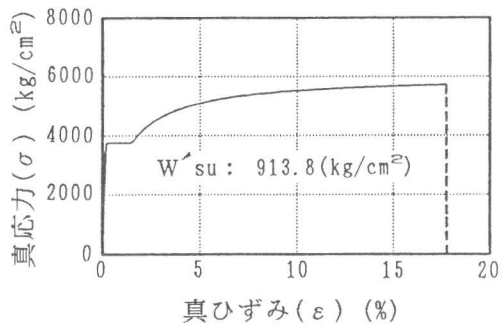


図-9 鉄筋の σ～ε 曲線

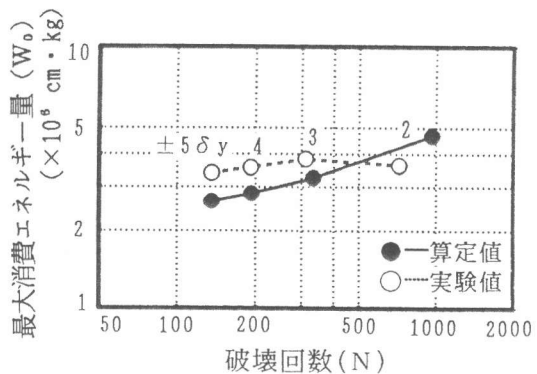


図-10 破壊回数と最大消費エネルギー量

じた値である ( $W_{su}=4631\text{kg}$ )。

#### 4. 3 破壊回数 (N) および最大消費エネルギー量 ( $W_e$ )

算定した破壊回数 (N) は、表-1、図-10 に示されるように、 $\pm 2\phi y$  は実験値の 33% 増となったが、他の値は併記した実験結果とほぼ整合している。このことは、前述の仮定の妥当性が示されたと考えられ、このような破壊形態においては、部材の破壊は本報告において提案している「塑性仕事量」と密接な関係があることがわかった。また、算定した各変位の最大消費エネルギー量は表-1、図-10 に示されるように、同一の値とはならず、 $\pm 2\phi y$  以外は実験値より小さな値を示したが、変位が小さくなるに従い大きくなる傾向を示した。また、実験値 ( $\pm 1.8\phi y$  を除く) に対する同一変位における最大消費エネルギー量の比較においては、その比は 1.29~0.78 の範囲であるが、平均値 ( $W_e=3.3\times 10^8\text{kg}\cdot\text{cm}$ ) は実験値に対してほぼ同一の値を示しており、若干の誤差を有するものの梁の破壊回数および最大消費エネルギー量が推定可能であるといえよう。なお、最大消費エネルギー量および  $\pm 2\phi y$  の破壊回数が実験値との比較において精度が比較的悪いのは、簡単なモデル化が原因と考えられる。

#### 5. 結論

限られた条件下ではあるが、本研究において得られた結論は以下の通りである。

①簡単な履歴モデルと鉄筋の静的ひずみエネルギーを用いて破壊回数と最大消費エネルギー量を算定したが、このような方法でもほぼ妥当な値が示され、破壊回数および最大消費エネルギー量の推定の可能性が示されたと考えられる。ただし、②実験値の最大消費エネルギー量が各変位ともほぼ一定値を示したのに対し、破壊回数および消費エネルギー量を個々に算定して求めた最大消費エネルギー量の解析値は同一の値にはならず、今後は実験値との整合性等について検討する必要があると考えられる。

#### 参考文献

- [1] Banon, H., Biggs, J.M. and Irvine, H.M. : Seismic Damage in Reinforced Concrete Frames, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 107, No. ST9, pp. 1713~1729, Sep. 1981
- [2] 中田聖志 他 : RCはり部材の累積消散エネルギーの定式化と損傷評価、土木学会第46回年次学術講演会第5部, pp. 760~761, 1991. 9
- [3] 魚本健人・矢島哲司 : 大変形正負交番繰返し荷重を受けるRC部材の曲げ耐力特性、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 2, pp. 265-268, 1991. 6
- [4] 日本建築学会 : 建築物の耐震設計資料, 技報堂, pp. 242~248, 1981. 4
- [5] 金沢武・飯田国広 : 溶接継手の強度(溶接全書 17), 産報出版, 1979. 10
- [6] S.S.Manson : Thermal Stress and Low-Cycle Fatigue, McGraw-Hill, 1966
- [7] ヴィ・エス・イワノフ・ヴィ・エフ・テレンシェフ・横堀武夫訳 : 金属疲労の基礎と破壊力学 現代工学社, 1979. 1
- [8] 松本公典 : RC, PCおよびPRC部材のモーメント-曲率の関係とその応用, 土木学会論文報告集, Vol. 331, pp. 155-165, 1983. 3