

V-15 鉄筋コンクリート桁の塑性回転および耐力特性について

北海道大学 正員 藤田 嘉夫
 北海道大学 正員 佐伯 昇
 北海道大学 学生員 志村 和紀
 日本道路公団 正員 楠 広行

1. まえがき

鉄筋コンクリート不静定構造物の構造解析の手法としては、従来用いられている線形解析、塑性理論に基づくモーメント再分配法および材料の非線形性を厳密に取り入れる方法（狭義の非線形解析と言えるが、以下非線形解析と略称する）などがあるが、材料の非線形性を有効に利用するためには線形解析以外の手法によることが望ましい。しかし、モーメント再分配法および非線形解析を経済的かつ実用的な設計法とするためには、いくつかの未解明な問題点が残されている。本報告は、曲げと軸力を受ける部材および2径間連続桁の載荷実験の結果から、塑性回転ならびに耐力について検討を行うとともに、2径間連続桁を対象としたモーメント再分配法および非線形解析の比較を行い各解析手法の問題点について考察を加えたものである。

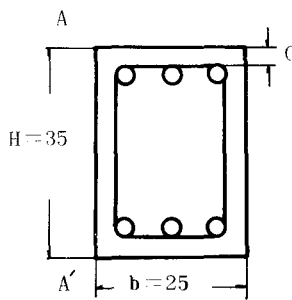
2. 使用材料および実験方法

実験に使用したコンクリートは早強ポルトランドセメントを用いたAEコンクリートであり、試験材令は14日とし、圧縮強度が250～300 kgf/cm^2 （24.5～29.4 MPa）となるよう、配合を定めた。鉄筋の材質はSD35とし、D10, D13, D16およびD19異形棒鋼を用いた。

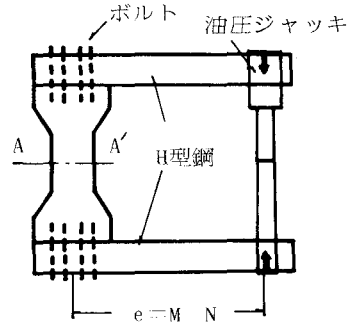
(1) 実験 I : 曲げと軸力を受ける部材の載荷実験

実験 I では、曲げと軸力を受ける部材が地震荷重のような繰返し荷重を受けた場合の塑性回転を検討することを目的とした。試験体中央の断面諸元は図-1(a)および表-1に示したように、高さ $h=35\text{cm}$ 、幅 $b=25\text{cm}$ とし、鉄筋量($p=p'\%$)、スターラップ間隔($S\text{cm}$)およびかぶり($C\text{cm}$)を相違させた。

また、載荷状況は図-1(b)に示したように、試験体両端にボルトで剛結されたH型鋼の他端を油



(a)



(b)

図-1 実験Iの断面、載荷方法

単位: cm

圧ジャッキで引張ることにより、試験体に均一な曲げモーメントと軸圧縮力を作用させた。載荷方法としては、引張鉄筋のひずみが2%程度（鉄筋のひずみ硬化の開始点）となるまで載荷し、その後ただちに除荷した。これを3回繰返したのち試験体を反転し、同様の載荷を繰返し（すなわち、反転前とは符号の異なる曲げモーメントと軸圧縮力を作用させる）たのち最終的に曲げ破壊させた。各試験体における軸圧縮力の偏心量 $e=M/N$ は表-1に示した。鉄筋のひずみはおおのこの主鉄筋の中央部分に貼付した大ひずみゲージ（10%程度のひずみまで測定可能）により測定し、支間中央のたわみを変位計によって測定した。

(2) 実験 II : 2径間連続桁の載荷実験

実験IIでは2径間連続桁の塑性挙動を検討し、モーメント再分配法および非線形解析による計算値と比較することを目的とした。試験桁の断面は図-2(a)および表-2に示した。荷重方法としては図-2(b)に示したように支間 $\ell=160\text{cm}$ とし、 $a=80\text{cm}$ あるいは 100cm として2点荷重を行った。荷重点のたわみはB,D点に配置した変位計によって測定し、曲げモーメントを算定するためにA'点およびB'点にロードセルを配置し反力を測定した。

表-1 実験Iの断面

試験体	e cm	s cm	c cm	p=p' %	θ_{m} rad.
I- 1	190	17	2	0.50	0.024
I- 2				0.74	0.033
I- 3				0.99	0.029
I- 4				1.21	0.018
I- 5			5	0.82	0.014
I- 6			7	0.88	0.015
I- 7		10	2	0.74	0.022
I- 8		5		0.74	0.019
I- 9		4		0.74	0.034
I- 10		50		0.74	0.031
I- 11				5	0.82
I- 12	150	17	2	0.99	0.036
I- 13	100			0.50	0.020
I- 14				0.74	0.026
I- 15				0.99	0.022
I- 16				1.21	0.021

表-2 実験IIの荷重点,鉄筋比

試験桁	a cm	断面	p %	p' %
II - 1	80	B,D	0.84	0.84
		C	0.84	0.84
II - 2		B,D	1.49	1.49
		C	1.49	1.49
II - 3		B,D	1.49	1.49
		C	0.84	0.84
II - 4		B,D	1.49	0.84
		C	0.84	1.49
II - 5	100	B,D	0.84	0.84
		C	0.84	0.84
II - 6		B,D	1.49	1.49
		C	1.49	1.49
II - 7		B,D	1.49	1.49
		C	0.84	0.84
II - 8		B,D	1.49	0.84
		C	0.84	1.49

3. 塑性回転角 θ_p の算出

塑性回転角 θ_p は塑性たわみ δ_p より算出したが、前回の報告^{1),2)}に修正を加え連続桁の場合 $\theta_p = 2 \tan^{-1} \{ \delta_p / (\ell - a) \}$ 、曲げ-軸力部材の場合 $\theta_p = 2 \tan^{-1} \{ \delta_p / (\ell/2) \}$ により算出した。

e: 軸力偏心量, s: スターラップ間隔
c: かぶり, p, p': 鉄筋比
 θ_{pu} : 塑性回転能

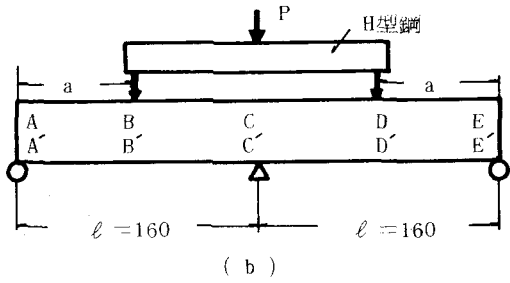
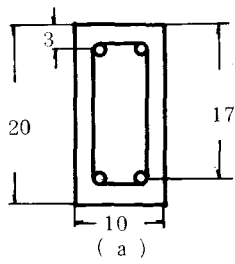


図-2 実験IIの断面, 荷重方法

単位: cm

4. モーメント再分配法および非線形解析

(1) モーメント再分配法

2径間連続桁のモーメント再分配法は3つの段階から成る。すなわち、図-3に示した桁においてB点(D点)およびC点の引張鉄筋が降伏する曲げモーメントをそれぞれ M_{by} , M_{cy} とすれ

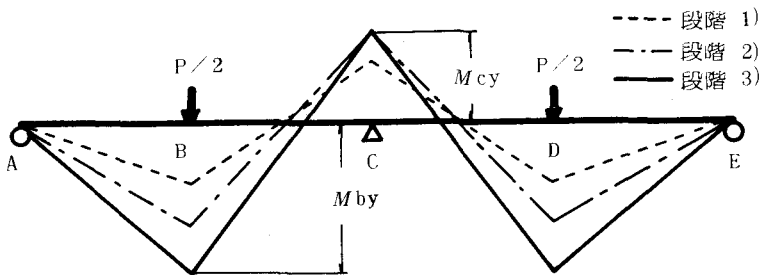


図-3 2径間連続桁の曲げモーメント再分配法

- ば、1) $M_b < M_{by}, |M_c| < |M_{cy}|$ (弾性解)
 2) $M_b < M_{by}, M_c = M_{cy}$ (塑性ヒンジの生成と回転)
 3) $M_b = M_{by}, M_c = M_{cy}$ (崩壊機構の成立)
- の3段階であり、それぞれの曲げモーメントのつりあいより諸量を算出した。なお、本報告ではC点に塑性ヒンジが生ずる場合を対象とした。また、塑性ヒンジの回転角は仮想働の原理を応用した手法⁹⁾により算出した。

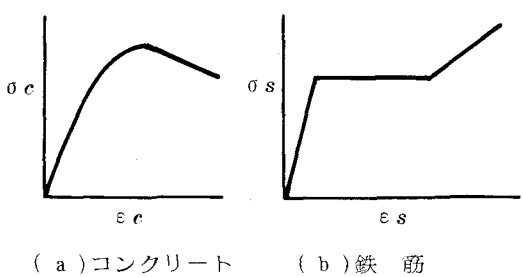


図-4 コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係

(2) 非線形解析

非線形解析は田辺らの手法⁴⁾に準じて行った。すなわち、繰返し計算によって得られたモーメント-曲率関係を要素分割した構造に適用し、さらに繰返し計算によって解く方法である。曲げモーメント-曲率関係を計算する際に用いたコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係は図-4 (a) および (b) に示したように、コンクリートはパラボラと下降直線の混合形、鉄筋はtri-linear形とした。

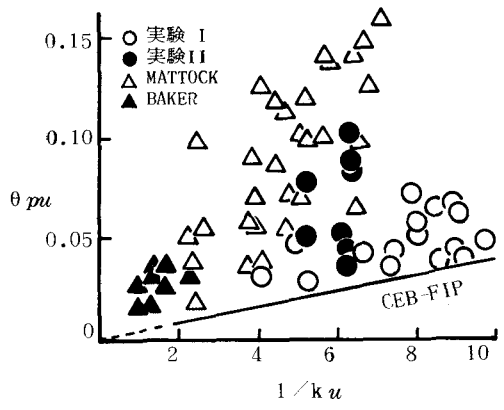


図-5 θ_{pu} と $1/k_u$ の関係

5. 実験結果および考察

(1) 塑性回転能

実験I および実験IIのたわみの測定結果より算出した塑性回転能 θ_{pu} (終局塑性回転角) と終局中立軸比の計算値の逆数 $1/k_u$ の関係を既往の研究資料^{5) 6) 7)}とともに整理したものを図-5 に示した。これによれば実験I, IIおよび既往の研究はいずれもCEB-FIP指針を上回る塑性回転能を示しており、特に実験I のように軸力および2方向の繰返し载荷を受けた場合にも塑性回転能を確保できることが明らかにされた。

また、モーメント再分配法による崩壊機構

表-3 曲げモーメント再分配法と実験IIによる塑性回転

試験桁	計 算 値		実 験 値			θ_p' / θ_{pu}
	θ_p'	β'	θ_p	β	θ_{pu}	
II-1	0.0013	0.11	0.0018	0.12	0.082	0.016
II-2	0.0015	0.11	0.0028	0.15	0.077	0.019
II-3	0.0070	0.40	0.0051	0.37	0.043	0.163
II-4	0.0074	0.48	0.0047	0.34	0.034	0.218
II-5	0.0035	0.24	0.0015	0.25	0.103	0.033
II-6	0.0037	0.24	0.0020	0.16	0.050	0.074
II-7	0.0095	0.48	0.0040	0.44	0.089	0.107
II-8	0.0074	0.48	0.0097	0.41	0.050	0.148

成立時の塑性ヒンジ回転角 θ_p' およびモーメント再分配率 β' と対応する荷重の実験値 θ_p, β (実験II) ならびに塑性回転能 θ_{pu} を表-3 に示した。なお、モーメント再分配法による塑性ヒンジ回転角 θ_p' の算出にあたっては曲げ剛性EIとして状態II (ひびわれ状態) のものを使用した。表-3によれば、崩壊機構成立時におけるモーメント再分配率の計算値と実験値の比 β' / β は0.73~1.50の範囲にあり、比較的良好な対応を示すことが認められた。塑性回転角については θ_p' / θ_p は0.54~2.36の範囲にあり、状態IIの曲げ剛性を使用することにより実際の値に近い回転角が得られることが示された。

また、 $\theta p' / \theta pu$ は0.016~0.218の範囲にあり、計算上の回転角に比べ塑性回転能にはまだ余裕のあることが示された。しかし、本実験の範囲（2径間連続桁を対象とし、モーメントの再分配を11~48%行った）外の構造物（例えば高次不静定構造物など）に適用した場合については不明であり、検討する必要があると考えられる。

塑性回転能 θpu とたわみのじん性率 μ ($\mu = \delta u / \delta y$ δu : 終局たわみ、 δy : 引張鉄筋降伏時のたわみ) の関係を図-6に示した。これによれば、 θpu と μ の間に密接な関係があることが認められた。

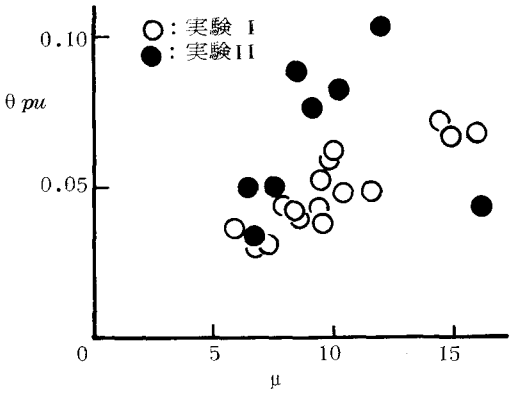


図-6 θpu とたわみのじん性率 μ の関係

(2) 2径間連続桁の塑性回転による曲げモーメントの挙動

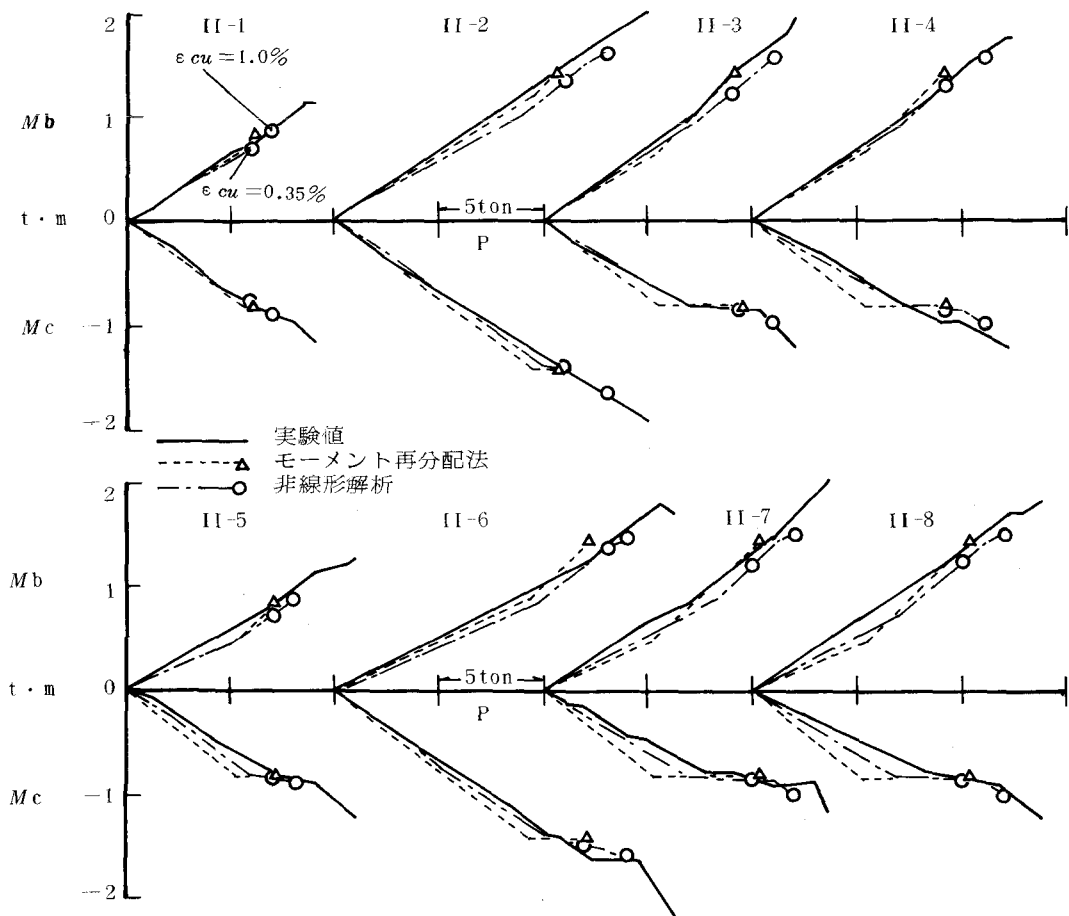


図-7 2径間連続桁の曲げモーメントと荷重の関係

実験II(2径間連続桁)の曲げモーメントと荷重の関係をモーメント再分配法および非線形解析による計算値とともに図-7に示した。非線形解析については、コンクリートの終局圧縮ひずみ ϵ_{cu} を0.35%および1.0%とした場合の終局値を併記した。

図-7によれば、破線で示したモーメント再分配法による計算値は初期の荷重段階より実線で示した実験値から離れる傾向にあった。これは、モーメント再分配法では曲げ剛性EIを部材の全長に渡って一定と仮定するため、ひびわれなどによる曲げ剛性の不均一性の影響が表れているためと考えられる。また、塑性ヒンジ断面の回転領域では計算値と実験値が比較的良好に一致することが認められた。一方、モーメント再分配法の実験値に対する終局荷重の比は0.65~0.85の範囲にあった。これは、鉄筋のひずみ硬化および終局時におけるコンクリートの非線形性を考慮せず、モーメント-変形関係を完全弾塑性と仮定するため耐力の評価が小さくなったものと考えられる。

一点鎖線で示した非線形解析による計算値は、鉄筋コンクリートの非線形性状を比較的良好に表現していると考えられる。しかし、 $\epsilon_{cu}=0.35\%$ とした場合には荷重の終局値はモーメント再分配法によるものと同程度であり、実験値に対する比は0.64~0.75の範囲にあった。 $\epsilon_{cu}=1.0\%$ とした場合には荷重の終局値の実験値に対する比は0.73~0.92と高まり、コンクリートの終局圧縮ひずみの仮定が終局耐力算定の上で大きな影響を与えることが示された。

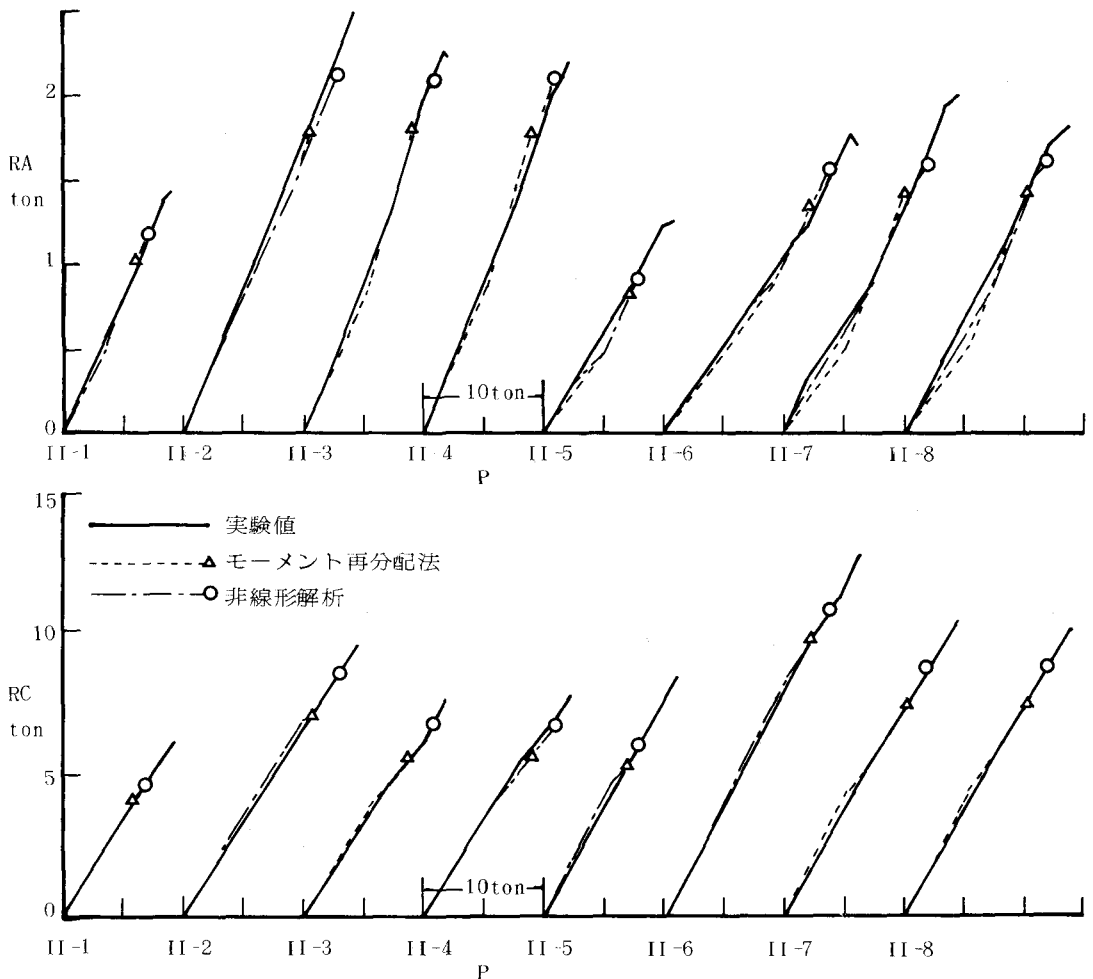


図 8 2径間連続桁の支点反力と荷重の関係

(3) 2径間連続桁の塑性回転によるせん断力の挙動

実験IIの支点反力と荷重の関係を解析結果とともに図-8に示した。これによれば、モーメント再分配法による値は曲げモーメントの場合と同様、初期の荷重段階より実験値から離れるものがありひびわれによる曲げ剛性の不均一性の影響が表れたが、塑性ヒンジの回転領域では実験値と良く一致することが認められた。また、終局時の支点反力を計算値の実験値に対する比で表せば、端支点反力RAについてはモーメント再分配法および非線形解析($\epsilon_{cu}=1.0\%$)でそれぞれ0.64~0.81および0.74~0.95、中央支点反力RCについては0.65~0.75および0.73~0.89の範囲にあった。このように計算値が実験値より小さな値を示すのは、前述したようにモーメント再分配法では曲げモーメント-変形性状を完全弾塑性と仮定すること、また非線形解析では材料の応力-ひずみ関係、特にコンクリートの終局圧縮ひずみの把握が十分ではないことが原因と考えられるが、計算値を大きく上回るせん断力が生じることは構造物のぜい性破壊の危険性があり好ましくない。従って、モーメント再分配法についてはせん断破壊に対する補強を十分に行うことが必要であり、非線形解析の精度を高めるためには材料の応力-ひずみ関係について十分な検討を行う必要があると考えられる。

6. むすび

- (1) 鉄筋コンクリート部材の塑性回転能は引張鉄筋のひずみが2%程度となる繰返し載荷を受けた場合にもさほど低下せず、終局中立軸比の逆数との関係で整理した場合 CEB-FIP 指針を上回る。また、たわみじん性率との間に密接な関係がある。
- (2) モーメント再分配法は、曲げモーメントおよびせん断力の挙動を比較的良く把握できる有用な設計法と考えられるが、実際のせん断力が相当に大きくなりぜい性破壊を生ずる危険性があるため、十分なせん断補強を行う必要がある。
- (3) 非線形解析を行う際には材料の応力-ひずみ関係、特にコンクリートの終局圧縮ひずみについて吟味する必要がある、通常用いられる値0.35%では実際の終局限界状態を把握することは難しい。

参考文献

- 1) 藤田, 佐伯, 志村 “鉄筋コンクリート連続桁の塑性回転による曲げモーメント再分配挙動”, 昭和58年度土木学会北海道支部論文報告集
- 2) 佐伯, 中津川, 楠 “曲げと軸力を受ける鉄筋コンクリート部材の塑性挙動について”, 同上
- 3) 田辺 忠顕 “構造解析”, コンクリートライブラリー第41号, 土木学会
- 4) T.SIRISREETREERUX, T.TANABE “NONLINEAR ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE FRAMES”, 土木学会論文報告集 No.292, 1979
- 5) A.H.MATTOCK “ROTATIONAL CAPACITY OF HINGING REGIONS IN REINFORCED CONCRETE BEAMS”, FLEXURAL MECHANICS OF REINFORCED CONCRETE, PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM 1964, ASCE-ACI
- 6) A.L.L.BAKER, A.M.N.AMARAKONE “INELASTIC HYPERSTATIC FRAMES ANALYSIS”, 同上
- 7) CEB-FIP MODEL CODE FOR CONCRETE STRUCTURES, 1978