

V—23

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

北海道大学 学生員 志村 和紀
北海道大学 正 員 佐伯 昇
北海道大学 正 員 藤田 嘉夫

1. まえがき

鉄筋コンクリート桁は、終局時に大きな曲げ変形能力を期待することができ、これによって不静定構造物とした場合に断面の塑性回転によるモーメントの再分配が生じ、構造物の終局時において余裕を持たせることができるとともに、これを合理的に利用することもできる。このような構造物のじん性は、一断面の塑性回転能力の大きさに関係するとともに他の断面の弾塑性挙動との関係に依存すると考えられる。本報告は鉄筋コンクリート単純桁および2径間連続桁の鉄筋比および載荷方法を相違させた実験によりモーメントの再分配挙動を明らかにするとともに、既往の研究資料を用いて断面の塑性回転能力と終局中立軸比との関係を整理し、鉄筋コンクリート不静定構造物の経済的設計法の基礎的資料とすることを目的としたものである。

2. 使用材料および実験方法

本実験に用いたセメントは早強ポルトランドセメント(比重:3.16)であり、細骨材として錦岡海岸砂(比重:2.77,吸水率:0.94%),粗骨材として静内川産川砂利(比重:2.75,吸水率:1.04%)を用いた。コンクリートはAEコンクリートとし、試験材令を14日、目標圧縮強度を280 $\%$ とした。各試験桁のコンクリートの配合を表-1に、圧縮強度($\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体による)および終局圧縮ひずみ(試験桁のひずみ測定による)を表-2に示す。

また、コンクリートの応力-ひずみ関係は図-1に示すようにパラボラ形に仮定した。

鉄筋の材質はSD35とし、D10およびD13異形棒鋼を用いた。応力-ひずみ関係は図-2に示す。ヤング係数 $E_s = 2.1 \times 10^6 \%$,降伏点 $f_{sy} = 3800 \%$,降伏ひずみ $\epsilon_{sy} = 0.18 \%$,ひずみ硬化開始ひずみ $\epsilon_{sh} = 2.0 \%$ とした。またひずみ硬化域は直線($\epsilon_s = 2\%$ 点と 6% 点を結ぶ)に仮定し、ひずみ硬化ヤング係数 $\bar{E}_s = 32500 \%$,切片 $f_o = 3150 \%$ とした。鉄筋とコンクリートのヤング係数比 n は6.5とした。

試験桁の断面は図-3(a)および表-3に示す。スターラップとして

はD10異形棒鋼を8cm間隔で配置した。載荷方法については図-3(b)に示すように、単純桁(S桁)については支間 $l = 80\text{cm}$ として支間中央に載荷し、連続桁(C桁)については、 $l = 160\text{cm}$ として各支間中央に載荷($a = b = 80\text{cm}$)した。C-3桁につい

表-1 コンクリートの示方配合

試験桁	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE剤
S1~S3 C1,C2	50	45	5.0	150	300	879	1066	0.3
C3	47	41	5.0	150	300	794	1140	0.33

表-2 コンクリートの圧縮強度・終局圧縮ひずみ

試験桁	圧縮強度 $\%$	終局圧縮ひずみ $\times 10^{-6}$
S-1	289	8640
S-2	289	4050
S-3	266	3900
C-1	322	10000
C-2	251	3950
C-3	267	4200

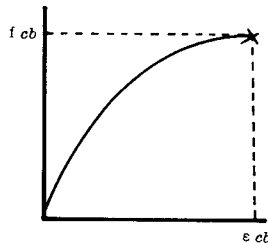


図-1 コンクリートの応力-ひずみ関係

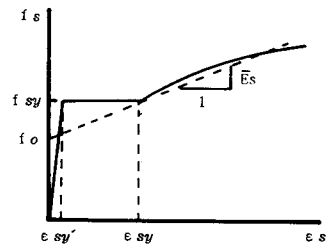


図-2 鉄筋の応力-ひずみ関係

ては載荷位置を $a=100\text{cm}$, $b=60\text{cm}$ とした。S 桁のB - B'断面およびC 桁のC - C'断面の圧縮縁にはひずみゲージを貼付し、終局圧縮ひずみを測定した。また、曲げモーメントを算定するために、S 桁についてはB点に、C 桁についてはB, D点に電気式変位計を配した。載荷点および支承の幅は全て 5cm とした。

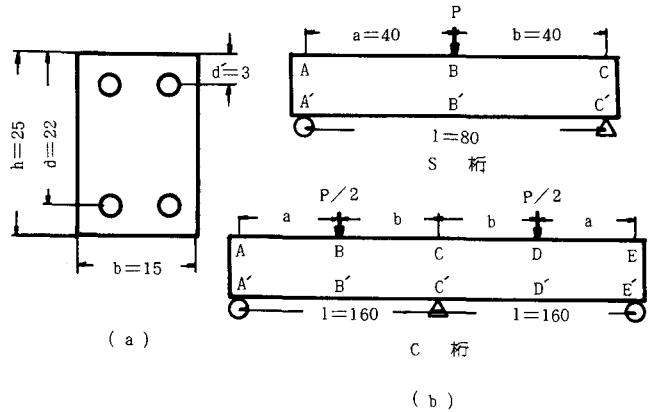


図-3 試験桁の断面寸法・載荷方法 単位: cm

3. 降伏・終局モーメント, 塑性回転角およびモーメント再分配率の算出

(1)降伏モーメントおよび終局モーメントの算出

断面の降伏モーメントの計算は慣用理論によった。終局モーメントおよび終局中立軸比の計算は図-4に示すように終局時コンクリートの応力ブロックをパラボラと仮定し($\alpha=0.8$, $\beta=0.412$)、鉄筋のひずみ硬化およびひずみの適合条件を考慮した計算方法により算出した。

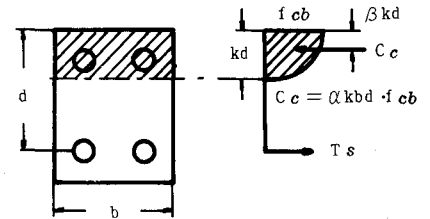


図-4 終局時コンクリートの応力ブロック

(2)塑性回転角の算出

塑性回転角 θ_p はたわみ測定値より算出した。単純桁のB点のモーメント-たわみ関係および連続桁のB,D点

のたわみとC点のモーメントの関係はいずれも図-5

(a)のように表わされる。単純桁については図-5

(b)に示すように、終局

たわみは弾性たわみ δ_e と

塑性たわみ δ_p の和と考

えることにより、図-5 (a)

より得られた δ_p を用いて

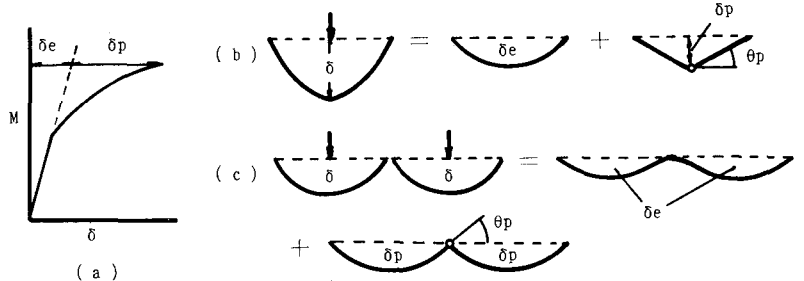


図-5 塑性回転角 θ_p とたわみ δ の関係

$\theta_p = \tan^{-1} (2\delta_p / \ell)$ より θ_p を算出した。¹⁾連続桁については図-5 (c)に示すように δ_p は単純桁の弾性たわみと考えることができ、載荷点の弾性たわみと端たわみ角の関係より、支間中央載荷の場合 $\theta_p = 3\delta_p / \ell$, $a : b = 3 : 2$ の場合 $\theta_p = 10\delta_p / 3\ell$ より θ_p を算出した。

(3)モーメント再分配率の算出

連続桁の試験において、モーメントの再分配率 γ は図-6に示すように塑性回転を生じる断面のモーメント荷重図における弾性理論によるモーメント M_e と荷重、反力の測定値より求めたモーメント M を用いて $\gamma = (M_e - M) / M_e$ によって算出した。

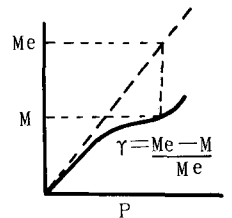


図-6 モーメント再分配率 γ

4. 実験結果および考察

単純桁および連続桁の載荷試験における破壊状況はそれぞれ写真-1, 写真-2 に示すようであった。

実験結果を整理したもの(降伏モーメント, 終局モーメントの実験値および計算値, 塑性回転角, 終局中立軸比およびその逆数)を表-3に示す。

降伏モーメント M_y については, 単純桁, 連続桁の支間断面, 支点断面にかかわらず実測値と計算値の比 M_{yact}/M_{ycal} は0.91~1.11であり, 実測値と計算値が比較的良好く一致することが認められた。一方, 終局モーメント M_b については M_{bact}/M_{bcal} は1.23~1.62であり, 実測値が計算値よりも相当に大きい。これはコンクリートの終局圧縮ひずみが計算に用いた値(試験桁のひずみ測定結果の平均値: 5800×10^{-6})よりも実際には大きいためと考えられる。

塑性回転角については, 単純桁S-3の θ_p が0.0325であるのに対し, 同一の断面鉄筋比を有するC-1, C-2連続桁の θ_p はそれぞれ0.0634および0.0627であり, 単純桁とした場合よりも連続桁とした方が大きな塑性回転能力が得られることが示された。これは, 連続桁とした場合には塑性ヒンジ部以外の断面の塑性挙動の影響が θ_p に含まれるためと考えられる。

次に, θ_p を終局曲率 ϕ_u に塑性ヒンジ長 l_p を乗じたものと考えれば, $\theta_p = \phi_u l_p = \epsilon_{cb} l_p / k u d$ となる。ここで ϵ_{cb} =一定(本報告では $f_{cb}=250 \sim 400$ の範囲にある), また l_p を d の一次関数と仮定すれば, $\theta_p = A / k u$ (A : 定数)と表すことができる。そこで本実験の結果ならびに既往の研究成果^{1) 2) 3)}より θ_p と $1 / k u$ の関係を表したものを図-7に示す。これによれば, θ_p と $1 / k u$ の間には直線関係があり, CEB-FIPの規定は θ_p の最小値に対応していることが認められる。このように, θ_p を $1 / k u$ に比例すると仮定することにより, θ_p を実際の設計に導入する際の簡便な式を得ることができると考えられる。



写真- 1



写真- 2

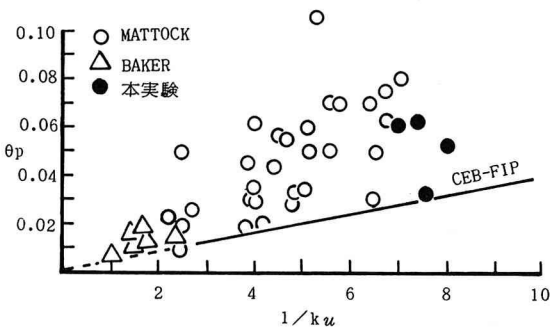


図-7 θ_p と最終中立軸比 $k u$ の関係

表-3 各試験桁の配筋および載荷試験結果

試験桁	断面	配筋		降伏モーメント・m		$\frac{M_{yact}}{M_{ycal}}$	終局モーメント・m		$\frac{M_{bact}}{M_{bcal}}$	θ_p	$k u$	$1 / k u$
		正鉄筋(鉄筋比 ρ)	負鉄筋(鉄筋比 ρ')	M_{yact}	M_{ycal}		M_{bact}	M_{bcal}				
S-1	B	D13×3 (0.0152)	D13×2 (0.00768)	3.0	2.84	1.06	3.90	3.16	1.23	—	0.156	6.411
S-2	B	D13×2 (0.00768)	D13×2 (0.00768)	2.1	1.92	1.09	3.02	2.24	1.35	—	0.138	7.274
S-3	B	D13×2 (0.00768)	D13×2 (0.00768)	2.0	1.92	1.04	3.04	2.20	1.38	0.0325	0.140	7.181
C-1	B	D13×3 (0.0152)	D13×2 (0.00768)	3.0	2.84	1.06	—	3.20	—	—	—	—
	C	D13×2 (0.00768)	D13×2 (0.00768)	-2.0	-1.92	1.04	-3.03	-2.27	1.33	0.0634	0.134	7.475
C-2	B	D13×2 (0.00768)	D13×2 (0.00768)	2.1	1.92	1.09	—	2.20	—	—	—	—
	C	D13×2 (0.00768)	D13×2 (0.00768)	-1.74	-1.92	0.91	-2.96	-2.20	1.35	0.0627	0.142	7.032
C-3	B	D10×3 (0.00648)	D10×2 (0.00432)	1.70	1.64	1.04	—	1.90	—	—	—	—
	C	D10×2 (0.00432)	D10×3 (0.00648)	-1.22	-1.10	1.11	-2.27	-1.40	1.62	0.0525	0.124	8.085

曲げモーメントの再分配挙動を明らかにするため、C 桁のモーメントと荷重の関係を表したものを図-8に示す。これによれば、モーメント-荷重曲線は荷重の初期より破線で示した弾性解を B 断面ではうわまわり、C 断面では下まわっている。これは C 断面のひびわれによる曲げ剛性の低下に

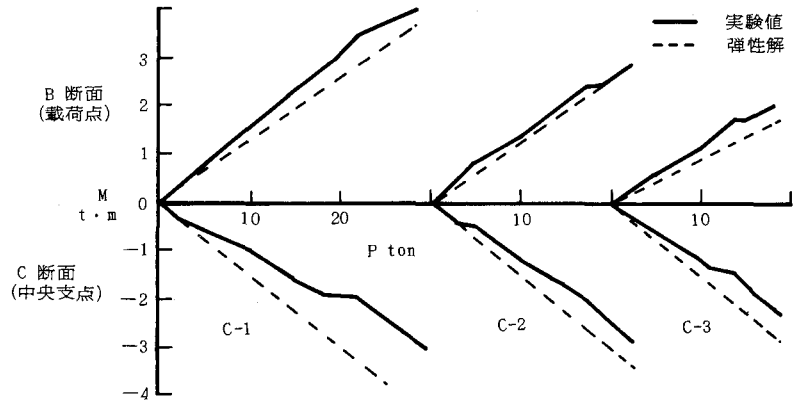


図-8 曲げモーメントと荷重の関係

起因するものであり、鉄筋が降伏する以前にひびわれによって一種のモーメントの再分配が生じていると考えられる。また、C 断面が降伏することによって本来の再分配が生じるが、C 断面の鉄筋のひずみ硬化の開始によってモーメント-荷重曲線の立ち上がりが認められ、B 断面の鉄筋の降伏と相まってモーメントの再分配を減少させることが認められた。

また、前述したモーメントの再分配率 γ を計算し、 M/My との関係で整理した結果を図-9に示す。これによれば、C-1、C-3桁の γ はC断面の鉄筋のひずみ硬化直前においてそれぞれ 38%、32%と 30%を越えているのに対し、C-2桁では 20%に過ぎない。C-1桁とC-2桁の鉄筋量は等しく、 θp も同等であったが、このような差が生じた原因は B断面の降伏モーメントが C-1桁が C-2桁の 1.5倍であり、モーメント再分配の負担を受ける断面の降伏モーメントが大きいことによるものと考えられる。連続桁としての終局耐力についても、C-1、C-2桁でそれぞれ 29tonおよび 22.5tonであり、B断面の鉄筋比の影響により約30%変化することが示された。

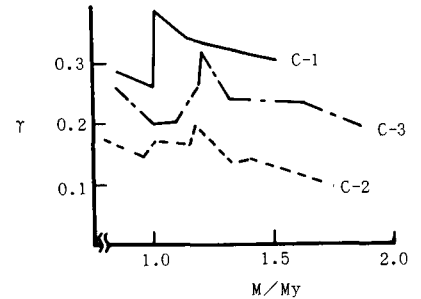


図-9 モーメントと再分配率 γ の関係

また、モーメント再分配率 γ が C-2桁より大きい C-3桁は載荷位置を中央支点方向に寄せた場合であり、B断面とC断面の作用モーメントに差を持たせている。

このようにモーメントの再分配挙動は塑性ヒンジが生ずる断面の塑性回転能力が重要であるとともに、モーメントの再分配を負担する断面の弾塑性挙動が重要である。

5. むすび

- (1) 鉄筋コンクリート桁の塑性回転能力は終局中立軸比の逆数 $1/k_u$ との間に直線の関係があり、曲げモーメントの再分配を考慮して設計する場合に断面の回転能力を求めることができる。
- (2) 不静定構造物とした場合の曲げモーメントの再分配挙動は、最初に塑性ヒンジが生ずる断面の塑性回転能力に依存するのみならず、モーメントの再分配を負担する断面の弾塑性挙動が重要であることが示された。

参考文献 (1) Alan H. Mattock, "ROTATIONAL CAPACITY OF HINGING REGIONS IN REINFORCED CONCRETE BEAMS", FLEXURAL MECHANICS OF REINFORCED CONCRETE, ACI-ASCE, 1964 (2) A. L. L. Baker, A. M. N. Amara-kone, "INELASTIC HYPERSTATIC FAMES ANALYSIS", FLEXURAL MECHANICS OF REINFORCED CONCRETE, ACI-ASCE 1964 (3) CEB-FIP MODEL CODE 1978