

I-10 鉄筋コンクリート部材のくり返しねじりにおける強度と変形

早稲田大学 神 山 一, 〇 国士館大学 松 島 博

(1) まえがき

コンクリートの材料または部材としての疲労については、従来多くの研究成果が発表されているが、そのほとんどが圧縮や曲げに関するもので、せん断やねじり疲労の研究は設計上重要な問題であるにもかかわらず皆無に等しい。

そこで、ねじり疲労について明らかにするために、無筋および鉄筋コンクリート部材に対して、ゆっくりした速度で各種荷重レベルのくり返し片ねじりを加える実験を行なっている。その結果に基づいて、部材の強度と変形を明らかにするための内部釣合機構の変化の状態について、静的ねじりの場合との対比的考察を行なった。現在のところ実験はまだ初期の段階なので、ここで述べる考察の結果についてもさらに検討を重ねるべきものがあるう。

(2) 実験の概要

試験体は表-1の通りで、その断面形状と寸法を図-1に示す。

荷重は、油圧式自動制御型ねじり疲労試験機を用いて片ねじりを加えた。

荷重レベルは、その最大値とひびく発生ねじりモーメントの40～90%の間で各種の段階に定め、最小値は常に零とした。

載荷速度は、ねじりせん断応力度の上昇を毎秒約1 kg/cm²とした。ひびく発生と発達を追跡し、適宜のくり返し回数ごとにねじり角とひびく幅および鉄筋のひずみを測定した。

表-1

表 - 1

				荷重 レベル (%)*	材令 (日)	コンクリート強度 (kg/cm ²)				
						σ_c	σ_{tu}	σ_b	E(10 ⁵)	
正方形断面 (20× 20 cm)	静 的	A - 1	無 筋	/	192	415	29.0	54.0	3.76	
		A - 2			196					
		A - 3			199					
		E - 1	鉄 筋		69	392	25.4	39.5	2.83	
		E - 2			69					
		E - 3			69					
	動 的	I - 3	無 筋	85	260	408	29.0	47.4	2.52	
		H - 2		80	205	412	29.0	53.7	3.76	
		H - 3			208					
		H - 4			207					
		F - 1	鉄 筋	75	162	435	25.6	40.9	2.98	
		F - 2			284					
		C - 1**		70	63	377	28.3	42.2	2.28	
		C - 2**			73					
		E - 2			114	427	24.3	27.9	2.50	
		I - 4	無筋	65	254	408	29.0	47.4	2.52	
		G - 1**	鉄筋		62	444	26.5	46.9		
		G - 2	60	67	415	29.0	53.1	3.76		
		I - 1	無筋	55	250	408	29.0	47.4	2.52	
		C - 1**	鉄筋	40	63	377	28.3	42.2	2.28	
長方形断面 (20 × 30 cm)	静的	C - 1	鉄 筋	/	79	510	32.1	48.3	2.60	
		C - 2			90(南)	83				
	動的	C - 3		90(南)	119	548	33.0	49.4	2.96	
	静的	A - 1		/	137	506	34.9	45.4	2.87	
		A - 2			80(南)	137				
	動的	A - 3		80(南)	153					
	静動的 クリープ	B,D-1~3 E,F,G-1~4		実験継続中						

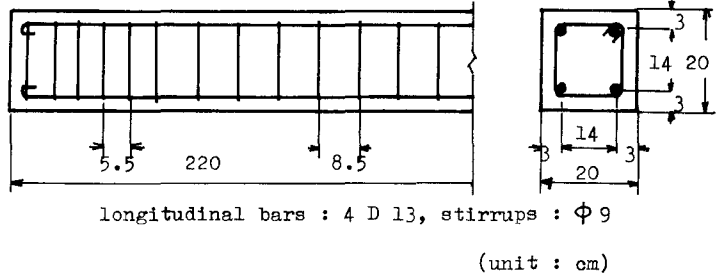
* : M_t/M_{tc} or τ_t/σ_{tu} ** : 端部破壊等のため、資料得られず。

(3) 釣合機構の変化

部材の強度および変形の正しい評価のためには、まず内部釣合機構とその変化の状況を明らかにしなければならぬ。

くり返しねじりを受ける鉄筋コンクリート部材の内部釣合機構は、ある荷重レベル以上のとき、くり返し回数の増加に伴って次の順序で変化する。

Square Cross Section



Rectangular Cross Section

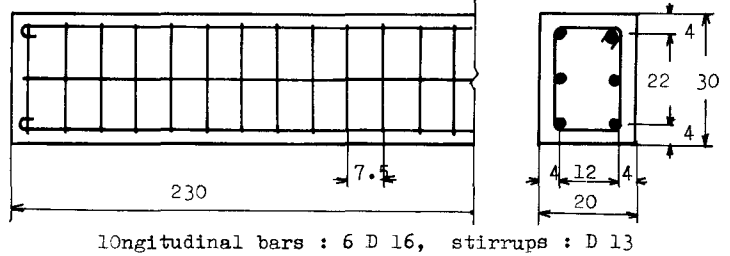


図 - 1

a) 全断面有効の状態 ϕ ひびく発生までは全断面有効で外力モーメントに抵抗し、その間の強度と変形は弾性論によってほぼ正確に評価できる。鉄筋の応力度は低く、その貢献は換算断面積を用いて評価することができる。

b) トラス型釣合状態 断面長

辺側の面の中央付近に発生した斜め ϕ ひびくが発達して全周にらせん状に連続したとき、この状態となる。このとき、軸方向鉄筋とこれに直交するスターラップの負担する引張力と、コンクリートの負担する圧縮力で、外力ねじりモーメントに抵抗する。

c) 斜め曲げ(Skew Bending)型釣合状態¹⁾ 部材軸に対して傾斜した面に関する斜め曲げの状態となり、ある面が引張側、その反対の面が圧縮側となる。このときの部材の強度と変形は、外力の釣合と ϕ ひびく条件に基づいて評価することができる。

d) ねじりプラスチックヒンジの形成と終了 斜め曲げによるねじりプラスチックヒンジ(Torsional Plastic-hinge)が形成され、急速に変形が増加し、ヒンジ終了とともに部材は破壊する。

ϕ ひびくモーメント以下のくり返しねじりの場合は一般に破壊への進行が後進で、このような a) ~ b) ~ c) ~ d) の変化を各段階ごとに明らかに識別できる。従って、破壊強度設計法の立場から部材の強度と変形を評価するための基準は、動的ねじりの場合も静的ねじりの場合と同様に、c) の斜め曲げ型釣合状態にとるのが適当であろう。

静的ねじりの場合の釣合機構の変化は、上述の動的の場合と比較して本質的な相違はない。しかしねじりモーメントが単調増加するときは ϕ ひびく発生から破壊への進行が急速なために、b) のトラス型釣合状態が瞬時に経過して、あたかも a) ~ c) ~ d) の順序をたどるように見えることが多い。

これらの a) ~ d) の経過は ϕ ひびく発生とその発達状況から観察することができるが、さらに、ねじり角、 ϕ ひびく幅とその本数および鉄筋の ϕ ひびくそのそれぞれの測定値に次のように現れている。

① ねじれ角 正方形断面試験体(F-1)について、くり返し回数Nとねじれ角 θ との関係を図-2に示す。これを理想化すれば図-3の通りで、各釣合状態とそれらの間の移行について明瞭に認められる。また各段階ごとの剛度(図-3中の $\tan \theta_1 \sim 7$)を計算すれば次の通りである。この数字は一回のねじりによるねじれ角の増加量を示し、これによって各段階ごとの安定度を判断できる。

a) ~ b) の移行 : $\tan \theta_1 = 8.76 \times 10^{-9}$ rad/cm/cycle, b) の状態 : $\tan \theta_2 = 6.85 \times "$

b) ~ c) の移行 : $\tan \theta_3 = 13.59 \times "$ c) の状態 : $\tan \theta_4 = 5.42 \times "$

d) の状態 : $\tan \theta_5 = 112.73 \times "$, $\tan \theta_6 = 40.00 \times "$, $\tan \theta_7 = \text{測定できず}$ 。

これによれば、c) の斜め曲げ型釣合状態が最もよく安定している。長方形断面試験体 C-1 の N- θ 曲線を図-4に示す。

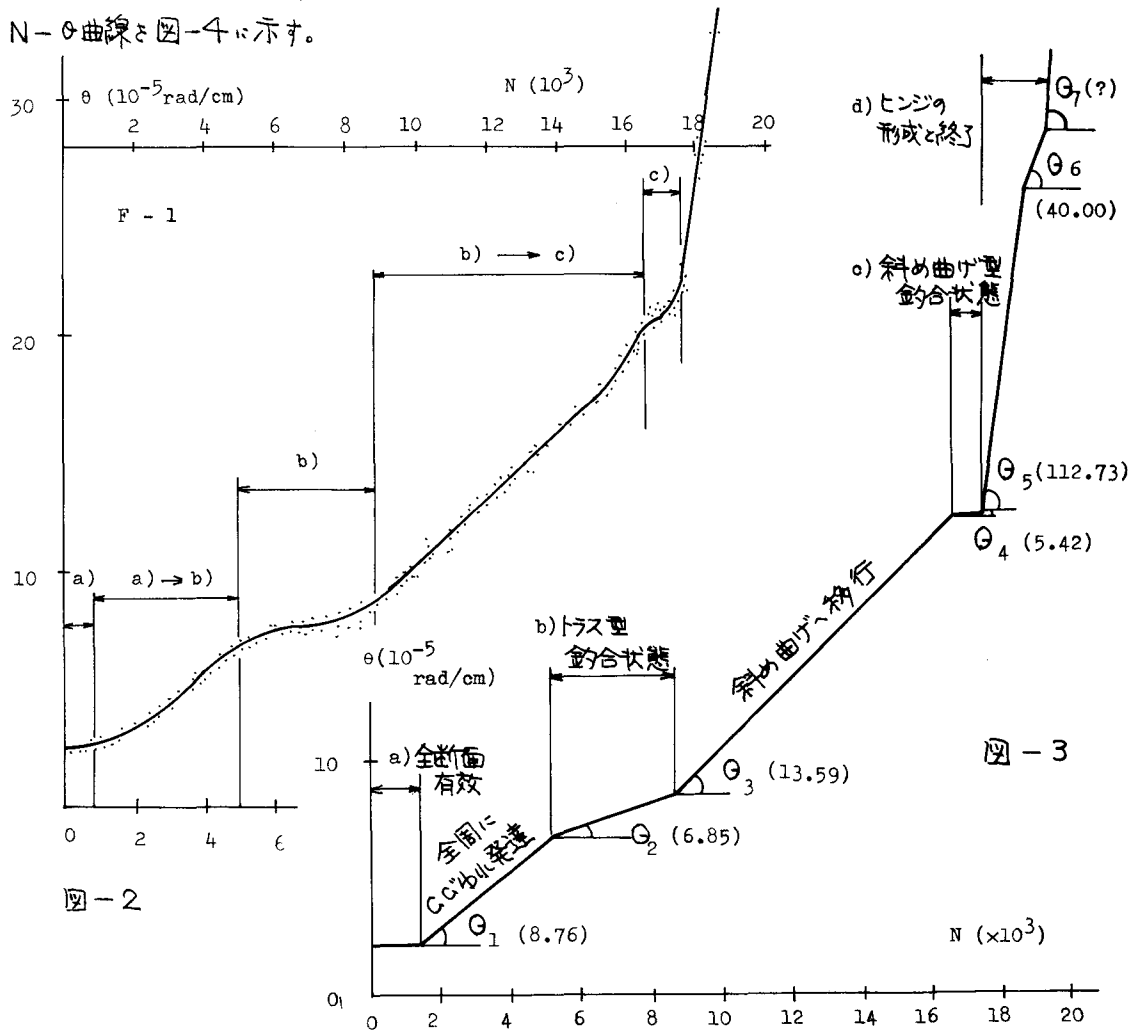


図-2

図-3

② Gひねりの本数と合計幅 正方形断面試験体(F-1)について、各面上中央軸線とGひねりの交点における本数と合計幅の変化を図-5に示す。これによれば、b) ~ c) 移行時の合計幅は斜め曲げ圧縮面では大きい変化がないのに、引張面のものは著しく増加している。とくに d) の状態ではこの傾向が明らかで、これは斜め曲げ破壊の様相を示している。Gひねり本数は、b) ~ c) の状態の間に一定値に達し、その後は増加していない。

長方形断面試験体(C-2)について、 ϕ の値と合計幅の各面での平均値を図-6に示す。合計幅の増加は各釣合状態では少なく、その間の移行間には著しい。本数については(F-1)と同様の傾向が認められる。

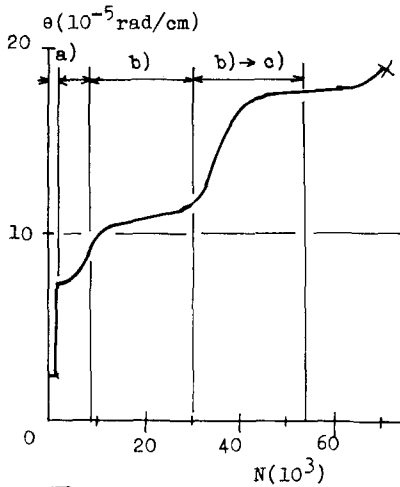


図-4

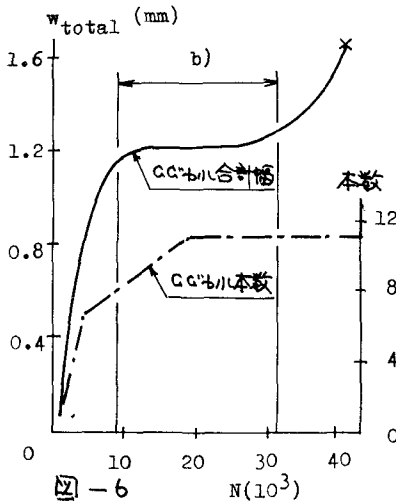


図-6

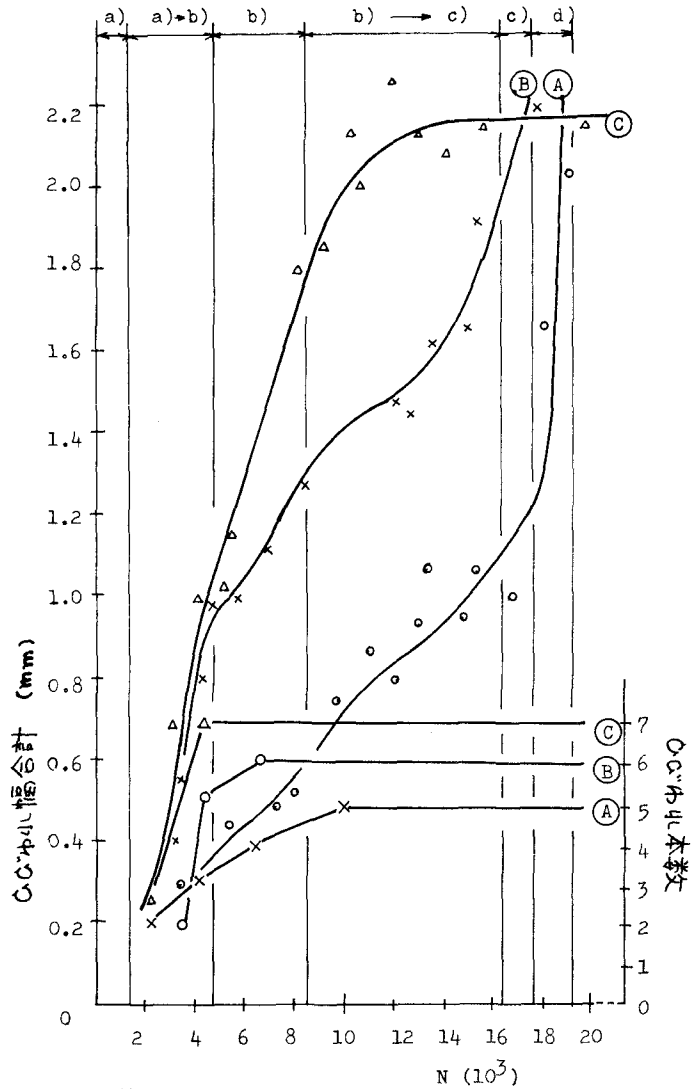


図-5

③ 鉄筋の ϕ ずみ C-2について、鉄筋 ϕ ずみの変化をスターラップと軸方向鉄筋ごとに図-7に示す。軸方向鉄筋についてみれば、釣合状態にあるときは ϕ ずみ増加量は少なく、移行間では多いが、これは ϕ の値と合計幅やねじり角の場合と同様である。

(4) ϕ の値と強度および変形

① ϕ の値と強度 ϕ の値発生時のS-N曲線を図-8に示す。ここで、Sは ϕ の値発生ねじりモーメントに対する荷重比である。この資料の範囲内では $S = 60 \sim 65\%$ の間に変曲点が認められるが、低荷重レベルでのクリープの影響²⁾や、コンクリートの変形特異点等の問題を含めて、さらに検討を重ねる必要がある。

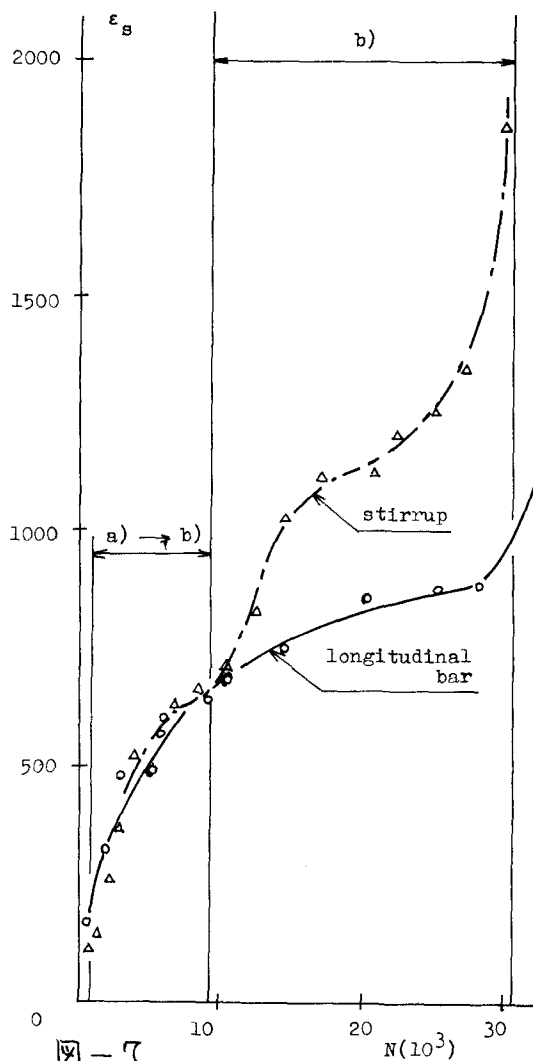


図-7

② 変形 荷重のくり返しに伴って変形は増加し、ねじり剛度は低下する。

少数回のくり返しするとき、無筋部材の剛度低下の一例は図-9の通りである。無筋部材のねじり剛度を $M_t / \theta = \beta b^3 h \cdot G$ で表わせば、この剛度低下はコンクリートの微小破壊に基づく G の減少によるものと考えることができ、ここで、荷重レベルが65%のとき、 $G_{1回目} : G_{2回目} : G_{3回目}$ の比は $1.00 : 0.54 : 0.41$ であった。

多数回のくり返しするとき、無筋および鉄筋コンクリート部材の、荷重レベルによる剛度低下の相違は図-10の通りであった。

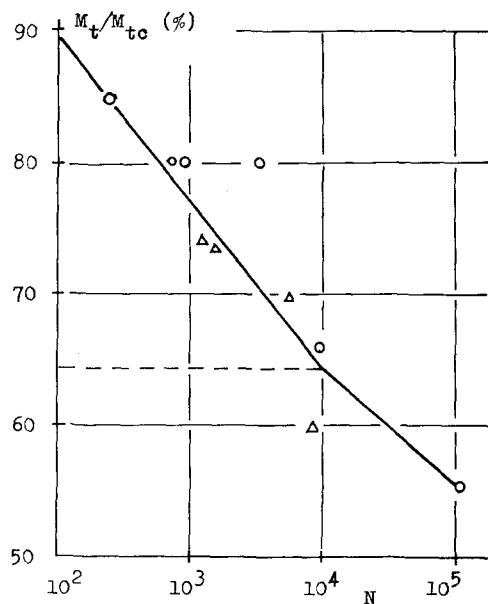


図-8

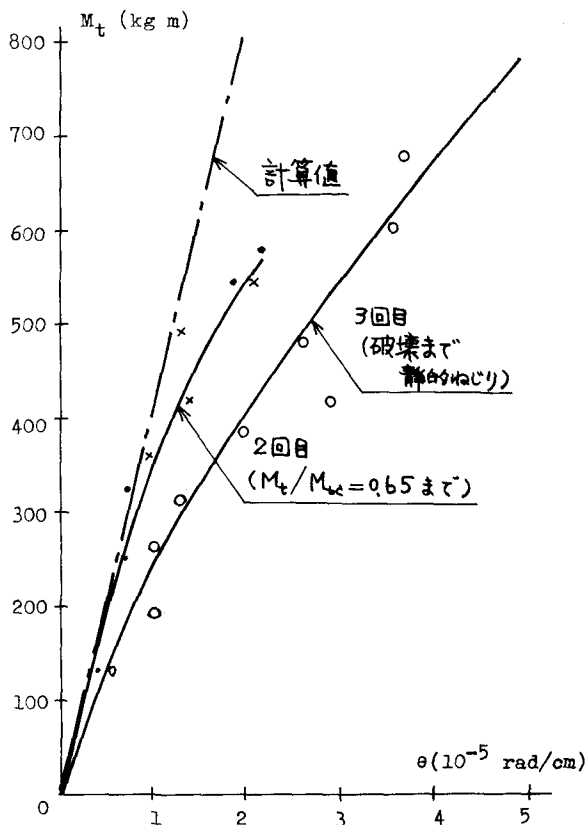
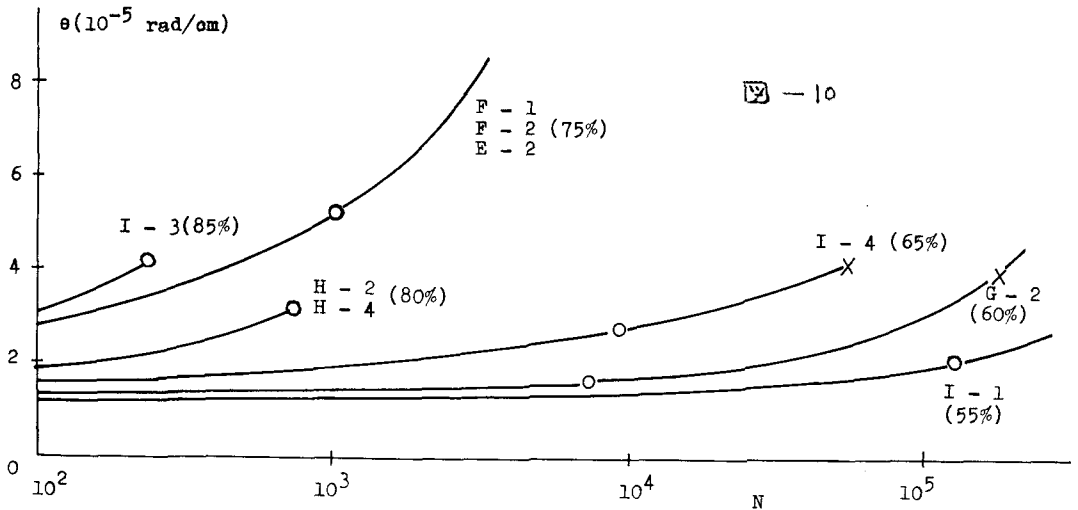


図-9



(5) まとめ

限られた実験資料の範囲内ではあるが、次のような結論が得られた。

① ある荷重レベル以上のくり返しねじりをうけると、鉄筋コンクリート部材は、全断面有効の状態、トラス型釣合状態および斜め曲げ型釣合状態を経て、ねじりプラスチックヒンジが形成され、その終了とともに破壊する。

破壊に至るまでの内部釣合状態の変化は、静的ねじりと動的ねじりとで本質的な相違はない。しかし、その変化の進み方には明らかにそれぞれの特徴があり、動的ねじりの場合はその変化を各段階ごとに区別して、全般的観察によるほかに、ひびわれの幅と本数、ねじり角および鉄筋のひずみから認めることができる。これに対して静的ねじりの場合はひびわれ発生から破壊への進行が急速で、とくにトラス型釣合状態が認め難いことが多い。

② ねじり疲労における終局限界状態は、静的ねじりの場合と同様にねじりプラスチックヒンジの終了時と定義することができる。この状態に対応する部材の最大耐力能力を評価するためには、ヒンジの形成と終了について明らかにする必要がある。しかし、ねじりプラスチックヒンジの釣合機構が十分に解明されていない現時点においては、近似的にその直前の状態である斜め曲げ型釣合状態に基づく部材の強度と変形を基準にとるのが適当であろう。そして、破壊強度設計法の立場からは、これらの強度と変形を終局状態に対応するものとする。

③ ねじり疲労における強度と変形を正しく評価するためには、荷重レベルを含む各種要因と上述の各釣合機構の進行状態との関連性について、実験的にさらに正確に把握することが必要である。各釣合状態におけるそれらの評価に対しては、静的ねじりの方法を準用しうるのである。

参考文献

- 1) 松島博：ねじりをうける鉄筋コンクリート部材の設計法に関する研究，土木学会論文報告集，No. 218，1973 - 10
- 2) 藤田嘉夫，西堀忠信：繰返し荷重をうける鉄筋コンクリートげたの変形に関する研究，コンクリートジャーナル，Vol. 9，No. 5，May，1971