

繰返しねじりを受ける RC 部材の挙動

松 島 博*

Behavior of Reinforced Concrete Members under Repeated Torsion

By Hiroshi Matsushima*

Synopsis: It is the intent of this paper to study on the fatigue strength and fracture behavior of the reinforced concrete members under repeated pure torsion. The experiments were carried out for some load levels, and considering that the regressive equations between load level and fatigue life and also modified Goodman's diagram were applicable, empirical formuluses were deduced.

要旨: この研究はゆっくりした速度で繰返しねじりモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の強度や変形状を明らかにすることを目的とした。荷重レベルを数段階に変えて行った実験結果から疲労寿命のパラッキが対数正規分布に従うことを確かめ、荷重レベルと疲労寿命に関する回帰直線式を求め、さらに上限および下限荷重と疲労寿命の間に修正 Goodman 図が画けるものと考えて、これらの間の関係式を導いた。

1. はじめに

この研究は鉄筋コンクリート部材の純ねじり疲労性状を明らかにして今後の研究推進のための基礎資料を求め、最終的に設計のための基準を得ることを目的としたものである。

これまでに得られた実験データは未だ不十分で一部の範囲に止まるため、ここで得られる結論がどの程度の普遍性をもつのかは分らない。しかし現在のところこの問題に関する研究資料は皆無に近い状態にあるため、あえて成果を述べることは意義があるものとする。

コンクリート構造物における構造形式の複雑化に伴ってねじりモーメントを考慮した設計法の解明が必要となり、静的なねじりに対しては一応の結論が得られており近く土木学会に於て制定予定の「コンクリート構造の限界状態設計法」に我が国では初めてねじりに対する設計基準が示されることになっている。しかし活荷重は一般に繰返し作用するものが多く、これに対しては設計に当って特別の考慮が必要となる。

コンクリートの分野における疲労の問題については、

その材料としての面からは最近幾つかの貴重な研究成果が発表されているが、部材に関する研究は少く、とくに静的に作用しても危険な破壊性状を示すねじりに関するものについては未だ見るべきものがない。

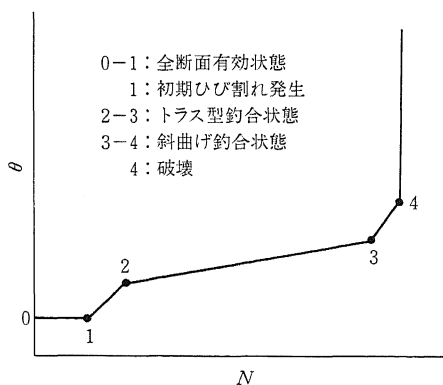
本研究では、正方形断面をもち軸方向鉄筋とこれに直交するスターラップで補強された試験体に数段階の大きさのねじりモーメントを繰返し加えて、強度、変形およびひび割れ性状等に関する基礎資料を得た。疲労に関するデータは本質的にバラツキが大きいため、実験結果の解析に当っては確率の考え方を導入した。

2. 従来の研究

コンクリートの材料としての疲労については多くの文献を要約してまとめ、さきに資料¹⁾として示した。

鉄筋コンクリート部材のねじり疲労については損傷進行に伴う内部釣合状態の変化に関する 神山、松島の研究²⁻⁴⁾がある。この変化は静的のときと繰返しのとときで本質的な差異はないが、後者の場合は損傷の進行が緩やかなのでその変化を明瞭に認めることができる。この研究は正方形断面と長方形断面をもつ試験体に上限荷重をそれぞれ数段階に下限荷重を常に零として繰返しねじりを加えたものである。いずれの場合も θ (ねじれ角) と N (繰返し回数) との関係をモデル化して示せば図 1

*土木工学科 教授 工学博士
Professor, Civil Engineering Division, Dr. of
Engineering

図1 モデル化した N - θ 曲線

の通りで、部材断面の縦横比や荷重レベルとは無関係に、安定したトラス型釣合状態は初期剛度に対する剛度の比がほぼ15~20%まで低下したときに始まり約8%程度に低下するまで続きその後破壊に至っている。

金属の疲労において $S^a \times N = \text{一定}$ (S : 応力レベル) の関係が成り立つとされているが⁵⁾、ここでもこの関係が成立するものとすればひびわれ発生時について $a \approx 18$ となり S の20%の低下に伴う N の増加は約58%である。金属の場合は一般に $a = 8 \sim 15$ とされており S の20%の

低下に伴って N は約30%増加することになり、色々な意味で複合された鉄筋コンクリート部材は均一質の金属に比べて作用応力レベルに敏感であるといえよう。

次に鉄筋コンクリート部材の純ねじり疲労に関する児島ら⁶⁾の研究がある。試験体は $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 550 \text{ cm}$ で鉄筋比は軸方向鉄筋とスターラップについてともに約1.0%, 1.5%および2.0%とした。コンクリートは $\sigma_{cu} = 45.7 \text{ MPa}$ で $\sigma_{tu} = 3.45 \text{ MPa}$ であった。上限荷重レベルは静的強度の85%, 75%および65%とし下限を約8%とした。実験から得られた生存確率 $p(N)$ と N の関係は

表1 S - \bar{N} の関係

	S - \bar{N} 関係式	疲労強度* (%)	
		200万回	1,000万回
無筋	$S = -13.77 \log N + 152.5$	65.8	56.1
鉄筋	$P = 1.0\%$	45.4	45.4
	$P = 1.5\%$	58.5	53.1
	$P = 2.0\%$	56.0	51.0
	$P = 1.5\%^{**}$	48.6	43.0

*: 静的強度に対する比

** : スティールファイバー補強

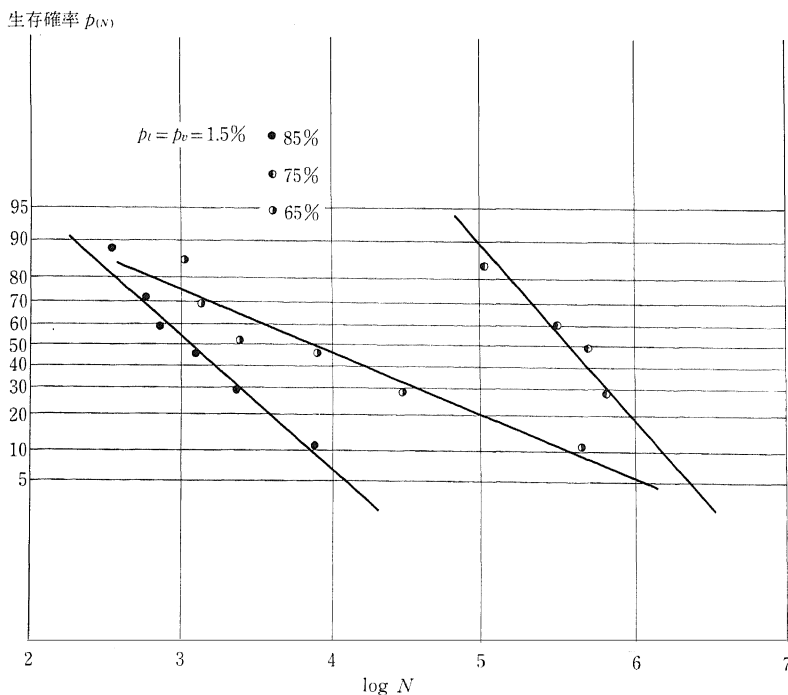
図2 $P(N)$ - $\log N$

図2の通りである。 $p(N)=50\%$ における平均疲労寿命 \bar{N} を求め最小二乗法により $S-\bar{N}$ 関係を表1のように定めた。

そのほかに RC スラブの疲労押抜きせん断強度に関する角田らの研究⁷⁾がある。レベルの異なる荷重の組合せについても実験を行い、Minner の仮説がこれに適用できることを示している。

3. 実験の方法

(1) 試験体

その断面寸法を図3に示す。合計26本で、内6本を繰返しにおける荷重レベル決定のための静的試験に用いた。コンクリートは $\sigma_{ck}=300 \text{ kg/cm}^2$ 、スランブを $12 \pm 1 \text{ cm}$ とし、セメントは普ポセメントで比重 $=3.16$ 、骨材は多摩川産で細骨材は $F.M.=2.74$ 、比重 $=2.55$ であり、粗骨材は最大寸法が 25 mm で比重 $=2.63$ であった。示方配合を表2に示す。

(2) 載荷

荷重は油圧式ねじり疲労試験機($M_{t,\max}=5.0 \text{ t.m}$)を用いたが、荷重レベルは上限および下限ともに油圧表示により任意に設定可能で表示油圧と作用ねじりモーメントの換算表を用意した。試験に先立って試験機のねじり端に部材軸と直角方向に腕(長さ 1.0 m)をもつ器具を取り付けその先端にロードセルを設置して試験機の荷重に関する検定を行った。

ねじりの繰返し速度は平均 20 cpm である。荷重レベルを定める基準となるひびわれ発生ねじりモーメント M_{tc} と破壊ねじりモーメント M_{tu} の値は、シリーズごと

表2 示方配合

W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
45	39	171	378	689	1079

表3 試験体の静的ねじり強度

	M_{tc} (kg · m)		M_{tu} (kg · m)		材令(日)
A-1	710	729	1040	1140	41
	748		1240		
A-2	765	742	1350	1181	42
	719		1012		
A-3 A-3'	784	795	1015	1210	93
	806		1405		

に2本をテストして表3の値が得られた。静的試験は各シリーズともに疲労試験開始前日に行い、そのときの材令が表に示してある。

同時に試験したコンクリートの強度と弾性係数は表4の通りであった。圧縮強度は $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ の、引張強度は $\phi 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ の円柱供試体を、曲げ強度は $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ のはり型供試体を用いた。

この結果に基づいて各シリーズごとの荷重レベルを表5のように定めた。

ここで M_{tc} 比と M_{tu} 比についての考え方について述

[A]

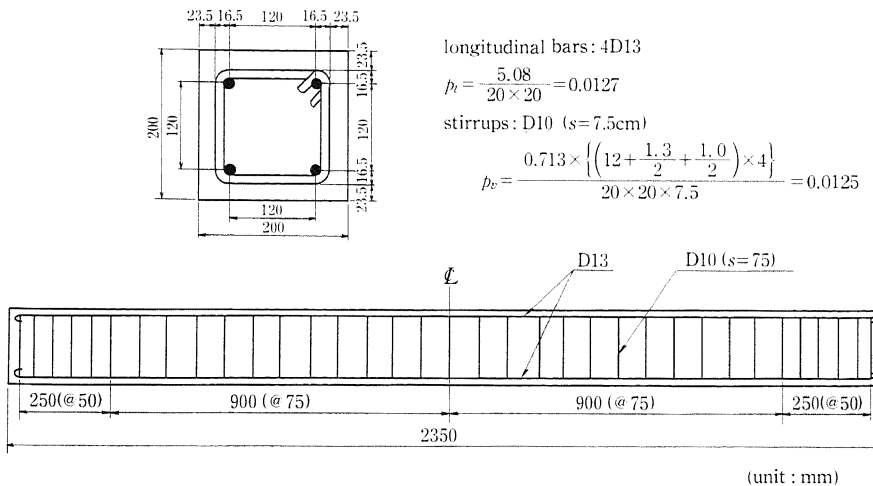


図3 試験体の断面寸法

表4 コンクリートの強度と弾性諸係数

	材 令 (日)	σ_c (kg/cm ²)	σ_{tu} (kg/cm ²)	σ_b (kg/cm ²)	E (10 ⁵ kg/cm ²)	G (10 ⁵ kg/cm ²)	ν
A-1	41	352	30.3	44.1	2.90	1.20	0.21
A-2	42	367	28.5	45.6	2.70	1.14	0.18
A-3 A-3'	93	396	32.6	50.5	3.10	1.34	0.16

表5 試験体の荷重レベル

	上, 下限荷重 (kg・m)	M_{tc} 比(%)	M_{tu} 比(%)
A-1	上限	656	90
	下限	0	0
A-2	上限	668	90
	下限	111	15
A-3	上限	716	90
	下限	239	30
A-3'	上限	716	90
	下限	-80	-10

べる。 M_{tc} の定義は静的のときも繰返し のときも同じである。 M_u については静的のときは最大荷重にとり繰返し のときはかぶりコンクリートが剥落して変形量が一挙に増加するときと定義した。ひびわれモーメント以下の繰返しでは変形の点で終局状態に達しても、部材は軸鉄筋とスターラップで囲まれた残存部分で外力に抵抗できる。このように静的の場合と繰返し のときでは破壊モーメントの定義が異なるばかりではなく、ねじりひびわれ発生後は剛度が急速に低下したひびわれ発生から耐荷力喪失までの余裕が少いので一般には設計荷重はひびわれ発生荷重以下と考えられるので、上限荷重をひびわれ発生モーメントの90%とし、下限を表5に示すような4段階に定めた。

(3) 測定

予じめ定めた繰返し回数ごとにねじれ角、鉄筋のひずみおよびひびわれ幅を測定したひびわれの発達状況を観測した。

ねじれ角の測定は図4に示すように設けた傾斜計を用い任意の回数ごとに荷重の上限と下限のそれぞれに対応する傾斜角の差を測定して、その値からねじれ角 θ (10⁻⁵ rad/cm) を求めた。鉄筋のひずみは試験体中央部分の軸方向鉄筋とスターラップに貼布したワイヤーストレインゲージによって測定した。ひびわれ幅はひびわれ発生と

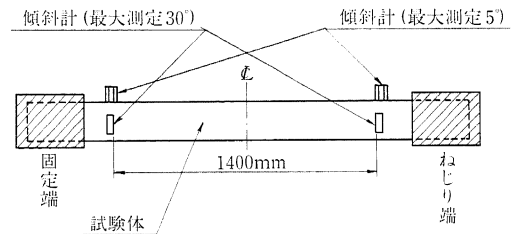


図4 ねじれ角の測定

ともに部材側面で高さ中央付近での初期ひびわれ幅を測微計で測定した後ひびわれの両側に端子を取りつけ、端子間の距離の変化を自動測定記録することによって求めた。この方法によれば、多数点のひびわれ幅を同時にまた荷重の上限と下限ごとに測定することができる。

4. 実験結果と考察

(1) 破壊に至る挙動

すでに文献^{3,4)}で示したように、ひびわれ発生までは全断面有効でひびわれが発生して部材のある面を斜めにほぼ横断するとねじれ角は急にふえ始め、これが部材の四面にらせん状に連続すると内部の釣合は立体トラスでモデル化される状態となる。この釣合状態は安定し全寿命の大半を占める。ついで図5に示すように部材四隅のかぶりコンクリートが押し出されて剥離し、これに伴ってねじれ角は一挙に増加して終局状態に至る。

A-1 シリーズについて θ -log N 曲線を図6に示す。ここで曲線のほぼ平坦な部分はトラス型釣合状態であり、ねじりによる斜引張力を軸方向鉄筋とこれに直交するスターラップで、斜圧縮力をコンクリートで分担している。図によればこの釣合状態の開始と終了時のそれぞれにおけるねじれ角は疲労寿命に関係なく表6に示す通りほぼ一定値を示す。A-2 に関する表7についても同様である。A-3 についてはデータ不足のため記述を省いたが、開始時は約 6.0×10^{-5} rad/cm で終了時は約 14.0×10^{-5} rad/cm であり、ひびわれ発生前のねじれ角を基準にと

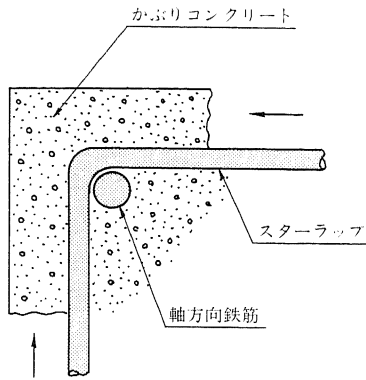


図5 かぶりコンクリートの剝離

れば前者は約3倍で後者は約7倍であった。

(2) 疲労寿命

荷重レベルごとの破壊までの繰返し回数 N_u を表8に示す。 N_u のバラツキは大きいので次式で計算した破壊確率 $p_f(N_u)$ をも示してある。材令は載荷開始日のものである。

$$p_f(N_u) = \frac{r}{n+1} \quad (1)$$

r : N_u の小さい方から数えて r 番目の数

n : 試験体数

$p_f(N_u) - \log N$ の関係を荷重レベルごとに対数正規確率紙上に画けば図7の通り直線関係で示され、角田らのせん断に関する研究²⁾と同様に N_u のバラツキは対数正規分布に従うものと考えてよい。このグラフは上限荷重が一定で下限荷重を変化させたものであるが、荷重振幅が大きい程疲労寿命は小さくなることを示す。

ついで、図7をもとにして荷重振幅を縦軸に N_u を横軸にとって破壊確率ごとに片対数表示したものが図8である。この図から $p_f(N_u) = 20\%$ と 80% のときの N_u の値を求めれば表9の通りで、荷重振幅の減少に伴って N_u のバラツキは著しく大きくなること分る。

図6に示されたデータから $S_{\max} \approx 0.58$ (上限荷重が破壊荷重の58%) のとき $\log N_u \{p_f(N_u) = 50\% \}$ と S_{\min} の関係について回帰分析を行って次の直線式が得られた。

$$\log N = 2.79 + 13.74 S_{\min} \quad (2)$$

これらの関係を、縦軸に S_{\min} を横軸に $\log N$ をとって示したものが図9である。両側ねじりは式(2)では表わせないが、これについてはデータの蓄積を待って再考すべきであろう。

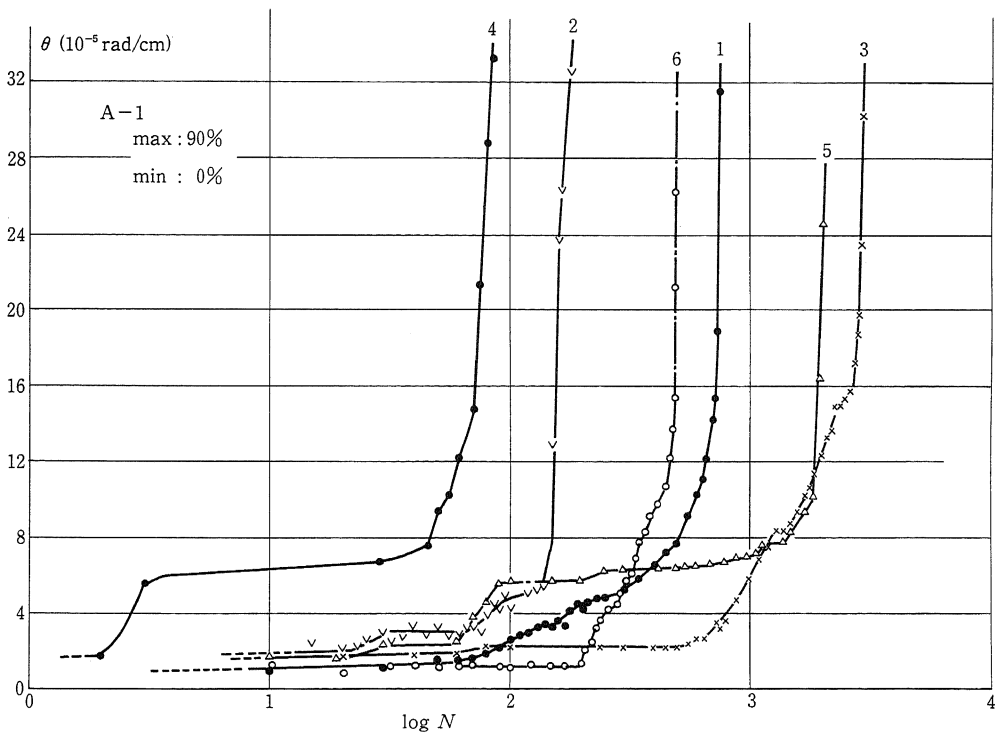
図6 θ - $\log N$ 曲線

表6 各段階での N と θ (A-1)

No.		4	2	6	1	5	3	平 均
ひびわれ 発 生	N	2	21	222	62	36	550	—
	θ	1.85	2.33	2.33	1.75	2.33	2.33	2.15
トラス型 釣合状態	開 始	N	3	95	328	250	120	1020
		θ	5.56	5.24	6.11	4.65	5.53	6.11
	終 了	N	55	150	460	730	1732	2900
		θ	10.19	8.00	12.22	15.71	11.64	19.78
	$(N_{終}-N_{始})/N$ (%)		61	68	27	63	88	62
破 壊	N	85	191	495	764	2070	3039	—
	θ	33.33	33.45	26.76	31.71	24.44	29.50	29.80

 $(\theta: 10^{-5} \text{ rad/cm})$ 表7 各段階での N と θ (A-2)

		1	4	6	5	2	3	平 均	
ひびわれ 発 生	N	3	7	100	1140	7600	40	1.89	
	θ	1.75	2.04	1.75	1.75	1.75	2.30		
トラス 型釣合状態	開 始	N	15	200	800	5100	7600	13000	6.38
		θ	6.40	6.00	6.40	7.27	4.95	7.27	
	終 了	N	2000	5000	11000	16000	20000	36000	13.86
		θ	16.29	12.60	14.25	15.42	10.76	?	
$(N_{終}-N_{始})/N_u$ (%)		71	51	77	66	61	60	64	
破 壊	N	2798	9382	13233	16595	20284	38207	48.58	
	θ	45.09	41.89	51.49	27.93	76.50	?		

 $(\theta: 10^{-5} \text{ rad/cm})$

表8 実験結果 (疲労寿命)

荷重 (%)	No.	N_u	$p_f(N_u)$ (%)	材令 (日)	荷重 (kg·m)	
					max	min
0~90 (0~57.5)	A-1	4	85	14.3	41	657 0
		2	191	28.6	46	
		6	495	42.9	42	
		1	764	57.1	44	
		5	2070	71.4	51	
		3	3039	85.7	50	
15~90 (9.8~58.9)	A-2	1	3298	14.3	52	666 111
		4	9382	28.6	48	
		6	13233	42.9	42	
		5	16595	57.1	44	
		2	20284	71.4	67	
		7	38207	85.7	48	

30~90 (19.8~59.1)	A-3	1	107579	20.0	93	715 239
		4	228000	40.0	106	
		3	450100	60.0	120	
		2	768693	80.0	141	
-10~90 (-6.6~59.1)	A-3'	8	150	20.0	62	716 -80
		6	185	40.0	58	
		5	319	60.0	57	
		7	612	80.0	59	

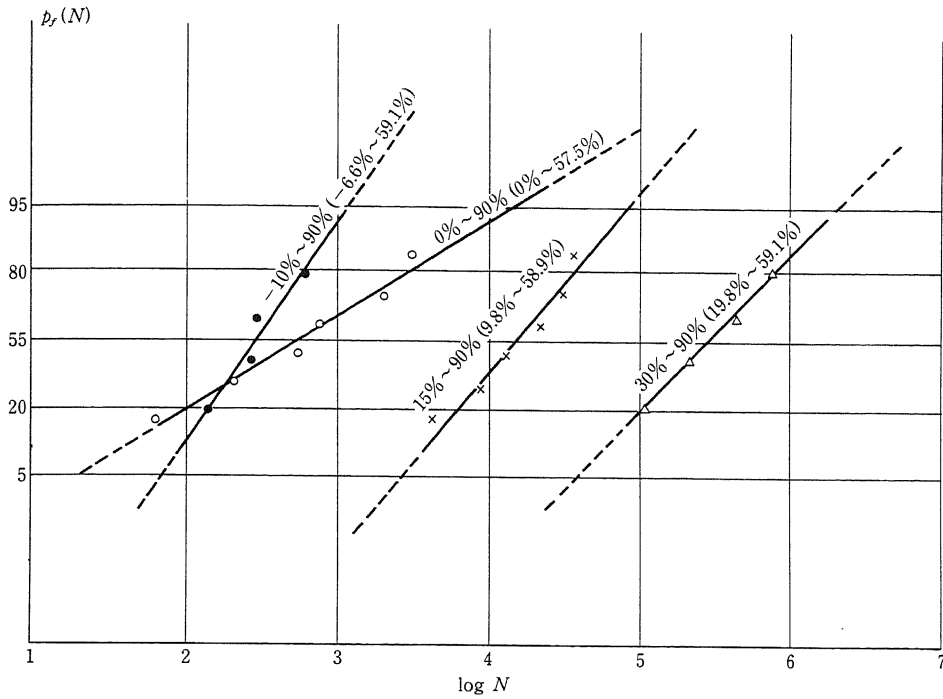


図7 $P_f(N) - \log N$

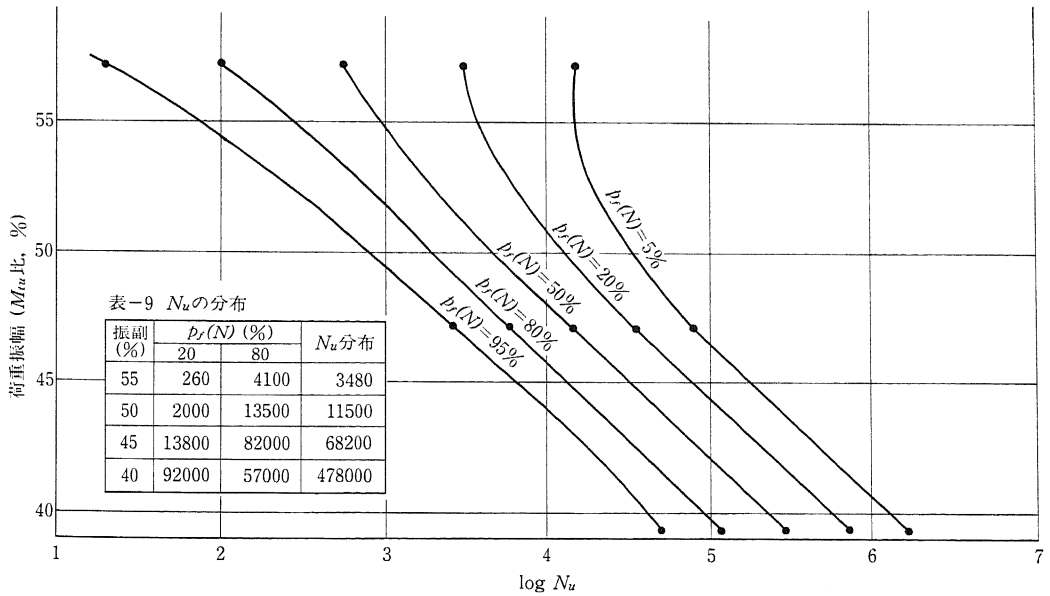


図8 荷重振幅と $\log N_u$

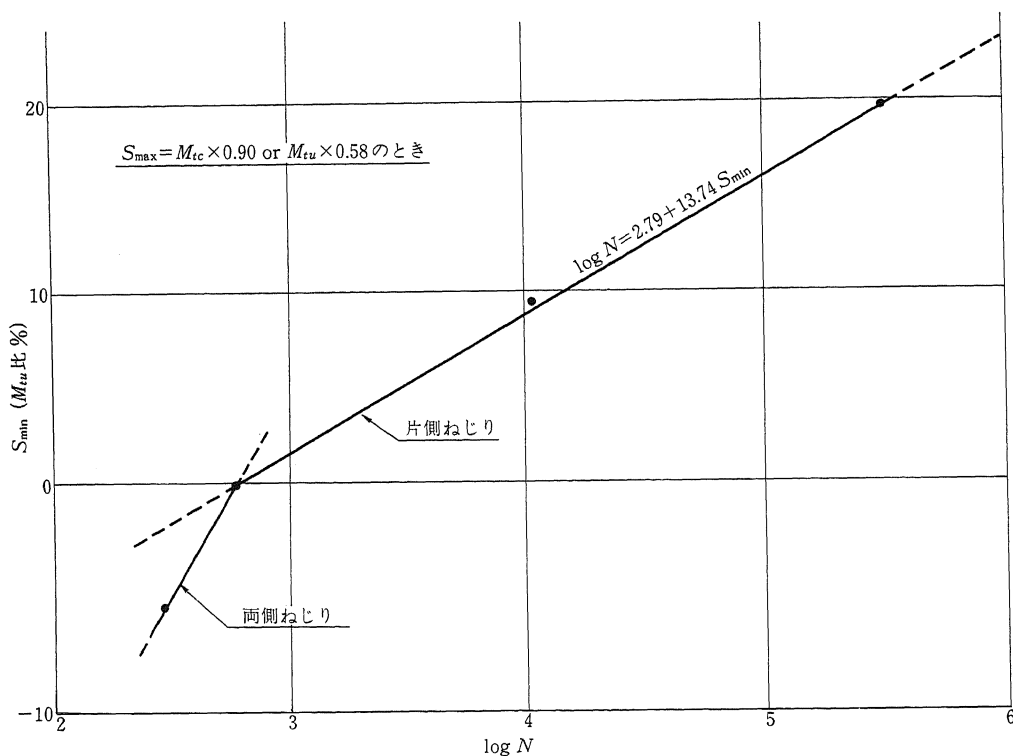
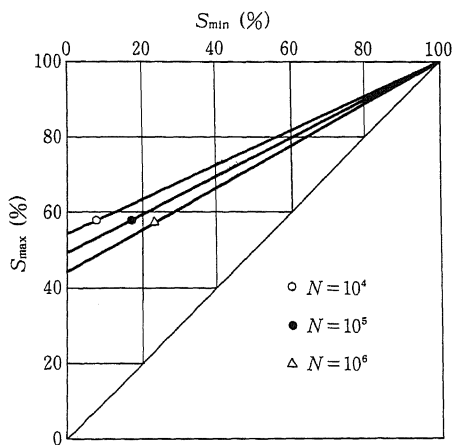
図9 $S_{min}-\log N_u$ 

図10 修正 Goodman 図

本実験で得られたデータは少いためにこれだけからは S_{min} と S_{max} に関する修正 Goodman 図は画けないが、角田らの研究²⁾ に示されるようにこれらの関係が同図に従って表わせるものとすれば図10が得られる。これから次式の関係が得られる。

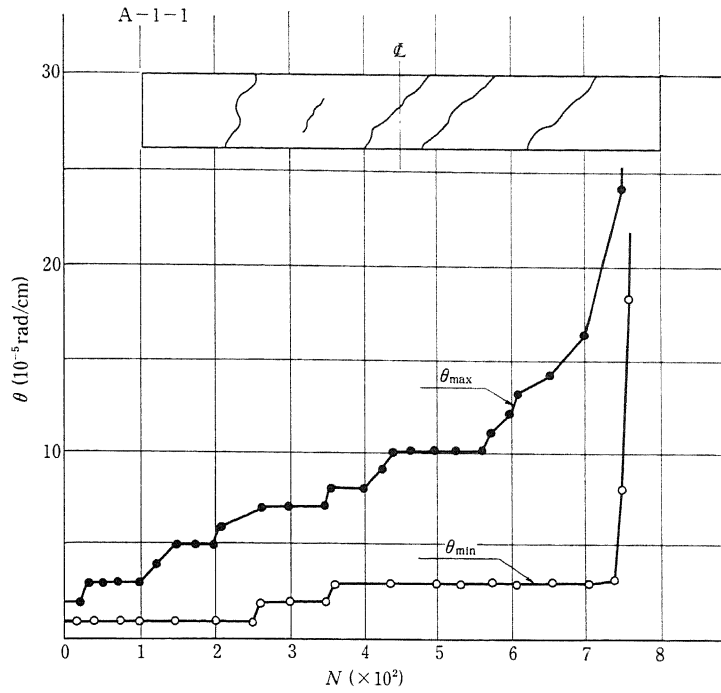
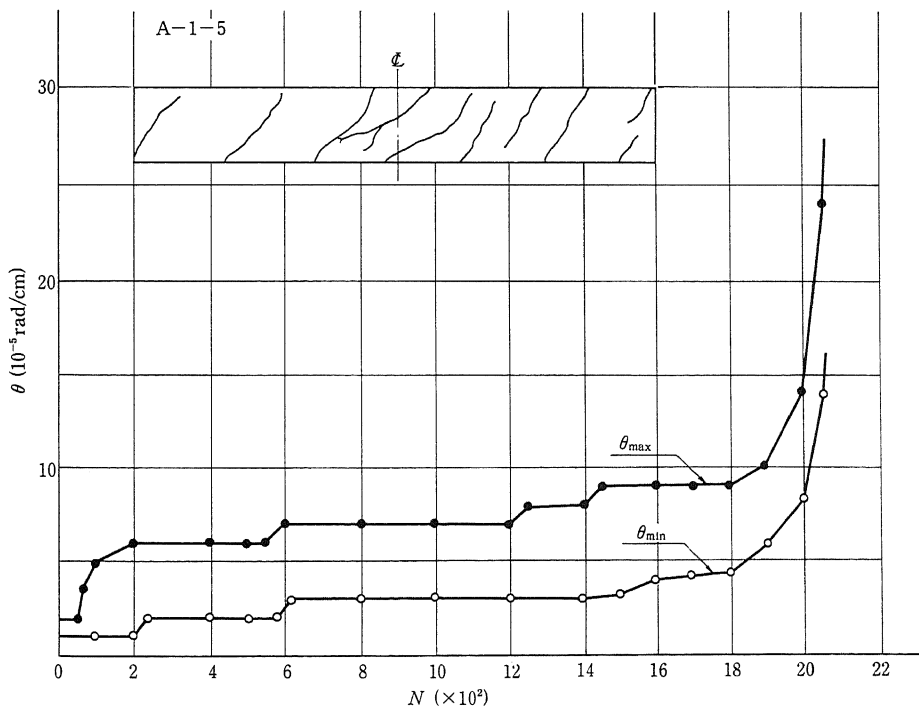
$$\log N = 23.2 \times \frac{100 - S_{max}}{100 - S_{min}} - 6.7 \quad (3)$$

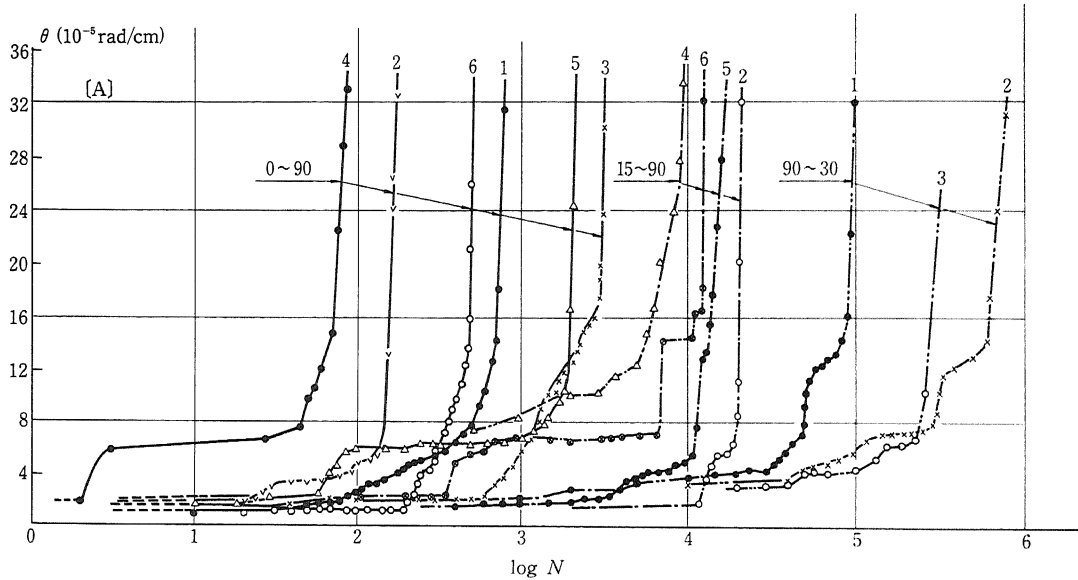
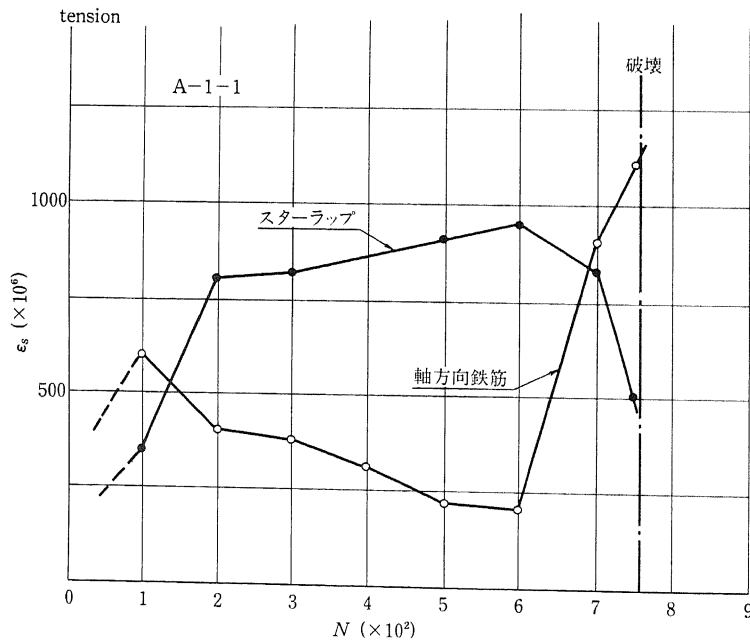
S_{max}, S_{min} : % で表示

この式によれば、完全片ふりの場合 10^5 回疲労強度は 50%, 10^6 回疲労強度は 45% であるが、これらはいずれも静的破壊ねじりモーメントに対する比である。

(3) 変形

繰返し回数 N とねじれ角 θ との関係の一例を、同一荷重レベル ($S_{max} = M_{ru} \times 0.58$ or $M_{ic} \times 0.90$, $S_{min} = 0$) で N_u が著しく異なるものについて図 11, 12 に示す。ここで θ_{min} は荷重が零に戻ったときの残留変形であるが、 θ_{max} と θ_{min} の囲む面積すなわち繰返し変形量の総和を比較すれば A-1-5 ($N_u = 2070$) は A-1-1 ($N_u = 764$) の約 2 倍である。両者のひびわれ発達状況は図に示すように A-1-5 においては細かい多くのひびわれが分散して発達し 1 本当りひびわれの変形吸収量が少くひびわれ幅の増加が遅れるので疲労寿命が大きく、A-1-1 においては逆の現象が見られる。これから明らかにように疲労寿命を大きく左右するものは荷重振幅の大きさとともにひびわれの発生発達状況であり、疲労寿命を大きくするためには多数の細いひびわれが全体に分散して発達するように

図11 θ - N 曲線図12 θ - N 曲線

図13 θ - N 曲線図14 ε_s - N 曲線

鉄筋とくにスターラップの配置を考える必要がある。

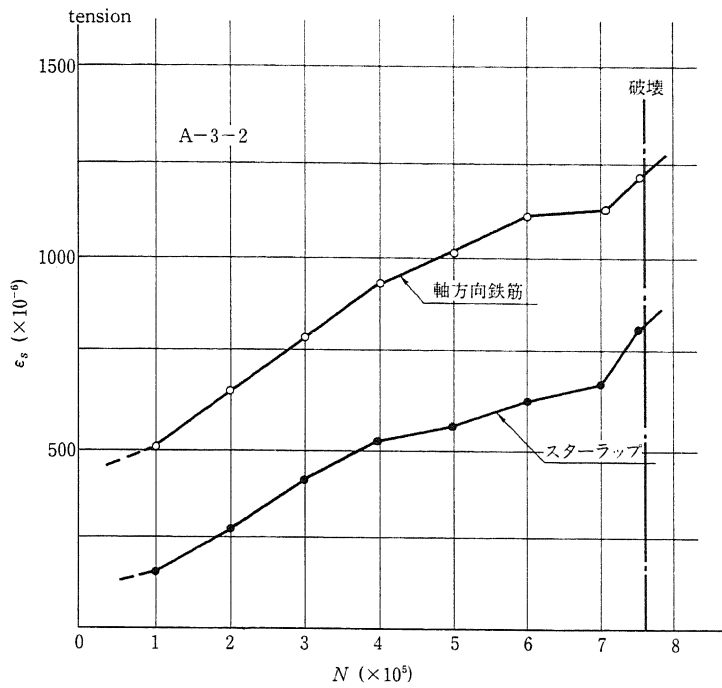
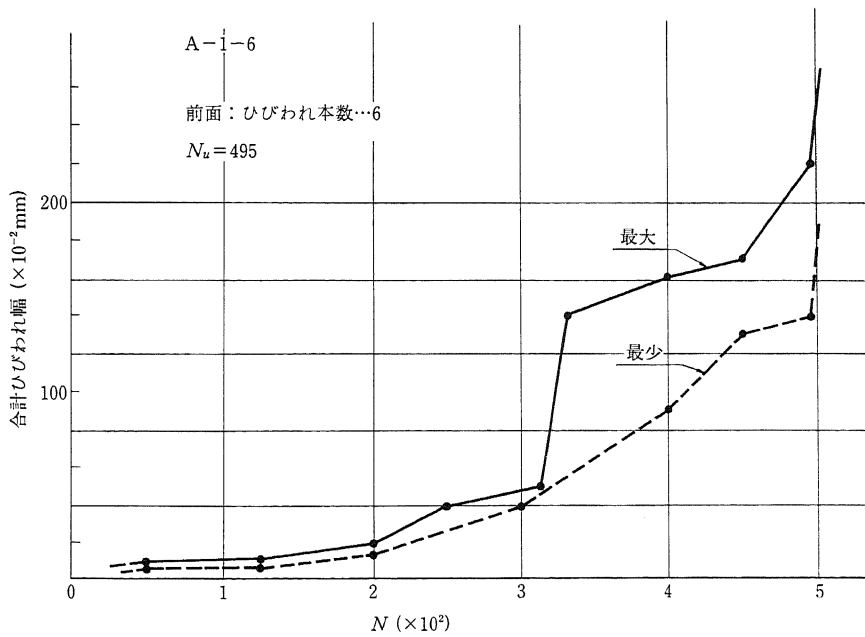
図13に各試験体の N - θ 曲線をまとめて示した。

(4) 鉄筋のひずみ

N と ε_s との関係を全試験体の中で破壊までの繰返し回数の少ないもの A-1-1 ($N_u=764$) と、最も多いもの A-3-2 ($N_u=768\ 693$) について図14, 15に示した。いずれの試

験体も軸方向鉄筋比とスターラップ比はすべて約1.25%である。

直交して配置された軸方向鉄筋とスターラップはねじりモーメントによる 45° 傾斜した斜引張力の水平および鉛直方向成分を分担しているが、本実験における荷重レベル ($S_{\max}=M_{ru} \times 0.58$ or $M_{rc} \times 0.90$) ではいずれも鉄筋

図15 ϵ_s - N 曲線図16 合計ひびわれ幅- N 曲線

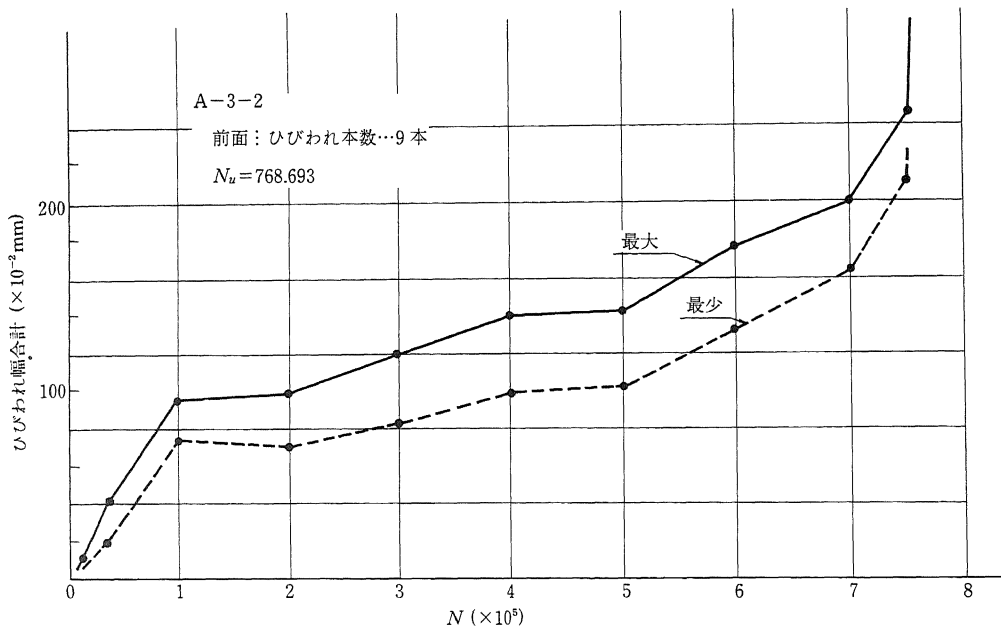


図17 合計ひびわれ幅-N 曲線

は降伏も破断もしていない。破壊はすべてかぶりコンクリートの剝離によって起っている。

(5) ひびわれ

部材のある一面におけるひびわれ幅の合計を荷重振幅が異なり従って疲労寿命に著しい差のある A-1-6 ($N_u=495$) と A-3-2 ($N_u=768.693$) について図16, 17に示す。これによれば N_u が著しく異なっても破壊直前のひびわれ幅の合計には大きな差はない。ただ、 N_u の小さいものは一本のひびわれ幅がある時点で急速に増加して破壊に至っている。これに反して N_u の大きいものは、それぞれのひびわれ幅がほぼ平均的に次第に増加しながら破壊に至っている。

5. ま と め

ここで得られた実験結果の範囲内での結論の概要は次の通りである。

(1) 本実験のように上限荷重がひびわれ発生ねじりモーメント以下の場合、ある繰返し載荷後にかぶりコンクリートが剝落すると同時に変形が急速にしかも著しく大きく増加に転じる。しかしその後も設定した上限荷重の繰返しに堪え得るが、変形の面から考えてこの点を終局状態と考えるのが妥当である。従って、加え得る最大荷重を破壊強度と考えたときの静的ねじりの場合とは破壊の定義が異なることになる。

(2) 斜ひびわれが断面四周にらせん状に発達するのに伴って形成されるトラス型鉤合状態は、荷重のレベルやその振幅および疲労寿命とは無関係に、ねじれ角が約 6.0×10^{-5} rad/cm (ひびわれ発生前のねじれ角の約3倍) のときに始まり、約 14.0×10^{-5} rad/cm (同じく約7倍) のときに終わっている。

(3) 疲労寿命はバラツキが大きいがこれを荷重レベルごとに画けば図6の通りで、対数正規分布に従うものと考えてよい。

(4) 上限荷重を $0.58 M_{tu}$ (本実験では $0.90 M_{tc}$ に相当する) としたときの平均疲労寿命と下限荷重の関係は次の回帰直線式で示される。

$$\log N = 2.79 + 13.74 S_{\min}$$

例えば、100万回疲労強度は $S_{\max}=0.58 M_{tu}$ のとき $S_{\min}=0.23 M_{tu}$ である。

(5) 上限と下限の荷重の間に修正 Goodman 図が画けるものとすれば図10の通りで、

$$\log N = 23.2 \times \frac{100 - S_{\max}}{100 - S_{\min}} - 6.7$$

ここで S_{\max} と S_{\min} は百分率表示で、例えば $S_{\min}=0$ の完全片振りねじりのとき100万回疲労強度は $S_{\max}=0.45 M_{tu}$ である。

(6) 同一の荷重レベルおよび振幅における疲労寿命のバラツキをもたらす大きい要因の一つはひびわれの発生

と発達状況である。ひびわれが細かく多数分散して発達すればトラス型鈎合状態が長く続き、従って疲労寿命が大きい。

(7) 本実験で採用した荷重レベルでは軸方向鉄筋とスターラップ ($P_1=P_0=1.26\%$) のいずれも部材破壊時に降伏しなかった。ここで定義した破壊後にさらに引き続いて同一荷重を繰返し載荷してもスターラップに囲まれたコアコンクリートで抵抗しそれが崩壊して耐荷力を喪失するが、そのときの鉄筋のひずみに大きな増加は見られない。従って鉄筋比をこれ以上大きくしても疲労強度を大きくすることはできないものと考えてよい。

謝辞 本実験を実際に担当された昭和51年から56年度に至るコンクリート研究室の卒論学生諸君と技手久家秀龍君に感謝致します。

(原稿受付 昭和57年 9 月17日)

参 考 文 献

- 1) 松島, コンクリートの疲労に関する従来の研究, 国土館大学工学部紀要, No.15, 1981
- 2) 神山, 松島, 鉄筋コンクリート部材のねじり疲労, セメント技術年報, XXX, 1976
- 3) 神山, 松島, 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, 土木学会第33回年次学術講演会, 1978
- 4) 松島, くり返しねじりを受ける鉄筋コンクリート部材の挙動, 土木学会第30回年次学術講演会, 1975
- 5) A. S. Tetelman and A. J. McEuly, Fracture of Structural Materials, 宮本博訳, 培風館
- 6) 児島ほか, コンクリート部材の純ねじり疲労に関する実験的研究, 土木学会第36回年次学術講演会, 1981
- 7) 角田ほか, RC スラブの疲労押抜きせん断強度に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No. 317, 1982