【土木学会論文集　第378号／V-6　1987年2月】

両引き試験による鉄筋コンクリートのひびわれ分散性に関する研究

STUDY ON CRACK DISPERSION OF REINFORCED CONCRETE IN AXIALLY-LOADED TENSION TESTS

村田二郎*・河合紀茲**
By Jiro MURATA and Tadashi KAWAI

The dispersion of flexural cracks in a reinforced concrete member is an important characteristic closely related to the durability of the member. The axially-loaded tension test is widely used for readily ascertaining crack dispersion, but there are fine aspects of this testing method which still remain to be clarified. The study reported here examines in detail the forms of axially-loaded tension testing methods, dimensions of specimens to be used, and the methods of calculating maximum crack width. Tests on the influences of surface configurations of deformed bars and quality of concrete on crack dispersion are performed by the axially-loaded tension method, and it is shown that except for special cases, the influences of these are small and that reinforcing bar diameter and reinforcement ratio have predominant effects.

Keywords: *bond test, crack dispersion, deformed bar*

1. 緒　　言

鉄筋コンクリート部材における曲げひびわれの分散性は，部材の耐久性に密接に関係し，鉄筋コンクリート部材の特性としてきわめて重要である．ひびわれの分散性には，鉄筋とコンクリートとの付着性が重要な役割を果たすといわれており，異形鉄筋を用いた場合のひびわれの分散性が普通丸鋼の場合より著しく改善されることは，よく知られている事実である．

著者らは，かねてより鉄筋とコンクリートとの付着試験方法について研究を重ね，異形鉄筋の付着強度を評価する方法として，割裂き引抜き試験および偏心引抜き試験を提案し，土木学会論文集，第348号[1)]に報告した．本文は，その延長として，異形鉄筋のひびわれ分散性試験方法について研究した結果を取りまとめたものである．

本研究では，ひびわれ分散性試験方法の標準化の可能性を検討することも主要な目的としたので，試験の簡易さを重視して，両引き試験を研究の対象とした．両引き試験は従来，わが国で広く用いられてきたが，標準化の観点からは，両引き試験方法の形式，鉄筋直径に対するコンクリート供試体の断面寸法など，なお検討すべき点が残されている．本文では，両引き試験方法の適正化のための諸提案を行うとともに，異形鉄筋の表面形状やコンクリートの品質がひびわれ分散性に及ぼす影響について述べている．従来，これらの影響がやや過大に評価されている嫌いがあると思われるが，本研究により，異形鉄筋のふし間隔が直径の数倍に達するような特別な場合とか，鋼繊維補強コンクリートや極低温下のコンクリートのように付着強度と引張強度との関係が通常のコンクリートと相違する場合などにその影響が認められるのであって，一般の場合，ひびわれ分散性には鉄筋直径およびかぶり，または鉄筋比の影響が支配的であることを明らかにしている．

2. 使用材料

(1) 鉄　　筋

実験に供した鉄筋は，切削試験片と市販の異形鉄筋5種（高炉品）であって，材質はすべてSD 35である．

切削試験片は，丸鋼および市販の横ふし筋の加工品であって，丸鋼から切削した試験片は，D 25相当品で，ふし間隔を直径の0.5～3倍，ふし高さを2.1 mm，ふ

* 正会員　工博　東京都立大学教授　工学部土木工学科
（〒158　世田谷区深沢2-1-1）
** 正会員　工博　日本大学講師　生産工学部土木工学科
（〒275　習志野市泉町1-2-1）

表—1　試料鉄筋の機械的性質および表面形状

鉄筋		機械的性質			表面形状				
銘柄	呼び名	降伏点 σ_y (kgf/cm²)	引張強さ σ_u (kgf/cm²)	伸び ε (%)	ふし間隔 l (mm)	ふし高さ h (mm)	ふしの隙間 t (mm)	ふしと軸線とのなす角 α (°)	ふし側面の傾斜角 θ (°)
A	D16	38.2	57.2	26.8	9.6 (0.60)	1.2 (0.08)	3.4 (0.18)	90.0	59.1
	D25	39.8	57.9	32.8	13.9 (0.55)	1.9 (0.08)	4.6 (0.18)	90.0	57.0
	D25※	39.1	57.3	32.1	16.4 (0.65)	2.1 (0.08)	4.7 (0.19)	90.0	56.7
	D32	40.6	57.2	31.8	14.6 (0.46)	2.2 (0.07)	4.9 (0.15)	90.0	54.0
	D35	40.4	57.3	29.3	15.2 (0.44)	2.5 (0.07)	4.8 (0.14)	90.0	58.2
	D38	38.3	61.5	28.4	15.4 (0.40)	2.4 (0.06)	5.7 (0.15)	90.0	57.4
	D41	41.6	62.6	24.3	14.6 (0.35)	2.7 (0.07)	6.1 (0.15)	90.0	58.4
	D51	41.8	59.7	21.4	14.5 (0.29)	2.8 (0.06)	5.5 (0.11)	90.0	57.2
B	D32	39.6	57.1	29.6	16.8 (0.53)	2.4 (0.08)	5.6 (0.18)	90.0	53.6
	D35	38.2	57.8	28.3	22.4 (0.64)	2.2 (0.06)	7.5 (0.22)	90.0	57.2
	D38	37.8	59.6	28.4	23.6 (0.62)	2.4 (0.06)	7.2 (0.19)	90.0	56.5
	D41	38.7	57.8	25.2	23.6 (0.62)	2.7 (0.07)	7.5 (0.18)	90.0	58.3
	D51	38.4	58.1	24.4	16.0 (0.32)	3.4 (0.07)	7.8 (0.15)	90.0	56.4
C	D32	38.3	56.2	27.9	17.0 (0.54)	2.2 (0.07)	8.1 (0.26)	90.0	58.2
	D35	39.7	59.8	23.4	17.5 (0.50)	2.9 (0.08)	7.6 (0.22)	90.0	54.2
	D38	37.3	55.4	22.2	17.0 (0.45)	3.2 (0.08)	10.0 (0.26)	90.0	54.3
	D51	39.2	57.2	25.1	19.4 (0.38)	4.2 (0.08)	13.8 (0.27)	90.0	49.5
D	D16	38.6	58.6	26.3	10.4 (0.65)	1.5 (0.09)	4.3 (0.27)	52.6	46.1
	D25	39.1	60.7	27.5	15.7 (0.62)	2.3 (0.09)	5.1 (0.20)	52.7	48.4
	D32	39.4	61.1	28.0	21.5 (0.68)	2.6 (0.08)	5.8 (0.18)	53.8	44.0
	D35	38.3	57.2	29.1	23.6 (0.68)	2.5 (0.07)	6.8 (0.20)	53.6	49.7
	D38	38.2	57.6	28.4	25.8 (0.68)	2.7 (0.07)	7.0 (0.18)	53.5	50.3
	D41	36.4	58.0	22.3	28.3 (0.69)	4.2 (0.10)	7.4 (0.18)	71.1	52.3
	D51	38.3	56.4	26.6	30.1 (0.59)	4.6 (0.09)	7.8 (0.15)	72.5	53.6
E	D32	38.7	57.8	28.1	18.1 (0.57)	2.3 (0.07)	4.8 (0.15)	52.8	48.3
	D35	39.6	58.9	27.4	20.0 (0.57)	2.2 (0.06)	6.2 (0.18)	53.1	48.9
	D38	38.2	56.2	24.3	23.4 (0.61)	2.4 (0.06)	7.7 (0.20)	52.8	49.7
	D41	37.4	57.8	25.2	25.7 (0.62)	3.0 (0.07)	7.8 (0.19)	52.5	51.1
	D51	38.3	59.6	23.3	32.1 (0.63)	4.5 (0.09)	8.5 (0.17)	75.1	53.2

表中の( )内の数値は鉄筋直径に対する比。
ふし側面の傾斜角はカリパー反対方向の角度。
鉄筋Aの D 25 ※は試作品。

し側面の傾斜角を90度としたものであり，幾何学的規則性をもっている．横ふし筋Aを加工した試験片は，D 25（表—1中の※印）およびD 51のふしを1個おき，および3個中2個を切削したもの，ふしの高さを1/3～2/3に切削したものである．

市販の異形鉄筋は，横ふし筋3種と斜めふし筋2種であって，寸法はD 16～D 51である．これらの機械的性質，および表面形状を表—1に示す．

（2）　コンクリート

大部分の実験に用いたコンクリートは，粗骨材の最大寸法を20 mmおよび25 mm，スランプ約8 cm，材令28日の圧縮強度を約300 kgf/cm² とした．このほか，一部の実験に圧縮強度約800 kgf/cm² の高強度コンクリート，圧縮強度約300 kgf/cm² の人工軽量骨材コンクリートおよび鋼繊維混入率0.5～2.0%の鋼繊維補強コンクリートを用いた．鋼繊維補強コンクリートは，スランプ約13 cmのコンクリートに鋼繊維を0.5，1.0，1.5および2.0%混入したもので，スランプはそれぞれ約10 cm，9 cm，4.5 cmおよび3 cmとなった．これらのコンクリートの配合を表—2に示す．

使用したセメントは，N社製普通ポルトランドセメント，細粗骨材は，通常の品質を有する富士川産，美山産の川砂，および砕石2005である．

軽量骨材は，M社製の非造粒型膨張頁岩であって，細骨材の絶乾比重は1.57，24時間吸収率は15%，粗骨材の絶乾比重は1.28，24時間吸水率は8%であった．

鋼繊維は，I社製ツイスト鋼繊維であって，直径0.5 mm，長さ30 mm，アスペクト比60のものである．

高性能減水剤は，N社製メラミンスルホン酸塩系のものである．

3.　両引き試験方法

（1）　両引き試験の形式

両引き試験として，従来次の3つの形式が試みられている．

a）間隔を少しずつ変化させて切欠きを設けた供試体を用い，ひびわれ発生位置を制御し，最大ひびわれ間隔をできるだけ明確に把握することを主眼としたもので，ひびわれの分散性は，最大ひびわれ間隔によって評価する方法[2]．

b）切欠きのない十分長い供試体を用いて，ランダムにひびわれを発生させ，平均ひびわれ間隔，または，最大ひびわれ間隔で評価する方法[3),4)]．

c）a），b）2方法の供試体断面を鉄筋直径と鉄筋比との比 ϕ/p（ϕ：鉄筋直径，p：鉄筋比）が一定となるように定める方法[5]．

上記の3方法を検討した結果，a）法を採用することとした．これは，b）法はひびわれの発生状態が自然で

表—2　コンクリートの配合

コンクリートの種類	圧縮強度 (kgf/cm²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m³) 水 W	セメント C	砂 S	砂利 G	混和剤 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	鋼繊維混入率 (%)
普通	307	20	55	47	169	307	848	975	—	10.0	1.9	—
高強度	825	20	30	38	173	577	621	1034	C×1.2	14.5	1.4	—
軽量	327	20	46	45	168	365	551	564	—	10.0	4.3	—
鋼繊維補強	278	20	60	42	186	310	769	1079	—	13.0	—	0
	286								—	10.1	—	0.5
	298								—	8.7	—	1.0
	307								—	4.4	—	1.5
	336								—	3.1	—	2.0

表—3　b法による試験結果の例

鉄筋の呼び名	供試体の長さ (cm)	供試体個数	ひびわれ間隔の個数	平均ひびわれ間隔 試験値の範囲 (cm)	平均値 (cm)	標準偏差 (cm)	変動係数 (%)
D25	100	3	6～7	11.5～12.3	12.0	0.81	6.8
	200	3	9～16	11.4～15.8	13.1	1.91	14.6
	250	3	16～19	11.8～12.1	11.9	0.51	4.3

捨て難い方法であるが，供試体長が2mをこえる場合が多く，通常のアムスラー万能型試験機を使用できない不便があること[6]．また，有効ひびわれの取り方によって，試験値に相当の差異が生ずること，たとえば，D25を用い，供試体断面7.5×7.5cm，長さ2mの両引き試験において，供試体1個の4側面におけるひびわれ数は，最大16個，最小9個に変化し，平均ひびわれ間隔は，最大13.9cm，最小10.6cmに相違した．

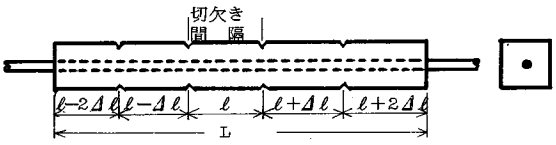
また，**表—3**に示すように，供試体3個について，打設面を含む2面以上にわたって発生したひびわれを有効として計算した平均ひびわれ間隔試験値の変動係数は，供試体長1～2.5mにおいて，4.3～14.6%となっている．

次に，c）法は，最大ひびわれ間隔がϕ/pに比例することを利用したもので，コンクリート断面積をϕ/pに比例させれば，供試鉄筋の直径にかかわらず供試体長をほぼ一定にできる便利がある．しかし，ϕ/pを一定とすると，ひびわれ間隔試験値に及ぼす鉄筋直径の影響が表われず，試験結果に汎用性が乏しい．鉄筋直径は，ひびわれ間隔を支配する重要な要因であり，また，後述するように，縦ひびわれの発生の有無は鉄筋比に依存するので，鉄筋比を一定とした供試体を用い，a）法によるのが適切と考えたのである．

（2）　供試体の形状，寸法および補強

供試体は，**図—1**に示すように，中心軸に鉄筋を有する正方形断面の角柱とした．コンクリート断面の寸法，すなわち，かぶりの適正値を定めるために辺長を鉄筋直径の3倍（以下3ϕと記す），4ϕおよび5ϕとした供試体を用い，両引き試験を行った．使用鉄筋は，横ふし筋AのD32である．

ひびわれのパターンは，**図—2**の模式図に示すように，まず切欠き部に発生し，次にある長さ以上の切欠き間隔内に1個ずつ横ひびわれ（1次ひびわれ）が順次発生し，安定状態に至る．安定状態に達する時期に前後して，切欠き部付近に鉄筋に沿う縦ひびわれが発生する（2次ひびわれ）．このひびわれ発生過程は，供試体の断面寸法によって相違した．



図—1　両引き試験供試体一般図

図—2　ひびわれ模式図

表—4は，横ひびわれ（1次ひびわれ）が発生し始めたとき，および横ひびわれの発生が終了し，安定状態に達したときの鉄筋応力，ならびに縦ひびわれ（2次ひびわれ）発生時の鉄筋応力を各寸法の供試体別に示したものである．鉄筋応力は，実測したヤング係数比$n=6.8$を用い，鉄筋コンクリート断面として計算してある．ただし，（　）内は，コンクリート断面を無視し，裸鉄筋として計算した値である．**表—4**において，横ひびわれ発生時の鉄筋応力は，従来いわれているようにコンクリートの断面寸法にかかわらず大体一定であって，215～400 kgf/cm² の範囲にある．そして530～1050 kgf/cm² から安定状態となっている．これに対し，縦ひびわれは供試体断面の辺長が3ϕの場合は，横ひびわれの発生が完全に終わった後に発生したが，辺長が4ϕ，および5ϕの場合には，横ひびわれの発生が終了する以前に縦ひびわれの一部が発生した．これは，横ひびわれ発生時の引張荷重がコンクリート断面積に比例するのに対し，縦ひびわれ発生時の引張荷重は，辺長に比例することによるのであろう．すなわち，横ひびわれ発生荷重は，

$$P_l=\sigma_{tu}\{A_c+(n-1)A_s\} \quad \cdots\cdots (1)$$

ここに，P_l：横ひびわれ発生荷重，A_c：コンクリート角柱の全断面積，A_s：鉄筋の断面積，n：ヤング係数比

また，鉄筋の引抜き時にふしのくさび作用によって，

表—4　ひびわれ発生時の鉄筋応力

辺長 (ϕ)	横ひびわれ発生時の鉄筋応力 σ_s (kgf/cm²) 開始時	終了時	縦ひびわれ発生時の鉄筋応力 σ_s (kgf/cm²)
3	317～396 (800～1000)	832～1050 (2100～2650)	1070～1149 (2700～2900)
4	214～267 (800～1000)	747～787 (2800～2950)	721～787 (2700～2950)
5	215～268 (1200～1500)	527～572 (2950～3200)	474～527 (2650～2950)

注）（）内の数値はコンクリート断面を無視し、裸鉄筋として計算した応力である。

鉄筋周囲のコンクリートに生じるフープテンションが，ふし間隔，およびかぶり方向に一様に分布すると仮定すれば，

$$\sigma_{rt}=\frac{\phi h_0\cdot\sigma_b}{2ct}\cot\theta \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)^{1)}$$

ここに，σ_{rt}：コンクリートに生じるフープテンション，c：ふし間隔，t：かぶり，h_0：ふしの高さ，σ_b：ふしに働く支圧応力の鉄筋軸方向の分力，θ：ふし側面の傾斜角．

縦ひびわれ発生時の引張荷重は，次式で与えられる．

$$P_s=\gamma P_{so}=\gamma\pi\phi h_0\sigma_b=\gamma\cdot 2\pi ct\,\sigma_{tu}\tan\theta \cdots\cdots\cdots (3)$$

ここに，P_s：縦ひびわれ発生時の引張荷重，P_{so}：1個のふし間隔に相当するコンクリートの割裂時の引張荷重，γ：付着応力の分布によって定まる係数

式（1）および（3）より定性的ではあるが，上記の現象が説明されている．

横ひびわれの発生が安定する以前に縦ひびわれが発生すると，この部分の付着が大部分消失し，切欠き間隔が短縮したことになり，この試験の意義が失われることが多い．

表—5 は，**表—4** の供試体の最大ひびわれ間隔試験値を示したもので，辺長を4ϕおよび5ϕとすると，試験値の変動係数は，3.6から7.7%としだいに大となっており，これは，上記のひびわれ発生過程の相違によるものと思われる．

次に，後藤らは，鉄筋比を一定とした供試体においても，鉄筋直径が大となるほど縦ひびわれが発生しやすいことを指摘している[7]．縦ひびわれ発生時の鉄筋応力は，

$$\sigma_s=\frac{P_s}{A_s}=\gamma 8c\left(\frac{t}{\phi}\right)\left(\frac{1}{\phi}\right)\sigma_{tu}\tan\theta \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

式（4）は，t/ϕが一定の場合でも縦ひびわれ発生時の鉄筋応力は，鉄筋直径に反比例することを示しており，後藤らの実験結果を裏付けている．

本実験においても，供試体寸法を3ϕに一定とした場合，D 35以上の鉄筋を用いた場合には，横ひびわれが安定する以前に縦ひびわれが発生する傾向が認められたので，供試鉄筋がD 35以上の場合には，供試体をらせん鉄筋で補強することとした．補強区間は，切欠き部から辺長の1.5倍程度で十分であったが，施工の便を考えて供試体全長にわたってらせん鉄筋を配置することとした．

表—5　かぶりが最大ひびわれ間隔試験値に及ぼす影響

辺長 (ϕ)	供試体の個数 (体)	最大ひびわれ間隔 ℓmax (cm) 試験値の範囲	平均値	標準偏差 σ (cm)	変動係数 V (%)
3	5	16.6～17.8	17.6	0.64	3.6
4	5	19.8～23.1	21.9	1.06	4.9
5	5	22.5～27.6	24.7	1.90	7.7

注）使用鉄筋は鉄筋AのD 32である。

表—6　らせん鉄筋補強の有無が最大ひびわれ間隔試験値に及ぼす影響

鉄筋の呼び名	らせん鉄筋補強	供試体の個数	最大ひびわれ間隔 ℓmax (cm) 試験値の範囲	平均値	標準偏差 σ (cm)	変動係数 V (%)
D 32	有	5	16.0～17.6	17.0	0.61	3.6
	無	5	16.6～17.8	17.6	0.64	3.6
D 35	有	5	16.8～18.2	17.6	0.49	2.8
	無	5	18.7, 19.3、他の3体はひびわれ判定不能			
D 51	有	5	22.4～24.7	23.7	0.70	3.0
	無	5	24.1、他の4体はひびわれ判定不能			

た．

表—6 は，横ふし筋AのD 32，D 35，およびD 51を用い，辺長を3ϕとした供試体について，らせん鉄筋の有無が最大ひびわれ間隔に及ぼす影響を試験した結果であって，らせん鉄筋は，供試鉄筋がD 32およびD 35の場合，線径4 mm，らせん直径8 cm，ピッチ4 cmとし，D 51の場合，線径6 mm，らせん直径12.5 cm，ピッチ4 cmとした．**表—6** において，D 32を除いて，らせん鉄筋補強なしの供試体は，縦ひびわれが一部の横ひびわれに先行し，横ひびわれを乱す傾向が認められ，最大ひびわれ間隔の判定が困難となった．これに対し，らせん鉄筋で補強した場合は，すべての供試体において横ひびわれの発生が先行し，その結果試験値のばらつきも小さく，変動係数は2.8～3.6%となっており，太径鉄筋について試験を行う場合には，らせん鉄筋補強が必要であることを示している．

以上の実験的検討から，供試体は，辺長が鉄筋直径の3倍の正方形断面とし，供試鉄筋がD 35以上の場合は，供試体の全長にわたって適当な寸法のらせん鉄筋で補強するのがよい．

表—7 に以下の実験に用いた各寸法の供試鉄筋に対する供試体の辺長，切欠き間隔，および補強用らせん鉄筋の詳細を示した．ただし，**表—7** において，標準切欠き間隔とは最大ひびわれ間隔の推定値として選定したものであって，後述する式（6）から計算した値である．切欠き間隔差は，実用上鉄筋直径の1/3～1/4を目安として定めた．なお，供試鉄筋がD 16の場合，均等質の供

表—7　両引き試験供試体の寸法

鉄筋の呼び名	コンクリート断面寸法 (cm)	標準切欠き間隔 ℓ (cm)	切欠き間隔差 $\Delta\ell$ (cm)	らせん鉄筋補強
D 16	7.5×7.5	19.5	0.5	用いない
D 25	7.5×7.5	13.0	0.5	
D 32	9.5×9.5	16.5	1.0	
D 35	10.5×10.5	17.5	1.0	線径：4 mm
D 38	11.5×11.5	19.0	1.0	らせん直径：8cm
D 41	12.5×12.5	20.0	1.0	ピッチ：3 cm
D 51	15.0×15.0	22.5	1.5	線径：6 mm らせん直径：12.5 cm ピッチ：4 cm

試体を造るために施工性を重視し，辺長をD 25の場合と同じく7.5 cmとした．

（3） 供試体の製造および養生

端板の中心に鉄筋を通す開口部を有する型枠を用い，その両側板の内面にプラスチック製面木を所定間隔に接着した．鉄筋は，水平に設置し，埋込み区間は特別な圧延マークなどのない部分とし，十分清掃して用いた．面木の間隔は，**表—7**に示す標準切欠き間隔を中心として，その前後に**表—7**の切欠き間隔差で順次増減した．

なお，供試体一体における切欠き間隔数を5～9個とし，供試体全長を約80～150 cmとした．

コンクリートを2層に分けて詰め，各層を棒径27 mmの小型内部振動機を用いて締固めた．打設後約2時間を経て再度上面を平滑にこて仕上げし，供試体断面を所定の寸法に正しく仕上げた．材令1日において，側板，および端板を脱型し，室温20±2°C，湿度90％以上の霧室内で試験時まで養生した．

（4） 載荷方法および最大ひびわれ間隔の算定方法

材令28日において，供試体を湿潤状態で試験した．すなわち，容量50 tおよび300 tアムスラー型万能試験機を用い，突出した鉄筋の両端に軸引張力を加えた．この場合，供試体端面から鉄筋のつかみ部までの長さを鉄筋直径の6倍以上，または，30 cm以上とするとともに，供試体の軸線と試験機の中心線が一致するよう供試体を正しく設置し，極力偏心荷重が加わらないよう注意した．荷重速度は，鉄筋の引張応力の増加が毎分500 kgf/cm^{2}以下となるように定め，鉄筋の公称降伏点に相当する荷重まで載荷した．最大荷重を保持した状態で供試体面上にひびわれを記録した．

次に，ひびわれの展開図を描き，横ひびわれの発生していない最大の切欠き間隔を最大ひびわれ間隔とした．

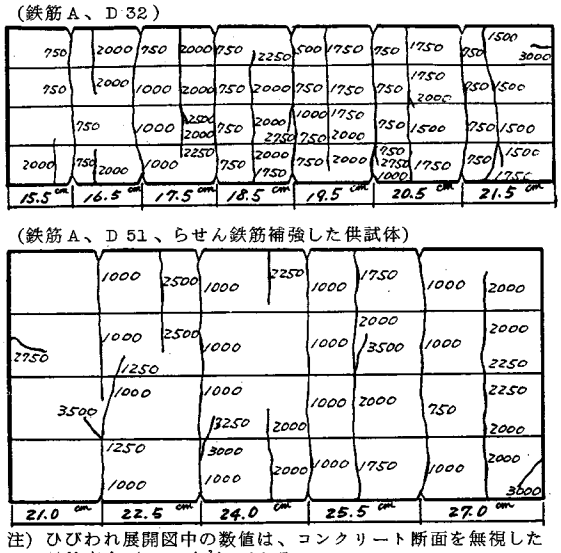
図—3にひびわれ展開図の例を示す．**図—3**に認められるように，わずかな偏心載荷や供試体の不均等性のために，ひびわれが供試体の全周にわたって発生しない場合がしばしば生じた．このような場合には，供試体軸に直交する面に対するひびわれの投影長さが全周長の60％以上のものを有効なひびわれとみなし，これらを用い，次式によって最大ひびわれ間隔を算定した．

$$l_{max}=\frac{W_1 l_1+\cdots+W_i l_i+\cdots+W_n l_n}{W_1+\cdots+W_i+\cdots+W_n}-\Delta l \cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

ここに，l_{max}：最大ひびわれ間隔（cm），W：ひびわれ長さに対する重み｛$W=x/L$　x：供試体軸に直交するひびわれの投影長さ（cm），L：供試体の全周長（cm）｝，l：切欠き間隔（cm），Δl：切欠き間隔差（cm）．

有効ひびわれ長さを供試体全周長の60％以上としたのは，次の理由による．すなわち，**表—8**は，斜めふし筋DのD 32，D 38，およびD 51を用いた両引き試験において，有効ひびわれ長さを全周長の100％（供試体の全周に発生した場合），75％以上（供試体の3面以上に発生した場合），60％以上，50％以上，および25％以上として，最大ひびわれ間隔を算定した結果である．

表—8において，横ひびわれが供試体の全周にわたって発生した場合だけを有効ひびわれと認めると，最大ひびわれ間隔算定値の変動係数は，約4～7％，一方，一面を超えて発生したひびわれをすべて有効なひびわれと認めて最大ひびわれ間隔を計算すると，その変動係数は，約4～5％と比較的大となっている．これに対し，ひびわれが供試体の2面以上に発生し，$x/L \geqq 60$％を有効



注）ひびわれ展開図中の数値は、コンクリート断面を無視した鉄筋応力（kgf/cm²）である。

図—3　ひびわれ展開図

表—8　最大ひびわれ間隔の算定値に及ぼす有効ひびわれ長さのとり方の影響

鉄筋の呼び名	有効横ひびわれの長さ x/L（％）	供試体の個数	最大ひびわれ間隔 l_{max}（cm） 試験値の範囲	平均値	標準偏差（cm）	変動係数（％）
D 32	100	5	18.5～20.5	19.5	0.9	4.6
	75 以上		18.5～19.8	19.0	0.6	3.1
	60 以上		17.9～19.1	18.4	0.5	2.7
	50 以上		16.6～17.9	17.2	0.5	3.1
	25 以上		15.4～17.1	16.4	0.7	4.3
D 38	100	5	18.0～21.0	19.3	1.3	6.5
	75 以上		17.6～19.8	18.5	0.9	5.0
	60 以上		17.4～18.5	17.9	0.2	1.2
	50 以上		16.2～17.6	16.9	0.6	3.4
	25 以上		14.6～16.8	15.6	0.9	5.8
D 51	100	3	26.2～28.6	27.7	1.1	4.0
	75 以上		25.1～26.8	26.1	0.7	2.8
	60 以上		22.7～23.6	23.2	0.4	1.6
	50 以上		22.4～23.1	22.9	0.4	1.6
	25 以上		21.9～22.6	22.3	0.3	1.3

注）使用鉄筋は斜めふし筋Dである。

とすれば，ひびわれ間隔算定値の変動係数は，約3% 以下となり，より安定した値が得られている．また，有効ひびわれ長さのとり方によって，最大ひびわれ間隔算定値に差異が生じ，$x/L \geqq 60\%$ を有効としたときの最大ひびわれ間隔は，$x/L=100\%$ を有効とした場合より，1～2.5 cm 小さく $x/L \geqq 25\%$ を有効とした場合より，2～3 cm 大となっているが，試験値のばらつきを考慮して，本実験では，有効ひびわれ長さを供試体全周長の60% 以上としたのである．

4. 異形鉄筋の表面形状およびコンクリートの品質がひびわれ分散性に及ぼす影響

(1) ふし間隔および高さがひびわれ分散性に及ぼす影響

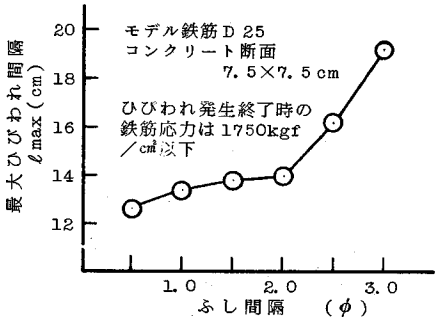
横ふし筋AのD 25*およびD 51のふしを2個に1個等の割合で切削し，ふし間隔を直径の約30% から2倍程度まで変化させたもの，およびふし間隔は変えずに(直径の65%)，ふし高さを製品の1/3～2/3に切削したものを供試鉄筋として両引き試験を行った．

試験の結果を表—9に示す．表—9において，ふし間隔を直径の2倍程度まで拡大しても，また，ふし高さを直径の4% 程度まで減じても，最大ひびわれ間隔にほとんど差異は認められない．従来，ふしの形状や間隔によって鉄筋周囲のいわゆる内部ひびわれの発生状況は，相当に相違することが実証されているが[7]，コンクリート表面に現われる横ひびわれへの影響は，きわめて小さい．これは，両引き試験における横ひびわれは，コンクリート全断面に作用する引張力に依存し，この引張力は既成の横ひびわれから新たに発生した横ひびわれ位置までの付着応力の総和に等しく，付着応力の総和は，ふしに働く支圧応力の総和にほぼ等しい．したがって，ふしの間隔が相違しても，ふしに接するコンクリートが支圧破壊や割裂き破壊を起こさない範囲では，ふしの数に応じて支圧応力の大きさが変化するだけで，その総和は変わらないことによるのであろう．

表—9 ふし間隔および高さが最大ひびわれ間隔に及ぼす影響

鉄筋呼び名	ふし間隔 C (mm)	ふし高 h (mm)	最大ひびわれ間隔 ℓmax (cm) 試験値の範囲	平均値
D 25	16.4 (0.65)	2.1 (0.08)	12.2～13.4	13.0 (1.00)
	32.8 (1.29)		12.5～14.6	13.7 (1.05)
	49.2 (1.94)		13.6～14.1	13.9 (1.07)
	16.4 (0.65)	1.05 (0.04)	12.7～14.0	13.6 (1.05)
		1.4 (0.06)	12.6～14.2	13.3 (1.02)
D 51	15.0 (0.30)	3.5 (0.07)	22.5～24.7	23.7 (1.00)
	30.0 (0.59)		23.8～25.3	24.6 (1.04)
	59.0 (1.16)		24.6～26.8	25.6 (1.08)
	89.0 (1.75)		25.1～26.1	25.7 (1.08)

注) 表中の( )内の値は、鉄筋直径に対する比である。コンクリート断面7.5×7.5 cm、コンクリート強度301 kgf/cm²である。



図—4 ふし間隔がひびわれ分散性に及ぼす影響

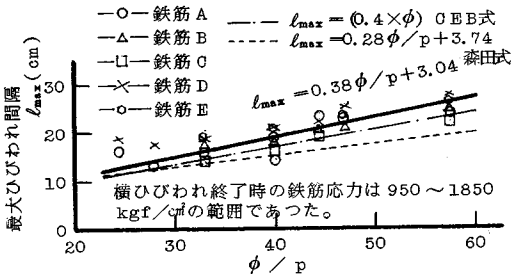
表—10 ふし間隔と横ひびわれ発生時の鉄筋応力との関係

ふし間隔 (φ)	コンクリート断面を無視して計算した鉄筋応力 (kgf/cm²) 横ひびわれ開始時	横ひびわれ終了時
0.30	367	950
0.59	412	1050
1.16	536	1350
1.75	698	1750

注) 使用鉄筋は鉄筋AのD 51である。

次に，図—4は，ふし間隔が最大ひびわれ間隔に影響を及ぼさない限度を確かめる目的で丸鋼を切削し，ふし間隔を直径の1.5～3倍とした横ふし筋D 25相当のモデル鉄筋について両引き試験を行った結果である．図—4において，最大ひびわれ間隔は，ふし間隔が直径の2倍をこえるとしだいに増加し，ふし間隔が直径の2.5倍の場合，約15%，3倍の場合，約33% 増加した．

以上のように，ふし間隔がひびわれ分散性に及ぼす影響はごく少ないが，ひびわれ発生時の鉄筋応力は，相当に相違する．表—10は，ふし間隔と横ひびわれ発生時の鉄筋応力との関係を示したもので，表—9中のD 51の場合である．表—10において，ふし間隔が広いほど鉄筋応力が大となり，付着による鉄筋からコンクリートへの応力伝達が不良となる傾向を示している．表—10において横ひびわれは367～698 kgf/cm² で発生し始め，950～1 750 kgf/cm² で終了し，安定状態となっている．このようにふし間隔が広いほど鉄筋応力が大となり，付着による鉄筋からコンクリートへの応力伝達が不良となる傾向を示している．一般にひびわれ分散性の評価は，一定の鉄筋応力のもとで行うのが適当であるが，横ひびわれの発生が安定したときの鉄筋応力は，最大1 750 kgf/cm² であって，一般に用いている許容応力度より小



図—5　ϕ/p と最大ひびわれ間隔との関係

さいので，表—9 のように横ひびわれ安定時の最大ひびわれ間隔を用いてひびわれ分散性を評価したのである．図—4 についても同様である．

（2） 市販異形鉄筋のひびわれ分散性

4.（1）において，ひびわれの分散性は，鉄筋の表面形状に対して比較的鈍感であることを明らかにした．したがって，JIS G 3112 の形状規定に適合する市販の異形鉄筋のひびわれ分散性は，直径，およびかぶりが同じ場合には，あまり差異がないものと推測される．これを確かめるために，表—1 に示した横ふし筋 3 種と斜めふし筋 2 種を用い，両引き試験を行った．供試鉄筋の寸法は D 16～D 51 である．

図—5 は，両引き試験結果であって，ϕ/p と最大ひびわれ間隔との関係で示してある．最大ひびわれ間隔は，横ひびわれ安定時の値であって，このときの鉄筋応力は 1 850 kgf/cm² 以下であった．ϕ/p と最大ひびわれ間隔との関係は，供試鉄筋の表面形状が相当に相違するにもかかわらず，ほぼ一直線で表わされ，次式で示される．

$$l_{max}=0.38\frac{\phi}{p}+3.04 \quad \cdots\cdots(6)$$

ここに，l_{max}：最大ひびわれ間隔（cm），ϕ：鉄筋直径（cm），p：鉄筋比

この直線の相関係数は，0.90 である．なお，図—5 に CEB[8] および森田式[9]も記入したが，これらは提案式と類似の関係にある．

図—5 は，少なくとも JIS の形状規定に適合する異形鉄筋においては，コンクリート表面に現われる横ひびわれの分散性に差異がないこと，およびひびわれの分散性には，鉄筋直径および鉄筋比の影響が支配的であることを示している．

（3） コンクリートの品質がひびわれ分散性に及ぼす影響

コンクリートの品質がひびわれ分散性に及ぼす影響を確かめるために，圧縮強度約 300 kgf/cm² の普通および軽量骨材コンクリート，圧縮強度約 800 kgf/cm² の高強度コンクリート，ならびに鋼繊維補強コンクリートを用いて両引き試験を行った．供試鉄筋は，横ふし筋 A の D 32 である．

表—11　各種コンクリートのひびわれ分散性

コンクリートの種類	鋼繊維混入率（%）	供試体個数	最大ひびわれ間隔 l_{max} (cm) 試験値の範囲	最大ひびわれ間隔 l_{max} (cm) 平均値	圧縮強度 σ_{cu} (kgf/cm²)	引張強度 σ_{tu} (kgf/cm²)
普通	—	3	16.6～17.3	17.0 (1.00)	307 (1.00)	29.1 (1.00)
軽量			16.9～17.8	17.4 (1.02)	327 (1.07)	24.4 (0.84)
高強度			17.4～18.3	17.9 (1.05)	825 (2.69)	57.2 (1.97)
鋼繊維補強	0	3	16.4～17.7	17.0 (1.00)	278 (1.00)	24.7 (1.00)
	0.5		16.8～18.5	17.7 (1.04)	286 (1.03)	25.0 (1.01)
	1.0		18.1～19.2	18.8 (1.11)	298 (1.07)	28.8 (1.17)
	1.5		18.6～20.2	19.4 (1.14)	307 (1.10)	30.6 (1.24)
	2.0		18.9～20.9	19.6 (1.15)	336 (1.21)	31.3 (1.27)

表中の( )内の数値は、軽量および高強度コンクリートは普通コンクリートに対する比、鋼繊維補強コンクリートは鋼繊維混入率ゼロに対する比である。

試験結果を表—11 に示す．表—11 において，軽量骨材コンクリート，高強度コンクリートなど，普通コンクリートに比べ，その品質が著しく相違するにもかかわらず，最大ひびわれ間隔にほとんど差異は認められない．

これは，両引き試験において，鉄筋比が大きくコンクリートの引張応力が断面に一様に分布すると仮定できる場合には，最大ひびわれ間隔は，次式で与えられており，コンクリートの引張強度と付着強度の比に比例し，この値は，コンクリートの品質によってあまり変化しないことによると思われる．

$$l_{max}=\frac{2}{K}\frac{\phi}{p}\frac{\sigma_{tu}}{\tau_{ou}} \quad \cdots\cdots(7)$$

ここに，σ_{tu}：コンクリートの引張強度，τ_{ou}：付着強度，K：付着応力の分布形によって定まる定数

次に，鋼繊維補強コンクリートにおいては，鋼繊維混入率が増すほど，最大ひびわれ間隔が増大するが，これはコンクリートの引張強度の増加によるのであって，ひびわれ発生時の荷重は相当に増大する．すなわち，鋼繊維混入率 1.5～2% により，コンクリートの引張強度は，約 25% 増大し，その結果，最大ひびわれ間隔は約 15% 大となったが，横ひびわれ発生時の鉄筋応力は，コンクリート断面を無視して計算した場合 1 500～1 750 kgf/cm² に増大している．なお，引張強度は，JIS A 1132 によった．

（4） 極低温に曝された鉄筋コンクリートのひびわれ分散性

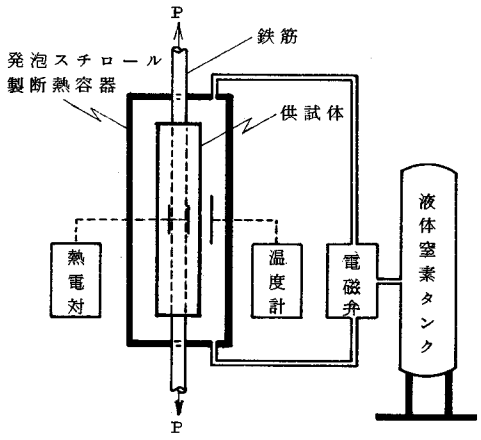
−80°C 以下の極低温に曝された鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれの間隔は，常温に比べてかなり大となることが報告されている[10]．

ひびわれ分散性に及ぼす低温の影響を詳細に検討する

ため，常温における圧縮強度が約 300 kgf/cm² のコンクリートと斜めふし筋 D の D 32 を用いた両引き供試体を常温，−40°C，−80°C，−120°C，および−160°C に保ち，両引き試験を行った．供試体の寸法は，断面 10×10 cm，長さ約 150 cm である．

試験装置は，図—6 に示すように，アムスラー万能試験機に湿潤状態の供試体を正しく据えたのち，内側寸法 30×30×170 cm の発泡スチロール製断熱容器でおおい，内部に液体窒素を噴霧し，あらかじめ供試体の中心に埋め込んだ熱電対と電磁弁とによって所定の温度に保った．供試体が所定温度に達したのち，5 分間を経て両引き試験を開始し，公称降伏点まで載荷した．荷重を除き，供試体を常温に戻したのち，再びわずかに載荷してひびわれを開口させ，供試体面上に記録した．

試験結果を表—12 に示す．表—12 には，供試体の温度，最大ひびわれ間隔との関係だけでなく，同時に作製した円柱供試体の圧縮強度，引張強度および付着強度も示してある．このうち，付着強度は，図—7 に示すような断面 10×10 cm，長さ 18 cm（最大ひびわれ間隔より短い長さ）の両引き供試体を用い，埋め込んだ鉄筋の中央にひずみゲージを貼付しておき引張荷重によってこの位置の鉄筋応力が急増したときを付着破壊とみなし（図—7 参照），このときの鉄筋中央およびコンクリートに埋め込まれていない部分の鉄筋の引張応力を求め，次式から

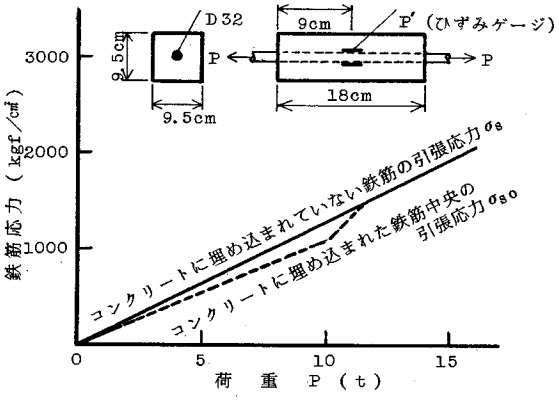


図—6　極低温試験装置

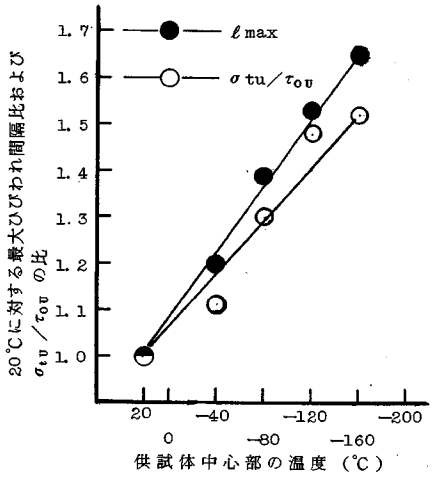
表—12　供試体の温度と最大ひびわれ間隔，圧縮，引張，および付着強度との関係

温度 t (°C)	最大ひびわれ間隔 ℓmax (cm) 試験値の範囲	平均値	圧縮強度 σ_{cu} (kgf/cm²)	引張強度 σ_{tu} (kgf/cm²)	付着強度 τ_{ou} (kgf/cm²)
20	19.2〜19.5	19.3 (1.00)	330	33.4	7.1
−40	21.7〜25.0	23.2 (1.20)	660	56.2	11.3
−80	25.1〜29.1	26.8 (1.39)	1850	58.6	16.1
−120	27.4〜31.9	29.5 (1.53)	1010	64.8	20.1
−160	30.1〜33.3	31.8 (1.65)	1000	65.6	21.0

注）使用鉄筋は斜めふし筋 D 32 である．



図—7　付着強度試験における荷重と鉄筋応力との関係



図—8　低温時におけるコンクリート温度と最大ひびわれ間隔および σ_{tu}/τ_{ou} との関係

計算した．

$$\tau_{ou}=\frac{2\phi}{l}(\sigma_s-\sigma_{so})\cdots\cdots(8)$$

ここに，τ_{ou}：付着強度（kgf/cm²），ϕ：鉄筋直径（3.2 cm），l：鉄筋の埋め込み長さ（18 cm），σ_{so}：埋め込まれた鉄筋中央の引張応力（kgf/cm²），σ_s：埋め込まれていない部分の鉄筋の引張応力（kgf/cm²）

表—12 において，供試体の温度が低いほど最大ひびわれ間隔が大となる状態が明瞭に示されている．すなわち，供試体の温度が−80°C および−160°C の場合の最大ひびわれ間隔は，常温に比べて約 1.4 倍，および 1.6 倍となっている．これは，主として低温に伴う付着強度の増加が引張強度の増加に比べて少ないことによると思われる．

図—8 は，低温に伴う最大ひびわれ間隔，および引張強度と付着強度の比の増加状況を示したもので，両者はほぼ同様な傾向を示している．

5. 結　　論

鉄筋コンクリート部材のひびわれ分散性を簡易に試験する方法として両引き試験を取り上げ，この試験方法の適正化のための諸提案を行うとともに，両引き試験によって，異形鉄筋の表面形状，およびコンクリートの品質がひびわれ分散性に及ぼす影響を確かめた．ただし，ひびわれ分散性は，横ひびわれ安定時の最大ひびわれ間隔で評価した．この実験の範囲内で次のことがいえると思われる．

（1） 両引き試験として，間隔を少しずつ変化させて切欠きを設けることにより，ひびわれ発生位置を制御した供試体を用い，最大ひびわれ間隔によってひびわれ分散性を評価する方法が適している．この場合，コンクリート断面は辺長が鉄筋直径の3倍の正方形とする．ただし，供試鉄筋がD 35以上の場合は，縦ひびわれが早期に発生するのを防ぐため，供試体をらせん鉄筋で補強するのがよい．

（2） 異形鉄筋の表面形状がひびわれ分散性に及ぼす影響はごく小さい．すなわち，ふし間隔を直径の2倍程度まで拡大しても，また，ふし高さを直径の4%程度まで減じても，最大ひびわれ間隔にほとんど差異は認められなかった．

（3） 市販の異形鉄筋の形状は，JIS G 3112に適合しているので，ひびわれ分散性に差異はなく，鉄筋直径と鉄筋比との比と最大ひびわれ間隔との関係は，ほぼ一直線で表わされ，その関係式は，次式で与えられる．

$$l_{max}=0.38\frac{\phi}{p}+3.04$$

ここに，l_{max}：最大ひびわれ間隔（cm），ϕ：鉄筋直径（cm），p：鉄筋比

（4） かぶりの小さい供試体による両引き試験において，最大ひびわれ間隔はコンクリートの引張強度と付着強度の比に比例するので，鋼繊維補強コンクリートのような特殊な場合を除いて，コンクリートの単位重量，圧縮強度等，その品質が相当に変化しても，ひびわれ分散性にほとんど差異はない．

（5） 極低温下の鉄筋コンクリートにおいて，低温ほど最大ひびわれ間隔は大となった．たとえば，温度が−80°C，および−160°Cにおける最大ひびわれ間隔は，常温下のそれぞれ約1.4倍，および約1.6倍となり，この増加割合は，コンクリートの引張強度と付着強度の比にほぼ比例した．

参 考 文 献

1) 村田・河合：引抜き試験による異形鉄筋の付着強度に関する研究，土木学会論文集，第348号／V-1，1984年8月．
2) 後藤・尾坂・三浦・大塚：異形鉄筋コンクリートとの複合に関する研究，第6回複合材料シンポジウム，日本科学技術連盟，1973年10月．
3) Perchat, J. : Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, N°s 171～172, mars-avril 1962.
4) 六車・森田・富田：鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究，日本建築学会論文報告集，第131号，1967年1月．
5) 角田：鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅，コンクリートジャーナル，Vol. 8, No. 9, 1970年9月．
6) 堺・河合：鉄筋コンクリートの付着強度試験方法に関する研究，日本大学生産工学部報告，第8巻，第2号，1975年12月．
7) 後藤・大塚：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究，土木学会論文報告集，第294号，1980年2月．
8) "Recommandations Pratiques Unifiees pour le Calcul et l'exécution des Ouvrages en Béton Arme C. E. B.
9) 六車・森田・角：異形鉄筋によるひびわれの分散について，第2回異形鉄筋シンポジウム，コンクリートライブラリー，第14号，土木学会，1965年12月．
10) 後藤・三浦：極低温下における鉄筋コンクリート部材の性質に関する研究，土木学会論文報告集，第285号，1979年5月．

（1986. 5. 10・受付）