

(76) プレストレスト鉄筋コンクリート合成梁の曲げ性状

大阪大学大学院 ○南 宏明
 大阪大学教授 正会員 大野 義照
 大阪大学大学院 尚 自端
 大末建設(株) 技術開発部 李 振豪

1.はじめに

プレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) や鉄筋コンクリート (RC) の梁や床版において施工の合理化, 省資源, 品質の向上の観点から部材断面の一部をプレキャスト化し, 残りの部分を現場で打設するハーフプレキャスト工法が普及してきている。このようなハーフプレキャスト工法は従来からプレストレストコンクリート(PC)合成床版に用いられている。そこではひび割れの発生は想定されておらず¹⁾, 常時荷重下での応力度はプレキャストコンクリート (PCa) 単体時の応力度に合成断面後に作用する荷重による応力度を加えることによって簡単に求めることができる。また RC 合成梁においては施工時には PCa 単体を支保工で支え, 一体打梁と同じように合成梁の完成後に応力が生じるようにしている。

本研究では, この種の部材の使用範囲を広げる目的で, 施工時荷重下で PCa 単体にひび割れが生じるような荷重を受ける PRC および RC 合成部材²⁾ を対象とし, プレストレスの有無, PCa 単体時に作用する荷重の大きさ, PCa 単体断面のせいを要因に持続載荷実験を行った。

2.実験概要

2.1 試験体の種類及び載荷方法

試験体の種類を表-1に示す。実験要因はプレストレスの有無, 全荷重 P に対する PCa 単体に載荷される荷重 P1 の割合及び PCa 単体のせいである。試験体の形状及び持続載荷方法を図-1に示す。PCa 単体にはコンクリート材齢

表-1 試験体の種類

試験体	持続荷重P (10 ⁴ N)	Pに対する割合(%)		断面高さ(cm) 幅:16cm		プレストレス力 (KN)
		P1	P2	PCa	後打	
No.1	4.4	0	100	25	7	0
No.2		50	50	25	7	0
No.3		50	50	25	7	48
No.4		30	70	18	14	0
No.5		50	50	18	14	48

注:P=P1+P2
 P1:PCa 単体時の載荷荷重, P2:合成梁の載荷荷重

22日に施工荷重を想定したP1を載荷した。P1を載荷した後,プレキャストコンクリートの材齢43日に後打コンクリートを打設した。後打コンクリートの材齢22日(プレキャストコンクリートの材齢65日)に荷重P2(持続荷重P-P1)を載荷した。NO.3, NO.5のプレストレスの導入は,荷重P1の載荷直前に行った。プレストレスの導入はポストテンション方式であり,導入したプレストレス力48KNはPC鋼棒φ9一本の許容値で,PCa単体の平均プレストレスは1.2MPa(No.3),1.7MPa(No.5)である。持続荷重4.4×10⁴Nは,鉄筋の長期許容応力度(200MPa)から定まるNO.1の許容荷重である。

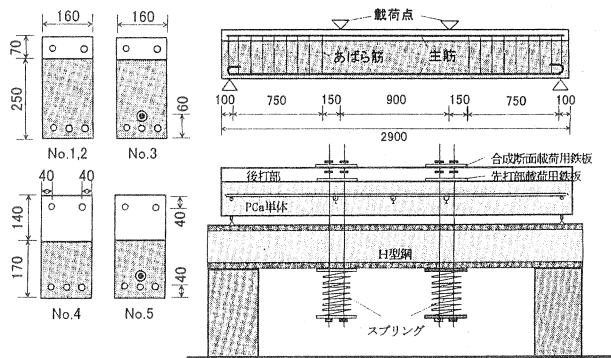


図-1 試験体の形状及び持続載荷方法

2.2 使用材料

プレキャストコンクリートおよび後打ちコンクリートには、それぞれ目標強度 40MPa と 24MPa のコンクリートを用いた。表-2 にコンクリートの力学的性質を示す。主筋にはSD495-XふしのD13を、PC鋼棒にはC種のφ9を、スターラップにはD10を用いた。なおスターラップは支点から中央スパンわたって750mmの区間に150mm間隔で配筋し、等曲げ区間には配筋していない。

表-2 コンクリートの力学的性質

項目	PCa		後打	
	22	157	22	114
材齢(日)	22	157	22	114
圧縮強度Fc(MPa)	37.8	39.1	21.4	24.6
割裂強度Ft(MPa)	2.5	3.0	1.7	2.0
ヤング係数Ec(10 ⁴ MPa)	2.5	2.8	2.0	1.9

2.3 測定項目

鉄筋のひずみは検長 2mm の箔ストレインゲージで、たわみは中央及び載荷点位置の計3ヶ所においてダイヤルゲージで測定した。ひび割れ幅は引張鉄筋高さ位置において検長 6cm のコンタクトストレインゲージ(以下C.S.Gと略記)で、圧縮側コンクリートのひずみは圧縮縁から1cm下の両側面において検長 10cm のC.S.Gで測定した。なお、コンクリートの乾燥収縮は梁断面と同じ断面の角柱試験体で、クリープは10×10(cm)断面の角柱試験体を用いて測定した。クリープ試験体の持続圧縮応力は6MPaである。図-2及び図-3にそれぞれ乾燥収縮ひずみ Sh(t)及びクリープ係数 φ(t)の経時変化を示す。図中の曲線は最小2乗法によって求めた近似曲線である。

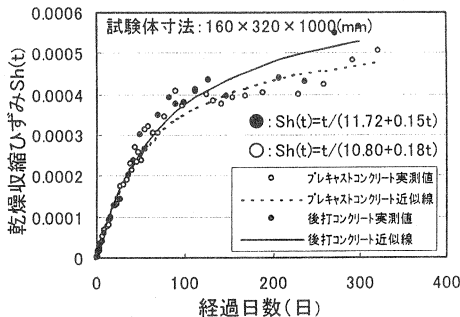


図-2 乾燥収縮ひずみの経時変化

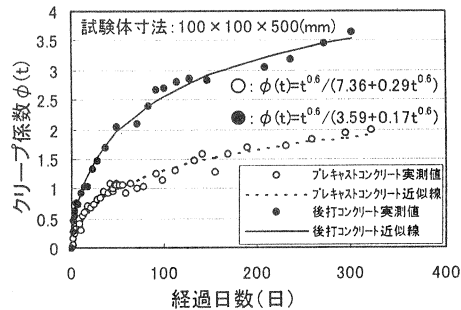


図-3 クリープ係数の経時変化

3. 初載荷時の結果及び考察

3.1 ひび割れ荷重とひび割れ状況

ひび割れ荷重を表-3に示す。試験体 No. 1を除き、PCa単体にP1を載荷している。P1載荷時に試験体 No. 2, 4, 5にはひび割れが生じ、試験体 No. 3はプレストレスの効果でひび割れは生じていない。合成梁にP2を載荷し、持続荷重Pの載荷完了時では全ての試験体にひび割れが生じた。合成梁として持続荷重Pを載荷した時点のひび割れ状況を図-4に示す。P1を載荷していない試験体 No. 1のひび割れは、一体打ちの梁のように梁せいひの3/4の高さまで進展している。一方、他の合成梁では、ひび割れの高さはすべてPCa単体の部分におさまっている。これは後述の応力ひずみ分布からも分かるように、PCa単体時にP1が載荷されることにより、P2載荷後もPCa単体の上部に圧縮応力が残存し、ひび割れの上部への進展が

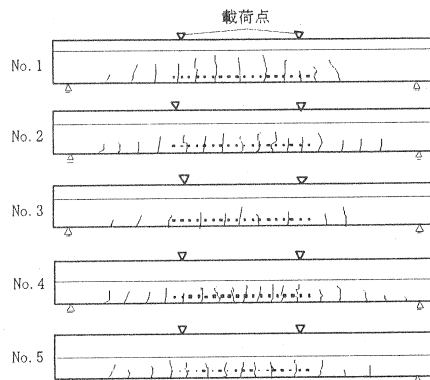


図-4 ひび割れ状況

制御されることによる。等曲げスパン内のひび割れ高さ h_{cr} と平均ひび割れ間隔も表-3に示している。平均ひび割れ間隔の実測値は建築学会「PRC 指針」⁵⁾の解説の式による計算値と同程度ないしより小さく、何れの試験体においても新たなひび割れが生じないひび割れ定常状態に至っていることが分かる。特 No. 4, 5 のひび割れ間隔が他の試験体より狭いのは Pca 単体のせいが小さく、曲げの効果⁶⁾によるものと考えられる。

表-3 ひび割れ荷重 P_{cr} 、等曲げスパンの平均ひび割れ間隔 l_{av} とひび割れ高さ h_{cr}

試験体	$P_{cr}(10^4 N)$		$l_{av}(mm)$		$h_{cr}(mm)$
	実験値	計算値	実験値	計算値	
No.1	2.2	2.4	135		220
No.2	1.2	1.5	148		190
No.3	4.0	3.9	138		120
No.4	0.6	0.77	114	135	100
No.5	1.0	1.2	118		90

注： $P_{cr}=M_{cr}/450$, $M_{cr}=(\sigma_b b + \sigma_p) \times Z$
 $\sigma_b=4.41MPa$, σ_p : 引張縁のプレストレス, Z : 断面係数

3.2 初期平均鉄筋ひずみと断面ひずみ分布

P1 および P2 載荷時の引張鉄筋ひずみと荷重との関係を図-5に示す。ただし、P1 の持続載荷中(材齢 22-65 日)のひずみ増加分は除いている。P1 載荷時には Pca 単体のせいの小さい No. 4, 5 のひずみ増加量が大きい。P2 載荷時にはひび割れ発生後に剛性が低下した試験体 No. 1 に比べ、P1 を載荷していた試験体 No. 2 ~5 のひずみ増加量が小さい。No. 3 はプレストレスによるひび割れ荷重の増大に起因する。P1 載荷時に既にひび割れが生じていた No. 2, 4, 5 においてもひずみ増加量が小さい。これは次に述べるように P1 の載荷によって Pca 単体の上部に圧縮応力が残存し、そのことにより圧縮有効断面積が大きくなり、曲げ剛性が大きくなっていることによると考えられる。

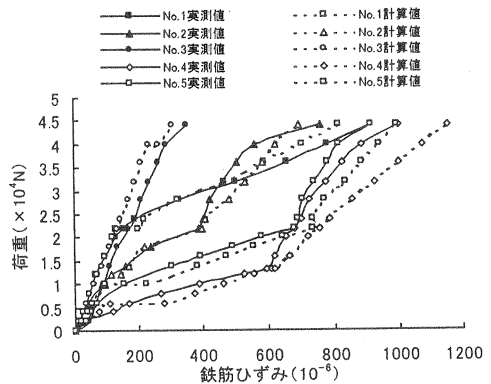


図-5 初期鉄筋ひずみ

載荷完了後即ち持続載荷開始時の等曲げ区間における断面のひずみ分布を図-6に示す。ただし、P1 の持続載荷中(材齢 22-65 日)のひずみ増加分は除いている。実線は実測値で、点線は既に提案した荷重の履歴を考慮する合成断面の応力解析法²⁾による計算値である。P1 を載荷した試験体の圧縮縁ひずみは P1 を載荷していない No. 1 より約 50% 低減されている。また、断面ひずみ分布を見ると Pca 単体に施工時荷重(P1)を受けた試験体断面の中立軸が No. 1 のそれより低くなっている。これは先に載荷した P1 によって Pca 単体の上部は圧縮応力を受けていることによる。

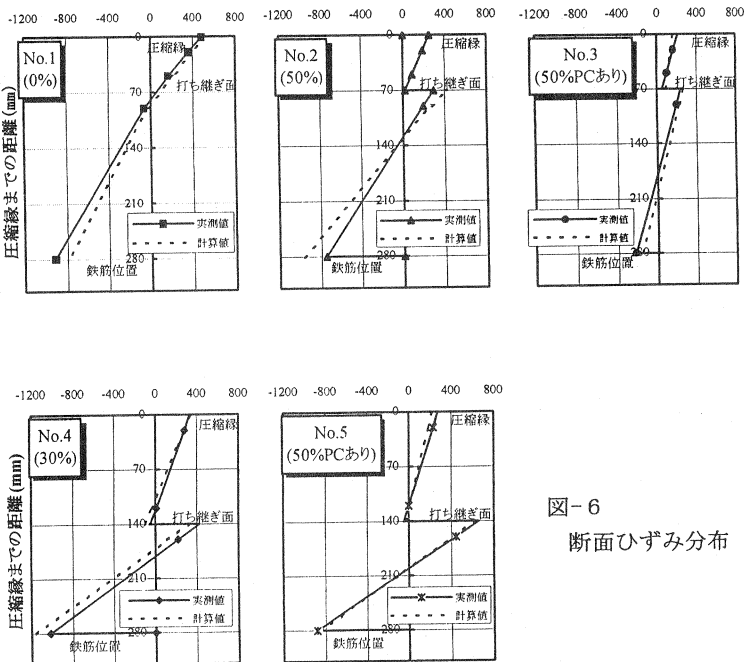


図-6 断面ひずみ分布

3.3 初期ひび割れ幅

P1 および P2 荷重時の等曲げスパン内における平均ひび割れ幅と荷重の関係を図-7に示す。P1 荷重から P2 荷重までの間に、P1 荷重時にひび割れが生じていた試験体 No. 2, 4, 5 ではひび割れ間コンクリートの乾燥収縮等によってひび割れ幅が増大している。P2 荷重時には前述のように試験体 No. 2, 4, 5 の鉄筋ひずみの増加量が小さいことからひび割れ幅の増加量が少ない。特に試験体 No. 4, 5 はひび割れ間隔が小さいことから、荷重完了時(持続荷重開始時)の幅は試験体 No. 1, 2 よりも小さくなっている。試験体 No. 3 はプレストレスの効果により、他の試験体に比べてひび割れ幅が小さくなっている。表-4に初期ひび割れ幅の実測値と PRC 指針解説式による計算値を示す。表中の P2 荷重完了時の値は P1 持続荷重中の増分を除いた値である。試験体 No. 4, 5 においては前述のようにひび割れ間隔が狭いことから実測値は計算値より小さい。

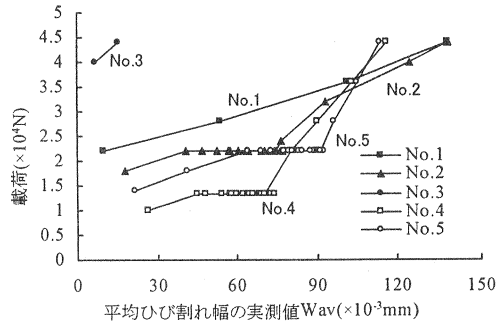


図-7 平均ひび割れ幅

表-4 初期平均ひび割れ幅の実測値と計算値 (10⁻³mm)

試験体	P1荷重完了時		P2荷重完了時	
	実測値	計算値	実測値	計算値
No.1	-	-	138	111
No.2	41	54	138	94.2
No.3	-	-	15.5	41.6
No.4	45	83	116	156
No.5	64	100	114	135

3.4 初期たわみ

等曲げスパンたわみと荷重の関係を図-8に示す。P1 荷重時には PCa 単体のせいが小さい試験体 No. 4, 5 のたわみが大きい。P1 を荷重してから P2 荷重までの間では、鉄筋ひずみが減少したひび割れの無い試験体 No. 3 も含め、P1 を荷重した全試験体において圧縮コンクリートひずみが増加するのでたわみは増加している。P2 荷重時には、ひび割れ荷重の大きい試験体 No. 3 の曲げ剛性が最も大きく、次に PCa 単体のせいが小さい試験体 No. 4, 5、単体のせいが大きい試験体 No. 2 の順で、P1 を荷重した試験体の方が P1 を荷重していない試験体 No. 1 より曲げ剛性が大きい。一方、荷重完了時のたわみはひび割れと異なって、P1 荷重時のたわみが大きい試験体 No. 4, 5 が大きい。表-5に初期たわみの実測値と計算値を示す。たわみの計算値は ACI コード 318 の有効断面 2 次モーメント I_e を用いて算出した曲率 ϕ より求めた (等曲げスパンたわみ $\delta = \phi l^2/8$, l' : 等曲げスパン, 900mm)。なお、ひび割れ幅と同様に P1 持続荷重中の増分を除いている。計算値は実測値をほぼ捉えている。

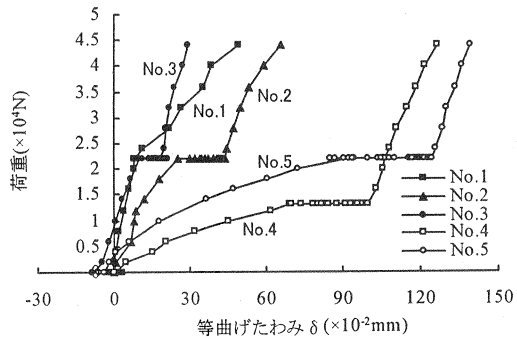


図-8 初期たわみ

表-5 初期たわみの実測値と計算値 (10⁻²mm)

試験体	P1荷重完了時		P2荷重完了時	
	実測値	計算値	実測値	計算値
No.1	-	-	49	50
No.2	25	35	47.2	63
No.3	10	9.5	21.7	30
No.4	70	71	96	92
No.5	95	96	107	117

4. 持続載荷実験の結果及び考察

4. 1 圧縮縁ひずみと鉄筋ひずみ

持続載荷 300 日間の圧縮縁ひずみ及び鉄筋ひずみの経時変化をそれぞれ図-9 および図-10 に示す。図中の太線は荷重の履歴を考慮した計算値である。

図-9 によると圧縮側のひずみは時間経過と共にコンクリートの乾燥収縮及びクリープによって徐々に増大している。全体に圧縮縁の長期ひずみは P1 を載荷した試験体の方が、図-6 に示したように初載荷時のひずみが小さいことから小さく、持続載荷 300 日における No. 2 の圧縮縁ひずみは P1 を載荷していない No. 1 より約 25% 小さくなっている。PCa 単体せいの影響については、PCa 単体のせいが小さい No. 4, No. 5 の長期圧縮縁ひずみはせいが大きい他の試験体に比べて 20% ほど大きくなる。試験体 No. 2 と No. 3 の比較により、プレストレスの導入によって圧縮縁の長期ひずみは若干小さくなっているがその効果は小さいことがわかる。

図-10 によると、鉄筋ひずみは圧縮側コンクリートのクリープ及び鉄筋とコンクリート間の付着クリープによって、時間とともに増大している。No. 3 ではプレストレスによって、鉄筋ひずみは他の試験体より大きく低減されている。一方、No. 5 もプレストレスが導入されているが、P1 載荷中にひび割れが発生していたので、鉄筋ひずみは No. 3 よりかなり大きくなっている。

4. 2 長期ひび割れ幅

図-11 に長期ひび割れ幅の経時変化を示す。P1 を載荷していない No. 1 の増加量が最も大きい。全試験体の持続載荷 300 日における長期ひび割れ幅の増加量は 0.013mm~0.061mm で、P1 載荷の長期ひび割れ幅の増加に及ぼす影響は認められない。なお、持続載荷中に新たなひび割れの発生はなかった。

4. 3 長期たわみ

持続載荷 300 日における長期等曲げたわみを図-12 に示す。全体に合成梁の長期たわみは圧縮側コンクリートのクリープと乾燥収縮によ

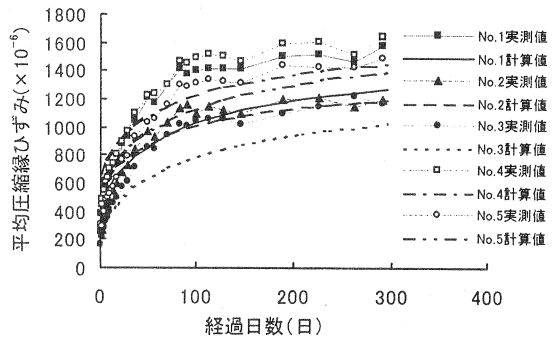


図-9 圧縮縁ひずみの経時変化

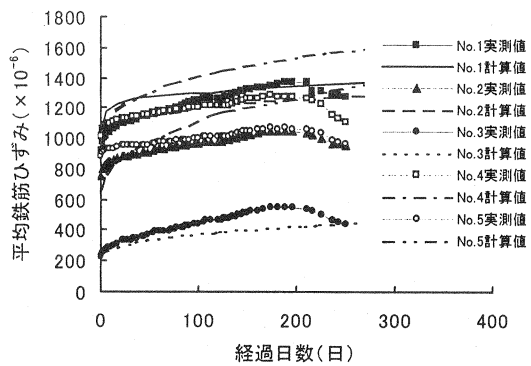


図-10 鉄筋ひずみの経時変化

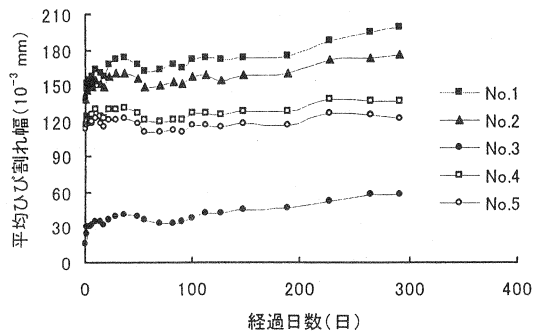


図-11 ひび割れ幅の経時変化

て徐々に増大している。初期たわみが大きいと長期たわみも大きくなっている。すなわち、No.5のようにPCa単体せいが小さいと、プレストレスを導入しても同じP1に対して初期たわみは大きく、長期たわみも最も大きくなっている。また25cmの同じPCa単体せいでNo.3のようにプレストレスによって初期たわみは制御され、長期たわみも最も小さくなっている。図中の曲線は解析値で、曲率は前述の合成断面の応力計算から求めた。

表-6に持続荷重300日の等曲げスパンの長期たわみ増加量を示す。同表から、P1を荷重した試験体のたわみ増加量は、P1を荷重していない試験体No.1よりいくらか小さいこと、PCa単体せいの大小の影響は少ないこと、プレストレスによる制御効果もたわみ増加量に対しては小さいことなどがいえる。

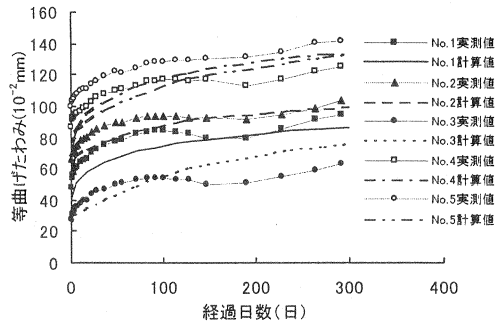


図-12 長期たわみ

表-6 持続荷重300日の長期たわみ増加量(10⁻²mm)

試験体	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
実測値	47	38	36	39	42
計算値	60	41	44	49	46

5. まとめ

- 1) PRCやRCのプレキャストコンクリート単体にひび割れが生じるような施工時荷重を受けた合成梁では、PCa単体断面の上部に圧縮応力が残存し、それによって合成断面のひび割れ断面における圧縮有効面積が広がるので、残りの荷重に対する曲げ剛性は荷重履歴のない場合より大きい。
- 2) 1)の現象にあわせて、PCa単体のせいが小さい方がひび割れ間隔が狭くなることにより、合成梁の設計荷重時のひび割れ幅は、PCa単体にひび割れの生じた方が小さくなる場合もある。また、長期ひび割れ幅へのPCa単体時での荷重の影響は小さい。
- 3) 設計荷重時のたわみは、PCa単体時に受ける荷重によるたわみが大きいので、PCa単体時に荷重を受けた方が大きくなった。しかし、長期たわみ増加量へのPCa単体時での荷重の影響はない。
- 4) プレストレスの導入によって合成梁の初期たわみやひび割れ幅は大幅に低減された。ただし、持続荷重下の長期たわみ及びひび割れ幅の増加量への低減効果は少なかった。

参考文献

- 1) 建築学会：プレストレストコンクリート(PC)合成床板設計施工指針・同解説、1994.11
- 2) 李振宝，大野義照，鈴木計夫：パーシャリープレストレスコンクリート合成断面の応力計算と略算法，プレストレス技術協会シンポジウム'94，1994.10
- 3) 尚自端，大野義照，李振宝：プレキャストコンクリート合成梁の持続荷重実験(その1)，日本建築学会1999年度大会(中国)学術報告演説集，1999.9
- 4) 尚自端，大野義照，鈴木計夫，鳥居洋：高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入したPRC合成梁の長期曲げ性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，1998
- 5) プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC) 構造設計・施工指針・同解説
- 6) 鈴木計夫，大野義照，太田寛：RC及びPRCスラブの曲げひび割れ計算定式について，第37巻，PP.458-462昭和58年