

[2061] 早期に受ける持続荷重下の付着特性

正会員 佐藤良一 (宇都宮大学 工学部)

正会員 氏家 勲 (宇都宮大学 工学部)

秋田克彦 (宇都宮大学 工学部)

正会員○笠井識敬 (宇都宮大学 工学部)

1. まえがき

マッシブな鉄筋コンクリート構造物に発生する温度ひびわれは、一般にその間隔が広く、幅も大きい。ため耐久性、水密性などの観点から問題とされることが多い。このため、温度ひびわれ発生防止に関する研究に加えて、温度ひびわれ幅に関する研究も行われるようになってきた。

しかし、これらはいずれも水和熱に起因する温度変化によって生じた温度ひびわれ幅に主眼を置いたものであって、温度変化に加えて乾燥収縮の影響も無視できないような構造物の場合にはさらに検討を要する。

そこで、本研究は、水和熱に起因する温度変化とともに乾燥収縮を受ける構造物に生じたひびわれ幅の予測方法の確立に資するためには、先ず、ひびわれ間要素の挙動説明が大切であるとの考えから、ひびわれ間要素を早期に持続荷重を受ける両引き供試体にモデル化し、鉄筋ひずみ、付着応力、端部抜け出し量などの経時変化を実験及び解析の両面から明らかにすることを目的とする。

なお、温度ひびわれ間要素を両引き供試体にモデル化したのは、拘束力と外力の相違はあるが、温度ひびわれが①ひびわれ間隔が広い ②鉄筋応力度が、例えば、鉄筋比0.6%で1600kgf/cm²にも達する場合がある ③鉄筋応力度は時間が経過しても減少しない などの特徴を有しているからである⁽¹⁾。

表1 コンクリートの配合表

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは普通ポルト

ランドセメントを用いた。骨材は鬼怒川産の川砂、川砂利で、粗骨材は最大寸法25mm、比重2.62、F.M.6.84である。また、細骨材は比重2.61、F.M.2.85である。コンクリートの配合は表1に示すとおりである。

鉄筋は、横ぶし型異形鉄筋D16SD30を用いた。鉄筋にはゲージ貼付による付着の乱れをなくするため両側の縦リブの位置に幅4mm、深さ3mmの溝を設けた。鉄筋の実断面積は1.53cm²、弾性係数は202×10⁴kgf/cm²である。

2.2 供試体の作製

供試体は、図1に示すように、両引き用供試体4体、クリープおよび乾燥収縮試験用供試体それぞれ3体作製した。供試体は打設後約2日で脱型し、材令7日まで湿

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	W/C (%)	s/a	単位置 (kg/m ³)				混和材料 (g/m ³)	
					W	C	S	G	減水剤	AE助剤
25	10±2	4±1	4.8	4.5	160	333	815	1000	1.80	1.5

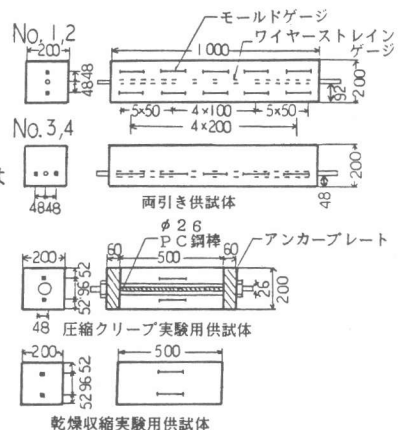


図1 供試体

布養生を行い、材令8日から載荷日の11日まで
は気中養生した。また、これら全ての供試体は乾
燥収縮の影響が長さによって異なることのないよ
うにエポキシ樹脂を端面に塗布した。

2.3 載荷および計測

両引き供試体の持続載荷実験は図2に示す装
置を用いて行った。載荷荷重は、鉄筋応力度で
1800kgf/cm²になるよう与えた。

鉄筋ひずみの軸方向分布は、図1に示すよう
に、鉄筋の両側の溝に対に5cm間隔で貼付した
ゲージ長5mmのワイヤーストレインゲージによ
り測定した。接着剤は、ポリエステル系のもの
で、ゲージ接着後、加圧し60℃で4時間養生し
た。これにより長期間のひずみ計測が可能にな
る。コンクリートのひずみは、図1に示すよう
に、鉄筋中心から鉄筋径の3倍の位置にセット
したゲージ長60mm、ベース長120mmの両端つま
みのモールドゲージを用いて測定した。

抜け出し量は、下方の端部でコンクリートひずみを
測定した断面位置と同じ位置で1/1000mmダイヤルゲ
ージにより測定した。

コンクリートのクリープ係数は、およそ80kgf/cm²
のストレスを導入して求めた。クリープおよび乾燥収
縮ひずみは、上述のモールドゲージを用い、断面の中
心から48mm(鉄筋径の3倍)の位置で測定した。

ワイヤーストレインゲージおよびモールドゲージの
接続は、共に1ゲージ3ワイヤー法であり、必要に応
じてひずみはドリフトと線膨張係数を補正して求めた。

なお、本実験は実験棟内で実施し、その温度は図3
に示すとおりであり、また、計測は載荷日2日前から
実施した。

3. 材料

3.1 コンクリートの諸性質

載荷時のコンクリートの圧縮強度、引張強度および
弾性係数は285、28.9および 25.8×10^4 であり、標準養
生材令28日では480、35.0および 32.0×10^4 (単位はい
ずれもkgf/cm²)であった。

図4および図5はクリープ係数と乾燥収縮ひずみの
経時変化を示したものである。これらの図では温度履
歴による硬化促進の影響を考慮するため載荷後の経過

表2 実験条件

名称	作用鉄筋応力 度(kgf/cm ²)	実断面積 (cm ²)	弾性係数 (10 ⁴ kgf/cm ²)	断面載荷 条件(cm)
N o. 1	1800 (1816)	1.533	202	中央 (9.2)
N o. 2	1800 (1826)	1.536	202	中央 (9.2)
N o. 3	1800 (1877)	1.531	201	偏心 (4.8)
N o. 4	1800 (1796)	1.532	202	偏心 (4.8)

D 16、SD 30 ()実作用応力度

()かぶり

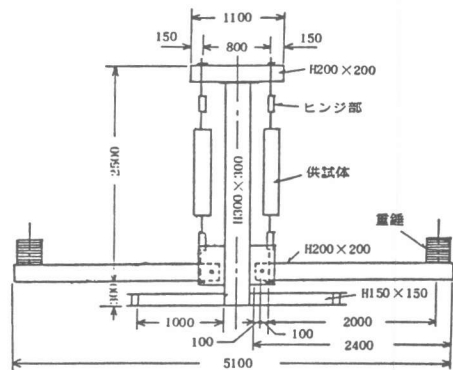


図2 載荷装置 (単位: mm)

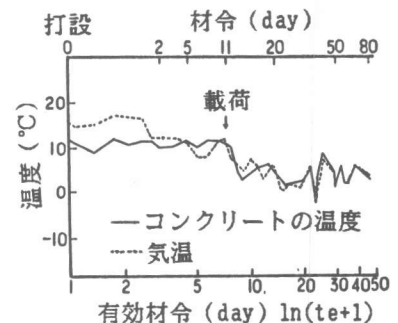


図3 温度変化

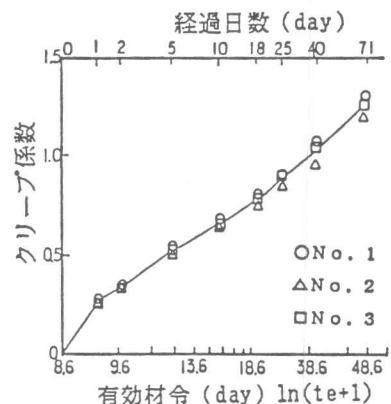


図4 クリープ係数の経日変化

日数と打設後からの有効材令を用いて表示した。

なお、クリープ係数は、CEB-FIPコードに従い、実測値から静的載荷時の弾性係数を用いて求めた弾性ひずみ、乾燥収縮ひずみなどを差し引いたひずみと、標準養生材令28日の弾性係数を用いて求めた弾性ひずみから算出した。

3. 2 付着

解析に用いる付着応力-すべり量曲線およびそのクリープ特性は、長瀧らの実験^[2]に基づいて定めた。また、この曲線の形は六車・森田の式により表し、実験値との比較から静的時の付着強度 τ_{max} は140kgf/cm²、その時のすべり量 δ_{max} は、0.3mmとした。自由端近傍の付着の劣化は黒正らの実験^[3]及び著者らの実験^[4]を参考にして、

図7のように仮定した。

4. 解析

4. 1 仮定

基礎方程式を導くうえで次の仮定を設ける。

- 1) 温度および乾燥収縮ひずみは断面内で一様であり、かつ材軸方向の任意断面で同一である。
- 2) コンクリートの応力・ひずみは断面内で一様である。

4. 2 コンクリートおよび鉄筋の応力・ひずみ

載荷後の経過日数 t_i 、座標 x における任意断面のコンクリートの全ひずみ $\varepsilon_{ct,i}$ はコンクリート応力 $\sigma_{c,i}$ を用い重ね合わせ法を適用すれば次のようになる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ct,i} = & \varepsilon_{e,i} + \sum_{j=2}^i (\sigma_{c,j} - \sigma_{c,j-1}) / \bar{E}_{c,j-1} \\ & + (1/2) \sum_{j=2}^i (\sigma_{c,j} + \sigma_{c,j-1}) f(\Delta t_{j-1}) \\ & + \{\varepsilon_{c,\Delta T}\}_i + \{\varepsilon_{sh}\}_i \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 $\{\varepsilon_{c,\Delta T}\}_i$ 、 $\{\varepsilon_{sh}\}_i$ および $\varepsilon_{e,i}$ は温度変化ひずみ、乾燥収縮ひずみおよび載荷時のひずみである。 $\bar{E}_{c,i-1}$ は t_i と t_{i-1} 間の平均弾性係数であり、 $f(\Delta t_{i-1}) = (\phi_i - \phi_{i-1}) / \bar{E}_{c,i-1}$ (ϕ :クリープ係数)、 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ である。この重ね合わせ法を用いることにより応力は次のように示される。

$$\begin{aligned} \sigma_{c,i} = & g_1(t_i) [\varepsilon_{ct,i} + g_2(t_i) \sigma_{c,i-1} \\ & - \sum_{j=2}^{i-1} \{ (1/g_1(t_j)) \sigma_{c,j} - g_2(t_j) \sigma_{c,j-1} \} \\ & - \varepsilon_{e,i} - \{\varepsilon_{c,\Delta T}\}_i - \{\varepsilon_{sh}\}_i] \end{aligned} \quad (2)$$

ただし $g_1(t_i) = 1 / \{ 1 / \bar{E}_{c,i-1} + f(\Delta t_{i-1}) / 2 \}$

$$g_2(t_i) = 1 / \bar{E}_{c,i-1} - f(\Delta t_{i-1}) / 2$$

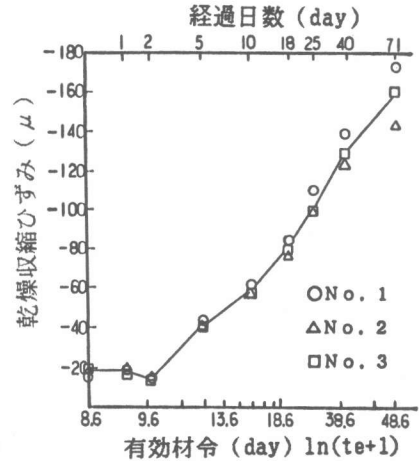


図5 乾燥収縮ひずみの経日変化

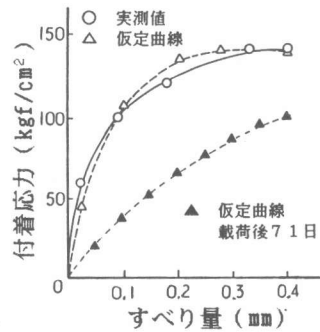


図6 付着応力-すべり量関係

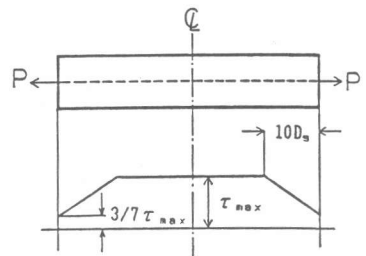


図7 付着応力の材軸方向分布

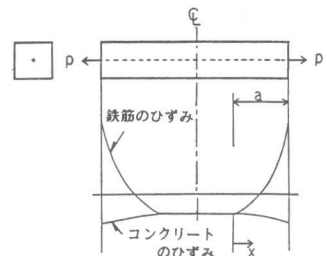


図8 ひずみ分布

一方、鉄筋の全ひずみ $\varepsilon_{st,i}$ および応力 $\sigma_{s,i}$ も次のように示される。

$$\varepsilon_{st,i} = \varepsilon_{s,i} + \{\varepsilon_{s,\Delta t}\}_i \quad (3)$$

$$\sigma_{s,i} = E_s \varepsilon_{s,i} = E_s \{\varepsilon_{st,i} - \{\varepsilon_{s,\Delta t}\}_i\} \quad (4)$$

ここで $\varepsilon_{s,i}$ は応力に関するひずみ、 $\{\varepsilon_{s,\Delta t}\}_i$ は温度変化に関するひずみである。

4.3 基礎方程式の誘導

コンクリートと鉄筋の合力を $T_c(t_i, x)$ 、 $T_s(t_i, x)$ とし、引張力を P とすれば次のつりあい式が成り立つ。

$$T_c(t_i, x) + T_s(t_i, x) = P \quad (5)$$

また、つりあい条件より軸方向の微小長さ変化 dx に対し、合力の微小増分は次式を満足する。

$$dT_c(t_i, x)/dx + dT_s(t_i, x)/dx = 0 \quad (6)$$

式(6)とすべり量とひずみの関係、鉄筋ひずみと付着応力の関係、付着応力とすべり量の関係から、 $S_x = \delta_x / \delta_{max}$ とすれば、最終的に付着応力の作用領域の基礎方程式として次式が導かれる。

$$\frac{d^2 S_x}{dx^2} = \frac{U_s \tau_{max} e^{\{1 + A_s E_s / A_c g_1(t_i)\} \ln\{(e-1)S_x + 1\}}}{A_s E_s \delta_{max} \{(e-1)S_x + 1\}} + [g_2(t_i) d\sigma_{c,i-1}/dx - \sum_{j=1}^{i-1} \{1/g_1(t_j) d\sigma_{c,j}/dx - g_2(t_j) d\sigma_{c,j-1}/dx\} - d\varepsilon_{ce,i}/dx] / \delta_{max}$$

4.4 境界条件

本両引き供試体では、図8に示すように、全断面有効領域が存在することおよび付着作用領域の長さ a が未知であることから、境界条件は次のように定められる。

$$x=0: \quad \delta_x=0 \quad d\delta_x/dx = \Delta\varepsilon \neq 0$$

$$x=a: \quad d\delta_x/dx = (\varepsilon_{st,i} - \varepsilon_{ct,i})$$

ただし $x=a$ においては $\varepsilon_{st,i} = P/(A_s E_s) + \{\varepsilon_{s,\Delta t}\}_i$ であり、 $\varepsilon_{ct,i}$ は $\{\varepsilon_{c,\Delta t}\}_i + \{\varepsilon_{sh}\}_i$ である。

なお、解析を行うに際し、コンクリートの有効引張断面は図9の斜線部分とした。また、平均弾性係数 $\bar{E}_{c,i}$ は載荷時の値を用い、時間経過に関わらず、一定とし、クリープ係数 ϕ は図4に示す値を用いた。

5. 考察

図10および図11は、かぶりが異なる2種類の供試体、すなわちNo. 1とNo. 3の鉄筋とコンクリートの全ひずみの材軸方向分布の経時変化を、実験値と解析値の両方について示したものである。これらの図から、かぶりが小さいNo. 3の場合材軸方向中央部で、未貫通のひびわれが生じているが、鉄筋とコンクリートのひずみ性状は、かぶりの影響をほとんど受けないといえる。

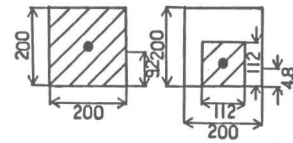


図9 有効引張断面領域

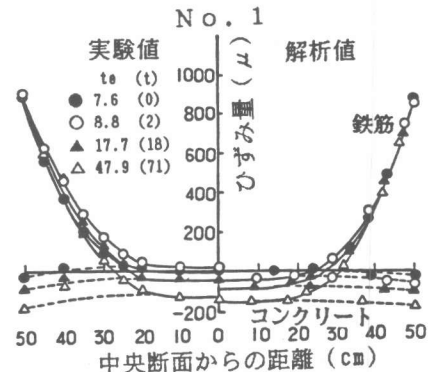


図10 鉄筋とコンクリートのひずみ分布

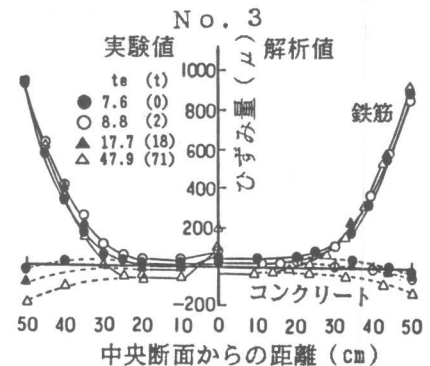


図11 鉄筋とコンクリートのひずみ分布

さらに、鉄筋とコンクリートとのひずみ差の増大は、共に乾燥収縮によりもたらされることがわかる。これらの性状は、解析値によっても示される。

次に、図12、13は、ひずみ分布から求めた付着応力の材軸方向分布の経時変化を示したものである。これによれば、自由端付近の付着応力は載荷後初期に低下し、その後はほぼ一定になり、一方、中央断面からの距離が20cmから40cmの領域では、逆に、載荷後初期に付着応力が増大し、その後一定を示す傾向のあることが認められた。しかし、黒正ら^[3]の指摘した自由端近傍の顕著な付着劣化は認められなかった。

そこで、図14に示すすべり量を用い、このすべり量の観点からみた付着応力の時間的推移を示したのが図15、16である。

これらの図に明瞭に示されているように、同一すべり量に対する付着応力は、 20kgf/cm^2 を越える範囲で載荷後初期に急激に低下し、その後はほとんど変化しないといえる。この性状は、かぶりが増しても同様である。

この性状は解析値によっても認められるが、曲線の形に若干の差がある。これは、インプットデータとしての付着-すべり量曲線の形が実験値と異なるためと思われる。

最後に、付着クリープ、乾燥収縮などの影響が総合された現象である端部抜け出し量の経時変化の代表的な例を示したのが、図17、18である。図中には、ダイヤルゲージおよびひずみ分布から求めた抜け出し量をそれぞれ示してある。静的時の抜け出し量は、ひずみ分布から求めたものであり、ダイヤルゲージは時間経過に伴う抜け出し量の測定に用いた。

これらの図は、いずれも、ひずみから算出した抜け出し量は、載荷後初期に急増し、その後直線的に増加する傾向を示し、一方、ダイヤルゲージから求めた抜け出し量は、載荷後初期から直線的に増加し、載荷後20日過ぎからさらに高い勾配で増加する傾向を示している。

しかし、経過日数を対数表示していることおよび載荷後初期の乾燥収縮ひずみの増加率が極めて小さいことなどを考えれば、載荷後初期の抜け出し量の増加は付着クリープによるものであり、その後の増加は乾燥収縮によるものと思われる。

次に、載荷後経過日数およそ70日におけるNo. 1と、No. 3の抜け出し量の増加量

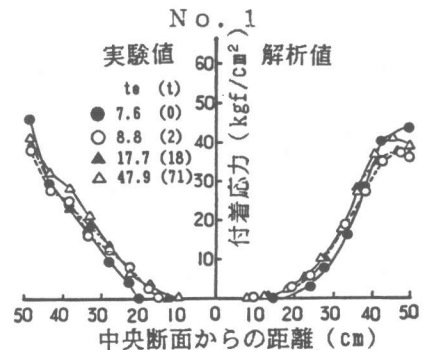


図12 付着応力分布の経日変化

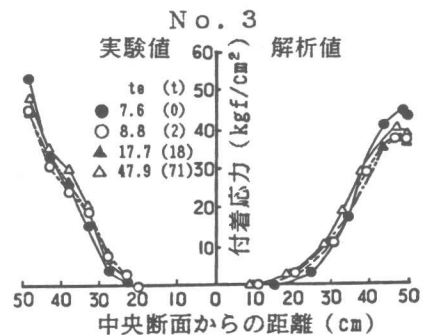


図13 付着応力分布の経日変化

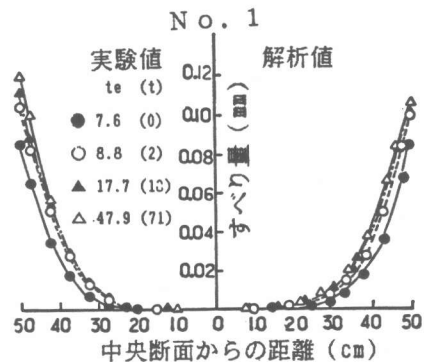


図14 すべり量分布の経日変化

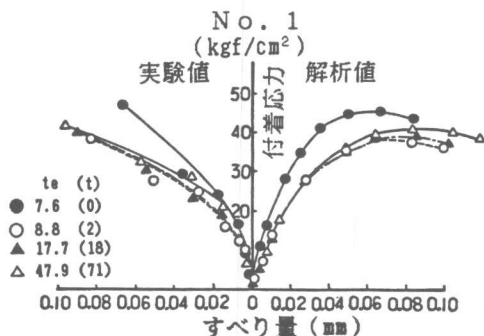


図 15 付着応力-すべり量関係の経日変化

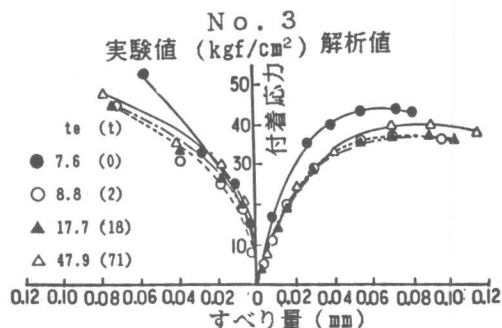


図 16 付着応力-すべり量関係の経日変化

は、ダイヤルゲージから求めた場合0.033mm、0.039mm、ひずみ分布から求めた場合0.021mm、0.024mmであって、抜け出し量の増加量は、かぶりの相違に拘らずほぼ等しい。しかし、静的時の抜け出し量は、No. 1の方が、0.012mm(14%)大きい。これはNo. 1の方が断面が大きくそのため応力ひずみが小さいことによるとと思われる。

一方、解析値は、時間経過に伴う抜け出し量の増加傾向を概ね表しているといえよう。しかし、かぶりの抜け出し量に及ぼす影響度は、実験値に比べ小さい。これは図15および図16に示したように、付着応力-すべり量曲線が、かぶりにより異なるが、解析では同じとして取り扱ったためと考えられる。

6. 結論

本研究の結論として以下のことがいえる。

- 1) すべり量からみた時間経過に伴う付着応力は、載荷後、比較的早期に低下し、その後はほとんど変化しない。
- 2) 端部抜け出し量が、時間経過に伴い増加する主要因は、載荷後初期においては付着クリープで、その後は乾燥収縮である。
- 3) 本研究で示した解析方法は、実験値の性状を比較的良好に予測できる。

参考文献

- [1] 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひびわれ制御指針、1986。
- [2] 長瀧重義ほか：若材令における鉄筋とコンクリートの付着特性、東工大研究報告、1985。
- [3] 黒正清治ほか：異形鉄筋とコンクリートの付着に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演概要集、p.p.1327-1328、1982。
- [4] 長瀧重義、佐藤良一ほか：異形鉄筋とコンクリートの付着クリープ性状、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、p.p.553-556、1984。

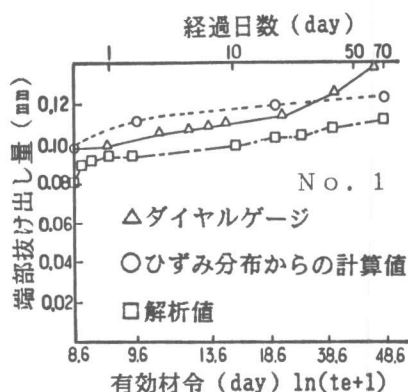


図 17 端部抜け出し量の経日変化

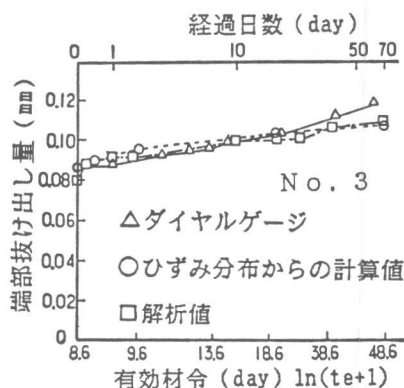


図 18 端部抜け出し量の経日変化