

論文

[1105] 鋼・コンクリート間の摩擦力をずれ止めに応用した合成桁に関する研究

正会員○山崎竹博 (九州産業大学工学部)
 正会員 出光 隆 (九州工業大学工学部)
 正会員 宮川邦彦 (九州産業大学工学部)
 金 成洙 (九州工業大学大学院)

1. まえがき

プレキャストコンクリートの使用は現場作業の迅速化や簡素化、高品質化などを図れる反面、接合部が構造物の弱点となる可能性があり、その一体化が重要な技術的課題となる。このような接合部ではそのせん断伝達力の確保に労を要し、接合表面に凹凸を設けたりせん断キーを挿入するなどの対策を講ずることが多い。特に、鋼主桁とコンクリート床版から成る合成桁の接合面ではジベルなどのずれ止め金具が使用されて、プレキャスト部材との接合にはあらかじめ金具を設置した空間にコンクリートを打設して一体化する方法などを取る。このような接合面の金具に集中してせん断力を負担させる方式や施工時に現場打設を必要とする方法では、図1のようにせん断ずれによってコンクリートの損傷が誘発されるなどプレキャスト部材の長所を十分に発揮できない。本研究では、図2のように鋼とコンクリートを高力ボルト (以下HTBと記す) の緊張力で接合

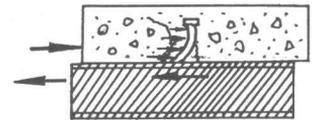


図1 ジベルによる接合

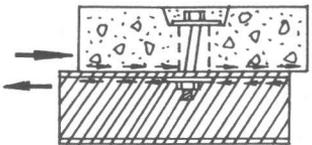


図2 ボルトによる接合

し、その摩擦力によってせん断力を受け持たせる方法について検討した。著者らはこれまでに本方法によって作製した合成桁の曲げ試験および疲労試験から、本接合法が従来のジベルによる方法と同程度以上のせん断剛性を有することを報告してきたが、今回の報告ではグラウトモルタルなどによる高力ボルトへの支圧力の有無の影響や、同程度のせん断耐力を有するスタッドジベル合成桁の曲げ試験結果との比較、鋼とコンクリート間の基礎的摩擦性状などについて述べる。

2. 鋼とコンクリート間の摩擦性状

高力ボルトの緊張力でプレキャスト床版を鋼主桁に合成する方法では、そのせん断耐力がボルトの緊張力と鋼・コンクリート間の摩擦係数との積によって決定される。そこで、図3のように合成桁接合部に近似した1面せん断試験および図4に示す2面せん断試験を実施し摩擦性状を調べた。

2.1 実験概要

1面せん断試験では、図3に示すように接合面を20×20cmとしグラウトモルタル注入後3日でHTBに15ton (平均圧縮応力37kgf/cm²)の接合力を導入した。このとき、グラウトには無収縮モルタル (膨張剤、流動化剤使用) を使用し、Jロートによる流下時間を8秒とした。HTBにはウレタンを巻きボルトとモルタルとの接触を切ったものと、塩化ビニルフィルムを巻きボルトの付着力のみを切ったものを使

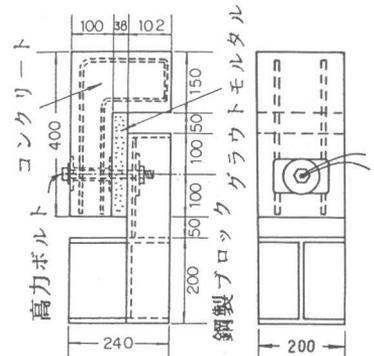


図3 1面せん断試験供試体

用した。

2面せん断試験では図4のように10×10×30cm角柱供試体に10mm厚の鋼板をはさみ、接触面を空目地乾燥、空目地湿潤、グラウト注入、鋼板へのコンクリート打継ぎの各状態で接合した。接合力は、コンクリートの目標圧縮強度(300kgf/cm²)の15、30、45%である。接合力はHTBの削孔中に埋設したゲージおよび加圧フレームに貼付したゲージで測定し、鋼とコンクリート間のずれは最小目盛り1/1000mmの変位計で各荷重ごとに測定した。

2.2 せん断応力～ずれ曲線

種々の接合面の状態で実施した鋼とコンクリート間の2面せん断試験の結果から、せん断応力～ずれの関係を図5～図7に図示した。その結果、付着力の有無の状態や鋼とコンクリート接合面の乾湿の状態などによりその曲線性状の異なることが分かった。すなわち、図5、図6に示す空目地接合のせん断応力～ずれ曲線は、せん断応力の増加に伴って徐々にずれ量も増大し、ずれ量0.4mm以上で最大せん断応力に漸近してゆが急激なずれは生じない。これに対して、図7に示すグラウトモルタルで接着された鋼とコンクリート間では0.07mm程度のずれでせん断応力は最大値となるが、その後、爆発音と共に0.3～0.5mm程度の急激なずれを生じた。

さて、図5、図6の相違は接合面の乾湿の影響であるが、図5に示す乾燥状態では図6の湿潤状態の曲線性状に比較してばらつきが大きく、かつ立ち上がり時のせん断剛性も低い。このような状況でも、ずれ量0.1mmでのせん断応力は最大値の80%程度に達しており、実用摩擦係数はずれ量0.1mm時の接合応力とせん断応力との関係から算出できるものと考えられる。

2.3 鋼とコンクリート間の摩擦係数値

空目地接合した鋼とコンクリート間には付着力は無いので、せん断応力 τ は摩擦係数 μ と接合応力 σ_x とによって $\tau = \mu \sigma_x$ と表わされる。今、ずれ量0.1mm以内での最大せん断応力とその時の接合応力との関係を図8に示した。その結果、

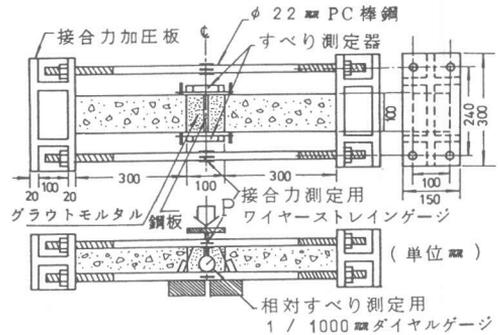


図4 2面せん断試験供試体

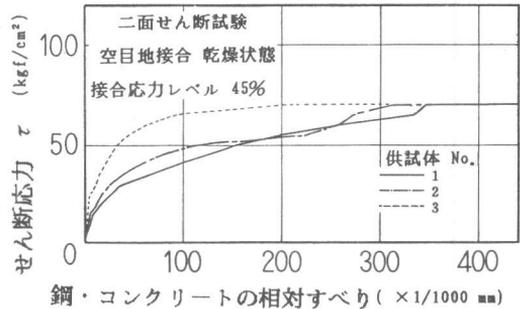


図5 空目地乾燥接合面のせん断応力～ずれ

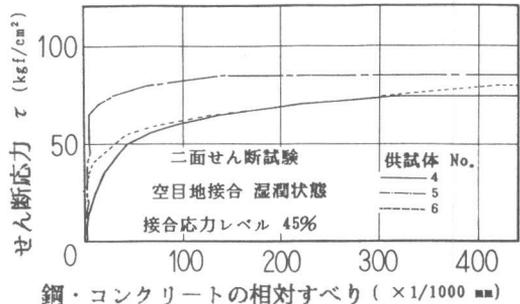


図6 空目地湿潤接合面のせん断応力～ずれ

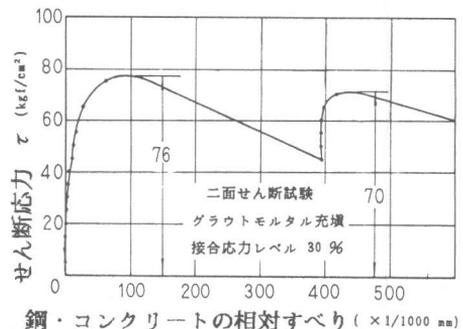


図7 グラウト目地のせん断応力～ずれ

湿潤状態での摩擦係数は0.63、乾燥状態では0.60となり、湿潤状態での摩擦係数の方がやや大きく、また、ばらつきも少なくなる傾向を得た。鋼とコンクリート間にグラウトモルタルを注入した供試体では、その付着力をCとしてせん断応力は $\tau = C + \mu \sigma_x$ で表わされるので、2面せん断試験の実測値からずれ量0.1mmでの τ と σ_x との関係を図9に示し摩擦係数を推定した。その結果、付着力は 10 kgf/cm^2 、摩擦係数は0.66となり、乾燥状態での空目地接合面の場合よりも1割大きい値となった。これについては先にせん断応力～ずれの関係で述べたように、付着力のある場合には0.1mm以内の小さいずれで最大せん断力に達するが、空目地接合では0.1mmのずれでも最大値に至らないことによる違いと考えることができる。また、付着力の影響については長期間の使用に際して損失が生じるものと考え、設計用の摩擦係数についてはこれを無視して考えることが望ましい。次に、合成桁接合面をモデル化した1面せん断試験結果から接合力と最大せん断力の関係を図10に示した。その結果、付着力は 5 kgf/cm^2 、摩擦係数は0.89と計算され、2面せん断試験結果から得られた摩擦係数0.60を用いて十分安全に見積もれることが分かった。ただし、本実験で使用する桁のせん断耐力の算定に当たっては付着力の影響も考慮して摩擦係数を0.65とした。

3. 合成桁の曲げ試験結果

鋼とコンクリート床版との合成桁ではせん断応力の高い部分に接合面がくるため、通常、床版厚の3倍または60cm間隔以内でジベルが配置される。本実験では、これらの設計指針を満たすような従来のスタッドジベルで接合した桁と、これと等価なせん断耐力を持つようHTBに15tonの緊張力を導入して接合した合成桁の曲げ性状を、荷重～ずれ曲線、ボルト1本当たりのせん断耐力、荷重～たわみ曲線、せん断ずれ分布などから比較した。

3.1 供試体の種類および寸法

合成桁の曲げ試験には、1) 図11に示す形状で50cm間隔にウレタン巻きHTBに緊張力を与えて接合した桁、2) 同じく図11の状態で塩化ビニルフィルム巻きHTBに緊張力を与えて接合した桁、3) 図12に示すように27cm間隔にスタッドジベルで接合した桁の3種類を用いた。この時、ジベル周囲にはグラウトモルタル(圧縮強度 450 kgf/cm^2) を打設した。また、すべてのHTBには埋込みゲージを設置し、導入緊張力およびその変化を測定している。HTBにはF10T、M20を用い、接合力を緊張時で15tonとし、使用時での緊張力低下を25%見込んでいる。すなわち、HTB合成桁と等しいせん断耐力を得るために必要なスタッドジベルの間隔は次のように計算される。

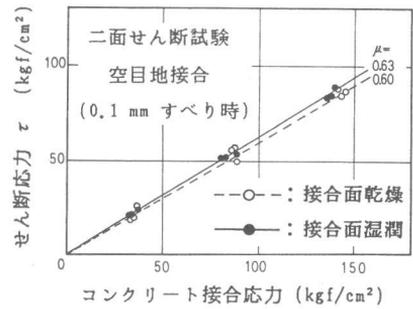


図8 空目地接合面の摩擦係数

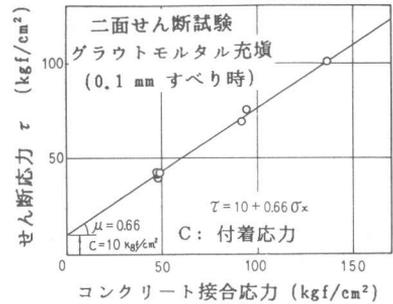


図9 モルタル接合面の摩擦係数

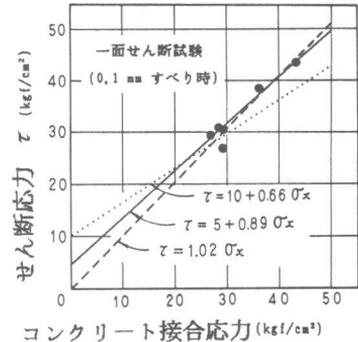


図10 1面せん断試験によるグラウト接合面の摩擦係数

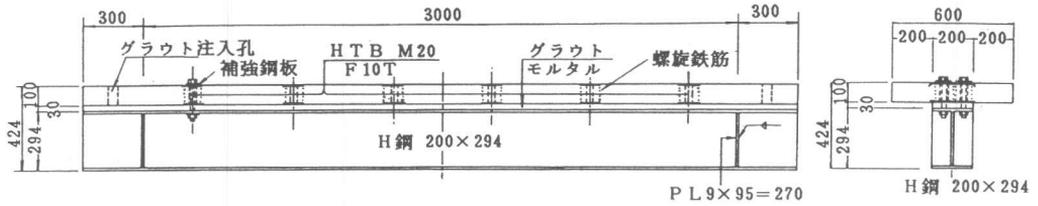


図 1 1 HTBによって接合した鋼とコンクリート床版合成桁

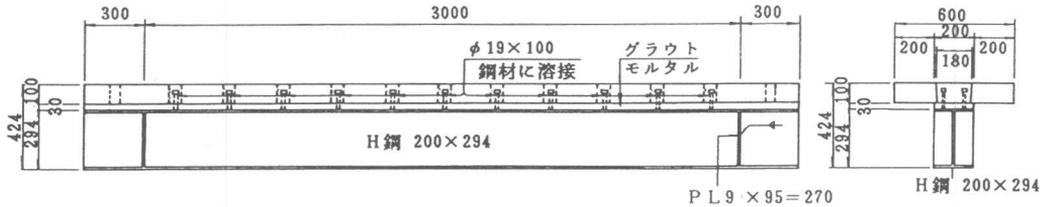


図 1 2 スタッドシベルで接合した鋼とコンクリート床版合成桁

HTB 1本当たりの使用時緊張力 $N = 0.75T = 0.75 \times 15000 = 11250 \text{ kgf}$
 単位長さ当たりのせん断耐力 $= \mu N / X_b = 0.65 \times 11250 / 0.5 = 14624 \text{ kgf/m}$
 スタッド 1本のせん断耐力 $= 9.5 d H \sqrt{f_{ck}} = 9.5 \times 1.9 \times 10 \times \sqrt{500} = 4036 \text{ kgf}$
 よって、シベル間隔は $X_c = 4036 / 14624 = 0.27 \text{ m}$ となる。

3. 2 合成桁接合面のせん断力とずれの関係

合成桁の接合面に図 1 3 に示すように変位計を取り付けて、鋼主桁とコンクリート床版間のずれ量を測定した。今、ずれを生じる範囲では床版と主桁とは非合成であり、両者の分担するモーメントを M_1, M_2 とすれば、合成断面に作用するモーメント M は全モーメント M からそれらのモーメントを差し引くことによって計算できる。($M_c = M - M_1 - M_2$) この時、ずれ量は床版下縁ひずみと主桁上縁ひずみとの差を載荷点から任意の位置まで積分して求められると仮定できるので、逆に実測ずれ量から接合部のひずみ差を求め、 M_1, M_2 を計算できる。

一方、ずれ発生後の合成断面に作用するせん断力 Q_c と全せん断力 Q との比は弾性範囲内では上記のモーメントの比と等しいので、 $Q_c = Q M_c / M$ として接合面に作用するせん断力を計算することができる。このようにして、実測ずれに伴うせん断力の低下を考慮してボルト 1本当たりのせん断力を算出し、せん断力とずれ量との関係として図 1 4 に示した。この時、断面力として作用する曲げモーメントはずれの発生により主桁と床版の個々に作用する曲げモーメントとして分担されるため、両者間のせん断力は減少して桁の曲げ剛性も低下することが分かる。

このような、ずれの発生に起因して生じるボルトせん断力の減少力は、その後の除荷に際しても図 1 4 に見られるように負のせん断力として残留することになる。このことは、合成桁接合面のせん断力を制御して、桁の断面に作用する応力分布を各部材に適切に配分すれば、桁の断面耐力を向上できることを意味している。

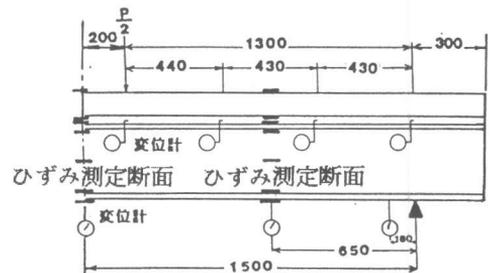


図 1 3 載荷および測定状況

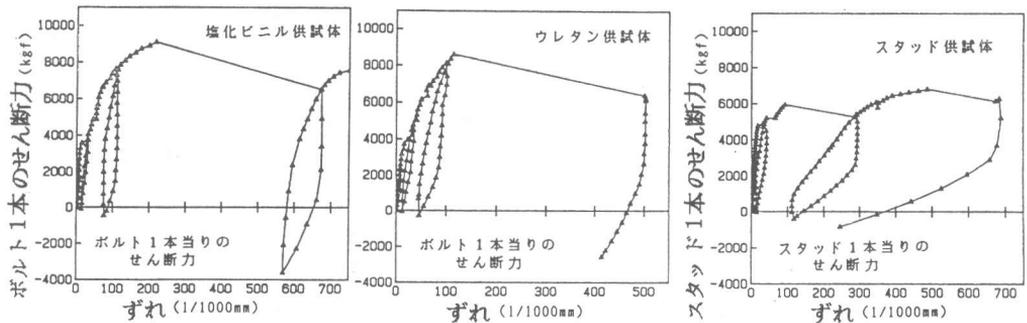


図14 ボルトおよびスタッドジベル1本当たりのせん断力とずれとの関係

図14からHTB供試体と従来のスタッドボルト供試体のせん断剛性を比較すれば、ジベル間隔は異なっても、両者とも0.1mm程度のずれ量で実用上の最大せん断力を生じており、先に述べた1面および2面せん断試験結果と一致する。また、ボルト1本当たりのせん断耐力はスタッドジベルの1.5～1.8倍高いことが分かり、実験計画でのスタッドジベル間隔27cmが実験結果からも $50 / 1.8 = 27.8$ cmと妥当であったことが分かる。また、コンクリートとのジベル効果を期待した塩化ビニルフィルム巻き供試体ではウレタン巻き供試体よりも若干の耐力上昇が見られたが、せん断剛性には向上は見られなかった。

3.3 せん断ずれの分布

合成桁の接合面にずれが生じた場合のせん断力低下を計算する際に、ずれと断面内ひずみ分布との適合条件として“等せん断力区間でのせん断ずれは載荷点から支点へ向けて直線的に増大する”との仮定を設けた。ここでは、その仮定の妥当性を調べるために実際に測定したずれ量の分布を図15、図16に示した。その結果、支点間外での接合力の影響などもあって、初期の荷重レベルではせん断区間の中央で最大ずれ量を示したが、荷重の増大に伴って載荷点から支点へ向かってずれ量が直線的に増加する傾向が確認できた。

3.4 荷重～たわみ曲線

合成桁の荷重とたわみの関係を図17に示した。図から分かるように摩擦力でせん断力を負担した桁ではずれの発生に伴うたわみの増大が急激ではあるが、その後の除荷および再載荷については再び弾性的に挙動することが分かる。これに対してスタッドジベルで接合した桁はずれに伴って徐々にたわみが増大し、除荷時にはずれの回復に起因するたわみの戻りが見られる。このような塑性的挙動はジベル周囲のコンクリートがずれによって損傷を受けていることを示す。このことは、図14に示すスタッドジベルの結果で繰返し載荷時のせん断剛性が著しく低下していることから明らかである。

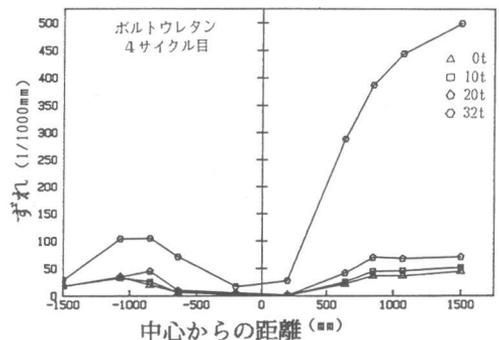


図15 ウレタン供試体のずれ分布

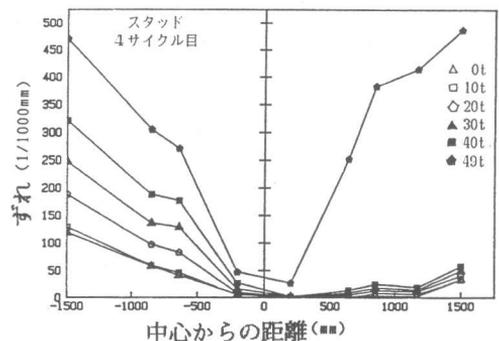


図16 スタッドジベル供試体のずれ分布

3.5 軸力の変化

ボルトの緊張力で接合した合成桁の問題として、その緊張力の確保が上げられる。今、緊張力導入時と試験開始時、試験終了後の軸力の変化を示した。緊張力導入から3日後の実験時までにはウレタン供試体で平均13%、塩化ビニル供試体で16%

の軸力低下が生じた。また、試験終了後で17%および21%の低下を

生じた。すなわち、ボルトにはシベル効果の無い方が軸力の低下が少ないことを示している。ちなみに、使用したグラウトモルタルのクリープ試験結果を図18にクリープ係数として示した。その内、本桁に使用した配合2は40日でのクリープ係数が0.9となり、普通コンクリートよりも良好であったが、水セメント比を増せばクリープ係数は著しく増大する。

このことから、グラウトモルタルの水セメント比は流動性を損なわない限り小さくすることが望ましい。床版のクリープはボルト周囲の補強金具量がボルト断面積よりも多いことから、その値は小さく、収束も早い。3年間に渡る現場実験では軸力の低下率は30%であった。

4. まとめ

本研究で明らかになった点をまとめると次のようである。(1) 鋼とコンクリート間の摩擦力はずれ量0.1mmを限界値とすれば摩擦係数0.60を用いて計算できる。(2) 鋼とコン

クリート間に付着力があれば、最大せん断力に達した後急激なずれを生じる。(3) ボルトの緊張力で接合した合成桁はスタッドシベルによるものよりも高いせん断剛性を示し、ずれ発生後の繰返し載荷に対しても弾性的に挙動する。(4) シベルによるずれ止めは、ずれ発生時にひび割れを誘発しせん断剛性の低下を生じる。(5) 合成桁のせん断区間でのずれ量は載荷点から支点まで直線的に増大すると仮定してもよい。(6) グラウトモルタルのクリープを小さくして軸力の損失を少なくするためには、W/Cを低くし、流動化剤や減水剤などを用いることが望ましい。

参考文献

出光隆, 山崎竹博, 渡辺明, 永井篤: ずれ止め到高力ボルト緊張による摩擦力を考慮したプレキャスト床版使用合成桁に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 10-3, 1988, pp.127~130

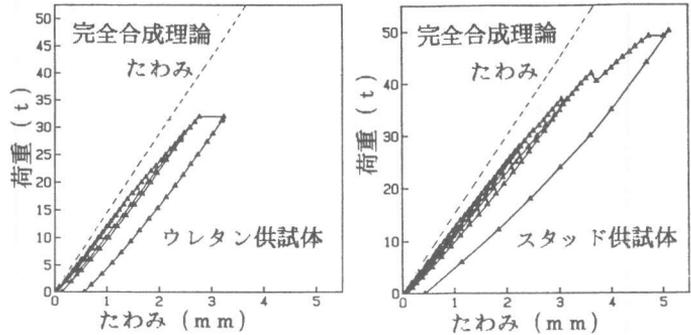


図17 ウレタンおよびスタッド供試体の荷重～たわみ曲線

表1 ボルト軸力の測定結果

ボルト No.	ウレタン供試体軸力(t)			塩化ビニル供試体軸力(t)		
	導入時	実験時	終了後	導入時	実験時	終了後
1	14.7	13.3	—	15.3	13.7	13.1
2	14.7	12.5	12.2	15.5	13.5	12.8
3	13.9	11.8	11.6	15.2	12.2	11.4
4	14.5	12.8	12.3	15.2	11.8	10.9
5	15.3	12.7	12.4	15.1	12.5	11.5
6	15.0	12.8	12.5	15.1	12.4	11.3
7	15.2	12.3	12.2	15.0	13.0	12.1
8	14.2	12.2	12.0	15.3	13.2	12.5
9	14.2	12.8	12.6	15.2	12.5	11.9
10	14.3	12.5	12.1	15.4	13.5	12.8
11	14.5	12.8	12.5	15.0	12.7	11.7
12	14.4	12.8	12.5	15.2	13.0	12.2

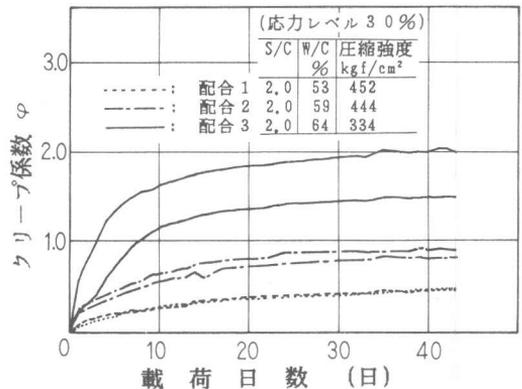


図18 グラウトモルタルのクリープ係数