

RC スラブの長期におけるひびわれ変形に関する研究 (その3)

——軟練り・硬練り調合による RC スラブたわみ実験結果——

高橋 久雄 小柳 光生
武田 寿一 大池 武

Studies of Deflection of Reinforced Concrete Slabs under Sustained Loads (Part 3)

——Results of Experiments on the Deflection of RC Slabs
with the Mixes of Wet and Dry Consistencies——

Hisao Takahashi Mitsuo Koyanagi
Toshikazu Takeda Takeshi Oike

Abstract

Comparitive experiments were conducted on simply supported and pin-supported slabs in an investigation of the effect on deflection due to difference in concrete mixes of dry and wet consistencies. Tests of shrinkage and creep were carried out. The results showed there was practically no difference in deflection in case of simple support, while in the case of pin support 10% less deflection was seen for concrete of dry consistency, but the modulus of creep was less for concrete of wet consistency.

概 要

軟練り・硬練りコンクリート調合の違いが部材長期たわみ変形に及ぼす影響を調べるため、単純支持およびピン支持スラブについて1年にわたり、比較実験を実施した。なお自由収縮量、クリープ量についての試験も行っている。その結果、調合の違いによるたわみ差は単純支持の場合、殆んど無く、ピン支持の場合でも10%程度硬練りが少ない程度であった。自由収縮量は硬練りの方が少なく、クリープ係数は逆にわずかながら軟練りの方が少なかった。

1. まえがき

RC 造スラブの長期におけるたわみ性状について、一連の実験研究を進めてきたが、今回、軟練り・硬練りコンクリート調合の違いが部材変形に及ぼす影響を調べるため、単純支持およびピン支持について長期たわみ性状の比較実験を実施したので報告する。なお、自由収縮量、クリープ量についての試験も行っている。

2. 実験概要

2.1. 実験計画

試験体の内訳は表-1に示す。コンクリート調合、支持方法それぞれ2種とし、加力は長期設計荷重であり、ピン支持については長期設計荷重の約0.6倍の試験体も加えている。この他に、自由収縮量を測定するため、ダミースラブおよびシリンダーも製作している。なお長期設計荷重とは RC 規準13条床スラブ断面算定式 $M =$

$a_t \cdot f_t \cdot j$ から $f_t = 2.0 \text{ t/cm}^2$ として求めた。

調合は W/C を同一とし、設計基準強度 210 kg/cm^2 に対し、硬練り ($S = 8 \text{ cm}$)、軟練り ($S = 21 \text{ cm}$) の 100ϕ シリンダー気乾養生 4W 強度、弾性係数はそれぞれ $F_c = 176 \text{ kg/cm}^2$, $E_c = 2.04 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, および $F_c =$

試験体 名 称	コンク リート 調 合	2 点支持 荷重(kg)	曲げ区間の 曲げモーメ ント比	支 持 条 件
21-1	A スラ ンプ 21cm	216	1.00	ピ ン 支 持
21-2		93(114)*	0.50(0.59)*	
21-3		216	1.00	単 純 支 持
21-4		0	0	4点ローラー支持(乾燥収縮用)
8-1	B スラ ンプ 8cm	216	1.00	ピ ン 支 持
8-2		93(114)*	0.50(0.59)*	
8-3		216	1.00	単 純 支 持
8-4		0	0	4点ローラー支持(乾燥収縮用)

* 荷重物の都合で()内の荷重で被荷した。

表-1 試験体の種類

198 kg/cm², $E_c=2.10 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ が得られた。試験体への加力は、両支持方法ともスパンの3等分点に鉄製の錘を載せる方式で行った。その状況を図-1に示す。なお試験室は恒温恒湿室であり、試験体形状はスパン $l=150 \text{ cm}$, 幅 $b=16 \text{ cm}$, スラブ厚 $D=7 \text{ cm}$ の一方向スラブである。主筋はSD30-2D6使用の単筋配筋で、鉄筋比 $P_t=0.56 \%$, 下端面から鉄筋中心位置 1.5 cm である。ダミースラブも同一配筋としている。なお、ピン支持試験体の製作は支持台に型枠を直接組立て、コンクリートを打込み、初期からの収縮を拘束するように考えた。全試験体とも材令8日で側面型枠を取除き、ピン支持試験体のサポートは材令21日で除去した。加力は長期設計荷重の試験体は材令28日で実施し、約0.6倍の設計荷重を受ける試験体は材令56日で実施した。

測定法は(1)中央たわみ:ダイヤルゲージ, (2)側面ひずみ:コンタクトゲージ法(3)スパン中央主筋ひずみ:W.S.G (4ゲージ法)とした。

2.2. ピン支持の拘束度試験

支持台支点拘束度を調べるため、両側支点シャフト間をチェーンブロックで引張り、その力を2ton用秤で読みとるとともにその支点間変形を両側シャフト部にダイヤルゲージを取りつけることによって測定したところ、引張力と変形の関係はほぼ比例しており、またどの試験体も比例定数 $K=8 \text{ ton/mm}$ 程度の値を示すことが判った。

3. 実験結果

3.1. 自由収縮ひずみの動き

ダミースラブの自由収縮ひずみをダイヤルゲージ法(石英ガラス管を基準尺として上面変形量を求める方法)とコンタクトゲージ法(部材側面の上下端 1.5 cm 位置に標点を貼り、平均ひずみを求める方法)を使って実測したのでその結果を図-2に示す。なおこの原点は打設して数時間後を基点としている。

この結果、コンタクトゲージ法によれば例えば材令1年で軟練り・硬練りそれぞれ 1050×10^{-6} , 850×10^{-6} の収縮ひずみを示し、水量の少ない硬練りの方が収縮は少ない。

3.2. 一軸圧縮クリープ性状

コンクリートの圧縮クリープ性状を調べるため、スプリング式試験機を使って軟練り、硬練りコンクリートそれぞれ3本の供試体を F_c の $1/3$ 応力で材令28日から載荷し、その結果を図-3, 図-4に示す。図-3は単位応力当りのひずみ値(単位クリープひずみ)で表わしておりダミーシリンダーにより自由収縮を既に補正してある。図-4はクリープ試験時に求めた弾性係数を用いてクリープ係数を求めたものである。

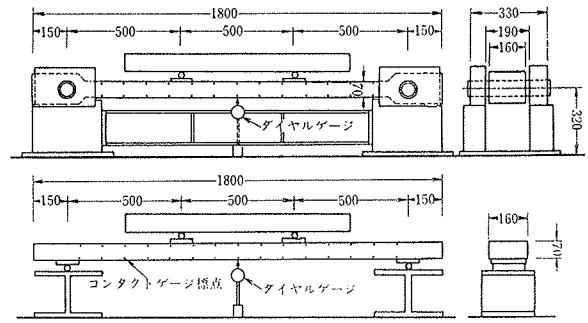


図-1 加力方法

記号	スラブ アンパ (cm)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率 (%)	重 量 (kg/m ³)				(g/m ³)	まだ硬まらぬコンクリートの性質		
				水	セメント	砂	砂利		混和剤	スラブ厚 (cm)	空気量 (%)
A	21	61.7	40.3	196	321	721	995	128	21.4	2.8	2307
B	8	61.7	39.5	169	274	703	1125	110	7.8	3.4	2339

混和剤: ウィンゾール使用

表-2 コンクリート調合

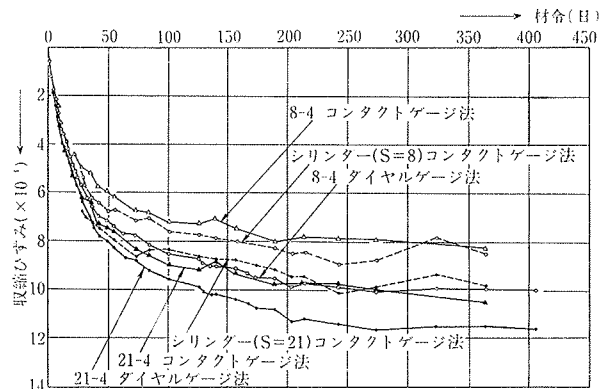


図-2 収縮ひずみの動き

図-3の結果から、硬練りの方が単位クリープ性状はやや小さい傾向にあることが判る。しかし、図-4の結果からは加力直後のひずみにかなりの差があったためか硬練りの方がクリープ係数はやや大きく、材令200日で硬練り、軟練りそれぞれ2.22, 2.06を示した。

なお今回の実験目的と多少異なるが、自然環境の影響を受ける地下室で、経年的な湿度変化のクリープに与える影響を調べるために同一軟練りコンクリート供試体で併行してクリープ実験を行ったのでその結果も図示している。載荷開始は5月中旬であるがそれから10月中旬までの期間は高湿度(70~90% R.H)で、それ以後冬季に入り低湿度状態となる。地下室でのクリープ挙動は湿度の影響を顕著に受けるが、最終的には恒温室でのクリープ値と近似してくると思われる。

クリープ係数計算値との対応性を調べるために坂博士の提案式

$$\varphi_c = c \cdot d \cdot t / (10.5 + 0.25 \cdot t)$$

t : 材令 (日数) c : 形状に関する係数
d : 湿度に関する係数

を使う。c = 1.0, d = 0.7 (湿度70~90% R.Hとして), 材令 t を荷重日数としてクリープ係数計算値を求め、恒温室内のクリープ挙動実験値と比較し、その結果を同図中に示したが、ほぼ良い近似であった。

3.3. ピン支持試験体の収縮ひびわれ

コンクリートを弾性体 ($E_c = 2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$) と考えた時のピン支持拘束度 (拘束ひずみ/自由ひずみ) ν の計算値は、 $\nu = 0.34$ が得られたが、実際の試験体のひびわれ直前までの拘束度は、ダミースラブの鉄筋ひずみおよびスラブ側面ひずみ (図-5 参照) から $\nu = 0.5 \sim 0.6$ 程度が得られた。計算値にはコンクリートの初期性状、クリープ性状が考慮されていないためこの差が生じたものと思われる。なお“拘束ひずみ”とは自由ひずみの拘束された分を示す。

シャフト間軸方向変形の動きを測定し、その結果を図-6に示す。水平引張力: P とシャフト間変形量: δ の関係が $P = K \cdot \delta$ ($K = 8,000 \text{ kg/mm}$) として判っているので、部材に働く動力が推測できる。収縮ひびわれ発生日は硬練りで21日, 28日, 軟練りで21日, 25日であり、その後ひびわれ貫通時に拘束力が半分以下に低下した。曲げ荷重時には一般に面内圧縮力の発生が考えられるが、今回の実験では打設後から試験体を拘束するという特殊性のため図-6から判るとおり加力前に既に引張軸力が作用しておりそのため最終的には設計荷重を受ける部材で平均600 kgの圧縮力, 一方0.6倍の設計荷重を受ける部材では平均600 kg程度の引張力になった。

次にひびわれ応力の検討を行う。シャフト間変形量の動きから部材軸力を推測できるので、図-6からひびわれ直前までの変形量を求めると $100 \sim 160 \times 10^{-3} \text{ mm}$ が得られ、これから、部材軸力: Nは、 $800 \sim 1280 \text{ kg}$ が作用していると考えられる。この収縮軸力による応力 $\sigma_1 = N/b \cdot D = N/16 \times 7 = 7 \sim 11 \text{ kg/cm}^2$ であり、その他に自重曲げモーメントによる縁応力 $\sigma_2 = 6 \cdot M/b \cdot D^2 \approx 6 \text{ kg/cm}^2$ の和がひびわれ直前の引張耐力と言える。つまり、引張耐力は

$$\sigma_{max} = 13 \sim 17 \text{ kg/cm}^2$$

が推定される。なお、実際のコンクリート4W 割裂強度 $F_t = 13.3 \text{ kg/cm}^2$ (S=21), $F_t = 15.0 \text{ kg/cm}^2$ (S=8) であった。

3.4. たわみの動き

曲げ部材のそれぞれの長期にわたる中央たわみ性状を図-7に示す。この結果、設計荷重を受ける単純支持スラブは硬練り, 軟練りそれぞれ加力直後に 3.4 mm, 3.9 mm であり、材令1年で 11.1 mm, 11.4 mm を示し、調

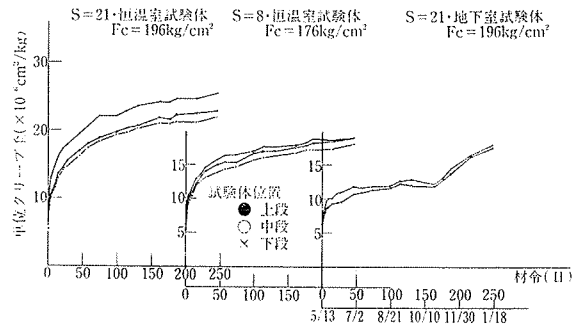


図-3 単位クリープひずみ性状

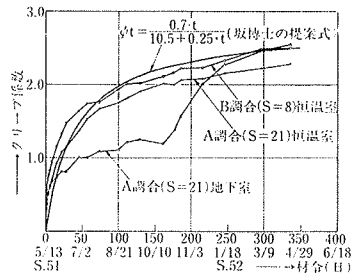


図-4 クリープ係数性状

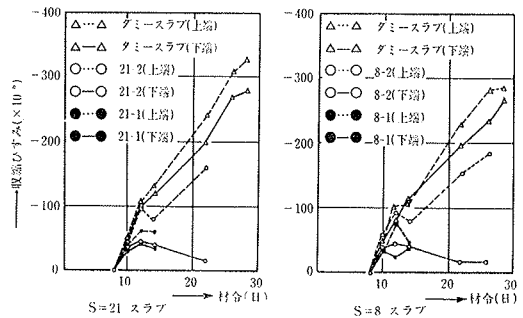


図-5 ひびわれ直前までのピン支持スラブ側面ひずみ

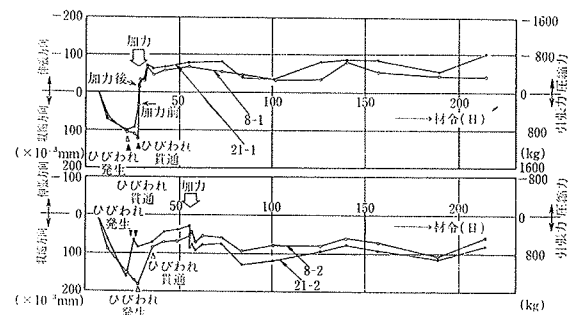


図-6 シャフト間の軸方向変形

合間のたわみ相違は見られなかった。またピン支持にしても設計荷重の部材で10%弱のたわみ差, その0.6倍の荷重の部材では殆んど差が見られなかった。ピン支持と単純支持の比較では、ピン支持の場合、もともと存在していた収縮引張力に面内圧縮力が打消されたためか、単純支持と同様のたわみを示した。むしろ0.6倍の設計荷重を受ける試験体の曲げモーメントはひびわれモーメン

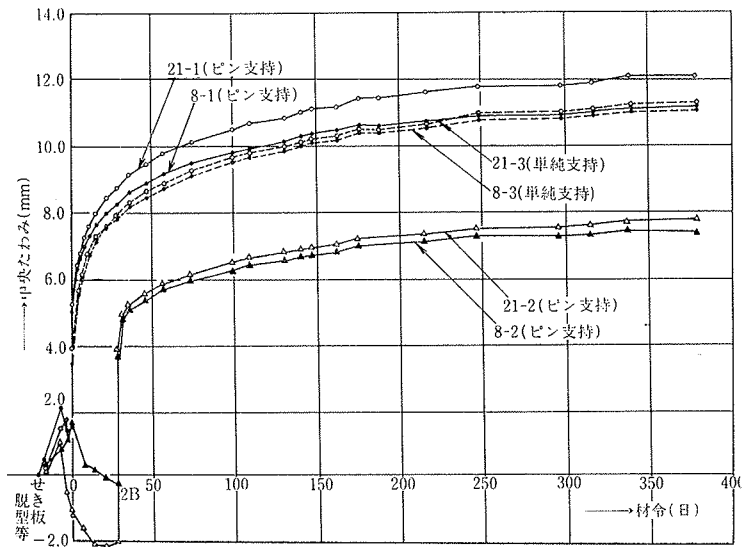


図-7 スラブ中央たわみ挙動

ト(0.033t.m) 程度にもかかわらず、設計荷重に対するたわみ比は各材齢を通じて0.6~0.65と、荷重比率とほぼ同じ値であった。これは引張軸力のためと思われるが、一般のRC建物床版のようにはり、柱の拘束を受ける場合、曲げひびわれモーメント以下の応力であっても収縮ひびわれが発生し、そのため、たわみが予想より大きくなる可能性がある。

なおたわみの原点は、ピン支持の場合、せき板脱型の打設後材令8日である。単純支持の場合、載荷直前であるが自重たわみ計算値0.2mmを付加している。

3.5. 載荷前の収縮ひびわれ前後の変形の検討

ピン支持の載荷前のたわみは図-7のようにサポート除去時(打設後材令21日)に自重たわみが1~2mm生じている。その後、スパン中央にひびわれが入ったが、このひびわれ発生後から載荷する期間までに、たわみが減少し、スラブがむくり上がるという現象を生じた。21-2, 8-2 スラブはひびわれ発生が遅れたので材令56日で載荷したが、ひびわれ発生(材令28日)後、たわみ減少の様子がよくわかる。

また、ひびわれを観察すると、最初に下端からひびわれが入るがその後貫通し、逆に上端のひびわれ幅の方が大きくなる。この傾向はスラブがむくり上がる現象と対応している。

この現象は次のように説明できる。ひびわれ発生後、下端に引張り、上端に圧縮が働いており、その時の応力の釣合い式は

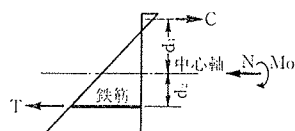


図-8 ひびわれ当初の応力分布

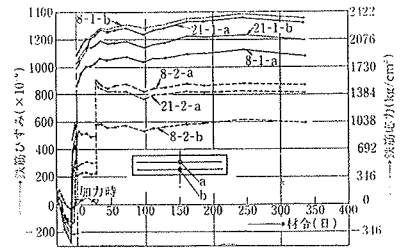


図-10 鉄筋ひずみ実測結果(ピン支持)

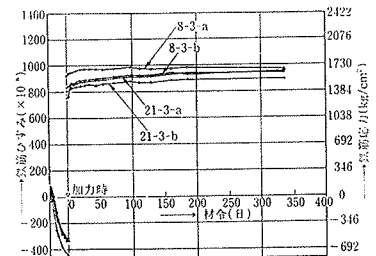


図-11 鉄筋ひずみ実測結果(単純支持)

$T-C=N$
 $d_1 \times C + d_2 \times T = M_0$
 であらわされる。この時、
 M_0 : 自重によるスパン中央
 曲げモーメント、 N : 部材
 軸力であり、 $M_0 = 760 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 、
 また図-6から $400 \text{ kg} < N < 800 \text{ kg}$ 程度と考
 えられる。また $d_1 = 3 \text{ cm}$ 、 $d_2 =$
 2 cm と仮定する。

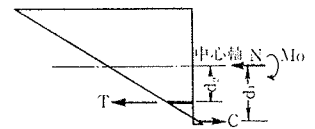


図-9 ひびわれ貫通時応力分布

そうすると上式を変形して、
 $C = 152 - 0.4 \cdot N$
 が得られる。 $C > 0$ (圧縮側)であるためには、 $N < 380 \text{ kg}$ になる必要があるが前述したように、ひびわれ発生後も、貫通しない限りこの軸力: N はこの値よりも大きいと思われる。そのため曲率が反転し、図-9のような応力の釣合いを示すと考えられる。その釣合い式を以下に示す。

$T-C=N$
 $d_2 \times T - d_1 \times C = M_0$
 例えば、 $N = 400 \text{ kg}$ の時、 $C = 40 \text{ kg}$ 、 $T = 440 \text{ kg}$ と
 なる。

3.6. 鉄筋ひずみ

スラブ主筋 SD30-2D6 のスパン中央に鉄筋ひずみゲージをそれぞれの試験体に2ヶ所ずつ貼り、鉄筋ひずみを実測した。その結果を図-10, 11に示す。この結果、あらかじめキャリブレーションした鉄筋ひずみから応力を換算すると、設計荷重を受けるピン支持中央鉄筋は、 $2,000 \text{ kg}$ を越える高応力を示している。これは鉄筋ゲージ位置付近に収縮ひびわれが発生し、その引張力を鉄筋が殆んど負担する形になったためと思われる。単純支

持の応力は 1,400~1,700 kg/cm² 程度であった。

3.7. ひびわれ分布

設計荷重を受ける試験体のひびわれ分布およびひびわれ幅を加力後材齢 1 年について、図-12 に示す。ひびわれ本数は加力直後に発生した本数から殆んど増えておらず、むしろその幅が拡大していく傾向であった。

4. 長期変形計算

4.1. 計算方法

単純支持およびピン支持スラブの長期的なたわみ挙動について、クリープと収縮を考慮した長期変形計算法*1 を適用して解析し、その計算法の妥当性を検討する。単純支持スラブの計算にはそのまま使えるが、ピン支持は軸力が存在するため、多少異なる。

ピン支持スラブの長期変形計算式は、軸力を : N に対し、中心軸位置のひずみ : ϵ_{xn} が

$$\epsilon_{xn} = \frac{\int E_c \cdot \epsilon_0 \cdot da_c + N}{\int E_c \cdot da_c + \int E_s \cdot da_s}$$

に変化した式*2 を用いる。その他の計算手法は単純支持の場合と同じであるので省略する。

コンクリートのクリープ係数と収縮計算定数は、実験値を用いる。硬練り、軟練りそれぞれの定数に殆んど差が見られず、たわみ計算結果もほぼ同じであるのでこ

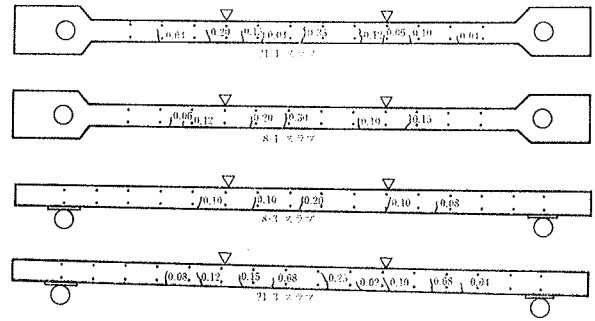


図-12 ひびわれ分布(材令 1 年) 単位 : mm

4.2. 計算結果と実測値の比較

試験体の中央曲げ区間側面ひずみをコンタクトゲージで測定し、平均曲率を求めたが、その結果と計算曲率値を比較して図-13 に示す。また実測たわみと計算たわみについて比較し、図-14, 15 に示す。この結果、設計荷重を受ける部材は単純支持、ピン支持ともに実測値と計算値の近似は良好であった。600kg 程度の圧縮軸力の有無はたわみに余り影響しないことが計算結果からも判った。0.6 倍の設計荷重を受けるピン支持部材は実測値の方が大きいたわみを示した。これは引張軸力は考慮しているが、載荷前に既に収縮ひびわれが入っていたことを計算に考慮していないためと思われる。

5. まとめ

コンクリート調合の違いがその性状に及ぼす影響を調べたところ、自由収縮ひずみは硬練りの方が少ない傾向が見られ、クリープ性状では、クリープ係数はわずかに硬練りの方が大きかったが、単位クリープひずみは逆に小さかった。たわみ比較ではわずかに差が見られた程度であった。

たわみ計算値と実測値を比較したところ、ほぼ良好な近似が認められた。

参考文献

- 1) 小柳光生, 他: RC スラブの長期におけるひびわれ変形に関する研究(その 2), 大林組技術研究所報, No. 15, (1977)
- 2) 斎藤 光: 材端拘束鉄筋コンクリート部材の火災時の性状, 日本建築学会大会梗概集, (1968)

試験体	材令(日)	計算定数				
		10	50	100	200	350
21-3 21-1 (28日加力)	クリープ係数	0.75	1.43	1.75	2.06	2.28
	収縮 ($\times 10^{-6}$)	100	230	250	360	350
21-2 (56日加力)	クリープ係数	0.75	1.43	1.75	2.06	2.28
	収縮 ($\times 10^{-6}$)	0	40	70	160	180

表-3 クリープと収縮 計算定数

では、軟練りコンクリートを使用した試験体のたわみ計算値だけを求める。その計算定数を表-3 に示す。またピン支持の軸力 : N は図-6 を参考にして、設計荷重を受ける部材で、600 kg の圧縮力とし、0.6 倍の設計荷重を受ける部材で 600 kg の引張力と仮定する。弾性係数は実験値 2.1×10^5 kg/cm² を用いる。

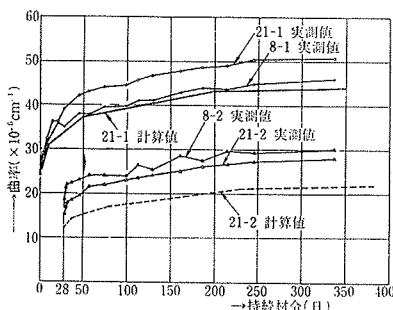


図-13 ピン支持スラブ曲率 実測値と計算値

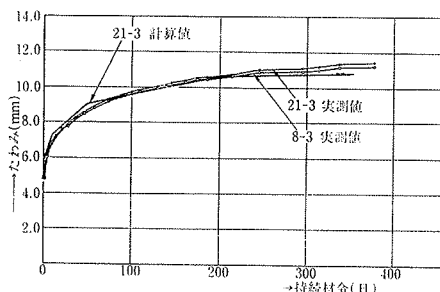


図-14 単純支持スラブ中央たわみ 実測値と計算値

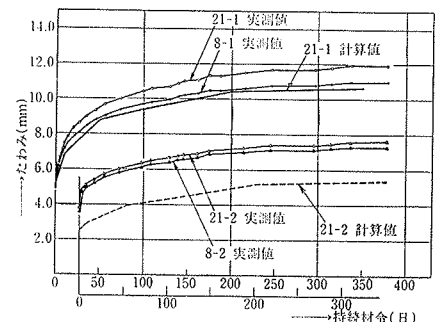


図-15 ピン支持スラブ中央たわみ 実測値と計算値