

セライトコンクリートを使用したPC梁の載荷試験および振動試験

磯 畑 脩
三 谷 勝 之
杉 田 稔

§ 1. まえがき

セライトコンクリートは他の人工軽量骨材コンクリートと同様、水セメント比を小さく硬練配合とすることによって、やや比重は増加するが $400\text{kg}/\text{cm}^3$ 以上の圧縮強度を得ることが可能である。

軽量骨材を使用した高強度コンクリートの研究は、軽量プレストレストコンクリートを前提として数年来主に土木方面で行なわれており、軽量プレストレストコンクリート道路橋ないしは鉄道橋として設計された例もすべからずあり。

元来プレストレストコンクリートは比較的小さな断面で長大スパンが得られる点に長所があり、これはコンクリート構造物の軽量化につながるものである。

この意味で（高強度）軽量コンクリートとプレストレストコンクリートは必然的に結びつくのであり、とくに設計荷重に自重の占める割合の大きな長大スパン橋梁方面でいち早く軽量プレストレストコンクリートの実用化が進められているゆえんである。これに対し、建築方面では本年になってPALA懇談会において軽量コンクリートによるプレストレストコンクリートダブルTスラブの製作の問題が検討されるようになった。

そこでとり上げられた軽量プレストレストコンクリートの問題点は次のとおりである。

- ・キャンパー、ヤング係数に関して——人工軽量コンクリートのヤング係数は同強度の普通コンクリートの80～60%であり、とくにダブルTスラブのように部材断面の細いものではその影響が大きい。
- ・導入時PC鋼材緊張力の損失に関して——弾性変形によるプレストレスの導入損失は、普通コンクリートの10%以上になる場合がある。
- ・収縮、クリープに関して——普通コンクリートに比べ長期の進行増大が予想され、とくに収縮については骨材の弾性係数および収縮に関連する。そしてプレテンションの問題点として上記3点の他に

ストランドの定着、せん断耐力を、ポストテンションの問題点として緊張材定着端の支圧強度の不足が上げられている。

さらに耐火性、曲げひびわれ、耐力、曲げ破壊耐力、曲げ破壊に至るまでの塑性的性質を調べる必要があるとされている。

ところで耐火性能については、セライト鉄筋コンクリート床板、壁板（通常の被り厚）の耐火試験により、耐火2時間の耐火性能を有することが報告されている。

人工軽量骨材は一般に熱伝導率、熱拡散率が小さいのが特徴である。

プレストレスを与えた場合には、軽量コンクリートでは普通コンクリートと若干熱応力破壊の状況が異なるといわれているが、この問題はまだ結論を得るまでには至っていない。

なお、JISA 5412に規格化されているプレストレストコンクリートダブルTスラブは、スラブ厚が5cmであるため耐火構造ではない。

次に人工軽量高強度コンクリートの力学的性質について要約しておく。

セライトコンクリートの収縮、クリープに関する長期の試験データ^{注1)}はないが、各種の軽量骨材によるコンクリートの試験結果²⁾³⁾によれば、収縮、クリープ共に軽量骨材の種類によっていちじるしく異なることが報告されており、多くは軽量の方が普通に比べて劣るようである。

弾性係数に関してはセライトを含む膨脹頁岩系の軽量コンクリートは圧縮強度 $200\sim 500\text{kg}/\text{cm}^2$ の範囲で普通コンクリートの40～70%であるといわれている。

また、圧縮強度に対する引張強度の割合は普通コンクリートよりやや小さく、ポアソン比は0.2～0.22程度でやや大きい。

注1) ただし、文献(9)には材令18週までのクリープと乾燥収縮に関するデータが示されている。

軽量コンクリートによるプレストレストコンクリート部材の実験は、先に述べた長スパン桁のほか、小スパンの試験桁、シングルTスラブ、ダブルTスラブ等で試みられている⁴⁾。

今回のセライトコンクリートによるプレストレストコンクリート梁の実験は、以上の実情を加味して計画したものであり、部材長5mの3種類の曲げ材、すなわち長方形梁、シングルT梁およびダブルTスラブをプレテンション方式で製作し、その曲げ載荷試験と振動試験を行なって軽量プレストレストコンクリートの特徴、又は普通コンクリートとの相違を調べようとしたものである。

§ 2. 実験方法

2.1 実験計画

粗骨材のみ異なるセライトコンクリート、普通コンクリート2種類のプレテンション曲げ部材について次の実験を行ない、比較検討する。

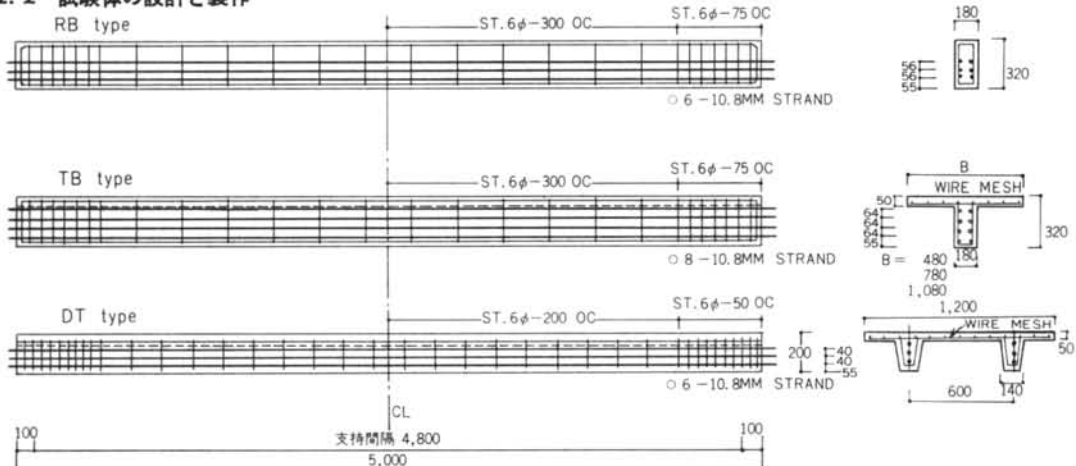
・曲げ載荷試験：荷重一ひずみ特性、ひびわれと破壊性状、安全度を調べる。

載荷方法としては JISA 5412 に規定されている両端支持2点集中載荷の荷重装置を適用する。

・振動試験：両端支持の状態で自由減衰振動および起振機により強制振動をさせて振動数—振幅特性、減衰特性、動弾性、プレストレスの効果等を調べ、軽量PC部材の動的挙動を分析する。

そのほか、プレストレス導入時のプレストレス伝達状況、導入時の部材の反り等を調べる。

2.2 試験体の設計と製作



図一 1 試験体製作図

試験体には3種類あって長方形断面梁をRB、T型断面のものをTB、ダブルTスラブをDTと呼び、表一の仕様に基づいて粗骨材がセライト(L)、普通コンクリート(C)の2通りのものを製作する。

	長方形断面 RB	T型断面 TB	ダブルTスラブ DT
断面形状			
B		480; 780; 1,080	1,200
b	180	180	
D	320	320	200
t		50	50
部材長	5,000	5,000	5,000
緊張材	6-10.8φ	8-10.8φ	6-10.8φ

表一 1 部材の形状寸法(単位: mm)

各断面形状およびコンクリート種別に応じて3体ずつ試験体を製作し、

RB(L)—No. 1, No. 2, No. 3, TB(L)—No. 1, ……
DT(L)—No. 1, …… RB(C)—No. 1, No. 2, No. 3,
TB(C)—No. 1, …… DT(L)—No. 1, ……
と名付ける。

TB型にはフランジ幅が3種類あって6t, 12t, 18tの順にそれぞれNo. 1, No. 2, No. 3となっている。

またRB型ではプレストレスを導入しない試験体を製作し、これをRB(L)RC, RB(C)RCとする。

試験体の個数は、セイライト、普通あわせて20個である。

試験体の製作は5月27日より約20日かけてピー・エス・コンクリートK.K.鴨宮工場の設備を使って行なわれた。

製作図を図-1、実施工程を表-2に示す。

試験体名称		セイライト コンクリート		普通コンクリート	
		応力導入時	本実験時	応力導入時	本実験時
RB	No. 1	1	28	1	37
	No. 2	1	28	1	37
	No. 3	1	28	1	33
TB	No. 1	1	33	1	32
	No. 2	1	36	1	39
	No. 3	1	38	1	40
DT	No. 1	1	28	2	28
	No. 2	1	27	2	28
	No. 3	1	27	2	28
RB	RC	—	35	—	28

表-2 実験の実施工程 (単位: 材令(日))

試験体はコンクリート打設後、60℃の蒸気養生を14時間程度行なう。

その後コンクリート強度を確認してプレストレスを導入する。

基準断面の設計方法は次のとおりである。

緊張材の配置は直線とし、RB、TB型では計測の都合上2列とする。

比重 γ を軽量、普通それぞれ1.8、2.4、支持間隔を $l = 4.8\text{m}$ 、有効率 $\eta = 0.8$ と仮定してプレストレスコンクリート設計施工規準4-3により初プレストレス力を定め、緊張材の可能な偏心距離 e を求める。

コンクリート圧縮強度 400kg/cm^2 に対する死荷重モー

試験体	Md (t·m)		Ml (t·m)		$Ml(L)$ $Ml(C)$	$Md(L)$ $Ml(L)$
	セイライト (L)	普通(C)	セイライト (L)	普通(C)		
RB	0.300	0.397	3.63	3.53	1.03	0.083
TB (12t)	0.455	0.605	4.83	4.68	1.03	0.094
DT	0.510	0.680	1.98	1.81	1.09	0.257

表-3 設計モーメント

メント Md 、設計許容載荷モーメント Ml は表-3のようになる。

同じ仮定に基づいてひびわれモーメント Mcr 、破壊モーメント Mb を計算して積載荷重を決める。

なおこの表からわかるように、仮定した部材の寸法程度では積載荷重に対する自重の比が小さいので軽量としての利点は少ない。

2.3 試験方法および測定方法

2.3.1 プレストレス導入量の測定:

図-2に示すように、各試験体の中立軸位置コンクリート内にモールドゲージ(計器長70mm)を埋設し、プレストレスを導入する時の応力とその部材軸方向分布を測定する。(写真-1)

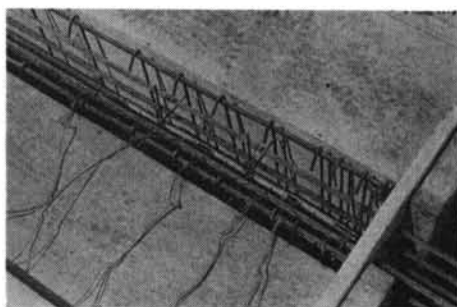


写真-1 材端にモールドゲージを埋設したところ

TB型については、フランジコンクリート上面のワイヤストレインゲージにより横方向の分布も測定する。

2.3.2 部材反りの測定:

プレストレス導入直後、両端支持した状態で材令による変化を定期的に測定する。

測定方法はDTスラブの製品検査と同じで、両端の基準点に水糸を張ってスケールにて中央の反りを読む。

この測定精度は $\pm 0.5\text{mm}$ である。

2.3.3 載荷試験:

図-2に示した試験体の各位置に貼付したワイヤストレインゲージおよびモールドゲージにてコンクリートの曲げひずみと導入プレストレスの変化を測定する。

またスパン中央のたわみをダイヤルゲージにて測定する。

ひびわれ発生以後の大たわみは、スケールにて測定する。

載荷方法は設計荷重→零→初ひびわれ発生→零→破壊の順序をとる。

荷重は30トン手動オイルジャッキである。(写真-2)

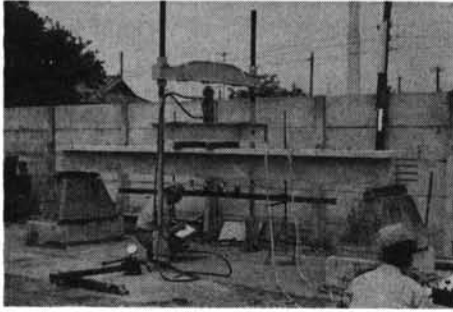


写真-2 載荷試験 (TB型)

2.3.4 振動試験:

電動起振機 (トルク ; $70 \times 3.7 \text{ g} \cdot \text{cm}$) をスパン中央に据えて回転数を徐々に変化させて上下振動を生ぜしめ共振振幅を測定する。

また衝撃荷重を加えて自由減衰振動を測定する。

振動のピックアップおよび記録には振動計 (明石製作所TVL-1型) とペン書きオシロ (渡辺測器WTR201-L) を使用した。

測定概略図を 図-2 に示す。

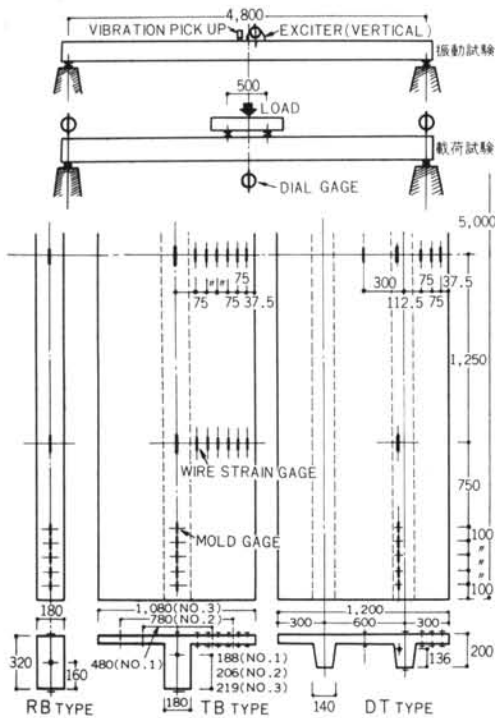


図-2 測定概略図

2.4 コンクリートの配合設計と材料試験結果

コンクリートの配合は、三菱セメント技術研究所にて

予備試験をした後、4週圧縮強度の目標を 450 kg/cm^2 程度に置いて 表-4 のように決定した。

コンクリート種別	セイライト コンクリート	普通コンクリート
セメント	アサノベロセメント	同 左
細骨材	神奈川県酒匂川産	同 左
粗骨材	セイライト	神奈川県酒匂川産
粗骨材の最大粒径mm	20	20
単位水量 kg	179	179
単位セメント量 kg	460	400
水セメント比 %	39.0	44.8
細骨材率 %	38.8	41.0
単位細骨材量 kg	674	733
単位粗骨材量 kg	613	1,120
スランプの範囲 cm	3~5	3~5

表-4 コンクリートの示方配合

コンクリートの材料試験はプレストレス導入時、載荷試験 (振動試験), および4週時について行なった。

静弾性係数と圧縮強度の関係を 図-3 に示す。

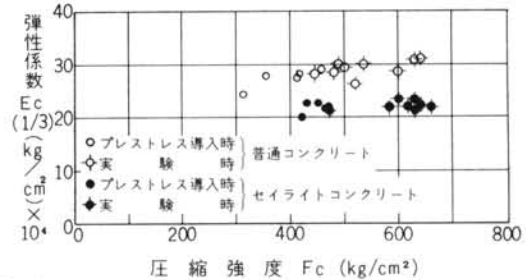


図-3 コンクリート材料試験 (圧縮強度と弾性係数の関係)

これらの数値は 表-9 に示してある。

試験体は蒸気養生されているが材令に伴う強度の伸びが認められる。

これに対して弾性係数の値はほとんど変化していない。セイライトコンクリートの普通コンクリートに対するヤング係数比は73%前後である。またセイライトコンクリートの強度はほぼ均一なものが得られたのに対し、普通コンクリートで少々ばらつきが認められる。

セイライトコンクリートの比重 (気乾) は1.9前後であり、普通コンクリートは2.4程度であった。

したがってセイライトコンクリートの普通コンクリートに対する重量比は83%程度である。

2.5 緊張材の材料試験

鋼材メーカーの試験成績表によれば $E = 1.97 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ である。

§ 3. 実験結果と考察

3.1 導入プレストレス

プレストレス導入時の各試験体の軸方向応力分布を図-4~図-6に、横方向分布を図-7に示す。

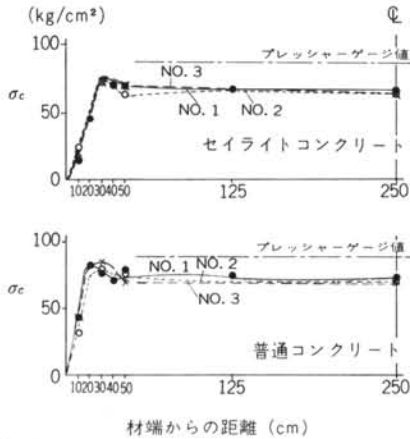


図-4 導入プレストレス軸方向分布; RB型

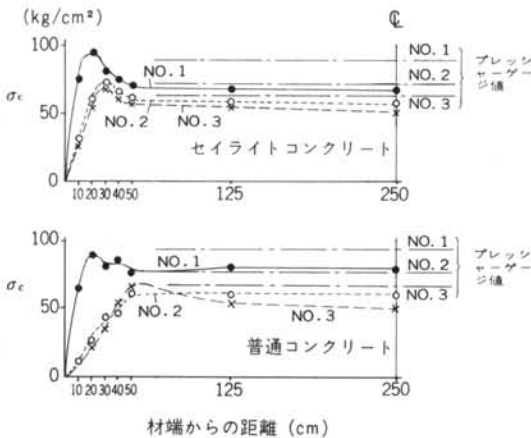


図-5 導入プレストレス軸方向分布; TB型

導入プレストレスの軸方向分布ではセライトコンクリート、普通コンクリートで相違はみられない。

プレストレスの伝達長さはRB, TB, DT型すべての試験体を通じて30cm前後であるといえる。

緊張材の公称径で表わすと約28Dである。

これは「許容引張力導入の定着長さ」で緊張材の錆びている場合の25Dに相当する(実験ではおおむね錆びている状態である)。

コンクリート強度の不足またははずみゲージと緊張材の接触による付着性の減退により伝達長さがこれより長いものもあるが、コンクリート強度が十分あれば付着性に

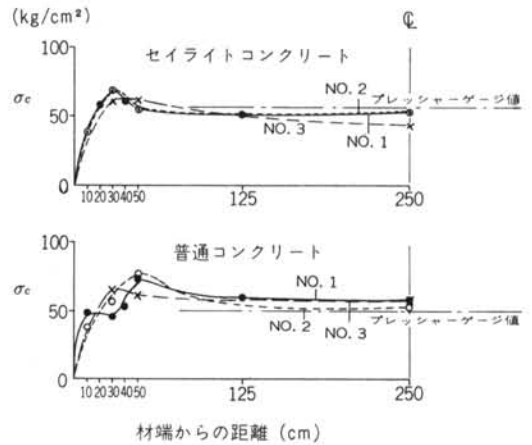


図-6 導入プレストレス軸方向分布; DT型

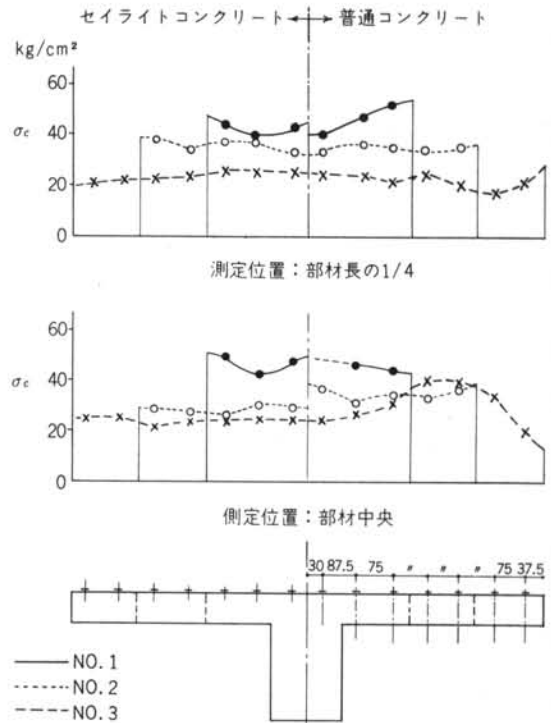


図-7 プレストレス導入時フランジ応力; TB型

関してはセライトコンクリートと普通コンクリートの差はないといえる。

図中、分布応力の Peak がいずれの試験体にもみられるが、これはプレストレスの伝達長さや部材断面の幅方向へのストレス拡散とが関連して緊張材付近のコンクリートに生ずる現象であり、コンクリート断面に対する緊張材配置の集中度が大きいほど顕著にでるはずである。

応力分布は経過時間に伴って中央へ少し移行すること

が認められたが、図は型枠除去後、両端支持にした時の数値である。

なおDTの普通コンクリートで端部の応力分布が乱れているのはひずみゲージが緊張材に接触してプレストレス伝達が阻害されたからである。

有効プレストレスPの値を表-5に示す。

試験体	No.	セイライト	普通	P(L)/P(C)		設計 緊張力*
		P(L)	P(C)	計測値**	理論値	
RB	No.1	39.5	41.9	—	0.97	50.9
	No.2	38.9	41.1	—	0.97	
	No.3	38.0	40.6	0.94	0.97	
TB	No.1	52.8	55.8	0.95	0.98	67.8
	No.2	51.1	55.0	—	0.99	
	No.3	53.0	52.8	—	0.99	
DT	No.1	48.3	54.5	—	0.96	50.9
	No.2	49.3	51.7	—	0.96	
	No.3	—	54.5	—	0.96	

*) ストランド降伏強度の80%

**) 同時性のあるものについてのみ計算してみた。

表-5 有効導入プレストレスP測定値(単位:t)

導入量に関してRBおよびTBとDTに差があるのは両者の緊張装置が異なるからである。

セイライトコンクリートおよび普通コンクリートの有効プレストレスをそれぞれP(L), P(C)としてP(L)/P(C)の実測値と理論値^{注3)}を比較すると表-5のようになる。

計算結果では弾性変形による緊張力の損失量の差はほとんどないが、実測ではセイライトコンクリートの方がやや少なかった。

しかしながら図-6のプレストレス伝達状況と図-7のコンクリート上面の応力分布(あるいは載荷試験時の緊張材の挙動等)を考慮すると、緊張材の沁りではなく計算上のヤング係数値や蒸気養生の余熱などの計測上のErrorによるものと思われる。

3.2 試験体の反り

継続測定の結果、いずれの試験体も材令と共に進行しており、導入後4, 5日までは進行がmmのOrderで顕著に表われている。

反りの測定結果と弾性計算値を表-6に示す。

注2) §4. 参照。

試験体種別	経過日数(日)									弾性計算値		JISA 5412		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	上限	下限		
セイライト(L)	RB	No.1									4.92			
		No.2									4.92	—	—	
		No.3	5			6	6					4.70		
	TB	No.1	3			4	4					3.10		
		No.2	3		4	4.5	4.5					3.95	—	—
		No.3	3		4	4.5	4.5					4.57		
DT	No.1	6		8			9				7.19	4.4	12.2	
	No.2	6		7			8				7.19	4.4	12.2	
	No.3	6		8			9				7.19	4.4	12.2	
普通(C)	RB	No.1	4			5	5				3.88			
		No.2	4			5.5	5.5				3.74	—	—	
		No.3	3			4	4					3.55		
	TB	No.1	2			3	4					2.66		
		No.2	3		5		6	6		6		3.62	—	—
		No.3	3		6		6	6		6		3.88		
DT	No.1	5			8	8			8		5.28	2.9	8.3	
	No.2	5			6	7			7		5.28	2.9	8.3	
	No.3	6			7	8			9		5.28	2.9	8.3	

表-6 反りの測定結果と弾性計算値(単位:mm)

弾性計算値は、

$$\delta = \frac{PeL^2}{8EI} - \frac{5WL^4}{384EI}$$

から算出したものである。

計算値と実測値はほぼ一致するが、材令に伴う変化はかなり大きい。

反りの絶対値はむろん弾性係数に比例するからセイライトコンクリートの方が大きい。

3.3 プレストレス導入時のフランジ応力

TB型についての測定結果を図-7に示す。

フランジ幅が6t, 12tでは部材長の1/4における横方向のプレストレス分布は均一であるといえる。

18tになるとStemから遠ざかるにしたがって幾分減少する傾向にあるが、定量的には大差ない。

この傾向は部材の中央位置についてもいえる。

したがってフランジ幅の広い部材の設計上、フランジ幅を12t以内に限定して断面算定する場合、コンクリートのプレストレス量に不足を生ずるので疑問がある。

設計上の基準断面がプレストレス導入端からある程度

離れた場合では、部材の全断面を考慮する必要がある。

しかしながらこのために生ずる緊張量の増加は導入端付近のコンクリート断面に過大な圧縮応力（ポステンの場合は支圧強度に関連してくる）を生ぜしめることになり、断面形状または緊張材の配置に工夫せねばならなくなる事が予想される。

3.4 載荷試験

本実験は表-2に示す材令で、試験体製作後4~5週目に実施した。

実験には屋外の載荷装置を使用した。その間ほとんど曇りでかくべつ計測上の支障はなかった。

スパン中央の荷重—たわみ曲線を図-8に示す。

試験体のひびわれ状況を図-9に示す。

試験結果は次のとおりである。

- (1) 設計許容荷重内では部材の曲げ変形はセライト、普通共に弾性的であり、弾性計算値とよく一致する。
- (2) 初ひびわれ荷重、破壊荷重共に大体計算値と一致する。例外としてDepthの小さいDTのひびわれ計算値よりも早い。

実験値と計算値の比較を表-8に示す。

この表の計算値は次式から求めている（図-10参照）。

ひびわれモーメント M_{cr} は、

$$M_{cr} = M_{cb} + P \cdot e + \sigma_g \cdot Z_2$$

ここに、

M_{cb} ; $P \cdot e = 0$ の場合のひびわれモーメント

$P \cdot e$; 有効プレストレスによる偏心モーメント

σ_g ; コンクリート断面の平均プレストレス

Z_2 ; 引張側コンクリート縁に関する断面係数

曲げ破壊モーメント M_b は、

$$M_b = 0.83bhF_{28}(d - 0.42n)$$

ここに、

n ; 曲げ破壊時の中立軸位置で、

$$n = \frac{A_s \sigma_{sy}}{0.83bF_{28}} \text{ より求める。}$$

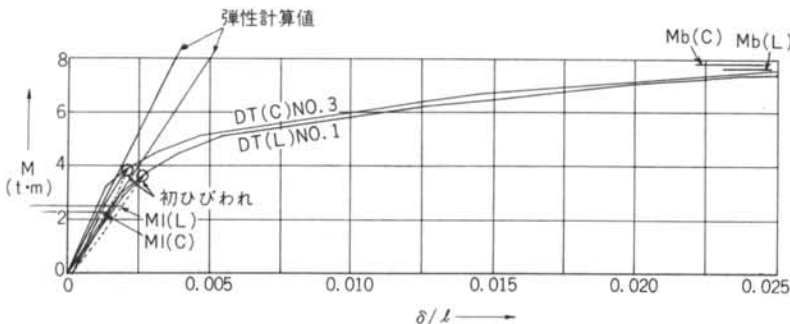


図-8-c 荷重—たわみ曲線; DT型

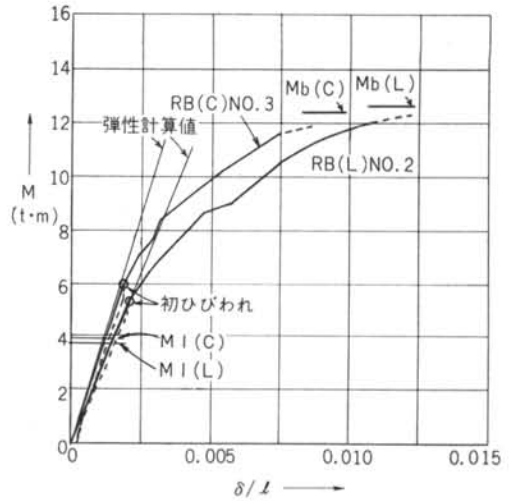


図-8-a 荷重—たわみ曲線; RB型

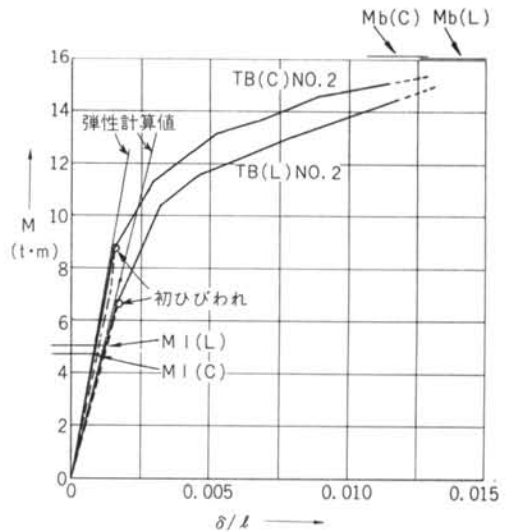


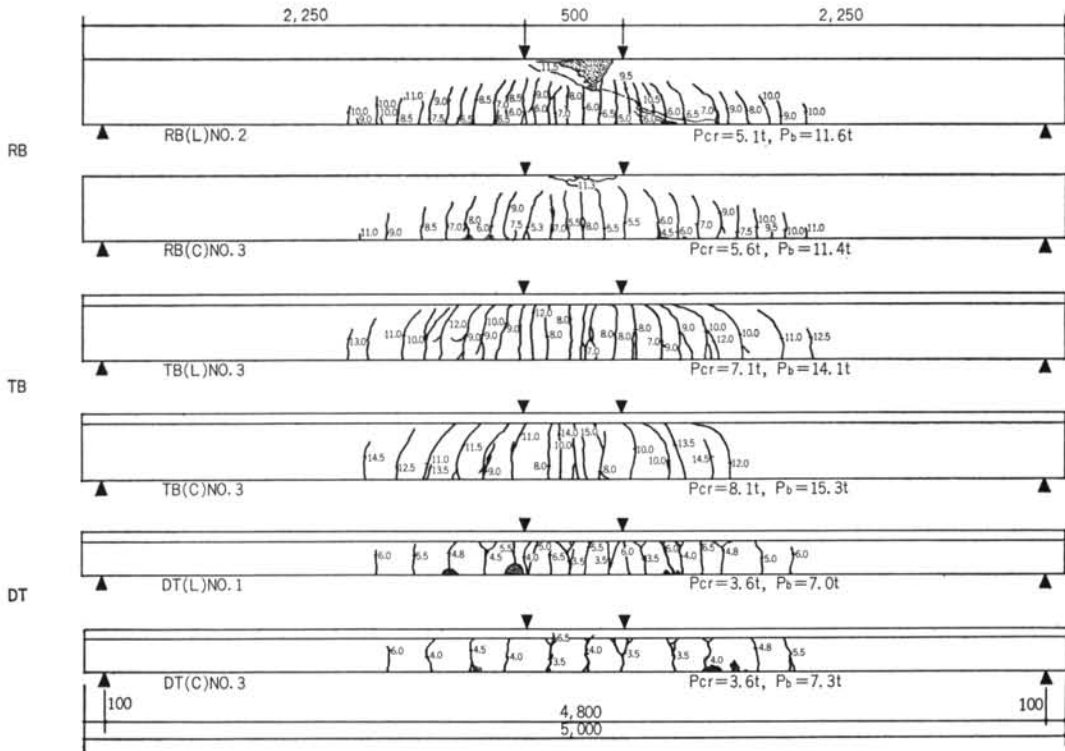
図-8-b 荷重—たわみ曲線; TB型

b ; 圧縮コンクリートの部材幅。

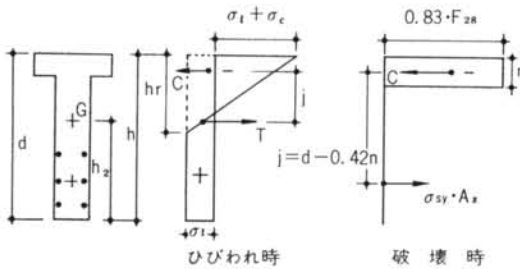
σ_{sy} ; 緊張材の降伏強度 (0.2% ひずみ時) で17,000kg/cm² とする。

なお載荷試験時のプレストレス有効率 η は設計規準 54条2-1にしたがって精算し、表-7の数値を得た。

(3) ひびわれモーメントの計算値と実験値の



図—9 曲げひびわれ状況



図—10

試験体	セイライト (L)	普通 (C)
RB	0.883	0.899
TB	No.1	0.879
	No.2	0.886
	No.3	0.889
DT	0.910	0.927

表—7 載荷試験時のプレストレス有効率 η

比較では、セイライトコンクリートの方がやや低い。

初ひびわれはコンクリートの曲げ強度に関係するわけであるが、圧縮強度が200~400kg/cm²のコンクリートの曲げ強度は河川産骨材の場合が $1/5 \sim 1/7$ (対圧縮強度比) であるのに対し、軽量骨材では $1/5 \sim 1/10$ であって普通コンクリートに劣る²⁾。

実験結果ではこの傾向が高強度コンクリートの場合にも顕れたようである。

初ひびわれは荷重を保持して計測中に生ずる場合が多かった。

(4) 曲げ破壊はセイライト、普通共にスパン中央の圧縮側コンクリートの Crush によって来まっている (写真—3, 4 参照)。

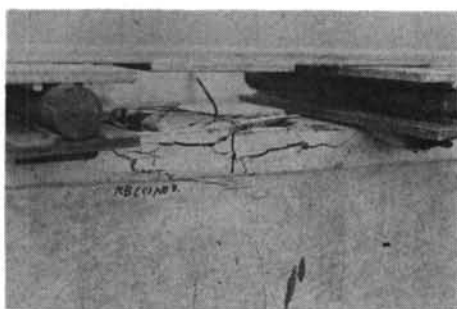
破壊モーメント M_b の実験値と計算値の比較では、セイライトコンクリートと普通コンクリートの差はみられない。

(5) 破壊時においてもすべての部材で緊張材の Slip は生じなかった。

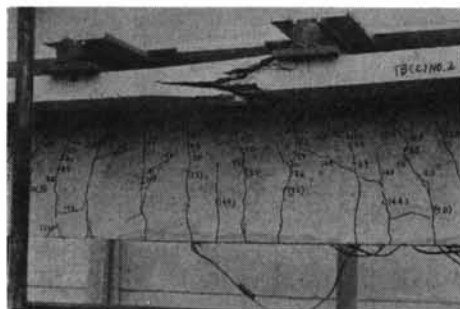
(6) ひびわれはセイライトコンクリートの方が密に生ずる。この傾向はTB型よりもRB型に、さらにRB型よりもDT型にいちじるしい(図—9の試験体の場合、荷重点間のひびわれ密度をそれぞれの型で同一荷重点について比較してみると、TB, RB, DTの順にそれ

試験体		Mcr ; t·m		$Mcr(実)$ $Mcr(計)$	Mb ; t·m		$Mb(実)$ $Mb(計)$	$Mb(実)$ $Mcr(実)$	MI ; t·m design	
		実験値	計算値		実験値	計算値				
RB	(L)	No.1	5.50	5.30	1.05	10.9	12.2	0.89	1.98	3.75
		No.2	5.50	5.20	1.06	12.5	12.2	1.03	2.27	3.70
		No.3	5.50	5.25	1.05	12.2	13.1	0.93	2.24	3.75
	(C)	No.1	6.00	5.45	1.10	11.8	12.0	0.98	1.97	3.70
		No.2	6.55	5.35	1.22	12.4	12.0	1.03	1.89	3.60
		No.3	6.00	5.60	1.07	12.25	12.3	1.00	2.03	3.80
TB	(L)	No.1	6.55	6.40	1.02	15.2	14.2	1.07	2.31	4.55
		No.2	6.55	7.15	0.92	16.1	14.7	1.10	2.46	5.00
		No.3	6.55	7.80	0.84	14.5	14.9	0.97	2.21	5.45
	(C)	No.1	7.65	7.10	1.08	15.6	14.4	1.08	2.04	4.95
		No.2	8.70	6.85	1.27	16.2	14.6	1.11	1.86	4.65
		No.3	8.70	6.60	1.31	16.45	14.5	1.13	1.89	4.35
DT	(L)	No.1	3.85	4.05	0.95	7.55	6.70	1.13	1.94	2.60
		No.2	3.20	4.05	0.79	6.75	6.70	1.01	2.10	2.60
		No.3	3.35	4.05	0.83	7.20	6.70	1.07	2.16	2.60
	(C)	No.1	3.20	3.70	0.86	7.30	6.40	1.14	2.27	2.10
		No.2	3.35	3.70	0.90	7.55	6.40	1.18	2.26	2.10
		No.3	3.85	3.70	1.03	7.85	6.40	1.23	2.03	2.10

表—8



写真—3 スパン中央コンクリートの圧壊 (RB型)



写真—4 スパン中央コンクリートの圧壊 (TB型)

それおよそ1.2倍, 1.5倍, 2.0倍ほどセイライトの方が密度が高いことがわかる。

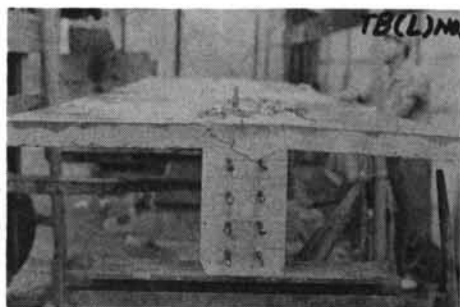
試験体の曲げ変形は $-1/\rho = -M/EI = \sigma t/Eh_2$ で表わすことができ, 前述のひびわれの傾向と中立軸から引張端までの距離 h_2 または変形 $-1/\rho$ との間に相関関係が存在することが考えられる。

一方ひびわれの要因としてはコンクリートの曲げ強度と付着強度が考えられるが, 上述の事実からひびわれ密度の相違は曲げ強度に原因するといえる。

(7) Mb/Mcr の実験値はセイライトコンクリートで2~2.5, 普通コンクリートで1.9~2.3である。

セイライトコンクリートはひびわれは早いけれども, 破壊に至るまでの余力は期待できる。

なお, TB型のNo.2(12t), No.3(18t)ではフランジ下面の圧縮ひずみが最大るとき Stem に沿ってフランジ



写真—5 フランジのステムからの分離破壊 (TB型)

が分離したが、荷重は中央断面付近の圧縮側コンクリートが Crush するまで増大した。(写真-5)

(1) 試験体は両端支持であるから、梁の振動エネルギー損失はコンクリートの内部固体摩擦ないしは粘性抵抗

3.5 振動試験

自由振動試験から固有振動数および振幅—減衰特性がわかった。

後者を図-6に示す。

自由振動記録の一部を写真-7に示す。

強制振動試験からは振動数—振幅特性と減衰常数 H 、

$$H = \frac{\Delta}{2\pi\sqrt{1+(\Delta/2\pi)^2}} \quad (\Delta \text{ は対数減衰率})$$

がわかった。

減衰常数の値は共振時の振幅と共に写真-6に示してある。

振動試験に関する各種のデータの比較を、表-9に示す。

つぎに試験結果について述べる。

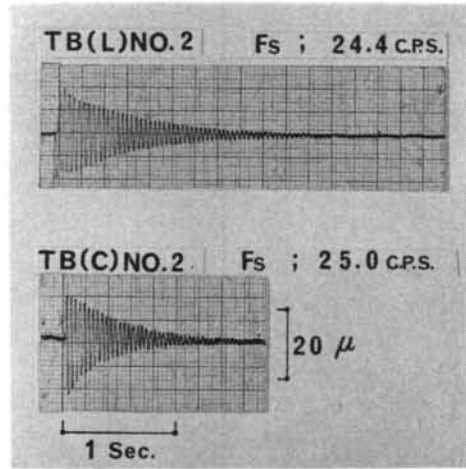
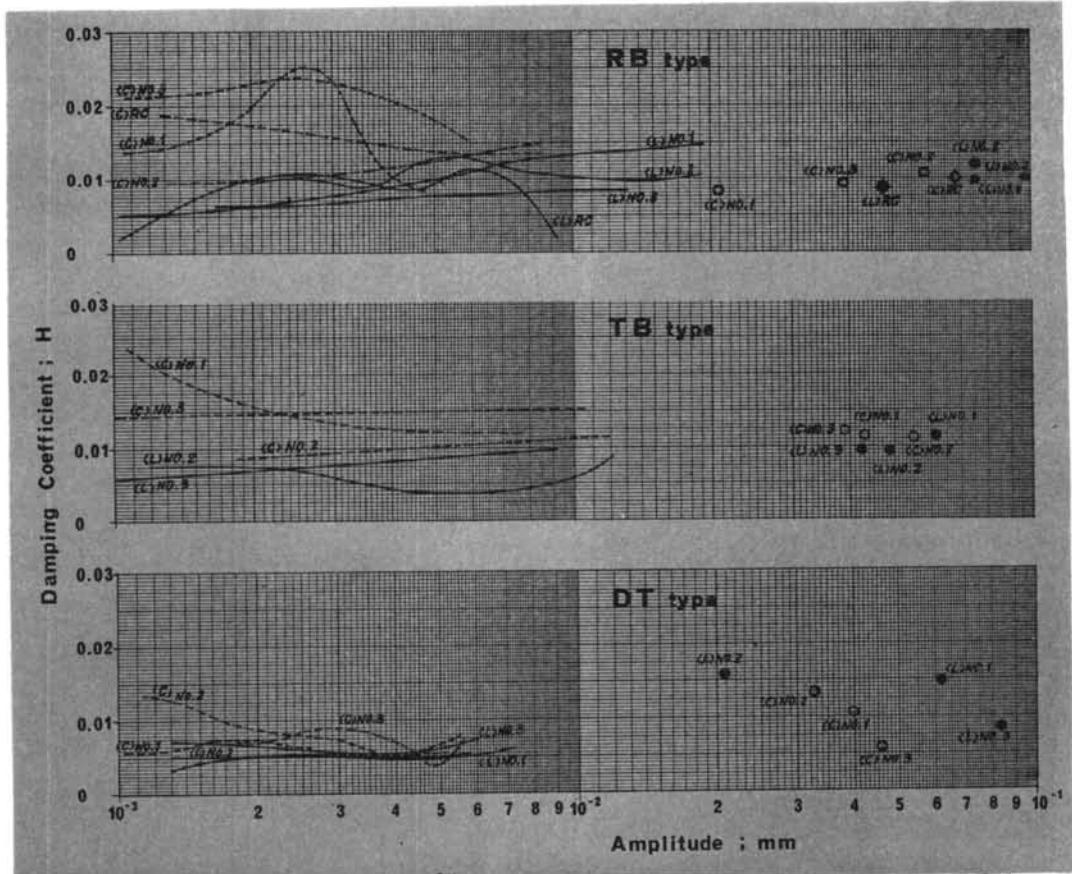


写真-7 自由振動記録



注) 実線はセライトコンクリート、点線は普通コンクリートを示す。
●, ○はセライト、普通をそれぞれ示し、強制振動試験から求めた値である。

写真-6 振幅—減衰特性

試験体	材令 (日)	比重 γ	圧縮強度 (kg/cm^2)	弾性係数 E_d	10^4kg/cm^2 E_s	E_d/E_s	振動数 f_s (c.p.s.)	E_d' $10^4(\text{kg/cm}^2)$	E_d/ρ $10^{11}(\text{cm}^2/\text{sec}^2)$	E_d'/ρ $10^{11}(\text{cm}^2/\text{sec}^2)$	
RB	No.1 (L)	28	1.88	597	2.36	2.26	1.03	21.9	2.33	1.23	1.20
	No.2	28	1.88	625	2.57	2.19	1.17	21.7	2.28	1.34	1.19
	No.3	28	1.88	625	2.57	2.19	1.17	21.8	2.31	1.34	1.21
	No.1 (C)	37	2.39	554	3.66	2.86	1.28	23.1	3.29	1.50	1.35
	No.2	33	2.42	631	3.93	3.05	1.29	23.2	3.32	1.59	1.36
	No.3	33	2.42	631	3.93	3.05	1.29	23.8	3.54	1.59	1.43
TB	No.1 (L)	33	1.88	620	2.47	2.21	1.12	—	—	1.28	—
	No.2	38	1.90	626	2.63	2.26	1.16	24.4	2.82	1.35	1.45
	No.3	38	1.90	626	2.63	2.26	1.16	24.7	2.72	1.35	1.40
	No.1 (C)	32	2.42	637	3.96	3.07	1.29	25.5	3.75	1.61	1.52
	No.2	40	2.39	471	3.73	2.95	1.26	25.0	3.73	1.53	1.53
	No.3	40	2.39	471	3.73	2.95	1.26	23.8	3.18	1.53	1.30
DT	No.1 (L)	28	1.88	634	2.49	2.26	1.10	15.7	3.21	1.29	1.68
	No.2	28	1.88	634	2.49	2.26	1.10	15.1	2.97	1.29	1.59
	No.3	28	1.88	634	2.49	2.26	1.10	15.2	3.01	1.29	1.57
	No.1 (C)	28	2.39	514	3.60	3.00	1.20	15.8	4.13	1.48	1.70
	No.2	28	2.39	514	3.60	3.00	1.20	15.3	3.87	1.48	1.59
	No.3	28	2.39	514	3.60	3.00	1.20	15.8	4.13	1.48	1.70
RB	(L) RC	35	1.82	461	2.70	2.13	1.27	22.1	2.29	1.45	1.23
	(C) RC	28	2.42	485	3.71	2.94	1.26	25.0	3.90	1.50	1.58

注) (1) E_d, E_s ; 材料試験で求めた動弾性係数及び静弾性係数 ($1/3$ のセカントモデュラス)
(2) E_d' ; 部材の振動試験から得た f_s より算出した動弾性係数

表—9 材料試験及び振動試験測定結果

(Internal Damping)が大部分を占めると考えてよい。

この量は変位振幅 10μ (曲げ撓度 4×10^{-6}) 以内で減衰常数にして、

$$H=0.005\sim 0.02$$

であった。

- (2) 振幅に対する減衰の関係は、変位振幅が小さいためかならずしも断言し難いが、今回の実験範囲では大体一定であるといえる。

この点は変位振幅を大きくして実験する必要がある。

自由減衰振動と強制振動から求めた減衰常数はDT型以外はほぼ一致した (DT型ではセイライトコンクリートの強制振動の値がやや高い)。

- (3) 減衰常数は振動数の高いTB型で大きく、振動数の低いDT型で小さい傾向にあり、速度振幅またはコンクリートのひずみ速度が関係しているかもしれない。
(4) プレストレスの有無による効果はみられなかった。この点はポストテンションによって検討する余地がある⁶⁾。
(5) コンクリートの動的および静的ヤング係数比 E_d/E_s はセイライトコンクリートの方が小さい。

また密度に対する動弾性係数の比 E_d/ρ は材料試験ではセイライトコンクリートの方が小さいが、曲げ振動の実測値から算出したものはセイライトコンクリートが普通コンクリートに接近している。

なおHの値に差がない場合、 E_d/ρ が小さいと振動数が低くて変位振幅が大きくなり、動的挙動として好ましくない場合が生ずる。

- (6) DT型では E_d/ρ の実測値が材料試験の値よりもかなり大きく、またセイライトコンクリートと普通コンクリートの差はほとんどない。

この原因は明らかでない。

§ 4. 結 論

- (1) プレテンション方式におけるプレストレス導入量はセイライトコンクリートは普通コンクリートに比べやや少なく、今回の実験では前者は後者の91%~95%程度であった。
(2) プレテンション方式における緊張力のコンクリートへの伝達機構、付着性、伝達長さについては、セイラ

イトコンクリートと普通コンクリートの差はない。

- (3) プレストレス導入による部材の反りは材令に伴って増加し、導入後4、5日頃に測定誤差内で停止する。

この傾向はセライトコンクリートも普通コンクリートも変わらない。

- (4) 設計荷重内における部材の曲げ載荷による変形はセライトコンクリート、普通コンクリート共に弾性的であり、弾性計算値とよく一致する。

- (5) 曲げ載荷による部材の曲げ破壊はセライトコンクリート、普通コンクリート共にスパン中央の圧縮側コンクリートの圧壊であり、計算値と大体一致する。

また緊張材の Slip はすべての部材で生じなかった。

- (6) 曲げ載荷による部材のひびわれは、セライトコンクリートの方が普通コンクリートに比べて早く発生し、また密に生ずる。

これはセライトコンクリートが普通コンクリートに比べ、曲げ強度が低いためと考えられる。

- (7) ひびわれモーメントに対する破壊モーメントの比 M_b/M_{cr} は、セライトコンクリートで2~2.5、普通コンクリートで1.9~2.3であった。

したがってセライトコンクリートは普通コンクリートに対しひびわれは早い破壊に至るまでの余力は期待できるといえる。

- (8) 動的挙動を表わす Factor としての E_a/ρ (密度に対する動弾性係数の比) はセライトコンクリートが普通コンクリートに比べ、やや低い。

- (9) 材料の持つ Internal Damping についてはセライトコンクリートと普通コンクリートの差はない。

§ 5. 問題点

ここでは § 3. の実験結果と解析について若干補足し、また問題点を上げる。

プレテンション部材の場合の導入プレストレスにおよぼす弾性変形の影響は、次のようにして求めることができる。

P ; 緊張力

P_{so}, P_{co} ; 弾性変形後の緊張材応力およびコンクリート応力 (いずれも合力)

ΔP ; 弾性変形による緊張力の変化量 (緊張力損失)

E_s, E_c ; 緊張材およびコンクリートのヤング係数

A_s, A_c ; 緊張材およびコンクリートの断面積

n ; E_s/E_c (ヤング係数比)

p ; A_s/A_c (断面積比)

e ; 緊張材の偏心距離

I_c ; コンクリート断面2次モーメント

とおけば、ストレス導入後の力の釣合と緊張材位置におけるひずみの適合条件はそれぞれ、

$$P_{so} = P + \Delta P,$$

$$P_{so} + P_{co} = 0,$$

$$\frac{\Delta P}{E_s A_s} = \frac{P_{co}}{E_c A_c} \left(1 + \frac{e^2 A_c}{I_c} \right)$$

であるからこれを解いて、

$$P_{so} = \frac{P}{1 + np \left(1 + \frac{e^2 A_c}{I_c} \right)}, \quad P_{co} = -P_{so} \dots \dots \dots (1)$$

$$\Delta P = \frac{-np \left(1 + \frac{e^2 A_c}{I_c} \right) P}{1 + np \left(1 + \frac{e^2 A_c}{I_c} \right)} \dots \dots \dots (2)$$

$np(1 + e^2 A_c / I_c)$ の項は一般に1に比べて小さいから、そのような場合は設計上、 $\Delta P \approx -np(1 + e^2 A_c / I_c) \cdot P$ とおくと安全側になる。

これは緊張力損失によるコンクリートの弾性復元ひずみを無視した場合に相当する。

コンクリートの塑性ひずみによるプレストレスの変化を表わす式を次に誘導してみよう。

ϕt ; クリーブ係数

φ_t, φ_n ; クリーブ係数およびその最終値(硬化収縮)

S_n ; コンクリートの硬化収縮ひずみ最終値

t, t_0 ; 材令を表わすパラメータおよびプレストレス導入時材令

$\varepsilon_p(t)$; コンクリートの塑性ひずみ

$\varepsilon_s(t)$; 緊張材の弾性ひずみ (緊張材の Relaxation は考慮しない)

$\varepsilon_c(t)$; コンクリートの弾性復元ひずみ

$E_c(t), E_{co}$; コンクリートのヤング係数およびその初期値

ε_{co} ; 導入プレストレスによるコンクリートの中立面における弾性ひずみ (すなわち $\varepsilon_{co} = P_{co} / E_{co} A_c$)

とおけば、

$t = t$ における緊張材合力位置の塑性ひずみの微分 $d\varepsilon_p(t)$ は、

$$d\varepsilon_p(t) = \varepsilon_{co} \left(1 + \frac{e^2 A_c}{I_c} \right) \frac{d\phi_{t1}}{dt_1} dt - \frac{S_n}{\varphi_n} \frac{d\varphi_t}{dt} dt, \quad t_1 = t - t_0 \dots \dots \dots (3)$$

また緊張材のプレストレス変化 $\Delta P(t)$ によって生ずる緊張材合力位置におけるコンクリートの弾性復元ひずみの微分 $d\varepsilon_c(t)$ は、

$$d\epsilon_e(t) = \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\Delta P(t)}{E_c(t)A_c} \left(1 + \frac{e^2 A_c}{I_c} \right) \right\} dt$$

$$= \left(1 + \frac{e^2 A_c}{I_c} \right) \frac{1}{E_c(t)A_c} \left(\frac{d\Delta P(t)}{dt} - \frac{\Delta P(t)}{E_c(t)} \frac{dE_c(t)}{dt} \right) \cdot dt \dots \dots \dots (4)$$

$\Delta P(t)$ による緊張材の弾性ひずみの微分 $d\epsilon_s(t)$ は、

$$d\epsilon_s(t) = \frac{1}{E_s A_s} \frac{d\Delta P(t)}{dt} dt \dots \dots \dots (5)$$

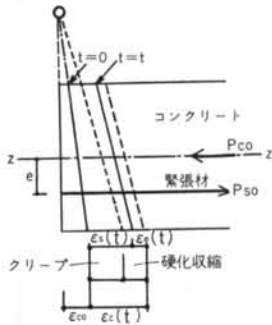


図-11

適合条件は (図-11 参照),

$$d\epsilon_s(t) + d\epsilon_e(t) = d\epsilon_p(t) \dots \dots \dots (6)$$

(3), (4), (5)を(6)に代入して,

$$n_0 = \frac{E_s}{E_{co}}$$

$$E_c(t) = E_{co} \psi_t$$

とおけば t に関する $\Delta P(t)$ の次の1階常微

分方程式を得る.

$$\frac{d\Delta P(t)}{dt} - \frac{\left(1 + \frac{e^2 A_c}{I_c} \right) n_0 \rho}{\psi_t + \left(1 + \frac{e^2 A_c}{I_c} \right) n_0 \rho} \frac{d\psi_t}{dt} \Delta P(t)$$

$$= \frac{n_0 \rho P_{co} \psi_t}{\psi_t + \left(1 + \frac{e^2 A_c}{I_c} \right) n_0 \rho} \left\{ \left(1 + \frac{e^2 A_c}{I_c} \right) \frac{d\phi_{t1}}{dt} - \frac{S_n}{\varphi_n \epsilon_{co}} \frac{d\varphi_t}{dt} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

$\Delta P(t)$ の係数および右辺の積分が容易であるように ϕ_{t1} , φ_t を与えればこの式の一般解は求まる.

$E_c(t) = E_{co}(\psi_t = 1)$ の場合(7)の一般解は、

$$\Delta P(t) = \frac{n_0 \rho P_{co}}{1 + \left(1 + \frac{e^2 A_c}{I_c} \right) n_0 \rho} \left\{ \left(1 + \frac{e^2 A_c}{I_c} \right) \phi_{t1} - \frac{S_n}{\varphi_n \epsilon_{co}} (\varphi_t - \varphi_{t0}) \right\} \dots \dots \dots (8)$$

したがってコンクリートおよび緊張材それぞれの合力は、

$$P_c(t) = P_{co} - \Delta P(t),$$

$$P_s(t) = P_{s0} + \Delta P(t)$$

より求めることができる.

$$\epsilon_0 = 0.8 \sigma_{sy} / E_s, S_n = 3.75 \times 10^{-4}, t_0 = 0, \phi_n = \varphi_n = 3.0$$

とて DT 型について(2), (8)を計算した結果を図-12に示す.

これは PC 設計施工規準に基づいており、クリープによる prestress 損失はかなり多い.

セライトコンクリートに関する文献(9)の実験値を用いて塑性ひずみによる prestress 損失を計算すると図

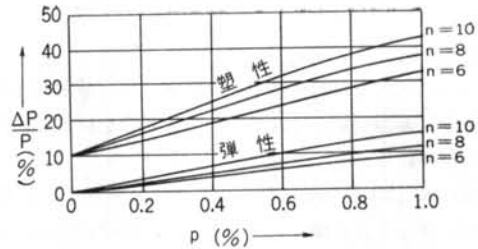
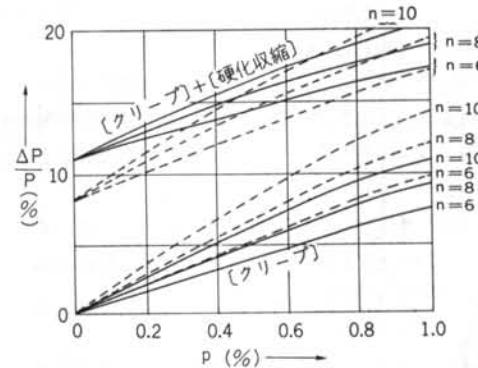


図-12 DT型における導入プレストレスの弾性損失と塑性損失



実線はセライトコンクリート；
点線は普通コンクリート (碎石)

図-13 クリープ実験値による塑性ひずみの prestress 損失 (DT型)

13のようになる.

クリープ係数最終値 φ_n はセライトおよび普通 (碎石) でそれぞれ 1.048×1.265 であり、硬化収縮量 S_n (乾燥養生) はそれぞれ $4.695 \cdot 10^{-4}$, 3.469×10^{-4} である.

図-13によれば、 ρ が 0.4% 前後 (DT 型の場合) ではセライトで 15% 程度の prestress 損失が考えられる.

またセライト、普通 (碎石) が同程度になるのは ρ が 0.6% 以上であり、これはダブル T スラブとしては緊張材量が多い方である.

図-13ではクリープよりも硬化収縮による損失の方が多し.

コンクリートの材料試験結果によれば比重に対する静弾性係数 ($1/3$ の Secant Modulus) の比はセライトコンクリートで 1.17~1.20、普通コンクリートで 1.20~1.27 (単位 10^6kg/cm^2) であり、軽量の方が小さい.

したがって設計荷重に自重の占める割合の多い長大スパン構造物では軽量の場合のたわみが問題となることが予想され、動的な場合 (表-9 の Ed'/ρ を参照) の振動の変位振幅についても同様である.

しかしながらこれはコンクリート断面の成を少し増や

すことによって変形は少なく押えることができる（自重の増加比に対して3乗のOrderで減らせる）。

また建築部材では部材重量を軽減することが大きな利点であり、弾性係数の大小はたわみを考慮せねばならない場合以外はあまり問題でない。

400kg/cm²以上の高強度軽量コンクリートでは、強度の増加に伴う比重の増大ということと、強度の伸びに対する弾性係数の伸びが少ないことが今回の実験から考えられる問題点であるが、筆者は先に述べた理由によりE/pの多少は高強度軽量コンクリートにとって大きな欠点であるとは思わない。

この実験では曲げに対する軽量および普通コンクリートの相違がわかったが、せん断耐力とせん断破壊の検討、長期のクリープ特性^{5) 8) 9)}が残された大きな問題といえる。

図一6に表わした振幅一減衰特性のグラフは、振動記録からの読みとり精度を顧慮すると縦座標が必要以上に拡大されており、振幅に関して減衰常数はほぼ一定であるとしても過言ではない。

文献(6)にはプレストレストコンクリート桁の振動について実験および実測したデータがでている。

この実験（断面10×15cm、全長410cmのポストテンション桁、両端支持）ではグラウティング、プレストレッシングおよびコンクリート圧縮強度を水準にとって振幅一減衰特性を調べており、変位振幅と対数減衰率の間の相関関係がよく表わされている。

すなわち変位振幅の増大に対して対数減衰率は増加する。

この場合の[変位振幅/スパン]はおおよそ10⁻³~10⁻⁵のOrderであり、一方筆者の実験では10⁻⁵~10⁻⁷であった。

Holand-Hansen⁹⁾が上述の実験で得た対数減衰率 λ を減衰常数Hに換算すると0.003~0.01である。（振動数は2~11Cyclesであると思われる。これに対し筆者の

実験では15~25Cyclesである）。

なおHoland-Hansenの実験では振動数が2~11Cyclesでは減衰は振動数に依存しないこと、コンクリートの立方体強度が増加すると減衰も大きくなること、グラウトすることによって減衰が大きくなること、プレストレスが減少すると減衰は大きくなること、等が指摘されている。それゆえ動的挙動を検討するにはポストテンション方式の部材が適している。

§6. おわりに

この実験は、セイライトコンクリート需要開拓のための高強度コンクリートの構造部材に関する技術資料を得るのが目的であると同時に、今日ではすう勢となりつつある人工軽量骨材による（プレストレスト）コンクリート部材の軽量化に対して一資料を提供しようとしたものである。

実験計画は昭和41年1月、セイライトコンクリート研究分科会にて検討され、5月下旬~6月中旬に試験体製作、7月上旬より約10日間かけて本実験を行なった。

実験はすべてピー・エス・コンクリートK.K.鴨宮工場で実施した。

実験企画はセイライトコンクリート研究分科会；
清水建設……………近藤芳美，高橋和男，磯畑 脩
ピー・エス・コンクリート…勅使河原政雄
三菱セメント……………安西 衛，鈴木 昇，横山 武
三菱鉱業……………石田 巖
が行ない，本実験は清水建設研究所が担当した。

末筆ながら、コンクリート配合設計をして頂いた鈴木昇氏、試験体の製作および実験に御助力くださったピー・エス・コンクリート荘田信彦氏、村田茂氏、松尾睦氏（鴨宮工場）および関係者に心から謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 町田富士夫，宮坂慶男：“軽量コンクリート鉄道橋，東北本線金山架道橋の設計施工について”プレストレストコンクリート Vol. 7, No. 3 (1965)
- 2) 村田二郎他：“高強度軽量骨材コンクリート”山海堂 (1966)
- 3) 奥島正一，小坂義夫：“人工軽量骨材コンクリートの力学的性質”材料，Vol. 15, No. 157 (1966)
- 4) “プレストレストコンクリート” Vol. 6, No. 3 (1964)
- 5) J. J. Shideler：“Lightweight-Aggregate Concrete for Structural Use” Journal of ACI, Oct. 1957
- 6) Ivar Holand, Erik Hjorth-Hansen：“Dempning av Svingninger i Spennbetong” Nordisk Betong 1965 : 3
- 7) 岡田清，神山一：“プレストレストコンクリートの設計”オーム社 (1966)
- 8) 西林新蔵：“人工軽量骨材コンクリートの乾燥収縮およびクリープ”材料，Vol. 15, No. 157 (1966)
- 9) 鈴木昇他2：“軽量骨材「セイライト」によるPC部材用コンクリートのクリープ試験（その1，その2）：三菱セメント技術研究所月報，6月，12月 (1966)