

論文 石炭灰高強度人工軽量骨材を用いた RC 床スラブの長期たわみに関する実験的研究

長谷川 はる香^{*1}・松崎 育弘^{*2}・中野 克彦^{*3}・石川 嘉崇^{*4}

要旨：地球環境保全に関する社会的要請が高まる中，天然骨材に替わる骨材の必要性和，火力発電所から排出される石炭灰の有効利用の必要性を受け，著者等は「石炭灰を主原料とした高強度人工軽量骨材」を用いたコンクリートの構造材料としての利用を目指した研究開発を進めている。これまでに，梁・柱部材へ適用した際の構造性能評価結果を示した。本稿では，本骨材を用いた床スラブの長期たわみ性状を把握するため，長期載荷実験及び短期載荷実験を実施し，その結果，本床スラブは普通コンクリート床スラブに比べて長期たわみが抑えられること，長期載荷が短期載荷における構造性能に影響を与えないことを明らかにした。
キーワード：石炭灰，床スラブ，弾性たわみ，長期たわみ，クリープ係数

1. はじめに

近年，地球環境保全に関する社会的要請の高まりから，各分野において産業廃棄物の積極的な利用が責務となっている。そのような中，建築分野においては天然骨材の採取に伴う環境破壊が著しく，天然骨材に替わる骨材の開発が求められている。一方，火力発電所から排出される石炭灰のうち，2割にあたる年間約140万トンが未だ産業廃棄物として埋め立て処分されており，新たな有効利用法が必要とされている。このような現状を受け，「石炭灰を主原料とした高強度人工軽量骨材（以下 TL 骨材）」を用いたコンクリート（以下 TL）の構造用材料としての利用を目指して開発を行っている。これまでに梁・柱部材に用いた場合の実験¹⁾を行い，普通強度及び高強度において天然骨材（以下 NA 骨材）を用いた場合と同等の構造性能が得られることを示した。

本稿では TL 床スラブの長期載荷実験を行い，普通コンクリート（以下 RC）を用いた既往の床スラブ実験²⁾と比較することで，TL 床スラブの長期たわみ性状を把握し，さらに長期載荷実験後に短期載荷実験を行うことで長期たわみが床スラブの破壊性状，変形性状，耐力，剛性に与える影響について把握することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 骨材の特性

表 - 1 に使用骨材の性質を示す。TL 骨材は石炭灰を造粒・焼成した粗骨材で，球形である。また，NA 骨材と同等の骨材強度を有し³⁾，密度は 1.9g/cm³ で NA 骨材に比べ 30%ほど小さく，

表 - 1 使用骨材の性質

種別	種類	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実績率 (%)
S:細骨材	陸砂	2.70	1.66	63.9
G:粗骨材	TL骨材	粒径15~10mm	1.92	2.49
		粒径10~5mm	1.93	1.48
	NA骨材(碎石)	粒径20~5mm	2.72	0.83

表 - 2 コンクリートの調合及びフレッシュコンクリートの性質

コンクリート	骨材種類	W/C (%)	s/a (%)	ブレンド比 (15-10:10-5)	単位量(kg/m ³)				混和剤	スラブ (cm)	空気量 (%)
					W:水	C:セメント	S:細骨材	G:粗骨材			
TL	TL	54	46	45:55	175	324	835	699	C×0.25%	19.5	6.2
RC	NA	50	45	-	185	369	787	969	C×0.25%	17.5	5.3

- *1 東京理科大学 工学研究科建築学専攻 (正会員)
- *2 東京理科大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)
- *3 新潟工科大学 工学部建築学科助教授 博士(工学) (正会員)
- *4 電源開発(株) 茅ヶ崎研究センター 博士(工学) (正会員)

吸水率は、粒径 15～10mm が 2.5%、10～5mm が 1.5% で一般の人工軽量骨材に比べ低いなどの特徴を有している。

2.2 コンクリートの材料特性

表 - 2 にコンクリートの調合及びフレッシュコンクリートの性質、表 - 3 にコンクリート材料試験結果を示す。TL は高強度コンクリートとすることも可能であり、また単位容積重量が TL で 19.5～19.8kN/m³、RC で 22.5～22.8kN/m³ であり、材齢に関わらず TL は RC に比べ 15% ほど軽く、部材の軽量化が可能である。また、骨材が球形であるため流動性が高く、所要の性能を得るための単位水量が低減できるので乾燥収縮が小さく抑えられるなどの特徴を有している。

2.3 試験体

表 - 4 に鉄筋材料試験結果、表 - 5 に PC 鋼より線性質、表 - 6 に試験体一覧を、図 - 1 に試験体形状及び配筋図を示す。試験体はコンクリートに TL 及び RC を用いた鉄筋コンクリート床スラブで、どちらもコンクリート設計基準強度を $F_c=36\text{N/mm}^2$ とし、TL 試験体 4 体、RC 試験体 1 体の総計 5 体とした。試験体寸法はスラブ幅 600mm、試験区間 4100mm、スラブ厚 220mm とし、主筋には D13(SD295)を用い、引張鉄筋比 $p_t=0.35\%$ とした。ただし、プレ

ストレスを導入する No.4 については他の試験体と想定した弾性たわみがほぼ等しくなるように、スラブ厚を 180mm とし、主筋に D10(SD295)を用い、引張鉄筋比 $p_t=0.25\%$ とした。なお有効プレストレス力は 110kN で、プレストレス導入は長期積載荷重前に行った。

2.4 実験方法

No.1, 2, 4, 5 の試験体は約 500 日間の長期載荷実験の後、積載荷重を除荷し、除荷後約 15 日で短期載荷実験を行った。No.3 の試験体は長期載荷する

ことなく、短期載荷実験のみを行った。以下に各実験方法について述べる。

(1) 長期載荷実験

表 - 7 に長期載荷状況を示す。約 30 日間自重による載荷を行った後、No.2, 4, 5 には積載荷重が住宅の常時荷重を想定した 1.80kN/m² となるよう鉄筋棒を等分布に並べて約 500 日間載荷を行い、No.1 は引き続き自重のみによる載荷を、他の試験体同様約 500 日間行った。たわみ量の

表 - 3 コンクリート材料試験結果

No.	試験体名	材齢	圧縮強度 (N/mm ²)	引張割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 × 10 ⁴ (N/mm ²)	単位容積重量 (kN/m ³)
1	TL-1	28日	36.2	2.21	2.49	19.8
		積載時	41.4	2.11	2.44	19.8
		540日	46.0	-	2.58	19.6
2	TL-2	28日	35.8	2.14	2.47	19.8
		積載時	41.9	2.62	2.56	19.8
		540日	49.1	-	2.69	19.6
3	TL-3	28日	35.2	1.91	2.52	19.8
		短期実験時	44.9	1.96	2.61	19.8
		540日	46.1	-	2.58	19.5
4	TLP	28日	35.9	1.92	2.59	19.5
		積載時	40.7	2.46	2.50	19.6
		540日	46.9	-	2.66	19.5
5	RC	28日	38.4	2.07	2.74	22.8
		積載時	43.2	1.97	2.79	22.7
		540日	46.0	-	3.32	22.5

表 - 4 鉄筋材料試験結果

材種(材質)	降伏強度 (N/mm ²)	降伏歪み (μ)	ヤング係数 × 10 ⁵ (N/mm ²)
D10(SD295)	373	2088	1.79
D13(SD295)	361	1925	1.88

表 - 5 PC 鋼より線性質

種類	呼び径 (mm)	引張強さ (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	リラクゼーション (%)
7本より線B種	15.2	1881	1600	2.5以下

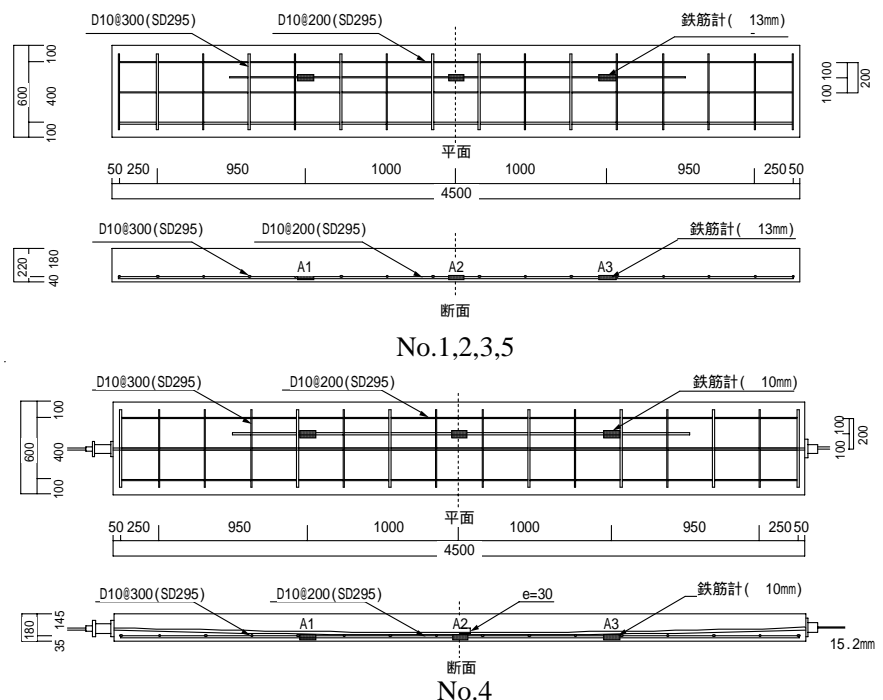


図 - 1 試験体形状及び配筋図

表 - 6 試験体一覧

No.	試験体名	コンクリート 設計基準強度 (N/mm ²)	スラブ厚 (mm)	スラブ幅 (mm)	試験区間 (mm)	主筋		配力筋		引張 鉄筋比 (%)	PC導入	実験形式*	長期載荷 条件
						材質	配筋	材質	配筋				
1	TL-1	36	220	600	4100	SD295	D13@200	SD295	D10@300	0.35	なし	L+S	自重
2	TL-2		220							0.35	なし	L+S	自重+積載
3	TL-3		220							0.35	なし	S	-
4	TLP		180							0.25	あり	L+S	自重+積載
5	RC		220							0.35	なし	L+S	自重+積載

*L：長期載荷実験 S：短期載荷実験

測定は試験区間中央で行った。

(2) 短期載荷実験

図 - 2 に加力装置図を示す。加力は試験区間 3 等分点における 2 点集中載荷 単純梁形式とし、一方向繰返し載荷を行った。加力の制御は試験体中央で計測した変位で行った。また、加力サイクルは表 - 8 に示す通りとした。

(3) 振動実験

長期載荷による劣化の程度を把握し、その劣化が構造性能に与える影響を確認するため、長期載荷実験の前後及び短期載荷実験各サイクルの除荷時にハンマーによる衝撃を与え、ひずみ型加速度計により固有振動数(f_0)を測定した。

表 - 7 長期載荷状況

No.	試験体名	長期載荷状況	備考
1	TL-1	W_{DL}	$W_{DL}=4.44\text{kN/m}^2$ $W_{LL}=0.00\text{kN/m}^2$
2	TL-2	W_{DL} $W_{DL}+W_{LL}$	$W_{DL}=4.44\text{kN/m}^2$ $W_{LL}=1.80\text{kN/m}^2$
3	TL-3	-	長期載荷実験を行わない
4	TLP	W_{DL} $W_{DL}+W_{LL}$	$W_{DL}=3.56\text{kN/m}^2$ $W_{LL}=1.80\text{kN/m}^2$ 積載荷重載荷前にプレストレスを導入
5	RC	W_{DL} $W_{DL}+W_{LL}$	$W_{DL}=5.02\text{kN/m}^2$ $W_{LL}=1.80\text{kN/m}^2$

W_{DL} : スラブ自重 W_{LL} : 積載荷重

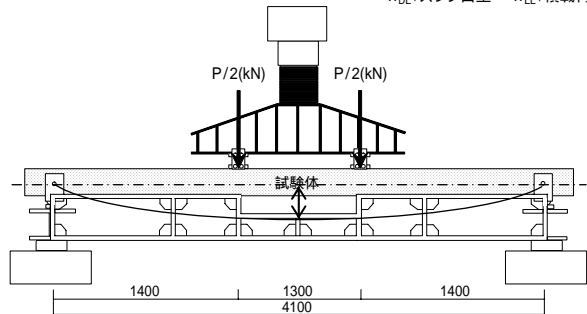


図 - 2 加力装置図 単位：mm

3. 実験結果・検討

3.1 長期載荷実験

表 - 9 に長期載荷実験結果及び計算値一覧を示す。弾性たわみは弾性剛性計算により、長期たわみは RC 規準⁴⁾による計算手法を用いた。なお、積載荷重除荷時のたわみ変化量の計算には材齢 540 日のコンクリート強度を用いた。

(1) ひび割れ状況

積載荷重を載荷した No.2, No.5 は載荷ののちにひび割れが発生した。図 - 3 に各試験体の長期載荷実験最終ひび割れ状況を示す。積載荷重の無い No.1 はひび割れがほとんど発生せず、プレストレスを導入した No.4 はプレストレスの効果によりひび割れの発生を抑えることができた。それに対し、積載荷重の有る No.2 と No.5 ではひび割れ発生耐力以下でひび割れが発生した。TL を用いた No.2 は RC を用いた No.5 に比べひび割れの本数が多く、一つ一つのひび割れ幅が小さく抑えられた。

表 - 8 加力サイクル

加力サイクル	+1	+2	+3	+4	+5	+6
中央部変位(mm)	$lx/100$	$lx/60$	$lx/30$	$lx/20$	$lx/15$	$lx/10$

lx : スラブ幅 600mm

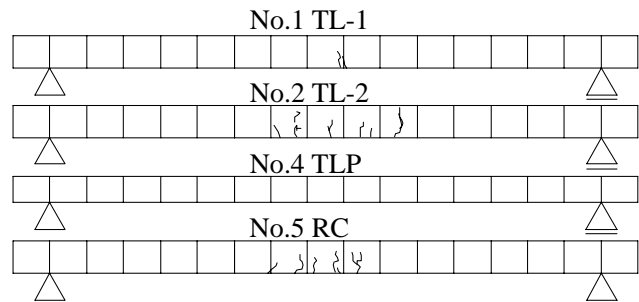


図 - 3 長期載荷実験最終ひび割れ状況

(2) 弾性たわみ

No.1 の弾性たわみは No.2 の自重によるたわみ量と同一であると考えられる。ここで No.2 (自重 $W_{DL}=4.44\text{kN/m}^2$, 積載荷重 $W_{LL}=1.80\text{kN/m}^2$) の積載荷重によるたわみが 0.35mm であり、自重と積載荷重の比が約 2.4 であることから、自重によるたわみは 0.85mm と推定できる。全ての試験体において実験値は計算値の 1.0~1.2 倍となり、ほぼ一致していたので、TL 床スラブの弾性たわ

表 - 9 長期載荷実験結果及び計算値一覧

No.	試験体名	たわみ実験値				たわみ計算値						
		弾性たわみ	長期たわみ	長期たわみ倍率	積載荷重除荷時のたわみ変化量	弾性たわみ	長期たわみ		長期たわみ倍率		積載荷重除荷時のたわみ変化量	
		e e (mm)	e (mm)	e / e e	(mm)	c e (mm)	c 1 (mm)	ひび割れ c 2 (mm)	c 弾性 1/c	ひび割れ c 2/c	e	
1	TL-1	0.85	4.79	5.65		0.74	3.19	11.9	4.31	16.0		
2	TL-2	1.20	6.06	5.06	0.36	1.00	4.22	14.4	4.22	14.4	0.28	
4	TLP	0.88	2.88	3.28	0.60	0.84	3.51	18.2	4.18	21.7	0.51	
5	RC	1.23	7.41	6.03	0.34	1.01	4.33	17.7	4.29	17.5	0.23	

・弾性たわみ実験値は、積載荷重除荷によるたわみ量 + 自重によるたわみ推定量である。
 ・長期たわみ計算値は RC 規準付録 7 により、弾性剛性及びひび割れ剛性を用いた計算値である。

みは RC 床スラブと同様に評価できるといえる。

(3) 長期たわみ

図 - 4 に積載荷重除荷後 500 日程度までの試験区間中央たわみ変化を示す。No.1,2,5 は載荷後 30 日程度まで急激にたわみが増大し、その後徐々に増加したのち、載荷後 360 日以降ほぼ一定となった。プレストレスを導入した No.4 は載荷後 90 日までたわみはほとんど変化しなかったが、その後徐々に増加し、他の試験体と同様に載荷後 360 日程度でほぼ一定となった。

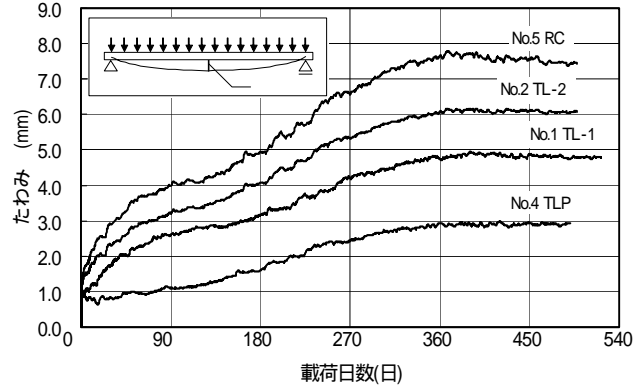


図 - 4 中央たわみ変化

最終的なたわみ量について各要因の比較を以下に述べる。プレストレス導入の有無で比較すると、導入した No.4 の最終的なたわみ量は、していない No.2 の半分ほどであり、プレストレスの効果によりたわみが抑制されていることが分かる。次にコンクリート種類の違いで比較すると、TL を用いた No.2 の最終的なたわみ量は RC を用いた No.5 の 8 割程度であることから TL 床スラブが RC 床スラブに比べ、長期たわみ量を抑制でき、有利であることが分かる。これは、TL の単位水量が小さく乾燥収縮が抑えられたことが影響していると考えられる。また、積載荷重の有無で比較すると、積載荷重の有る No.2 の最終的なたわみ量が、積載荷重の無い No.1 の 1.3 倍であり、荷重比とほぼ同等である。既往の RC 床スラブの研究²⁾においても荷重比と最終的なたわみ量の比がほぼ同等の比率であった。

(4) 長期たわみ評価

乾燥収縮による影響を含むみかけのクリープ係数について以下に述べる。図 - 5 にみかけのクリープ係数計算値比較を示す。みかけのクリープ係数は式(1)で実験値より求め、図中に示した計算値には学会 PC 規準⁵⁾及び CEB-FIP 指針⁶⁾

の規定を用いた。

$$= (e_t - e_e) / e_e \quad (1)$$

：みかけのクリープ係数

e_t : 載荷後 t 日の中央たわみ

e_e : 弾性たわみ実験値

最終的なみかけのクリープ係数は、プレストレスを導入した No.4 で実験値が学会 PC 規準計算値の 2.9 倍、CEB-FIP 指針計算値の 1.4 倍、また No.4 以外の試験体の実験値は、学会 PC 規準計算値の 1.5 ~ 1.8 倍、CEB-FIP 指針計算値の 2.5 ~ 3.2 倍となり全試験体とも適合性が良くない。

そこで実験値から評価式を求めることとした。評価式にはコンクリートのクリープ特性を表す式として用いられる式(2)のような形式を用いた。

$$C = t^D / (A + B \cdot t^D) \quad (2)$$

C : クリープ係数 t : 載荷日数(日)

A, B, D : 実験より得られる係数

実験における最終的なみかけのクリープ係数を、t = におけるクリープ係数と仮定して求めた係数 B は No.1 で 0.22、No.2 で 0.25、No.5 で 0.20 となった。最終的なクリープ係数の骨材による差は小さいことから、係数 B には 0.20 を用いることとした。係数 D はより簡単な評価式にするため、D=1 を用いた。これらの係数を用い、

実験結果から係数 A を決定した。骨材によるクリープ係数増加の差が小さいことから、係数 A の値を骨材によらず 20 とした。今回の評価式ではおおよその変化を評価できているが、みかけのクリープ係数には乾燥収縮の影響も含まれているため、今後更なる検討が必要である。

(5) 除荷時のたわみ

表 - 9 より、No.2 と No.5 の除荷時のたわみ変化量実験値は計算値に比べ 3~5 割程度大きく、長期荷重を受けている間に発生したひび割れにより剛性の低下が起こったと考えられる。

3.2 短期荷重実験

長期たわみが短期荷重時の構造性能に及ぼす影響を把握するために行った短期荷重実験について以下に述べる。表 - 10 に短期荷重実験結果及び計算値一覧を示す。計算には RC 規準による計算式を用いた。ただし、No.4 の曲げ降伏耐力については PRC 指針⁷⁾による計算手法を用いた。

(1) 破壊性状

いずれの試験体も加力点下に曲げひび割れが発生した後、試験体中央部にひび割れが入り始めた。その後主筋が降伏すると、加力点下に損傷が集中し、それまで 0.5~0.8mm 程度であった加力点下のひび割れ幅が 1.3~1.7mm へと急激に開いた。破壊性状に関して、長期荷重による影響は無いと言える。また TL と RC のコンクリート種類による明らかな違いも見られなかった。

(2) 変形性状

長期荷重の影響を見るため図 - 6 に No.1 と No.3 の P(荷重)- (変位)曲線比較を示す。No.1 は No.3 より曲げひび割れ発生耐力が高いが、これは材齢の経過によりコンクリート強度が上昇していることによるものである。No.1 は No.3 に比べ初期剛性が 2 割程度低いが、曲げひび割れ発生以降ほぼ同様の履歴を示しており、曲げひび割れ

発生以降の変形性状に長期荷重の影響は無いと言える。次に、コンクリート種類で比較するため図 - 7 に No.2 と No.5 の P- 曲線比較を示す。No.2 と No.5 の各サイクルの剛性は、ヤング係数の違いによる影響が見られずほぼ同等であり、ひび割れ発生耐力や曲げ降伏耐力も同等であることから、TL 床スラブは RC 床スラブと同様の変形性状を示すことが分かる。

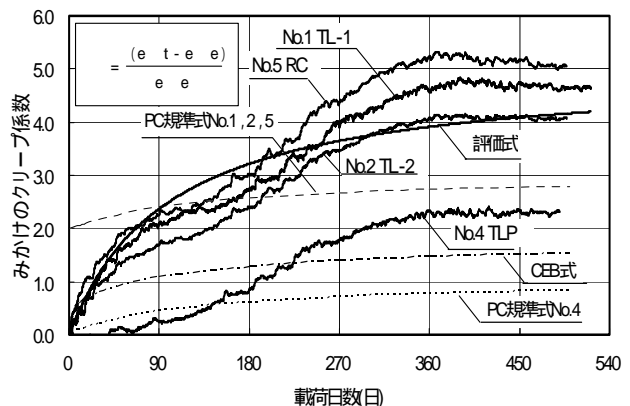


図 - 5 みかけのクリープ係数計算値比較

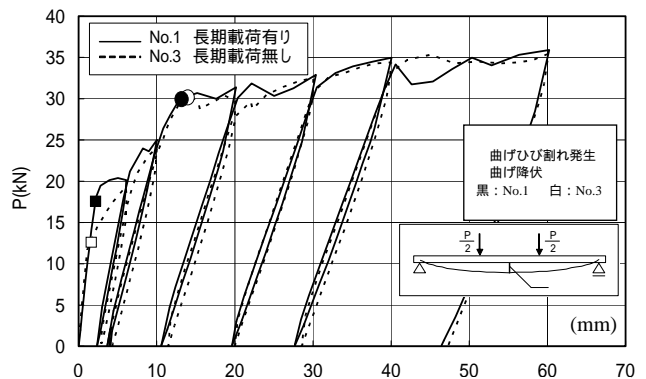


図 - 6 No.1 と No.3 の P- 曲線比較

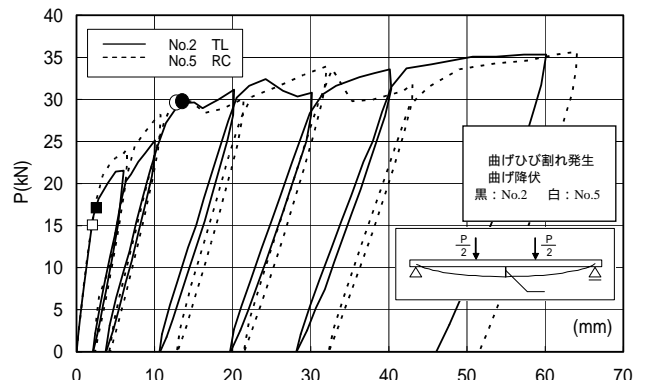


図 - 7 No.2 と No.5 の P- 曲線比較

表 - 10 短期荷重実験結果及び計算値一覧

No.	試験体名	曲げひび割れ発生				曲げ降伏				初期剛性		降伏時剛性	
		実験値		計算値		実験値		計算値		実験値	計算値	実験値	計算値
		P(kN)	(mm)	P(kN)	(mm)	P(kN)	(mm)	P(kN)	(mm)	(kN/mm)	(kN/mm)	(kN/mm)	(kN/mm)
1	TL-1	18.1	2.24	18.8	1.67	30.0	13.0	32.5	12.5	8.1	11.2	1.1	1.3
2	TL-2	16.2	2.19	19.7	1.68	29.5	13.2	32.5	12.5	7.4	11.7	1.2	1.2
3	TL-3	11.8	1.13	18.5	1.63	30.5	14.2	32.5	12.2	10.4	11.3	1.4	1.3
4	TLP	20.1	4.42	15.5	2.45	-	-	40.0	24.5	4.5	6.3	-	1.1
5	RC	15.1	1.95	17.2	1.19	30.1	12.6	32.5	10.2	7.7	14.4	1.4	1.7

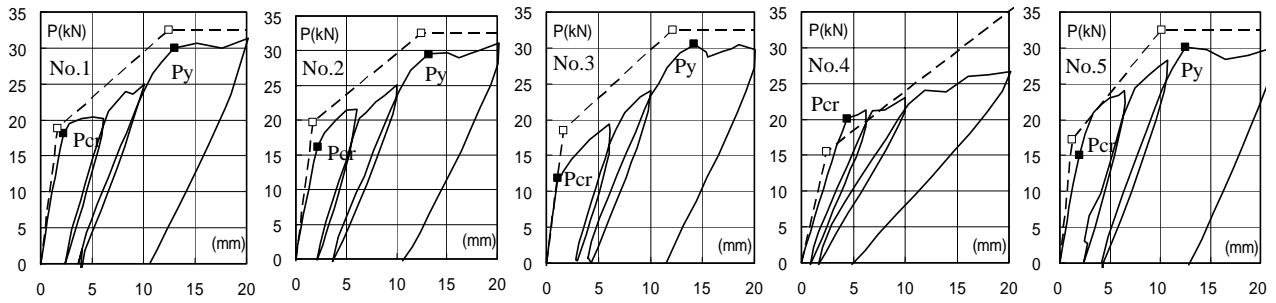


図 - 8 耐力・剛性計算値比較

Pcr: 曲げひび割れ発生 —■— 実験値
Py: 曲げ降伏 - - □ - - 計算値

(3) 耐力・剛性計算値比較

図 - 8 に耐力・剛性計算値比較を示す。曲げひび割れ発生耐力は、長期载荷した試験体で実験値が計算値の 0.8~1.3 倍となった。また、曲げ降伏耐力は全試験体とも、実験値が計算値の 9 割程度となった。初期剛性は長期载荷していない No.3 のみ計算値との適合性が良く、長期载荷を受けたがひび割れのほとんど発生しなかった No.1, 4 では計算値の 7 割、長期载荷を受けてひび割れが発生した No.2, 5 ではそれぞれ計算値の 6 割, 5 割となった。このことから長期载荷したものは初期剛性計算値を低減し、長期载荷によりひび割れが発生したものは、さらに初期剛性計算値を低減する必要があると考える。

3.3 振動実験

図 - 9 に固有振動数測定結果を示す。長期载荷前後の固有振動数変化を見ると、No.2, 5 は振動数がそれぞれ 0.63, 0.75Hz 低下し、No.4 は低下していないことから長期载荷によるひび割れ発生に伴う剛性低下が窺える。しかし、No.2, 5 の長期载荷前から短期载荷+1 サイクルにかけての振動数変化量は、長期载荷していない No.3 の短期载荷前から+1 サイクルにかけての変化量と同程度であることから、長期载荷による剛性の低下は短期载荷にほとんど影響しないと言える。

4. まとめ

- 1) TL 床スラブの载荷約 500 日間にわたる長期たわみ性状について、RC 床スラブと同等以上の性能を有することを以下のことから示した。
 - ・RC 床スラブ同様、たわみは载荷後 30 日までに急激に増加し、载荷後 360 日程度で安定する。
 - ・長期たわみが RC 床スラブの 8 割に抑えられる。

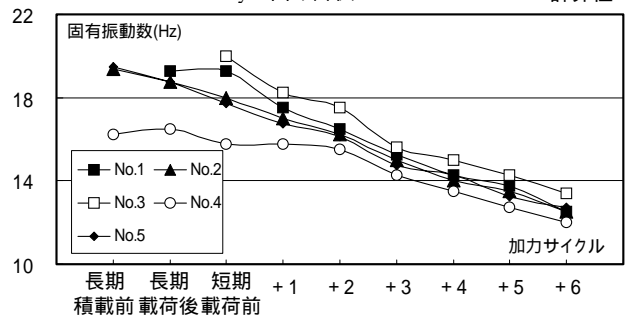


図 - 9 固有振動数測定結果

・積载荷重の有無による長期たわみ量の比率が RC 床スラブの場合の比率と同等である。

2) TL 床スラブの短期载荷時の破壊性状及び曲げひび割れ発生以降の変形性状に長期载荷による影響が現れないことを示した。

【謝辞】

実験にあたり、ドーピー建設工業株式会社のご協力を得ましたこと、深く御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 山口浩一郎, 石川嘉崇, 松崎育弘ほか: フライアッシュ高強度人工軽量骨材を用いた RC 部材の構造性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.3 - 8, 2002.8
- 2) 松崎育弘, 畑野肇, 田中久雄: 鉄筋コンクリート造床スラブの長期たわみに関する実験的研究, 鹿島建設技術研究所年報, 第 27 号, pp.63 - 68, 1979.6.15 および第 28 号, pp.107 - 114, 1980.7.10
- 3) 石川嘉崇ほか: フライアッシュを主原料とした人工軽量骨材の高強度コンクリートへの適用に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, pp.1 - 8, 第 554 号, 2002.4
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999
- 5) 日本建築学会: プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 1998
- 6) CEB - FIP Model Code 1990, July 1991
- 7) 日本建築学会: プレストレスト鉄筋コンクリート(種 PC)構造設計・施工指針・同解説, 1986
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1988