

振動実験を利用した SRC 造長大梁のプレストレス導入効果の追跡・検討例

吉原 醇 一 蔭 山 満 安 井 讓
渡 辺 清 治 中 川 恭 次

Example of Running Checks of Prestressing Effects of Large-sized Composite Girders Through Vibration Tests

Jun-ichi Yoshihara Mitsuru Kageyama Yuzuru Yasui
Seiji Watanabe Kyoji Nakagawa

Abstract

An example of running checks of prestressing effects of large-span composite girders through vibration tests is presented. The vibration tests were conducted during a period of more than two years and through five stages of construction of the girders. It was considered that checks of prestressing effects through vibration tests were very useful. Further, it was confirmed that the prestressing of this large-span composite girder produced good results under conditions of general use after completion of the construction and cracks of the girders could be prevented with sufficient strength in reserve.

概 要

振動実験を利用した、SRC格子梁スラブのプレストレス導入効果の追跡・検討例を示した。実験は2年強にわたり、施工の5段階で行なった。プレストレス導入の効果の検討は、その振動実験の結果を反映した解析モデルを用いて行なわれた。その結果、振動実験を利用する追跡・検討方法は有効であることが確認された。また、ここでとりあげた長大梁については、竣工後の使用状態においてもプレストレス導入の効果は大であり、十分な余力をもってひびわれは防止されることが確認された。

1. 序

本論文は、プレストレス導入の効果を、段階的に実施した振動実験を利用して追跡・検討した一例であって、その手順と結果について述べたものである。対象としたSRC格子梁スラブは、スパンが長いこと、ひびわれが発生する恐れが高いことが予想された。そこでひびわれの発生を防止するためにプレストレスの導入がなされた。このプレストレスの導入の効果を追跡・検討すべく、2年強にわたる施工の各段階で振動実験を行なった。プレストレス導入の効果の検討は、その振動実験の結果を反映した解析モデルを用いて行なわれた。以下に、振動実験の概要と追跡・検討結果について述べる。

2. 格子梁スラブの概要

対象としたスラブの梁伏図と軸組図を図-1に、梁の

断面図を図-2にそれぞれ示した。これらの大梁はSRC造であって、そのスパンは24mと大きく、6m間隔に配置されたSRC造の外周柱により支持された格子梁形式となっている。格子梁にはひびわれを防止する目的で図-3に示すように、アンボンド工法により鋼材を緊張してプレストレスが加えられた。このプレストレス力の大きさは、PG1、PG2梁においては343t、PG3、PG4梁においては172tである。躯体スラブには図-4に示すように、豆砂利コンクリートとニューカルコンからなる嵩上げコンクリート(荷重0.334t/m²)が打設される。

3. 設計時に予測されたプレストレス導入の効果

設計時に予測されたプレストレス導入によるひびわれの防止効果を表-1に示した。これらの結果は、梁スラブをT型断面を有する線材に置換して作成した立体フレ

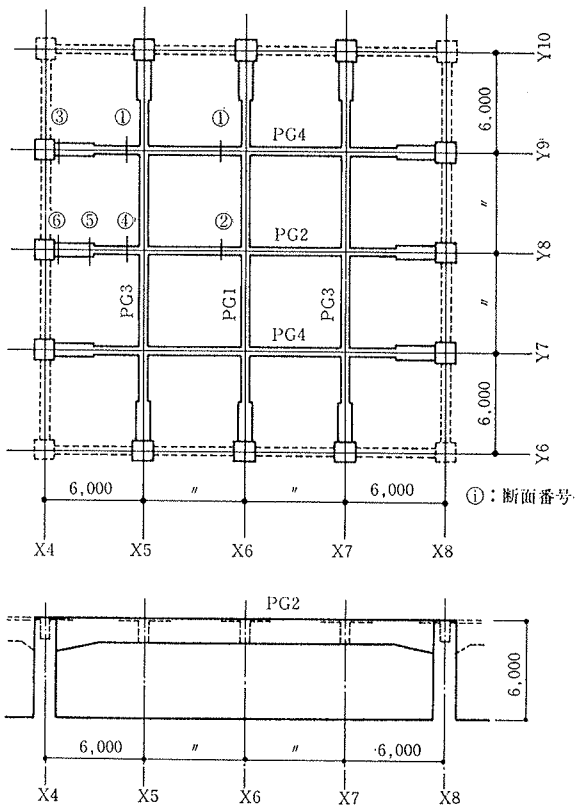


図-1 梁伏図と Y8 通り軸組図

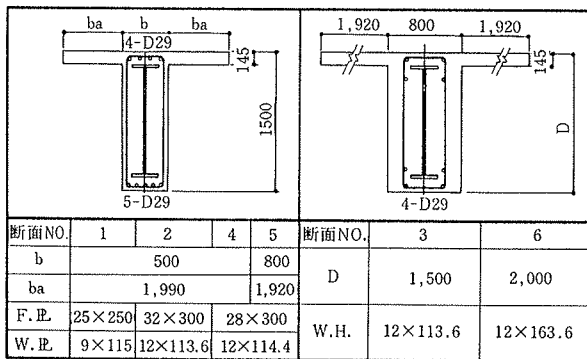


図-2 梁断面図

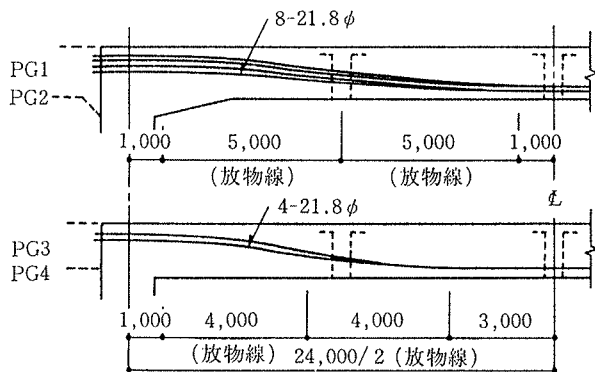


図-3 PC 鋼材導入図

ーム解析モデルを用いて求められたものである(図-8参照)。この解析モデルを作成するにあたって設けた仮定は次のようである。即ち、(1)外周柱に連なる梁(周辺コンクリート)は無視した。(2)嵩上げコンクリートはその剛性を無視して重量のみを考慮した。(3)荷重は、躯体(1.01 t/m²)、嵩上げコンクリート(0.334 t/m²)、表面仕上材(0.05 t/m²)および積載荷重(0.360 t/m²)の合計を考えた。また、表-1中のひびわれモーメント M_c と剛性低下率 α の計算は鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説から次式によった。

$$M_c = 1.8\sqrt{F_c}Z_e + ND/6 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、M_c: ひびわれモーメント

F_c: コンクリートの設計基準強度

Z_e: はりの断面係数

N: 軸力

D: はりの全せい

$$\frac{1}{\alpha} = 1 + \left(\frac{1}{\alpha_y} - 1 \right) \frac{1 - \frac{M_c}{M}}{1 - \frac{M_c}{M_y}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\alpha_y = \left(0.043 + 1.64nP_t + 0.043 \frac{a}{D} \right) \left(\frac{d_c}{D} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$P_t = \frac{ra_t + F_c E a_t}{bD} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$M_y = 0.9r_a t \cdot \sigma_{sy} \cdot d + F_c E a_t \cdot \sigma_{sy} \cdot H_{F.E} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、α: 剛性低下率

α_y: 降伏時の剛性低下率

M: 梁の最大曲げモーメント

M_y: 梁の降伏モーメント

n: ヤング係数比

p_t: 梁の引張鉄筋比

a: シヤースパン

d_c: 梁の圧縮縁から引張鉄筋と引張側フランジプレートとの共同重心までの距離

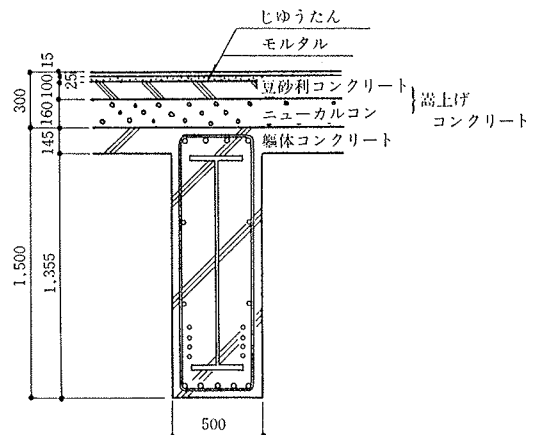


図-4 嵩上げコンクリート内訳図

プレストレス	梁記号	モーメント M(t・m)		ひびわれモーメント Mc(t・m)		剛性低下率 α
		端	中央	端	中央	
なし	PG 3, 4	176	92	224	90	0.94
	PG 1, 2	298	187	353	104	0.55
あり	PG 3, 4	102	63	267	133	1
	PG 1, 2	142	69	439	190	1

注) $E_c=2.1 \times 10^5$ (kgf/cm²), $n=10$, $F_c=210$ kgf/cm²

表一 モーメントと剛性低下率 (設計時)

- r_{at} : 引張鉄筋の断面積
- F_{ra} : 引張側フランジプレートの断面積
- b : T型梁のウェブ幅
- σ_{sy} : 鉄筋とフランジプレートの降伏応力度
- d : T形梁の圧縮縁から引張鉄筋重心までの距離
- $H_{F,r}$: 梁の圧縮側と引張側の両フランジプレート
の重心間距離

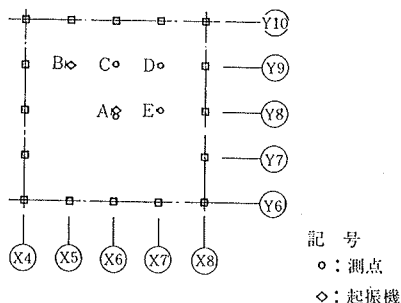
なお、コンクリートの圧縮強度 F_c を 210 kgf/cm², ヤング係数 E_c を 2.1×10^5 kgf/cm², 鉄骨・鉄筋のヤング係数 E_s を 2.1×10^6 kgf/cm² とそれぞれ設定して計算を行なった。

4. 振動実験

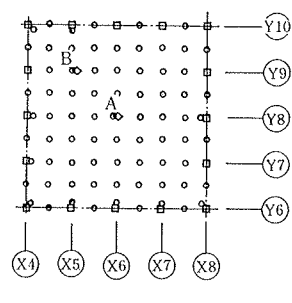
プレストレス導入の効果を追跡・検討するためには、設計時に予測できなかった諸条件を何らかの方法を用いて明確にし、それらを反映させた解析モデルを作成することが必要である。ここでは、表一に示すように、2年強にわたる施工の5段階で振動実験を行ない、固有振動数の経時的变化を実験的に求めることとした。以下に、振動実験の方法とその結果得られた主な特徴点について述べる。なお、嵩上げコンクリート打設時とは図一4の豆砂利コンクリート打設時のことをさす (荷重 0.33 t/m²)。

4.1. 実験方法

実験には上下加振用の起振機を用いた。その起振機の



図一5(a) 共振曲線作成用の測点と加振位置



図一5(b) モード作成用の測点と加振位置

主な諸元は次の様である。即ち、型式は2軸4輪型で、許容最大回転数は35 Hz, 最大加振力は740 kg である。起振機を固定した位置は、図一5のA点とB点である。A点はスラブの中央であって、1次振動の特性を検出することを目的とした加振位置であり、B点は高次振動の特性を把握するために設けた加振点である。また、換振器は図一5の(○)印で示す点に設置し、変位を記録した。図一5(a)の測点は共振曲線を求めるための測点であり、図一5(b)はモード作成用の測点である。実験の順序は、先ず、図一5(a)に示す四つの測点の記録から共振曲線を作成し、この曲線を用いてスラブの共振振動数(固有振動数)を求めた。加振方法はステップによる方法を採用した。加振振動数の間隔は0.1 Hzを基準としたが、共振振動数の曲線の頂部付近では0.05 Hz 間隔とした。次に、共振曲線から得られた各次の固有振動数で加振し、図一5(b)に示す各測点における変位記録から格子梁スラブのモードを作成した。各測点の記録の位相差を算出する際には、起振機から取出したパルス信号を基準とした。

なお、振動実験時には、スラブのコンクリート・テストピースの強度圧縮試験も行なった。

4.2. 実験結果

実験から求めた共振曲線の一例としてPC鋼材緊張後のものを図一6に示した。加振位置がB点の共振曲線である。また、共振曲線から得られたスラブの各次固有振動数と減衰定数をまとめて表一2に示した。減衰定数の算出は $1/\sqrt{2}$ 法によった。表一2によると、PC鋼材緊張後の固有振動数は緊張前に比べて低次から高次にかけてわずかに高くなっている。これはスラブの見掛け上の剛性が上がったためと思われる。また、周辺コンクリート打設後は、打設前に比べて固有振動数が高くなっている。これはスラブ周辺の梁により回転が拘束されたためであろう。更に、嵩上げコンクリート打設後は、打設前よりも固有振動数が低くなっている。また、減衰定数についてみると1次の減衰定数は五つの施工段階を通して1.5%前後であることがわかる。一方、高次の減衰定数は1次と比べて大きい、振動数に対するはっきした法則性は見出し得ない。

図一7には、PC鋼材緊張後のスラブのモード図(1次)の一例を示した。また、スラブのコンクリート・テストピースの圧縮強度試験結果を表一3に示しておいた。

5. プレストレス導入の効果について の追跡・検討

設計に際し、その時点で特定できなかった

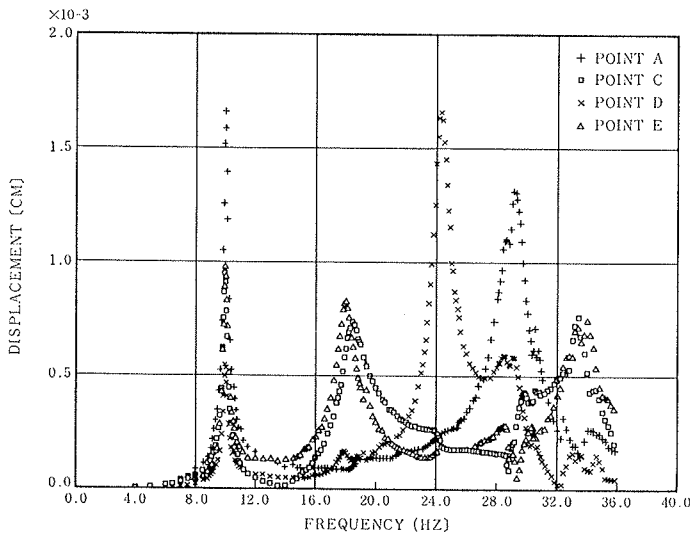


図-6 共振曲線 (B点加振)

実験時施工段階	実験実施年月日	実験値				
		1次	2次	3次	4次	5次
躯体コンクリート完了時 (PC鋼材緊張前)	昭和56年9月21日 ~23日	9.8 ~ 9.9 Hz	17.6 ~ 18.2 Hz	23.9 Hz	28.2 ~ 29.3 Hz	32.5 ~ 34.2 Hz
		1.73 %	3.96 %	2.31 %	2.17 %	1.98 %
躯体コンクリート完了時 (PC鋼材緊張後)	昭和56年9月27日 ~28日	9.95 ~ 10.05 Hz	18.0 ~ 18.5 Hz	24.3 Hz	28.5 ~ 29.1 Hz	33.4 ~ 34.0 Hz
		1.51 %	3.86 %	2.12 %	2.37 %	2.13 %
周辺コンクリート打設後	昭和56年11月4日 ~5日	10.7 Hz	18.9 ~ 19.5 Hz	25.3 Hz	29.0 ~ 30.2 Hz	33.0 ~ 34.0 Hz
		1.60 %	2.65 %	1.90 %	2.25 %	2.77 %
周辺コンクリート打設後 (嵩上げコンクリート打設前)	昭和58年12月6日 ~10日	10.6 Hz	19.4 ~ 19.5 Hz	25.3 Hz	30.1 ~ 30.2 Hz	35.2 Hz
		1.45 %	2.99 %	2.13 %	2.80 %	3.15 %
嵩上げコンクリート打設後	昭和59年1月10日 ~12日	10.2 Hz	18.8 Hz	25.1 ~ 25.4 Hz	29.5 ~ 29.9 Hz	34.4 Hz
		1.53 %	2.35 %	2.85 %	3.32 %	4.65 %

上段：固有振動数(Hz) 下段：減衰定数の平均値(%)

表-2 共振曲線から求めた固有振動数と減衰定数

事項については、すべて、安全側となるように選択された。例えば、コンクリートのヤング係数 E_c を 2.1×10^5 kgf/cm²、圧縮強度 F_c を 210 kgf/cm² としたこと、外周に連なる梁(周辺コンクリート)の拘束効果を無視したこと、および、嵩上げコンクリートを重量としてのみ考慮したことなどがそれにあたる。ここでは、各施工段階で実施された振動実験結果をもとに、これらの定数あるいは効果を定量的に把握して定めた解析モデルについて述べるとともに、そのモデルを用いて行なった追跡・検討結果について述べる。

5.1. 検討用モデルの作成

図-8に解析モデルを示した。まず、躯体コンクリート完了時の固有振動数 9.8~10.05 Hz に一致するように E_c を模索してみた。その結果、 $E_c = 3.3 \times 10^5$ kgf/cm² で 9.95 Hz と得られた。一方、別に実施したテストピースによる平均静的ヤング係数は 2.51×10^5 kgf/cm² であった。このことは、ヤング係数の値は微小振幅の問題を扱う場合は、かなり大きめの値を用いるべきであることを示していると言える。次に、周辺コンクリート打設時

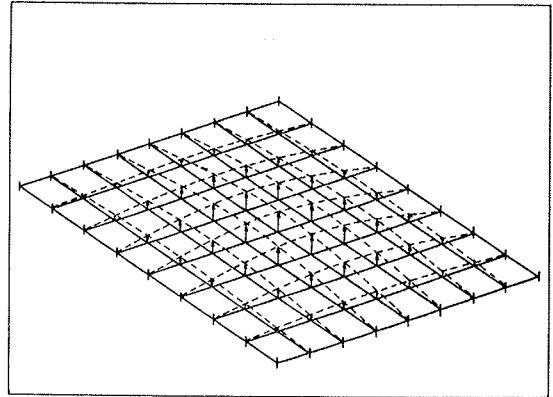


図-7 モード図 (1次)

実験時施工段階	平均圧縮強度 (kgf/cm ²)	平均静的ヤング係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)
躯体コンクリート完了時 (PC鋼材緊張前)	273	2.50
	263	2.34
躯体コンクリート完了時 (PC鋼材緊張後)	287	2.52
	282	2.33
周辺コンクリート打設後	331	2.60
	250	2.30
周辺コンクリート打設後 (嵩上げコンクリート打設前)	261	2.36
	315	2.63
嵩上げコンクリート打設後	328	2.77
	314	2.69

上段：現場水中養生 下段：現場気中養生

表-3 コンクリートの圧縮強度と静的ヤング係数

の拘束効果を解析モデルにとり入れることを考える。ここでは、解析モデルを簡単にすることを旨として、その効果を柱の剛性を割増すことにより考慮することとした。その結果、設計時の断面2次モーメントの値 (2.63×10^7 cm⁴) を 1.5 倍としたモデルにおいて、固有振動数は 10.7 Hz と得られた。最後に、嵩上げコンクリートの効果を検討してみた。嵩上げコンクリートを重量としてのみ考えた場合(表-4のA)は 9.26 Hz、その剛性も考慮した場合(表-4のB)は 10.3 Hz とそれぞれ得られた。一方、実験値は、10.2 Hz である。このことは、打設後間もない時期で、且つ微小振動の場合は、嵩上げコンクリートと躯体は一体となって振動することを示していると言える。以上の結果は、まとめて、表-4に示してある。

5.2. 追跡・検討結果

嵩上げ時以降の状態におけるモーメントと剛性低下率の計算は、上記の要領で定めたモデルを用いて求める。表-5はその結果の一覧である。ここに、施工完了時とは嵩上げ時の荷重に表面仕上げ材の重量 0.05 t/m² を加

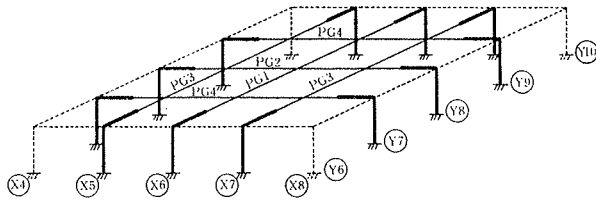


図-8 解析モデル

えた場合のことを指し、使用状態とは更に積載荷重 0.360 t/m^2 を考慮した場合のことを指す。また、コンクリートの圧縮強度 F_c はテストピースによる試験結果をもとに、 $F_c=328 \text{ kgf/cm}^2$ とした。同表中の解析仮定Aとは、嵩上げコンクリートを重量としてのみ考慮した場合であり、Bはその剛性も考慮した場合である。この表から、プレストレスを導入した場合は、十分な安全余裕度をもって、ひびわれは発生し得ないことがわかる。また、将来的には、嵩上げコンクリートと躯体コンクリートはその境界面で剥離することが予想される。そこで、特に、表-6に、使用状態での解析仮定Aの場合の剛性低下率と固有振動数を示しておいた。プレストレス導入の効果が大きいことがわかる。なお、嵩上げコンクリート打設直後は、コンクリートは流動状態にあり、一時的に解析仮定Aの状態になる。その場合、表-5のプレストレスなしの嵩上げ時A欄に見られる如く、剛性低下率は、 0.96 となり、ひびわれが発生することが必至であると考えられる。実験時の目視では、ひびわれは発生していないことが確認された。従って、施工途中でのひびわれ防止にもプレストレスの導入が有効であると考えられることも付記しておく。

6. おわりに

本論文は、幾つかの施工段階で実施した振動実験結果を利用したプレストレス導入の効果の追跡・検討の方法とその結果について述べたものである。従来、その効果を追跡・検討した事例は少ないと思われる。諸賢の一資料としてお役に立てば幸いである。

謝辞

実験にあたり、御協力をあおいだ大林組 高山 PS 工務事務所の方々に謝意を表します。更に、解析にあたり御協力頂いた東洋大学 工学部 素木研究室の森 年和氏、大林組 本社 設計部の田村志郎課長代理、大垣 彰氏、神永憲一氏および同技術部の田村悦徳課長代理ならびに

実験時施工段階	実験実施年月日	実験値 (Hz)	計算値 (Hz)
躯体コンクリート完了時 (PC鋼材緊張前)	昭和56年9月21日~23日	9.8 ~ 9.9	9.95 ($E_c=0.33 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)
躯体コンクリート完了時 (PC鋼材緊張後)	昭和56年9月27日~28日	9.95~10.03	
嵩上げコンクリート打設後	昭和56年11月4日~5日	10.7	10.69 (柱の断面2次モーメントを1.5倍)
嵩上げコンクリート打設後 (嵩上げコンクリート打設前)	昭和58年12月6日~10日	10.6	
嵩上げコンクリート打設後	昭和59年1月10日~12日	10.2	

注) Aは嵩上げコンクリートの重量のみ考慮 Bは嵩上げコンクリートの剛性も考慮

表-4 1次固有振動数(実験値と計算値の比較)

プレストレス	解析ケース	解析仮定	モーメント M (t·m)		ひびわれモーメント Mc (t·m)		剛性低下率 α
			端	中央	端	中央	
なし	嵩上げ時	A	246	131	441	129	0.96
		B	226	144	527	161	1
	施工完了時	A	255	136	441	129	0.87
		B	234	149	527	161	1
	使用状態	A	321	171	441	129	0.58
		B	294	187	527	161	0.71
あり	嵩上げ時	A	77	20	527	215	1
		B	57	34			1
	施工完了時	A	86	25			1
		B	66	39			1
	使用状態	A	152	60			1
		B	126	78			1

注) $E_c=3.3 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$, $n=6.4$, $F_c=328 \text{ kgf/cm}^2$

表-5 嵩上げ時以降の状態でのモーメントと剛性低下率 (PG 1 梁)

プレストレス	解析ケース	解析仮定	剛性低下率	固有振動数
なし	設計時	A	0.55	5.71
	使用状態	A	0.58	7.64
あり	設計時	A	1	6.02
	使用状態	A	1	8.11

表-6 使用状態での剛性低下率と1次固有振動数

田中保雄氏に謝意を表します。また、本論文をまとめるにあたり、御指導を賜った東洋大学 工学部の素木三郎教授ならびに貴重な助言を頂いた大林組技術研究所 竹本 靖建築第一研究室長に謝意を表します。最後に、コンクリート圧縮試験を担当された同建築第二研究室の小柳光生研究員の労をねぎらい謝意を表します。