

【論 文】

プレビーム建築梁の静的載荷実験及び振動実験

Static and Dynamic Loading Test of Architectural Pre-Beam

梅澤 宣雄*
Nobuo UMEZAWA
石塚 馨**
Kaoru ISHIZUKA
今 仁 昌 考***
Masataka IMANI

〔要旨〕 プレビームはI型断面を有する鉄骨梁の引張側フランジをコンクリートで完全に被覆し、鉄骨梁の曲げ剛性によりコンクリートに圧縮プレストレスを導入して、鉄骨とコンクリートが一体となって働くよう形成した梁である。プレビームの圧縮側には、現場架設後スラブのコンクリートが打設され、最終的にスラブと一体となる合成梁である。そのため、鉄骨とコンクリートの一体化は最も基本的な条件であり、十分なシャーコネクターが配置される。このシャーコネクターの施工はかなり煩雑なものであり、今回これを省略する目的で縞付H形鋼を用いることとした。従って付着性状がかなり変わると考えられ、それが、プレビーム全体としての性状に与える影響を確認する必要があると考えられる。

また、設計荷重に対し、フル・プレストレスの設計を行なうことが望ましいが、本計画にあつては、特に設計用積載荷重が大きく、パーシャル・プレストレスの設計を行なっている。このため、下フランジコンクリートに亀裂の発生する可能性を考慮し、それによる剛性変化及び振動性状の変化を確認する必要があると考え、静的載荷実験及び振動実験を行なったので、結果とその考察を報告する。

1. まえがき

SI計画は大手電算メーカーのコンピューターのソフト開発を主目的とする研究所であり、建物の使用上のフレキシビリティが、建築計画の主要テーマの一つである。そのため、意匠、構造、設備が一体となって、建築的フレキシビリティを実現するよう計画された。構造的には、建物の主空間をX方向・Y方向共、12.8mスパン、梁成0.7mで構成することが一つのテーマとなった。これに対し、鉄骨梁、鉄骨鉄筋コンクリート梁、プレストレストコンクリート梁、プレビーム等が総合的に比較検討された結果、構造性能、経済性、施工性の全ての点で優れたプレビームの使用が決定された。

プレビームは橋梁においてかなりの実績を有し、その設計・施工法も確立されている。しかし、建築においてはさほど多くの実績を有しておらず、建築と橋梁としては(1)使用断面寸法、(2)使用状況、(3)設計の考え方、(4)施工方法等で若干の違いがある^{1),2)}。また、建築ではその使用サイズが小さくなるため、圧延過程でフランジ表面にコンクリートとのずれ止め用の突起を形成した縞付H形鋼の使用も有望である。これらのことから、実施に際し、施工及び性能の安全性を検討する目的で実験を行なった。

本実験は住友金属工業㈱中央技術研究所波崎研究センターで実施し、㈱竹中工務店設計部及び㈱住友金属工業鋼構造研究室の御指導をいただいた。

2. 実験概要

2-1 試験体

試験体は、図-1～図-3に示すごとく、SI計画4～6Fの一般事務所階に使用されるプレビーム(Pb₄)に形状・寸法を合わせた実大試験体3体で、各々以下の特徴をもっている。

- TYPE-1：縞付H形鋼を用いたプレビーム（縞付H工法のプレビーム）
- TYPE-2：従来のビルトアップH形鋼にスタッドコネクター及び溶接角鋼でコンクリートとの一体化を計ったプレビーム（従来工法プレビーム）
- TYPE-3：TYPE-2と同形状で同材質鉄骨及びコンクリートを用いた試験体であるが、下フランジコンクリートにプレストレスを導入しないSRCビーム

2-2 使用材料

表-1に使用鋼材の機械的性質を、表-2及び表-3に使用コンクリートの配合及び強度とヤング係数を示す。

2-3 プレフレクション実験

プレフレクション導入装置を図-4、下フランジコンクリートへのプレストレスは、この装置を用い以下の工程で行われた。

* 川田工業㈱鉄構事業部技術課課長 ** 川田工業㈱鉄構事業部技術課 *** 川田工業㈱建築事業部技術部設計課

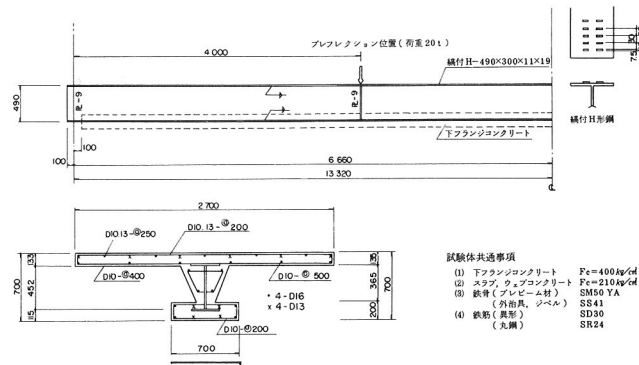


図-1 TYPE-1 試験体

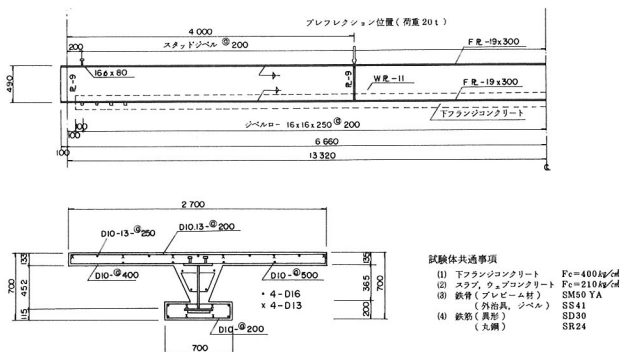


図-2 TYPE-2 試験体

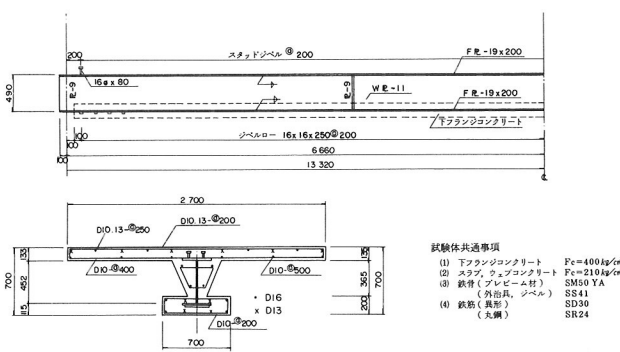


図-3 TYPE-3 試験体

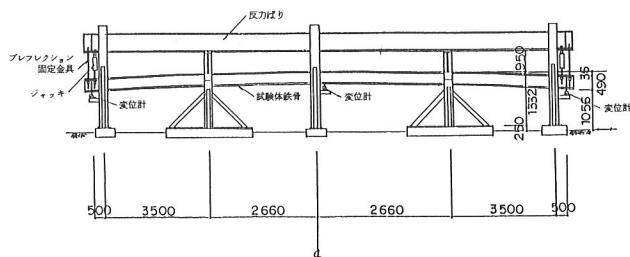


図-4 プレクション導入装置

表-1 使用鋼材の機械的性質

供試体 (SM5UY)	引張強度 (kg/cm²)		伸び (%)
	σ_y	σ_{max}	
Type-1			
フランジ	37.3	56.4	27.1
ウェブ	40.9	58.0	22.5
Type-2, 3			
フランジ	35.8	52.9	29.6
ウェブ	44.5	58.3	21.7

表-2 コンクリート配合表

打設位置	セメントの種類	設計基準強度 (kg/cm²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	セメント量 (kg/m³)	水量 (kg/m³)	細骨材 (kg/m³)	粗骨材 (kg/m³)	混和剤 (kg/m³)	W/C (%)	混和剤銘柄
下フランジコンクリート	早強ポットランドセメント	500	12	3±1	486	169	562	1194	5.83	34.8	ボソリス No.1450
ウェブスラブコンクリート	普通ポットランドセメント	210	18	3±1	299	164	831	1003	6.82	55.0	ボソリス No.10L

表-3 使用コンクリートの強度及びヤング係数

供試体	圧縮強度 (kg/cm²)	引張強度 (kg/cm²)	ヤング係数 $\times 10^5$ (kg/cm²)	材令	養生
リリース					
下フランジ	531	—	2.82	8日	現場
Type-1					
下フランジ	690	40.8	3.39	29日	現場
スラブ	218	21.3	1.97	16日	現場
Type-2					
下フランジ	661	50.5	3.36	34日	現場
スラブ	238	22.4	2.25	21日	現場
Type-3					
下フランジ	701	41.6	3.59	38日	現場
スラブ	234	21.5	2.19	25日	現場
4週					
下フランジ	681	49.2	3.61	4週	標準
スラブ	287	28.5	2.56	4週	標準

- (1) 端部ジャッキにより中央部2点載荷曲げ形式でプレフレクションを与える。
- (2) 端部PC鋼棒でプレフレクションを固定する。
- (3) 下フランジコンクリートを打設、必要強度の出る1週間そのままの状態で行う。
- (4) 端部PC鋼棒のプレフレクション張力を再びジャッキで戻し、油圧を漸減することにより、プレフレクションの解除(リリース)し、下フランジコンクリートにプレストレスを与える。

上記(1)の工程では、予め荷重を作用させ残留応力による鉄骨の非線形たわみを取り除いた後、梁中央のたわみ管理によりプレフレクションを導入した。

プレストレス導入実験では、以下の計画を行った。

- (1) ジャッキ張力(油圧ゲージ換算による)
 - (2) 梁中央部のたわみ
 - (3) 梁中央断面の鉄骨及びコンクリートのひずみ
- ひずみゲージの位置は載荷実験の場合と同じで、この

実験から図-5のスラブ表面と下フランジコンクリート表面ゲージ以外のひずみ変化が通して計測されるようにした。

なお、たわみについては、プレフレクション完了時及び載荷実験開始時に、レベルにより絶対たわみ測定を行い、両実験を通した追跡を行った。

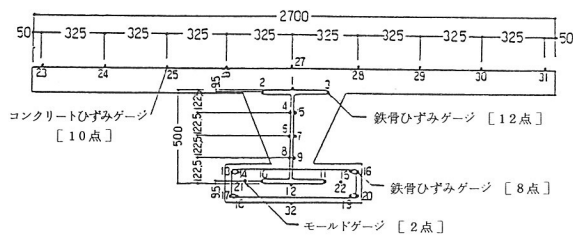
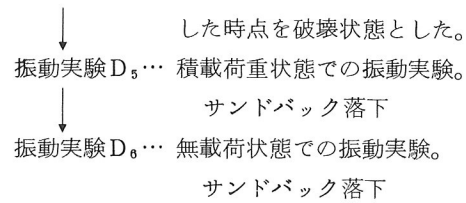
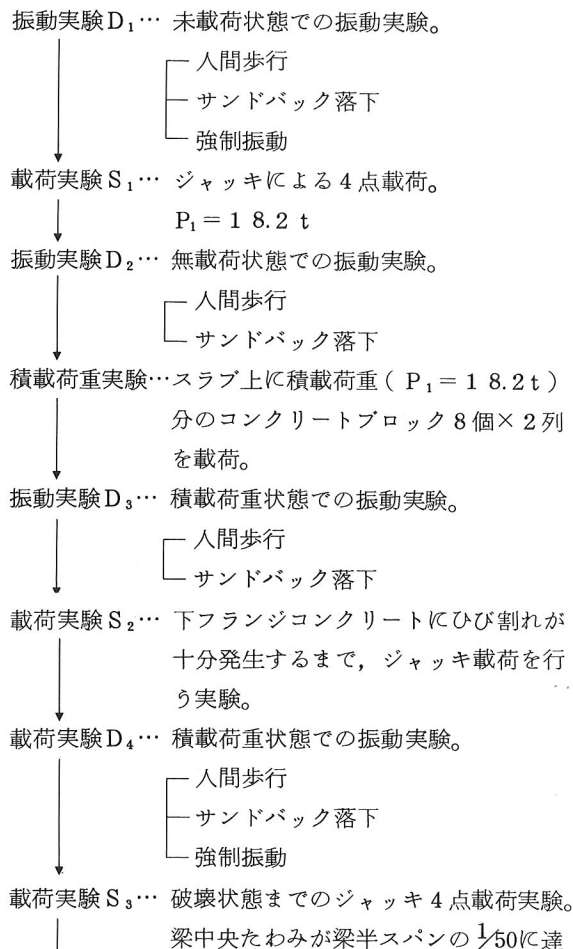


図-5 ひずみゲージ貼付位置（中央断面）

2-4 載荷実験の全体プログラム

静的載荷実験と振動実験との全体手順をまとめると以下ようになる。



2-4-1 静的載荷実験

図-6に、静的載荷実験での実験条件及び載荷方法を示す。実験は単純梁4点載荷形式で行われた。試験体は実験場のクレーン能力の制約を受け、コンクリートスラブ幅を実際の3.325mから2.7mに減じて製作されたが、実験に際しては、この自重と仕上荷重の不足分である約2.8tを鉄ブロック14個で調整した。載荷は、以下の各荷重目標毎に、漸増片振りで行うこととした。

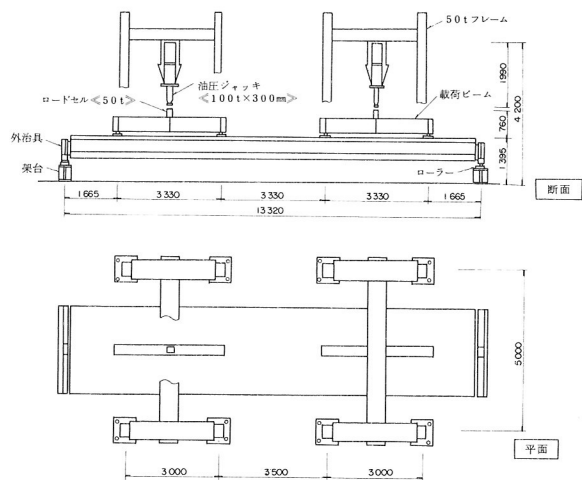
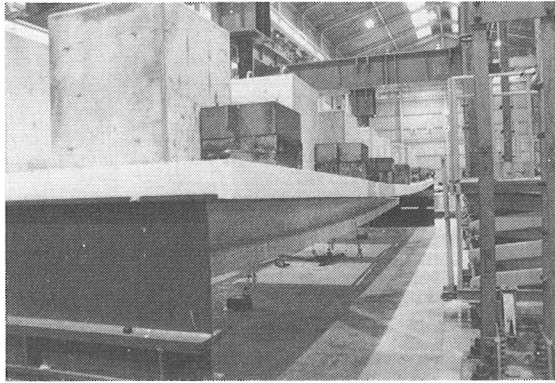


図-6 実験方法（静的載荷実験）

- S₁ 設計積載荷重 $P_1 = 18.2 \text{ t}$
- S₂ 下フランジコンクリートにクラックが発生する設計荷重 $P_2 = 29.5 \text{ t}$
- S₃ 破壊実験は梁中央たわみが梁半スパンの $\frac{1}{50}$ の 13.2 cm になった時点をもって大変形により破壊状態に達したものと見なした。

ただし、積載荷重を載せた状態での振動試験を行うことから、S₁載荷実験完了後、写真-1に示すように、設計積載荷重分のコンクリートブロック16個を載せ、その状態を維持したままその後の実験を継続することにした。S₂実験では 36.8 t ($P'_2 = P_2 - P_1 = 55 \text{ t} - 18.2 \text{ t}$) がジャッキ載荷荷重となる。



写真一 大変形による終局状態

2-4-2 振動実験

- (1) サンドバック落下による自由振動実験
30 kg サンドバックを高さ 40 cm から落下
- (2) 強制振動実験
梁中央に 2.0 kg・cm 起振機を設置
- (3) 人間歩行実験
梁中央部の一人歩行

実験は、図-6の荷重ビームを浮かし、試験体との縁を切った状態で、以下の要領で行うことにした。

- ・D₁ 未載荷実験状態で(1),(2),(3)実験を行う。
- ・D₂ S₁実験終了後(1),(3)実験を行う。
- ・D₃ コンクリートブロックによる積載荷重状態で、(1),(3)の実験を行う。
- ・D₄ S₂実験後、積載荷重状態で(1),(2),(3)の実験を行う。
- ・D₅ S₃実験後、積載荷重状態で(1)の実験を行う。
- ・D₆ D₅実験後、コンクリートブロックを降した状態で、(1)の実験を行う。

3. プレフレクション、静的荷重実験結果

3-1 プレフレクション実験結果

プレフレクション実験結果を図-7に、また、表-4に主な項目の実験値と理論値との比較を示す。これらより、実験値と理論値はほぼ一致し、プレフレクション過程で、下フランジコンクリートに設計通りのプレストレスが導入されたことが判る。

3-2 静的荷重実験

図-8の荷重-たわみ関係から各試験体の耐荷性状の

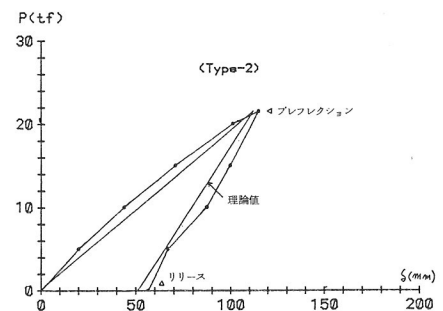
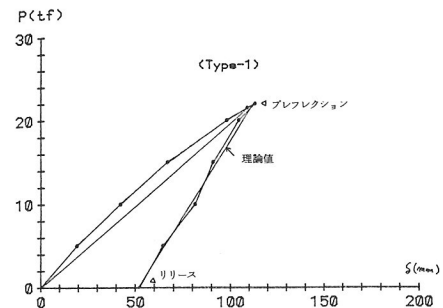


図-7 荷重-たわみ関係

表-4 プレフレクション実験値と理論値

		Type-1	Type-2
たわみ (mm)	試し加力時	実験値	— 128.41
		理論値	— 110.46
	残留非線形たわみ	実験値	— 1.16
		理論値	— 1.16
	プレフレクション時	実験値	199.3 24.11
		理論値	113.17 114.94
		実験値	113.03 110.46
		理論値	1.00 1.04
	リリース時 もどいたわみ	実験値	-60.96 -58.66
		理論値	-61.03 -59.64
リリース時応力 (kg/cm ²)	下フランジコンクリート中央部	実験値	1.00 0.98
		理論値	-98.3 -90.5
		実験値	-83.1 -81.2

概略が判る。

まず、TYPE-1、TYPE-2のプレビーム試験体の耐荷性状を述べる。両試験体の耐荷性状は実験全域に亘りほとんど同じで、次のような挙動を示した。

- (1) 荷重 40 t までは完全な弾性挙動を示し、設計荷重 18.2 t の繰返し載荷に対しても完全な線形性を示した。この間の梁剛性は計算値と一致している。
- (2) 荷重約 40 t で下フランジコンクリートの梁中央

部よりクラックが発生し、図-9、図-10に示すようにクラック発生領域を材方向に広げながら第2勾配に移行した。この剛性は、梁全域に亘りプレストレス効果が失われ、断面剛性には下フランジコンクリート断面を無視したSRCビームのそれとほぼ一致し、初期剛性の約0.34倍である。

- (3) クラック発生後の除荷勾配は直線性状を示すが、その剛性は、初期勾配の約0.67倍、第2勾配の約2倍と両者の中間的な値を示した。
- (4) 荷重60tを超えたところで、鉄骨下フランジが降伏点に達した。その後鉄骨降伏領域が広がるのに伴い、剛性を減じながら終局状態に近づく。実験は、梁たわみが梁半スパンの $\frac{1}{50}$ の大変形に達した時点をもって終了としたが、この時点では鉄骨の降伏領域もかなり広がり、梁の終局耐力に近い状態に達していたことが図-11、図-12のひずみ分布より判る。

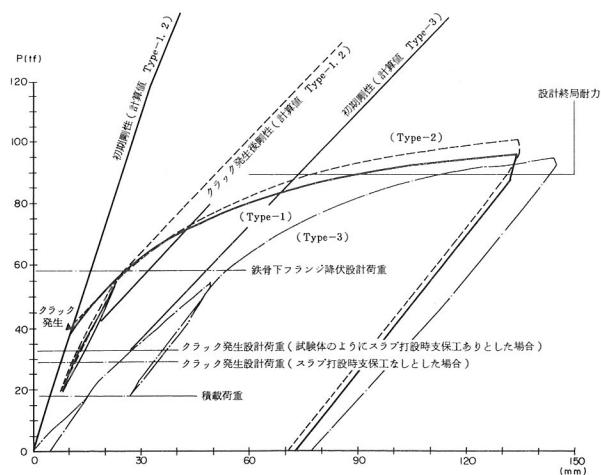


図-8 荷重 - たわみ関係

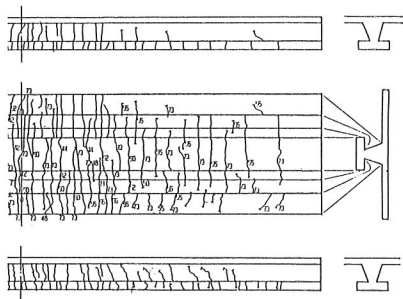


図-9 コンクリート亀裂発生状況 (Type-1)

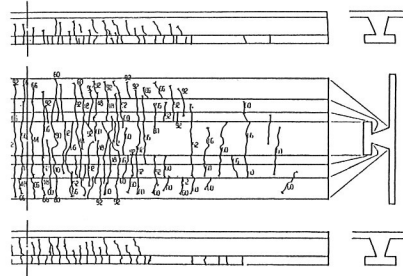


図-10 コンクリート亀裂発生状況 (Type-2)

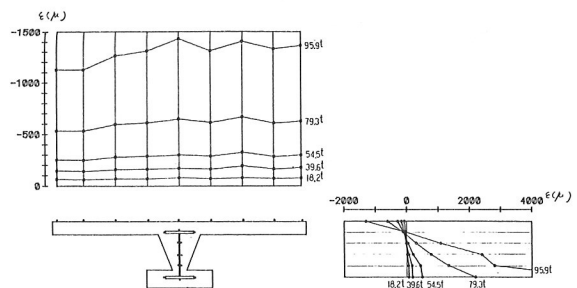


図-11 ひずみ分布 (Type-1)

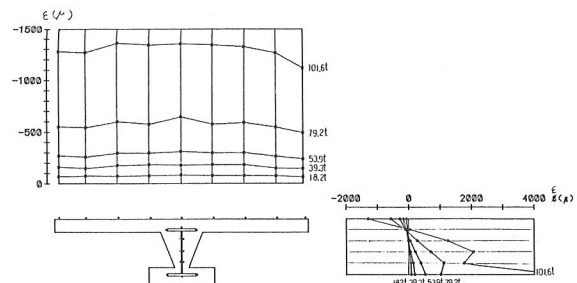


図-12 ひずみ分布 (Type-2)

次に、TYPE-3のSRCビームの耐荷性状を述べる。

- (1) 初期剛性は設計値とよく対応しており、その値はプレビームの約 $\frac{1}{3}$ であった。
- (2) 下フランジコンクリートのクラックは、図-11に示すように、自重により試験体セット時点ですでに発生しており、積載荷重時にはほぼ梁全域に広がる。

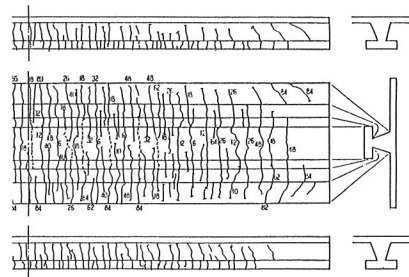


図-13 コンクリート亀裂発生状況 (Type-3)

さらに、各タイプごとの比較を述べる。

- (1) プレベームと SRC ビームの挙動差は、下フランジコンクリートのプレストレスの有無に起因するものであるから、プレベームのクラック発生以後の領域での両者の差はあまりない。
- (2) プレベームについては荷重 40 t 以上でのたわみ及び各部のひずみ変化は、ほぼ一致したものとなる。
- (3) SRC ビームの荷重～ひずみ関係は荷重 40 t で一致するように横軸に平行移動すると以後プレベームの結果とほぼ一致する。
- (4) 同荷重におけるクラックの進展はプレストレスを有するプレベームの方が遅れ、その損傷度合が少ない。
- (5) クラック発生後の同荷重からの剛性はプレベームの方が高く、約 1.5 倍の値を示している。
- (6) 図-14 の荷重-ずれ変形関係から、いずれの試験体でも、鉄骨とコンクリート間のずれ変形は認められず、従来工法、編付 H 工法とも両者間のずれ止め強度が充分であることが判る。
- (7) 表-5 の実験結果と設計理論値との比較より、各試験体とも設計通りの挙動を示し、設計方法が妥当であることを示している。
- (8) クラック発生荷重が設計値を大きく上回っている

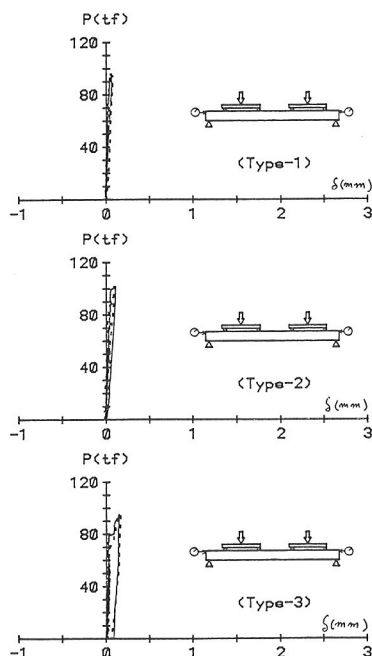


図-14. 荷重 - ずれ関係

が、これは下フランジコンクリートの経時変化が設計値まで進んでいないこと、及び、コンクリートの引張強度を 18 kg/cm^2 と小さく見積っていることによるものと考えられる。

表-5 静的載荷実験結果及び理論値

		Type-1	Type-2	Type-3
設計荷重時のたわみ (mm)	実験値	4.92	4.88	15.23
	理論値	5.10	5.10	14.98
	実験値 理論値	0.96	0.96	1.02
初期クラック発生荷重 支保工の影響を考慮 (tf)	実験値	39.64	41.33	0
	理論値	34.1	34.1	0
	実験値 理論値	1.16	1.21	—
下フランジ降伏荷重 (tf)	実験値	60.34	67.35	54.13
	理論値	58.6	58.6	58.6
	実験値 理論値	1.03	1.15	0.92
最大荷重 (tf)	実験値	95.76	101.26	92.76
	理論値	89.5	89.5	89.5
	実験値 理論値	1.07	1.13	1.04

4. 振動実験結果

4-1 サンドバックによる自由振動実験結果

自由振動実験結果および得られた自由振動曲線の一部を、表-6 および図-15 に示す。

自由振動曲線は、全体的に典型的な減衰振動性状を呈している。TYPE-1, TYPE-2 のプレベームの理論振動数は、 D_1, D_2 の無載荷状態で、6.96 Hz、積載荷重状態 D_3 で、5.24 Hz となる。これに対し実験値は、それぞれ 5%, 8% 程度高い値を示している。

また、TYPE-3 の SRC ビームでは D_1, D_2 の 4.06 Hz、 D_3 の 3.06 Hz の理論値に対し、それぞれ 63%, 47% と実験値の方が高く、プレベームに比べその差が大きい。この原因として、下フランジコンクリートにクラックが発生した後も、クラック面での接触摩擦抵抗が存在し、その梁剛性に対する剛性寄与効果が残されていることが考えられる。実際、静的実験でみられるように、クラック発生後の除荷剛性は荷重上昇時の場合より高い。静的実験で得られる除荷剛性を用い振動数を計算すると D_1, D_2 で 4.97 Hz、 D_3 で 3.49 Hz となる。実験値との差が小さくなるが、まだそれぞれ 33%, 28% の開きがある。振動のような微小変動の範囲では、除荷時の大きい荷重変動のときより、一層その摩擦抵抗効果が大きいと考えられる。

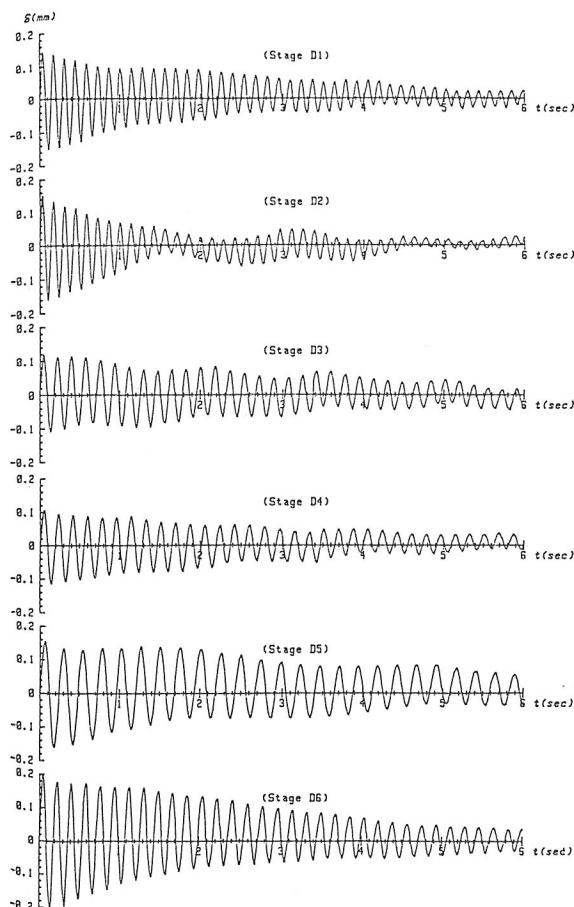
最大振幅について考察すると総質量 W/g の単純梁に質量 W/g の物体が高さ h からの落下衝撃を与えたときの動たわみ δ_d の理論近似解は、文献より次のように求められる。

$$\delta_d = \delta_{st} + \sqrt{\delta_{st}^2 + 2 \cdot h \cdot \delta_{st} / (1 + 17W/g \cdot 35W)} \quad \dots (1)$$

ここで、 δ_{st} は荷重 W が作用するときの静たわみである。

表一六 サンドバック落下による自由振動実験結果

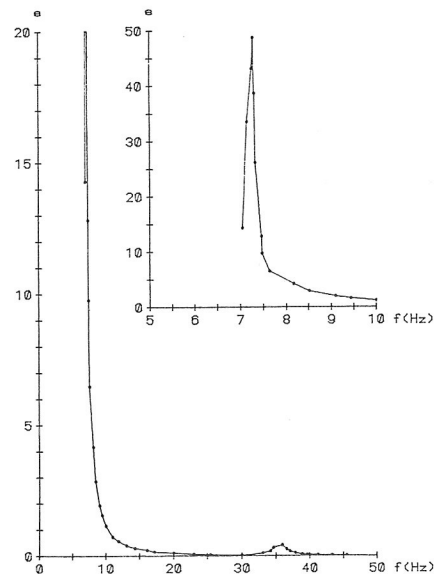
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Type-1						
振動数 (Hz)	7.23	7.21	5.64	5.51	4.11	5.55
最大半振幅 (μm)	148	155	118	109	157	203
減衰定数 (h)	.0095	.0143	.0085	.0093	.0096	.0101
Type-2						
振動数 (Hz)	7.36	7.35	5.71	5.54	4.18	5.55
最大半振幅 (μm)	139	145	111	106	154	204
減衰定数 (h)	.0072	.0102	.0153	.0173	.0138	.0131
Type-3						
振動数 (Hz)	6.63	6.16	4.50	4.21	3.84	5.20
最大半振幅 (μm)	167	183	138	146	176	221
減衰定数 (h)	.0059	.0250	.0222	.0186	.0186	.0132



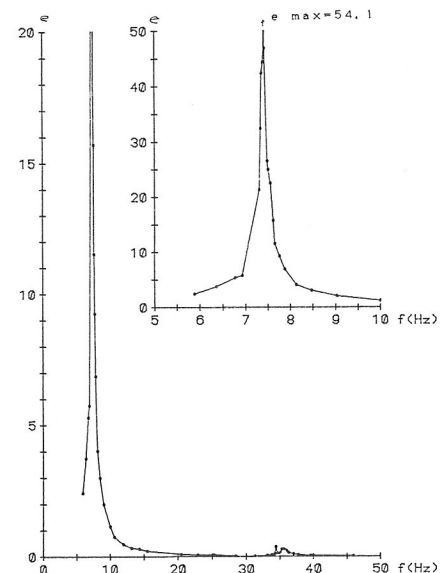
図一五 自由振動曲線 (Type-1)

4-2 強制振動実験

図一16~17は、TYPE-1, 2での強制振動実験結果を、応答倍率で整理して示したものである。応答倍率計算の際の梁剛性には、自由振動での振動換算断面二次モーメントによる値を採用した。起振力が試験体に比べてやや小さく、低周波域でのデータ採取が困難であったが、固有振動数近傍以上のデータ採取には十分な起振力を有していた。表一7では、サンドバック実験の固有振動数、及び、その減衰定数から計算される最大応答倍率値とで、両実験結果の比較を行っている。両者は良い対応関係にあることが判る。



図一16 強制応答倍率曲線 (Type-1 D1)



図一17 強制応答倍率曲線 (Type-2 D1)

表一七 サンドバック実験と強制振動実験の比較

		サンドバック実験		強制振動実験		比 較	
		固有振 動数 f_s (Hz)	計算応 答倍率 e_s	固有振 動数 f_d (Hz)	最大応 答倍率 e_d	f_d/f_s	e_d/e_s
Type-1	D1	7.23	5.26	7.27	48.7	1.01	0.93
	D4	5.51	5.38	5.49	51.2	1.00	0.95
Type-2	D1	7.36	6.94	7.41	54.1	1.01	0.78
	D4	5.54	2.39	5.63	24.7	1.02	1.03

4-3 人間歩行実験結果

建築学会「合成り設計施工指針」⁽⁴⁾では、一人歩行時の振動は、約3kgの物体を5cmの高さから落下した条件に近いと示唆している。

プレビームでは無載荷時 D_1 、 D_2 で $7.0\mu m$ 、積載荷重時 D_3 で $5.4\mu m$ 、SRCビームでそれぞれ $7.8\mu m$ 、 $7.3\mu m$ の値を得る。これに対し、実験値は大幅に大きい値を示していた。

式(1)の値は、1回の衝撃力が作用した場合の解であり、歩行のような周期的に衝撃が作用する場合の振動の重複は考慮されていない。実験室での振動実験では、一般に減衰定数がかかなり小くなるのでその重複効果が大きくなることが考えられる。この重複効果の量的検討を行う場合、歩行が梁に作用する力学的所量を設定する必要がある。しかし、それを実験から直接求めることはむずかしく、少し大胆ではあるが、歩行による作用力を図-18のように周期0.5秒で、人間体重相当の50kgの荷重が($t_p+0.02$ 秒)間に台形状に作用する外乱で評価し得るものとして、実験値に合う t_p を求めることにした。 t_p を変え応答計算を行った結果、 $t_p=0.03$ 秒とすると各実験結果と良く対応することが判った。

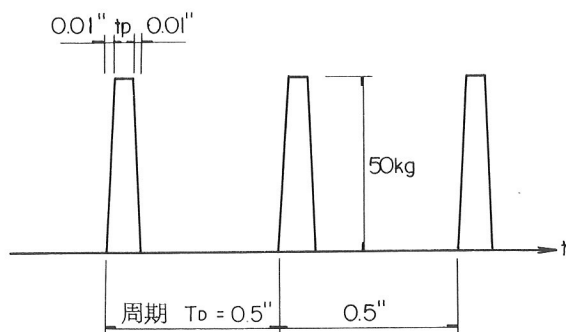


図-18 想定外乱

図-19は、得られた振動曲線の一部であり、図-20が、この外乱のもとでの応答解析値と実験値とを、固有振動数-応答半振幅との関係で比較したものである。梁重量は試験体実情に合わせてあるので、図-20の横軸の変化は梁剛性の変化を意味する。解析値は外乱周期の逆数の整数倍毎の共振現象を呈するが、この曲線に各試験体の無載荷状態、積載荷重状態両者の実験結果がほぼ対応していることが判る。

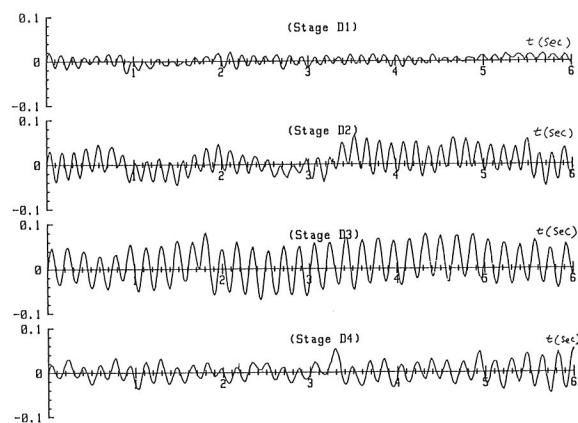
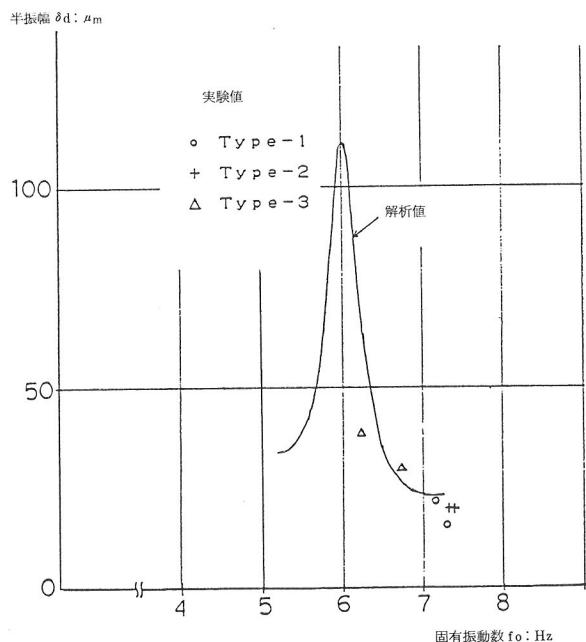


図-19 中央部歩行による振動曲線 (Type-1)

図-20 歩行実験での実験結果と外乱モデルによる解析値との比較 (無載荷状態 D_1 , D_2)

さらに、図-21が、2次元モデルを対象とした実建物での歩行振動解析結果である。歩行周期が固有振動数 f_0 の $1/4$ で共振した場合、振幅が大きくなるが、ほぼ学会規準案近傍の振動となることがわかる。

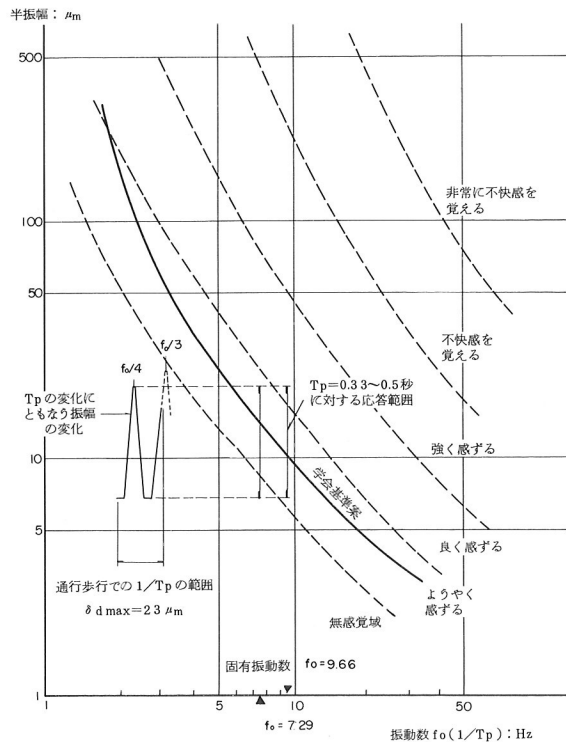


図-21 実建物での歩行による振動解析結果

5. まとめ

前章の検討より、本実験については以下の事が結論づけられる。

- (1) プレフレクション実験では、理論値と一致した挙動を示し、下フランジコンクリートに十分な圧縮プレストレスが導入されたことが確認された。
- (2) 静的載荷実験では、プレビームは、TYPE-1, TYPE-2 試験体とも、下フランジコンクリートにクラックが生ずるまで、コンクリートと完全に一体となって挙動することが確かめられた。
- (3) SRC ビームは、試験体セット時点で下フランジコンクリートにクラックが生じた。
- (4) プレビームは、設計荷重を超えた時点でクラックが発生したが、それ以下の範囲では繰返し荷重に対しても完全弾性挙動を示した。

この結果、プレビームは SRC ビームの約 2.9 倍の剛性を示すことになる。

- (5) 振動実験では、理論剛性から求めた固有振動数に対し、プレビームでは若干高目であるがほぼ一致する値を、SRC ビームではかなり高い値を示した。

この原因として、コンクリートにクラックが生じた後も、振動のような微小変形に対しては、クラック断面の梁剛性寄与効果が残されているものと考えられる。

- (6) 振動性状を検討した結果、振動感覚曲線上で、学会基準案近傍の応答となるとの予測結果を得た。

この計算では、減衰定数として実験で得られた $h = 0.01$ を用いたが、実際の建物では、減衰定数が大きくなるため、更に良い振動性状を示すと考えられ、振動障害の可能性は少ないと判断される。

最後に、本実験にあたり長期間御指導、御協力賜りました、(株)竹中工務店・太田道彦氏、畑中公樹氏、(株)住友金属工業・工博 坂本傑氏、工博 大竹章夫氏の皆様に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) プレビーム合成げた橋設計施工指針、(財)国土開発技術研究センター、昭和 50 年 3 月。
- 2) プレビーム建築ばり認定書、建設省富住指発第 24 号-2、昭和 56 年 10 月。
- 3) S・Timoshenko (谷下・渡辺 訳): 工業振動学、東京図書、1956。
- 4) 合成ばり構造設計施工指針同解説、日本建築学会、昭和 50 年 11 月。