

論文 RPC 製埋設型枠を用いた RC はりの載荷試験

牧 隆輝*¹・田中 敏嗣*²・阿部 忠*³・木田 哲量*⁴

要旨：超高強度繊維補強セメント系材料を用いた埋設型枠とコンクリートの付着性に関する基礎実験として、付着面形状の異なる（粗骨材埋込み型およびディンプル型）埋設型枠を RC はりの引張縁に付着させた RC はりの静的実験および定点の疲労実験を行った。その結果、静的実験においては埋設型枠の付着面の形状に影響されることがなく、最大荷重に至るまで埋設型枠と内部コンクリートが一体的に挙動することが認められた。また、200 万回の疲労実験においても埋設型枠の剥離やひび割れは認められなかった。

キーワード：埋設型枠, RPC, 短繊維, 繰返し載荷, 一体性, 付着, 剥離

1. 目的

プレキャスト埋設型枠は、現場打ちコンクリート型枠の取外しの工程を省略し、施工の合理化・省力化を図るとともに、型枠とコンクリートが一体化することでコンクリート構造物の耐久性の向上や長寿命化に寄与するだけでなく、型枠合板の使用を低減し、森林資源を保護する環境保全効果にも期待できる¹⁾。

一方、最近、反応性粉体コンクリート(Reactive Powder Concrete)の技術を応用し、短繊維補強によりじん性を高めた超高強度繊維補強セメント系材料(以下 RPC)が開発された²⁾。この材料は、極めて緻密な硬化体構造を持つため、高強度を有するだけでなく、中性化、塩分浸透、凍結融解および磨耗などに対する耐久性にも優れている^{2),3)}。このような RPC 材料の特長を活かした用途の一つとして、高耐久性プレキャスト埋設型枠(以下、RPC 埋設型枠)が提案されている⁴⁾。

RPC 埋設型枠は、RPC を用いて製作される高耐久性で、かつ薄肉の埋設型枠であり、付着面に粗骨材を埋め込むことなど特殊な形状とすることにより、コンクリートとの付着力を高めている。

本研究では、RPC 埋設型枠を RC はりの引張

縁コンクリート(以下、内部コンクリート)に付着させた RC はりの静的実験および定点疲労実験を行い、荷重-たわみ関係、耐力および RPC 埋設型枠と RC はりとの付着性状などについて調査し、RC はり構造としての一体性を実験的に検証した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

RPC 埋設型枠の使用材料は、水道水 (W)、高性能減水剤(SP, ポリカルボン酸系)、繊維およびプレミックス材料 (DP, 密度 2.82g/cm³, 太平洋セメント(株)製) とした。繊維としては、PVA 繊維(φ 0.3×15mm, 密度 1.30g/cm³)を体積比で 3.0%使用した。プレミックス材料は、セメント、シリカフェーム、珪石粉末などが最密充填されるように調整されており、粗骨材は用いず、骨材としては最大粒径 2mm の珪砂が混合されている^{2),3)}。減水剤使用量は、目標フロー値を 240mm (0 打フロー)として決定した。ここで、RPC の配合を表-1 に示す。

次に、RC はりの使用材料であるが、コンクリートは表-2 に示す配合のものを用いた。なお、

*1 太平洋セメント (株)	中央研究所ダクトル技術開発チーム	工修	(正会員)
*2 太平洋セメント (株)	中央研究所ダクトル技術開発チーム	リーダー 博士 (工)	(正会員)
*3 日本大学	生産工学部土木工学科	教授	博士 (工) (正会員)
*4 日本大学	生産工学部土木工学科	教授	工博 (正会員)

セメントには早強セメントを用いた。また、軸方向鉄筋にはSD345のD16およびスターラップにはD10を用いた($p_t=0.57\%$)。ここで、RPC埋設型枠およびRCはりに用いた材料の特性を表-3および表-4に示す。

表-1 RPCの配合

単位量 (kg/m ³)			
W	DP*	PVA 繊維	SP**
178	2231	39	30

* DP:セメント808(kg/m³), シカフェーム・珪砂等1423(kg/m³)

**SPは単位水量の一部とした

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	スラップ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
52.0	8	4.5	165	317	732	1077	3.36

S:細骨材(鹿島産, 密度2.55), G:粗骨材(栃木産, 最大寸法20mm, 密度2.68), Ad:AE減水剤(天然樹脂酸塩系)

表-3 RPCおよびコンクリートの材料特性

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
RPC	169*	46.5	20.4*
コンクリート	29.4**	27.1	3.65**

*供試体寸法: 圧縮φ5×10cm, 曲げ4×4×16cm

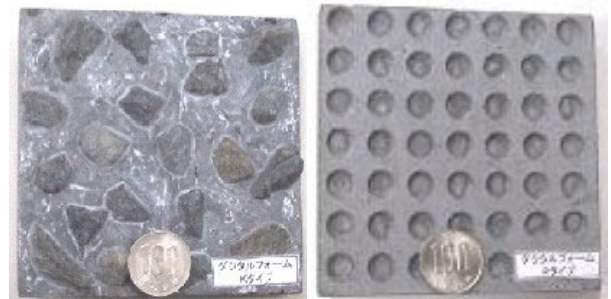
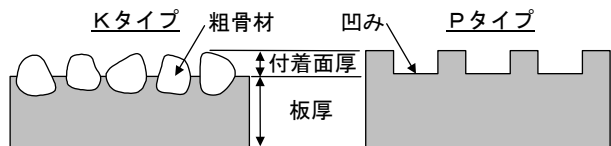
**供試体寸法: 圧縮φ10×20cm, 曲げ10×10×40cm

表-4 鉄筋の材料特性

鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D16	370	511	200
D10	370	511	200

2.2 RPC埋設型枠の寸法

一般に埋設型枠は、コンクリートとの付着を高めるため、型枠の付着面の処理方法が種々検討されている^{5),6)}。RPC埋設型枠の断面形状および付着面形状を図-1に示す。RPC埋設型枠の付着面は、粗骨材埋込み型(Kタイプ)とディンプル型(Pタイプ)の2種類とした。本実験で用いた埋設型枠の寸法・形状は、幅300mm, 長さ300mm, 板厚15mmとし、Kタイプ(以下、



Kタイプ

Pタイプ

図-1 RPC埋設型枠の形状

RPC/K)およびPタイプ(以下、RPC/P)とした。RPC/Kは付着面に粗骨材(最大寸法13mm, 散布量:7kg/m²)を一様に配し、付着面厚を5mm(平均)としたものである。RPC/Pは凸型付き型枠材を用いて付着面に凹部(ディンプル)を一様に設け、凹部の面積率を40%, 付着面厚を3.6mmとした。なお、付着面厚とはコンクリートと噛み合わさるRPC埋設型枠の表面に形成された凹凸部の厚さと定義した。

養生は、成形後前置き時間を48時間とし、脱型後蒸気養生(最高温度90℃を48時間保持)を行った。なお、コンクリートとの打継ぎ面のせん断ひび割れ強度は、K・Pタイプともに母材コンクリートと同程度の値を示していることから十分な付着が得られることが確認されている⁴⁾。

2.3 RCはり供試体

RCはり供試体の形状寸法は、図-2に示すように、幅300mm, 高さ400mm, 供試体長3000mmとし、有効高さ350mmとした。また、RPC埋設型枠を用いたRCはりの寸法は、幅, 全長, 有効高さはRCはりと同様であるが、高さはRPC埋設型枠の厚さを15mmとすることから、RCはりの高さを385mmとし、総高さを400mmとした。

はり供試体の作製は、型枠底部に埋設型枠を配置した後、コンクリートを打込む方法とした。

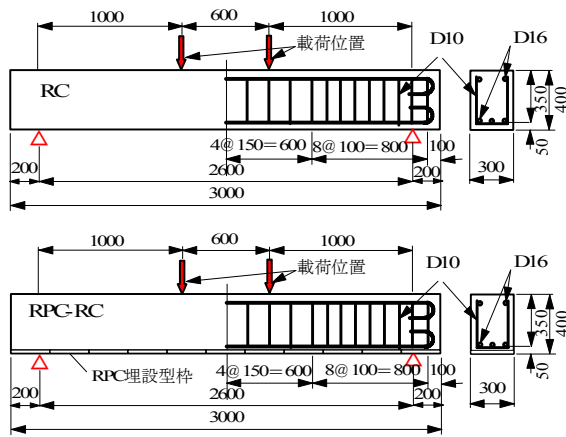


図-2 RCはり供試体の形状寸法(単位:mm)



写真-1 実験装置および荷重試験状況

脱型後1ヶ月間湿空養生を行った。養生終了後、はり供試体は実験室内に保管し、約1ヶ月間で静荷重試験および定点疲労試験を行った。

2.4 試験項目とその方法

本実験は、RCはり(以下、RC)とRCはりの底面にRPC/Kを用いた供試体(以下、RPC/K-RC)およびRPC/Pを用いた供試体(以下、RPC/P-RC)の3種の供試体を用いて、2点荷重による静的実験および定点疲労実験を行い、それぞれの実験耐力および付着・剥離状況からRCはりの一体性について検証した。

本実験には、最大荷重300kN荷重できる疲労荷重試験装置を用いた⁷⁾。本実験に用いた疲労荷重試験装置を写真-1に示す。

(1) 静荷重実験(記号:S)

静荷重実験は、荷重0.0kNから5.0kNずつ破壊するまで増加し、最大荷重から5.0kNずつ0.0kNまで減少する漸増荷重荷とした。荷重の荷重位置は支間中央から±30cmの位置(支点から100cmの位置)に荷重する2点荷重とした。荷重荷重位置を図-2に示す。計測は最大荷重および荷重毎の最大たわみと残留たわみとした。また、供試体RPC/K-RC-SおよびRPC/P-RC-SにおいてはRPC埋設型枠とコンクリートの付着面の剥離状況を目視とテストハンマによる打音法により測定した。

(2) 定点疲労実験(記号:F)

定点疲労実験の荷重位置は静荷重実験の場合と同様とした。荷重条件は、上限荷重69kN、下

限荷重34.5kNで5.0Hzの正弦波形による片振り荷重荷重とし、繰返し回数200万回とした。なお、上限荷重は鉄筋に発生する応力が 180N/mm^2 に相当する荷重とし、下限荷重はその1/2とした。繰返し回数 10^n ごとに、静荷重実験により最大たわみと残留たわみを測定した。たわみは疲労実験の荷重の最大値(最大たわみ)と無荷重時(残留たわみ)において計測を行った。また、繰返し回数 10^n 毎に、ひび割れ幅、ひび割れ発生状況および埋設型枠の剥離状況を測定した。

3. 実験耐力

静荷重実験および繰返し荷重200万回後の静的実験における最大荷重を表-5に示す。

静荷重実験における最大荷重は、供試体RC-Sが161kN、RPC/K-RC-SおよびRPC/P-RC-Sの場合は、それぞれ165kN、160kNとなり静的実験における最大荷重はほぼ近似している。また、繰返し荷重200万回後の場合は、供試体RC-Fが165kN、RPC/K-RC-FおよびRPC/P-RC-Fの場合は、それぞれ155kN、155kNであり、ほぼ近似

表-5 最大荷重

供試体名	最大荷重(kN)
RC-S	161
RPC/K-RC-S	165
RPC/P-RC-S	160
RC-F	165
RPC/K-RC-F	155
RPC/P-RC-F	155

している。静荷重実験と疲労実験による耐力比は、静荷重実験の場合とほぼ同等な耐力を有している。したがって、本実験に用いた各供試体ともに疲労実験における耐力の低下はほとんどみられない。

4. 荷重－たわみの関係

4.1 静荷重実験における荷重とたわみの関係

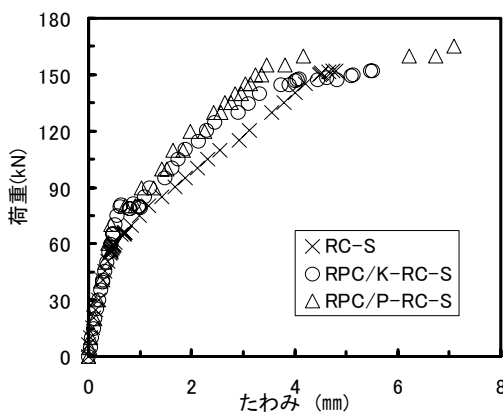
静荷重実験におけるスパン中央の荷重とたわみの関係を図－3に示す。

静荷重実験の場合の支間中央のたわみは、供試体 RC-S の場合、荷重 70kN 付近からたわみの増加割合が変化し、荷重 150kN 付近から急激に増加し始めた。次に、RPC 埋設型枠を用いた RC はり、すなわち供試体 RPC/K-RC-S は荷重 80kN でたわみが増大し始め、その後の 150kN までの荷重増加では線形的に増加し、その後の荷重増加では急激にたわみが増大した。また RPC/P-RC-S の場合も、RPC/K-RC-S と同様な傾向であり、荷重 150kN 付近からたわみが急増した。RC-S のたわみと比較すると各荷重に対するたわみの増加率は若干少ない。

このように、RPC 埋設型枠を用いた場合は、その付着面の形状によらず、RPC 埋設型枠を用いない場合とほぼ同様の挙動を示すことが認められた。

4.2 疲労試験における荷重とたわみの関係

疲労実験における繰返し载荷回数 10^n 回毎に



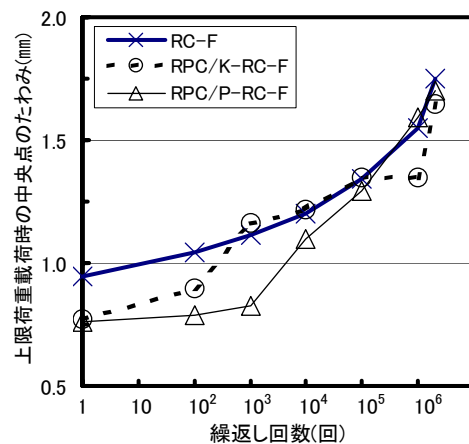
図－3 荷重とたわみの関係（静载荷試験）

行った静荷重実験における最大荷重時（以下、上限荷重载荷時とする）および荷重 0.0kN 時（以下、無載荷時とする）の支間中央点におけるたわみと繰返し载荷回数の関係として、それぞれ図－4および図－5に示す。

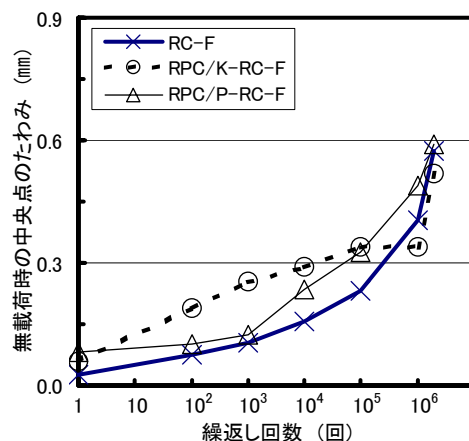
これらより、供試体 RC-F および RPC/K-RC-F、RPC/P-RC-F とともに上限荷重载荷時および無載荷時のたわみ値は、繰返し回数の増加に伴い増加する傾向が認められたが、これは繰返し载荷によるひび割れ発生の影響によるものと考えられる。また、繰返し载荷 200 万回後の無載荷時および上限荷重载荷時の場合のたわみは、RC-F と RPC 埋設型枠を用いた供試体 RPC/K-RC-F および RPC/P-RC-F のいずれも、ほぼ同等な値を示した。

4.3 疲労試験終了後の静荷重試験

繰返し载荷 200 万回後の静荷重実験における



図－4 荷重と最大たわみの関係（疲労試験）



図－5 荷重と残留たわみの関係（疲労試験）

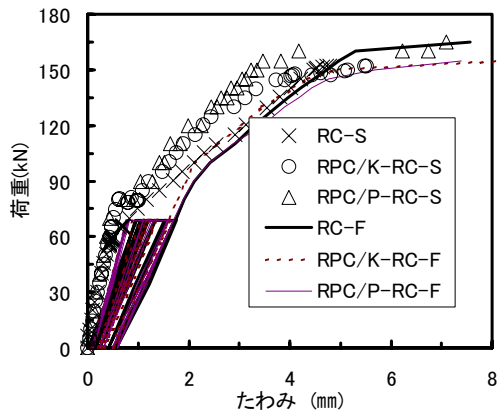


図-6 200万回載荷後の静荷重実験結果

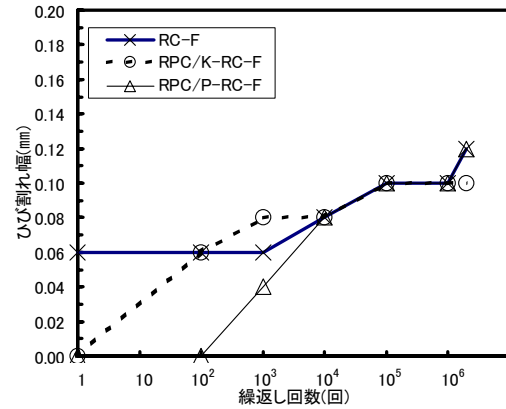


図-7 繰返し回数とひび割れ幅

荷重とたわみの関係を図-6に示す。なお、図-6には静荷重実験における荷重とたわみの関係も併記した。これより、供試体 RC-F は、荷重 90kN 付近でたわみの増加割合が変化し、160kN 付近から急激に増加している。また、供試体 RPC/K-RC-F および RPC/P-RC-F は、RC-F と同様に、荷重 90kN 付近からたわみの増加割合が変化し、150kN 付近から急激に増加している。供試体 RPC/K-RC-F と RPC/P-RC-F を比較すると、

付着面が K タイプの場合がたわみの増加が若干少ない。

5. 疲労実験による破壊状況

上限荷重による繰返し回数とひび割れ幅の関係を図-7に示す。また、200万回載荷終了時におけるひび割れ分布状況を図-8に示す。いずれの供試体においても、ひび割れ幅は繰返し回数に伴い増加する傾向を示した。200万回載荷

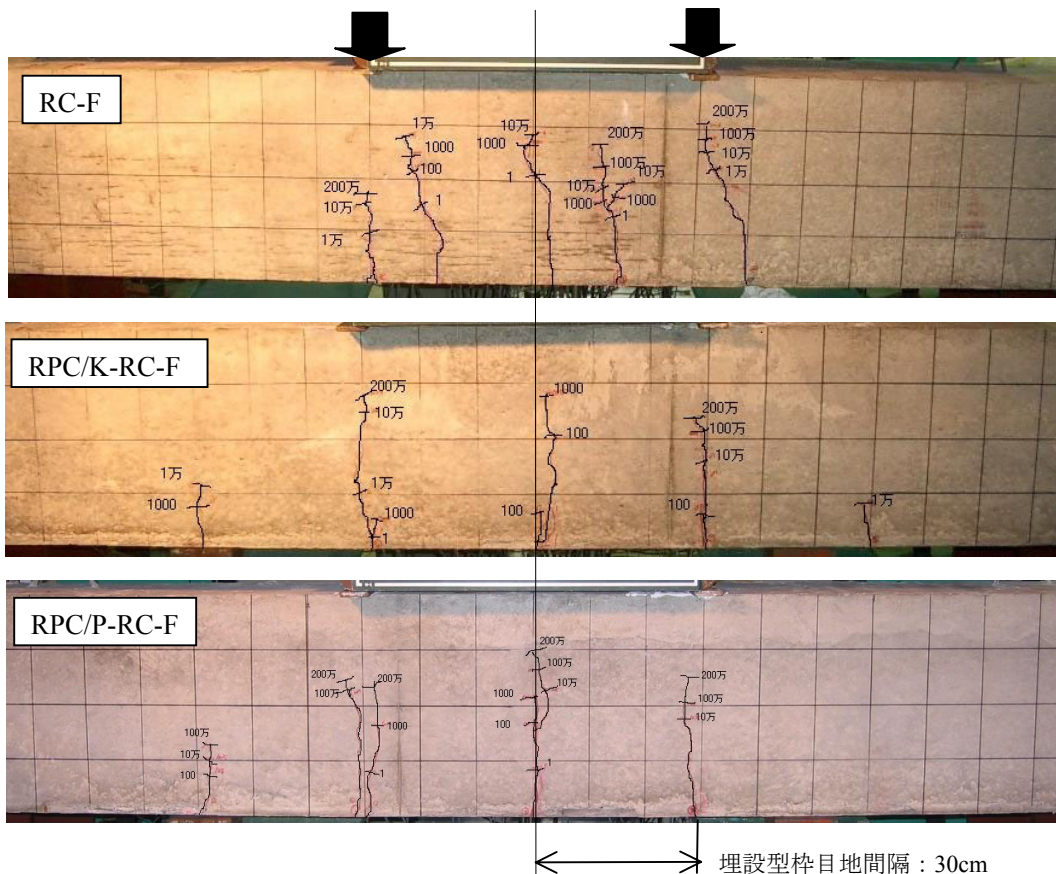


図-8 疲労試験における200万回時のひび割れ状況

後におけるひび割れ幅は、供試体 RC-F の場合、0.12mm、また、供試体 PC/K-RC-F および RPC/P-RC-F の場合は、それぞれ 0.10mm および 0.12mm となり、いずれの供試体ともに近似した結果が得られた。

図-8より、供試体 RC-F は、疲労回数 1 回目において、純曲げ区間の中央付近に発生した初期ひび割れは中立軸位置まで進行し、疲労回数の増加に伴い、純曲げ区間に 13cm~25cm 間隔で発生し、上縁方向に進展した。また、RPC 埋設型枠を用いた場合の供試体 RPC/K-RC-F および RPC/P-RC-F のひび割れは、1 回目の载荷ではクラックスケールでは測定困難なヘアクラックが供試体下面付近にわずかに発生し、ひび割れが抑制された。これは、RPC 埋設型枠によるひび割れ抑制効果と考えられる。その後、繰返し回数の増加により目地位置（型枠と型枠の接合位置）、すなわち 30cm 間隔で発生し、繰返し回数の増加により上縁に進展した。また、繰返し回数 200 万回後において、ハンマーによる打音法および目視においても、両供試体ともに埋設型枠と内部コンクリートとの剥離は認められなかった。さらに、繰返し回数 200 万回後の静的実験における最大荷重時においても、埋設型枠と内部コンクリートとの付着面において剥離は認められず、付着性が高いことが認められた。

以上より、疲労荷重の条件下でも、RPC 埋設型枠は内部コンクリートと一体化して挙動することが確認された。したがって、RPC 埋設型枠は、疲労荷重を受ける道路橋床版や橋げたなどの部材にも適用できると考えられる。

6. まとめ

RPC 埋設型枠とコンクリートの付着性に関する実験において、付着面の異なる埋設型枠を引張側に配置した RC はりを用いて、静荷重実験および疲労実験を行った。本実験で得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) 静荷重実験では、RPC 埋設型枠を用いた RC

はりの変形挙動は、付着面の種類（粗骨材埋込み型およびディンプル型）によらず、埋設型枠を使用していない場合と同様であり、また最大荷重まで埋設型枠とコンクリート間の剥離は認められなかった。

(2) 200 万回の繰返し载荷を受けた場合においても、RPC 埋設型枠を用いた RC はりの変形挙動は、付着面の種類によらず、埋設型枠を使用していない場合と同様である。また、埋設型枠のひび割れおよび埋設型枠とコンクリート間の剥離は認められなかった。以上より、RC はり部材において、RPC 埋設型枠は RC はり引張縁コンクリートと一体化して挙動することが確認された。

参考文献

- 1) 吉野次彦：型枠工法，コンクリート工学，Vol.33，No.3，pp.93-96，1995.3
- 2) 下山善秀，鶴澤正美：ダクトルの特性と応用分野，太平洋セメント研究報告，No.142，pp.55-62，2002.6
- 3) 土木学会，コンクリートライブラリー「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」，2004.9
- 4) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書「高強度セメント系材料を用いた高耐久性薄肉埋設型枠「ダクトルフォーム」」，2002.3
- 5) 小沢満三，鶴田健，内藤隆史：ポリマー含浸コンクリート板を永久型枠として用いた PC 梁の基礎研究，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.7,pp.473-476,1985
- 6) 土木研究センター：土木系材料技術・技術審査証明報告書「FRP と高強度モルタルの複合部材による高耐久性埋設型枠材「H・R フォーム」」，1995.3
- 7) 阿部忠，木田哲量，澤野利章，水口和彦，近藤崇：走行振動試験装置の性能検証に関わる RC はりの走行実験研究，日本大学生産工学部研究報告，Vol.34，No.2，pp.1-9，2001.12