

## アンボンドPC桁の衝撃試験

宮 本 征 夫\*  
岩 崎 岩 雄\*\*

### 1. ま え が き

コンクリート構造物が衝撃により破壊した例は少ない。しかしながら、鉄道構造物（またはその部材）において、列車走行が高速化した場合、レール継目をとおしての衝撃が問題になることが考えられる。とくに、PCまくらぎ等に衝撃力を含んだ大きな輪重が数多く作用する場合には、部分的にせよ何らかの異常が発生することが予想されよう。

従来、コンクリート部材の衝撃試験としては、RCばかりについての試験例<sup>1)</sup>、軽量PC部材と普通PC部材の耐衝撃性の比較試験結果<sup>2)</sup>、等が報告されている。筆者らはポストテンション方式のPC部材において、従来PC鋼材とシーすとの間に注入していたグラウトを省略して、コンクリートとPC鋼材との付着を期待しないいわゆるアンボンドPC部材の基本的な力学性状を調べてきた。その結果、静的曲げ強度については、PC鋼材の表面にアスファルトまたはエポキシ樹脂を塗布したアンボンドPC桁は、グラウトを施工した一般のPC桁に比較して若干の強度低下が見られる程度であることを、実験および理論計算によって確認した<sup>3),4)</sup>。また、一連の静的曲げ試験のなかで、アンボンドPC桁のPC鋼材は、桁全長にわたりコンクリートと一体化していないため、桁が破壊に近づくにつれて、PC鋼材端部のひずみが他の部分に比較して顕著に増加する現象が見られた。アンボンドPC桁を、変動荷重を受ける鉄道構造物に応用する場合には、当然、荷重の繰り返しに対する桁の挙動を調べる必要があり、疲労試験を実施した<sup>5)</sup>。その結果、設計荷重に相当する繰り返し荷重を650万回アンボンドPC桁に加えても桁に著しい異常は認められず、また、疲労試験後における静的破壊荷重は、疲労試験を行わずに静的破壊された桁の破壊荷重と

変らなかった。

この報告の試験は、筆者らの一連の試験の一部であり前述のとおり、アンボンドPC桁の耐衝撃性に着目して行った試験の報告である。

### 2. 試 験

#### (1) 試験体の設計

試験体の設計は表-1に示す設計条件に従って行った。設計活荷重としては、スパン中央における曲げモーメントが98700 kg·cmになる荷重を、また、死荷重としては67.5 kg/mを考慮した。

試験桁のプレストレスはPC鋼棒にプレストレスを導入した直後の緊張力が1本あたり7400 kgを考えた。このときのPC鋼棒引張応力はφ10の場合9379 kg/cm<sup>2</sup>となる。試験断面の諸定数を表-2に、スパン中央断面におけるコンクリートの曲げ応力度とPC鋼棒の引張応力度を表-3に示す。また試験桁の設計図は図-1に示すとおりである。

#### (2) 桁製作に使用した材料

PC鋼棒の力学的性質、セメントの物理試験結果、骨材の物理的性質、コンクリートの示方配合、塗布剤の成

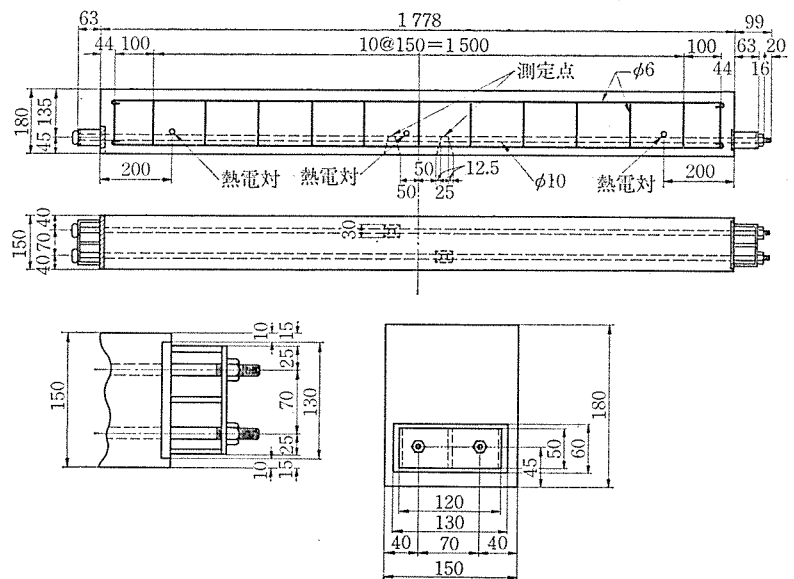


図-1 試験桁設計図

\* 国鉄技術開発室主任部員

\*\* 同 鉄道技術研究所構造物研究室主任研究員

表-1 試験体の設計条件

項目	内 容			
寸 法	スパン 1.6 m 全長 1.8 m 長方形断面			
設計条件	単純支持形式, 集中荷重 1 点荷重形式または集中荷重 2 点荷重形式, 載荷スパン 0.6 m			
設計荷重	3.95 t (1 点荷重では 2.47 t)			
材 料 お よ び 許 容 応 力 度	コ ン ク リ ト	$\sigma_{ch}=500 \text{ kg/cm}^2 \quad E_c=400\,000 \text{ kg/cm}^2$		
		許容曲げ 圧縮応力度	部 材 圧 縮 部	$\sigma_{cac}=160 \text{ kg/cm}^2$
			部 材 引 張 部	$\sigma_{cat}=210 \text{ kg/cm}^2$
		許容曲げ 引張応力度	全荷重が作用する前	$\sigma_{cac}'=-18 \text{ kg/cm}^2$
			設計荷重が作用後	$\sigma_{cat}'=0 \text{ kg/cm}^2$
		許容斜め 引張応力度	設計荷重作用時	$\sigma_{1a}=10 \text{ kg/cm}^2$
	破壊安全度検討のとき		最大値 $\sigma_{1a \max}=48 \text{ kg/cm}^2$ 許容値 $\sigma_{1a}=60 \text{ kg/cm}^2$	
	許容支圧 応 力 度	$\sigma_{ci} \leq \left(0.25 + 0.05 \frac{A}{A'}\right) \sigma_{ck}, \sigma_{ci} \leq 0.5 \sigma_{ck}$		
	P C 鋼 棒	$\phi 10$ 3号PCまくらぎ用PC鋼棒		
		ヤング係数	$E_p=2\,000\,000 \text{ kg/cm}^2$	
引張強度		$\sigma_{pu}=13\,300 \text{ kg/cm}^2$		
降伏強度		$\sigma_{py}=12\,200 \text{ kg/cm}^2$		
有効断面積		$2 \times 78.9 = 157.9 \text{ mm}^2$		
許容引張 応 力 度	プレストレス導入中	—		
	プレストレス導入直後	$9\,400 \text{ kg/cm}^2$		
	設計荷重作用時	$9\,150 \text{ kg/cm}^2$		

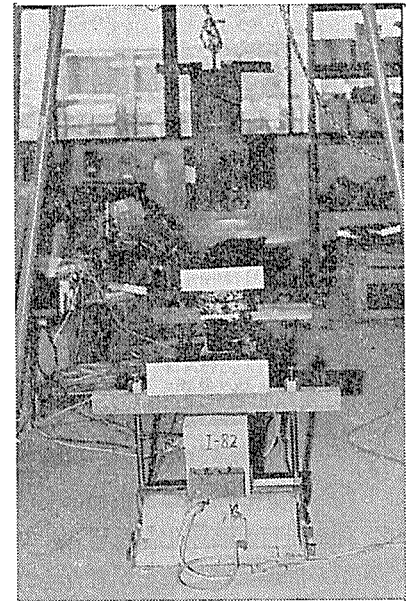


写真-1 衝撃試験装置

間の中心に重錘を落下させることによって行った。衝撃試験装置は重錘をフックで吊しておき、フックをはずすことにより重錘が試験体の支間中心に落下するようにしたものであり、重錘としては質量 52.3 kg, 88.35 kg の 2 種類のものを使用した(写真-1 参照)。52.5 kg の重錘は全試験体に作用させ、88.35 kg の重錘は 52.5 kg の重錘による衝撃試験が終了した後、I-22, 41, 82 の 3 個の試

験体に作用させた。

衝撃試験の試験体および測定点位置を図-2 に示す。

表-2 試験体断面の諸定数

コンクリート断面	換 算 断 面
$A_c=266.92 \text{ cm}^2$	$A_e=274.82 \text{ cm}^2$
$Y_{co}=8.95 \text{ cm}$	$Y_{eo}=9.08 \text{ cm}$
$Y_{cu}=9.05 \text{ cm}$	$Y_{eu}=8.92 \text{ cm}$
$I_c=7\,226 \text{ cm}^4$	$I_e=7\,386 \text{ cm}^4$
$Z_{co}=807.34 \text{ cm}^3$	$Z_{eo}=813.44 \text{ cm}^3$
$Z_{cu}=798.45 \text{ cm}^3$	$Z_{eu}=828.03 \text{ cm}^3$
$e_{pc}=4.55 \text{ cm}$	$e_{pe}=4.42 \text{ cm}$

分と塗布方法を表-4~8 に示す。使用したコンクリートの円柱供試体圧縮強度は、標準養生で  $\sigma_1=440 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\sigma_{28}=536 \text{ kg/cm}^2$  であった。

製作した桁は同一寸法のもの 10 本であり、PC鋼棒の表面処理としてはアスファルト塗布、エポキシ樹脂塗布、グラウト注入の 3 種類である。試験体の番号を PC 鋼棒の表面処理を表-9 に示す。

(3) 試験の方法

試験は衝撃試験によって桁の性質を調べた後、静的に破壊させた。

a) 載荷試験 衝撃試験は試験桁を単純支持し、支

表-3 スパン中央断面における応力度

	コンクリート応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )		PC鋼棒引 張応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )
	上 縁	下 縁	
プレストレスを与えた直後 $P_p=0$	-28.0	139.8	-9 379.0
はり自重による応力度 $W_d$	2.68	-2.71	-3.40
合成応力度 $P_p=0+W_d$	-25.32	137.09	-9 382.4
乾燥収縮, クリープ等による 応力度 $\varphi$	3.44	-17.21	1 154.5
$P_p=0+W_d+\varphi$	-21.88	119.88	-8 227.9
活荷重による曲げ応力度 $W_1$	121.34	119.88	-138.39
全荷重作用後の曲げ応力度 $P_p=0+W_d+\varphi+W_1$	99.46	0	-8 366.29

表-4 PC 鋼棒の力学的性質

直 径 (mm)	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	降伏強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)	弾性係数 (kg/mm <sup>2</sup> )
9.88	146.5	140.7	8.3	20 580

表-5 セメントの物理試験結果

	比重	曲げ引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		
		3日	7日	28日	3日	7日	28日
アサノベロセメント	3.14	48.2	63.0	76.5	248	350	488

表-6 骨材の物理的性質

骨材の種類	物理的性質		単位容積量 (kg/m <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率
	比 重	比 重			
細 骨 材	2.60	1 651	1.72	3.10	
粗 骨 材	2.63	1 745	0.64	6.48	

表-7 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント量比 W/C (%)	絶対細骨材率 S/A (%)	スランプの範囲 (cm)	各材料の単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				セメント	水	細骨材	粗骨材	混和材料
20	36	39	3~5	440	158	715	1 120	0

表-8 塗布剤の成分と塗布方法

成分	アスファルト	エポキシ樹脂
	ブロンアスファルト プロセスオイル 炭酸カルシウム カーボン天然ゴム 合成ゴム その他	エビクロン 800 HX-908 エステルジン
塗布方法	上記のアスファルト 1000g をガソリン 1000cc、灯油 500cc で溶解し、刷毛塗り 上記の材料を上から順に 100g、10g、20g を攪拌し、石粉を混ぜて刷毛塗り	

表-9 試験体の番号と PC 鋼棒の表面処理

試験体番号	PC 鋼棒表面処理
I-11, 21, 22	アスファルト塗布
I-31, 32, 41, 42	グラウト注入
I-71, 81, 82	エポキシ樹脂塗布

試験体は支間 1.6 m で単純支持し、スパン中央荷点にはゴムパットを敷き、その上にあらかじめ検定ずみのロードセル、球座を置きその上に重錘を落とした。重錘の落下高さは、52.3 kg のものは、試験体にひびわれを生じない範囲で 2.5 cm, 5 cm, 15 cm とし、88.35 kg のものは 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm とし、試験体にひびわれを生じるまで行った。なお、88.35 kg の重錘落下試験では、衝撃による桁のはね上りを防止するために支点において桁を固定した。衝撃試験における測定項目は、① 衝撃荷重、② コンクリートのひずみ、③ PC 鋼棒のひずみ、④ 支間中央におけるたわみ、⑤ コンクリート表面のひびわれ、で

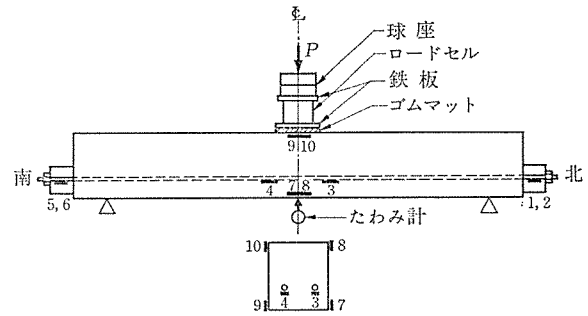


図-2 衝撃試験試験体および測定点位置

ある。

この試験では、塗布剤の温度特性を調べるために、I-11, 31, 32, 71 の桁は夏期に、I-21, 22, 41, 42, 81, 82 の桁は冬期に行った。また I-11 および I-22 の試験体については加温して試験を行った。

**b) 静的荷重試験** I-11, 21, 31, 32, 42, 71, 82 については 2 点振り分け荷重し、I-22, 41, 82 は 1 点集中荷重した。静的試験における測定項目は、① 桁のたわみ、② コンクリートのひずみ、③ PC 鋼棒のひずみ、④ コンクリートのひびわれ、である。

### 3. 試験結果および考察

表-10 に静的試験の結果を示す。

表-10 静的試験結果

試験体番号	表面処理の種類	ひびわれ荷重 (t)	破壊荷重 (t)
I-11	アスファルト	5.0	11.17
I-21	"	4.3	12.75
I-22	"	—	8.47
I-31	グラウト	5.0	13.0
I-32	"	5.0	12.05
I-41	"	—	8.57
I-42	"	4.6	12.34
I-71	エポキシ樹脂	5.0	11.45
I-81	"	5.9	11.06
I-82	"	—	8.5

#### (1) 衝撃荷重について

衝撃荷重は、支間中央上面に置いたロードセルの動的ひずみから推定した。図-3 は衝撃荷重を含めた各測定項目についてのオシログラフに記録した波形である。衝撃荷重はあらかじめ作ってあるキャリブレーションカーブから推定した。衝撃荷重と重錘落下高さとの関係を示すと図-3, 4 のとおりである。図-5 によると、88.35 kg の重錘を 60 cm の高さから落下した際の衝撃荷重は約 14.2 t である。表-10 から明らかなように、図-5 の試験体 I-22, 41, 82 の静的破壊荷重は約 8.5 t であり、衝撃荷重は静的破壊荷重の 1.7 倍に達している。図-3 の衝撃荷重の波形を見ると、重錘が桁に衝突した

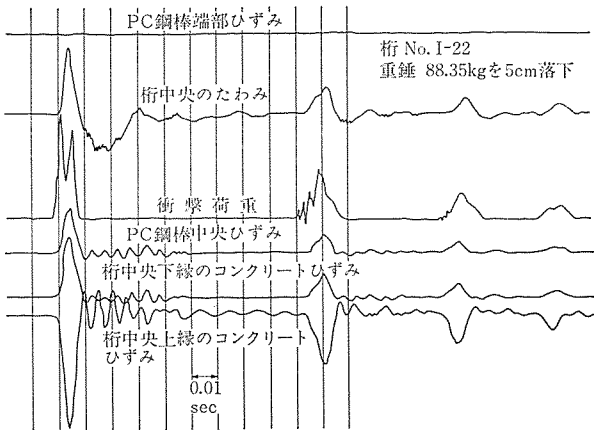


図-3 衝撃試験における各測定項目記録波形の一例

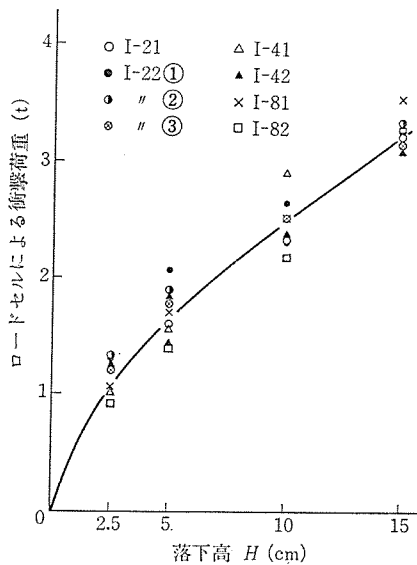


図-4 衝撃荷重と重錘落下高との関係 (W=52.3 kg)

第1撃の作用時間は 0.01 秒に過ぎない。衝撃荷重の波形とたわみ波形とを対比すると、衝撃荷重が最大となった時点から桁のたわみが増加し、たわみが最大に達すると衝撃荷重はいったん減少し再び増加する山型の波形を示していることがわかる。

(2) たわみについて

桁の支間中央のたわみと重錘落下高との関係を示すと図-6, 7 のとおりである。図中の実線は文献 6) にある計算値であり、支間  $l$ 、質量  $W_1$  のはりに質量  $W$  の重錘が高さ  $h$  から落下したときの支間中央の動的たわみ  $\delta_d$  は次式で表わされる。

$$\delta_d = \delta_{st} + \sqrt{\delta_{st}^2 + 2h\delta_{st} \cdot \frac{1}{1 + \frac{17}{35} \cdot \frac{W_1}{W}}}$$

ここで、 $\delta_{st}$  は支間中央の静的たわみであり、

$$\delta_{st} = \frac{Wl^3}{48EI}$$

で表わされる。

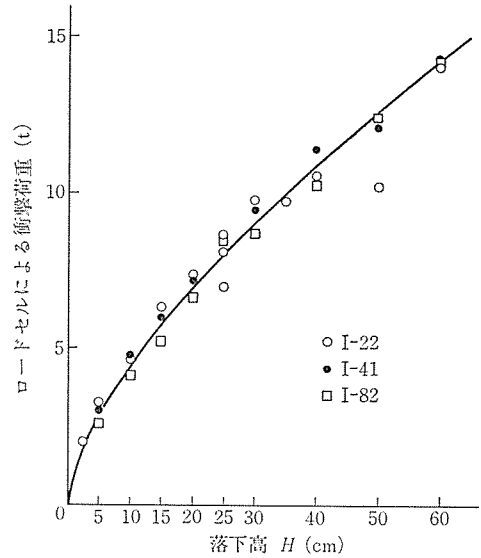


図-5 衝撃荷重と重錘落下高との関係 (W=88.35 kg)

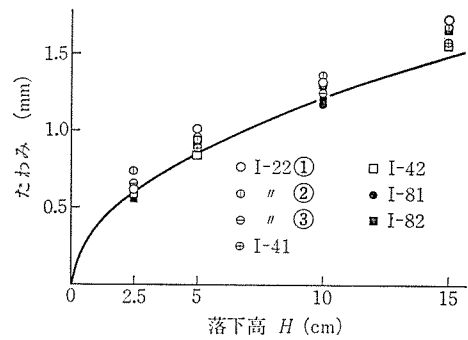


図-6 衝撃たわみ (W=52.3 kg)

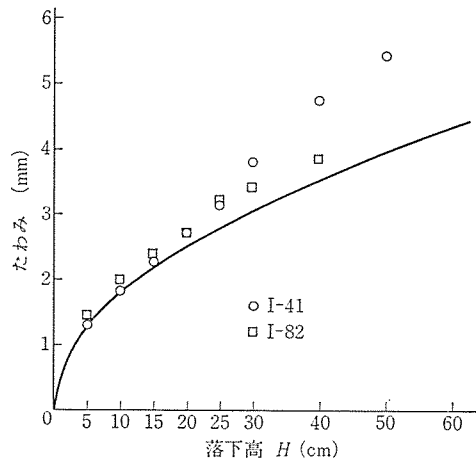


図-7 衝撃たわみ (W=88.35 kg)

図-6, 7 において、落下高が小さい間は実験値は計算値に近いが、88.35 kg の重錘を 30 cm 以上の高さから落とすと実験値は計算値より大分大きくなる。88.35 kg の重錘を 30 cm の高さから落したときの衝撃荷重は約 9 t であり、この段階ではすでに桁の上下縁にひびわれを生じており、ひびわれのために計算値より大きなたわみを生じたものと推定される。

衝撃試験と同一の载荷方法で静的曲げ試験を行った I-22, 41, 82 桁の荷重たわみ曲線を示すと 図-8 のとおりである。これを衝撃たわみと比較すると、荷重 3t 以下では衝撃たわみは静的たわみにほぼ一致しているが、大きな荷重になると静的たわみが大きくなり、荷重 8t における静的たわみは衝撃たわみの約 3 倍となっている。これは、衝撃荷重そのものが非常に短時間に作用

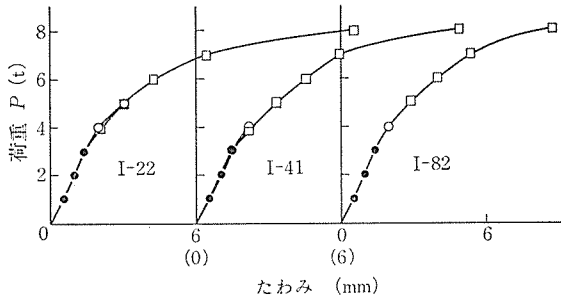


図-8 静的試験における荷重とたわみとの関係

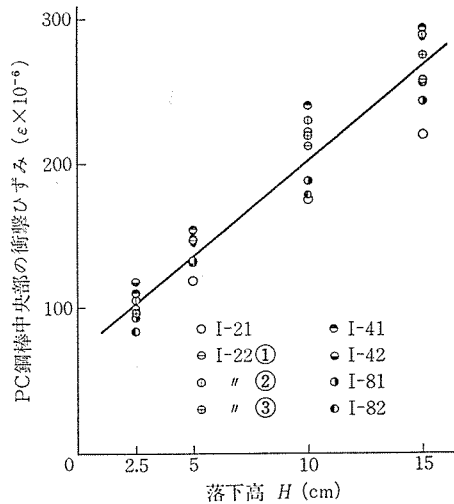


図-9 PC 鋼棒中央部の衝撃ひずみと落下高の関係 (W=52.3 kg)

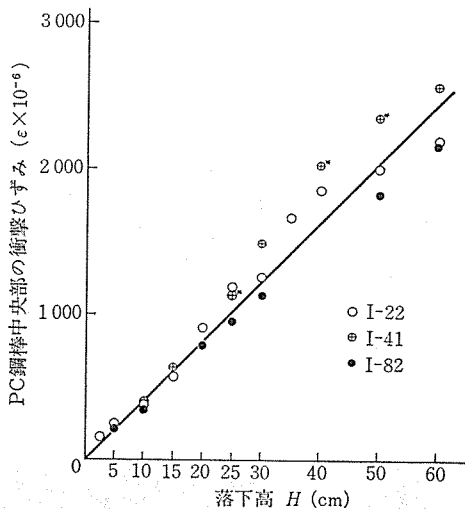


図-10 PC 鋼棒中央部の衝撃ひずみと落下高の関係 (W=88.35 kg)

する (図-3 から 0.01 秒) ものであり、大きな衝撃荷重が作用してもそれと同じ静荷重が加わった場合と力学的に同じ状態ではないことを示している。

(3) PC 鋼棒のひずみについて

衝撃試験における PC 鋼棒のひずみは、図-2 に示すとおり PC 鋼棒端部および中央部で測定した。図-9, 10 は PC 鋼棒のひずみと重錘落下高との関係を示したものである。これによると、かなりのばらつきはあるけれども、PC 鋼棒ひずみは落下高さに比例して直線的に増大している傾向をよく示している。この場合、図は PC 鋼棒中央部のひずみのみを示しているが、鋼棒端部ではひずみをほとんど生じなかった。このことは衝撃試験におけるこの種の桁の特性であり、I-22, 41, 82 桁の静的試験における PC 鋼棒端部のひずみが荷重の増加につれて生じている (図-11~13 参照) のと比較するとその差があきらかである。衝撃によって PC 鋼棒端部にひずみを生じないということは衝撃荷重を受ける PC 部材の鋼材の疲労を考慮する上で有利な現象と考えられる。

一方、PC 鋼棒の中央におけるひずみは、前述のとおり

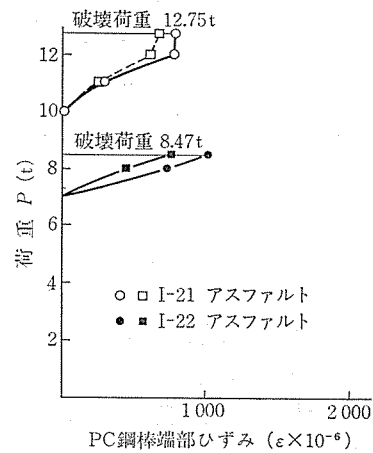


図-11 静的試験における荷重と PC 鋼棒端部のひずみとの関係

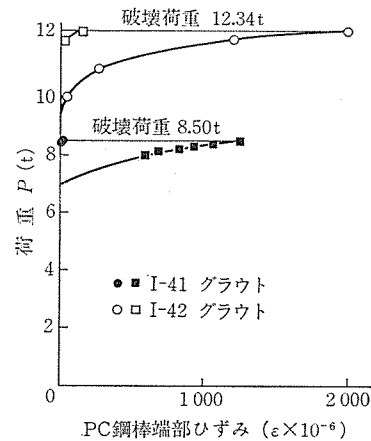


図-12 静的試験における荷重と PC 鋼棒端部のひずみとの関係

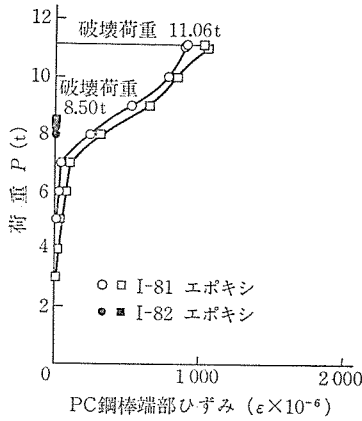


図-13 静的試験における荷重と PC 鋼棒端部のひずみとの関係

り落下高さ、すなわち衝撃荷重に比例して増大しており落下高さが 20 cm を越すとばらつきが大きくなってくる。これは、桁にひびわれを生じたため衝撃力の伝達が乱れたためと考えられる。

(4) コンクリートのひずみについて

衝撃試験におけるコンクリート上縁のひずみを図-14, 15 に示す。図-14 は 52.3 kg の重錘を落とした場合、図-15 は 88.35 kg の重錘を落した場合である。図-14, 15 からあきらかなように、桁のたわみ、PC 鋼棒のひずみに比較して、重錘落下高とコンクリートひずみとの関係はあまり明瞭ではない。これはコンクリートの材質の不均一性にもよるが、コンクリートひずみ測定位置が載荷点に近接しており、載荷板のあたりによる局所的な影響を受けたためと考えられる。コンクリートの曲げ圧縮破壊ひずみは、今回の静的載荷試験では  $3000 \times 10^{-6}$  であるが、衝撃試験では重錘 88.35 kg を 60 cm の高さから落した場合、衝撃荷重は 14.2 t だが、コンクリートひずみは  $1400 \times 10^{-6}$  にすぎない。したがってコンクリートはこの程度の衝撃力に対して破壊に至っていないと考えられ、桁の衝撃性状を追求するためには衝撃荷重をさらに増して試験検討を行う必要があるものと思われる。

下縁コンクリートのひずみ性状も上縁コンクリートひずみと同様、非常にばらついており、これには桁に生じたひびわれも関係することが考えられ、これらを調べるにはさらに精密な試験を必要とするものと考えられる。

(5) 桁のひびわれ

写真-2、図-16 は衝撃荷重による桁のひびわれの例を示したものであるが、一般の静的曲げ試験におけるひびわれとはその性状を異にしている。すなわち、ひびわれが桁上縁からも発生しており、下縁から発生したひびわれとは必ずしも同一でなく、桁の中立軸付近でやや水平方向に分岐している。図-3 によると、桁上縁には、

衝撃による桁のはね上り力が原因と推定される引張ひずみが生じており、これによりひびわれを生じたものと考えられる。このような桁中央部におけるコンクリート上縁のひびわれは、アスファルト塗布のアンボンド PC 桁

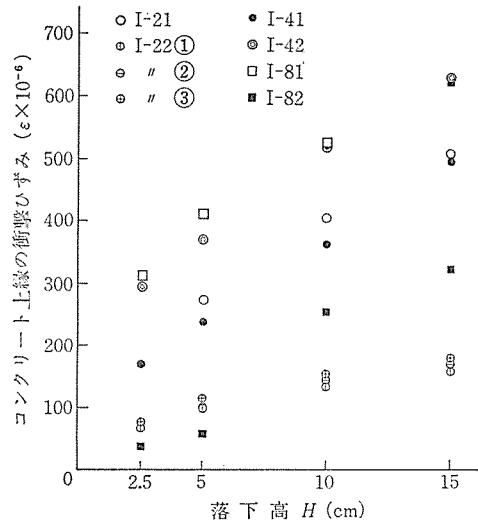


図-14 コンクリート上縁の衝撃ひずみと落下高との関係 (W=52.3 kg)

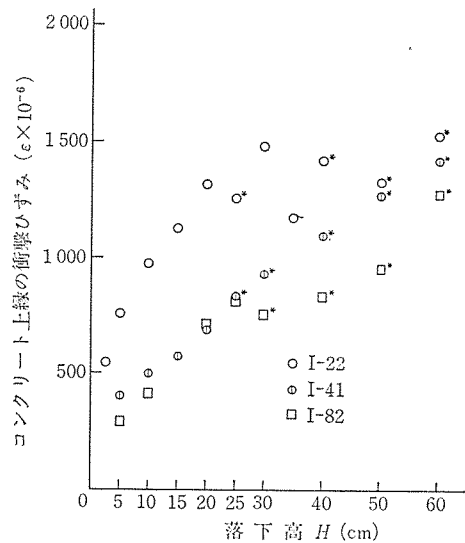


図-15 コンクリート上縁の衝撃ひずみと落下高との関係 (W=88.35 kg)

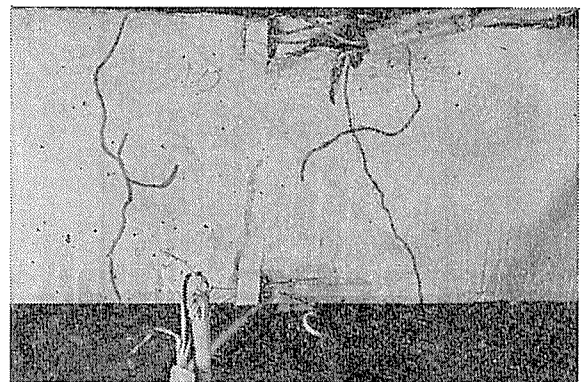


写真-2 衝撃による桁のひびわれ

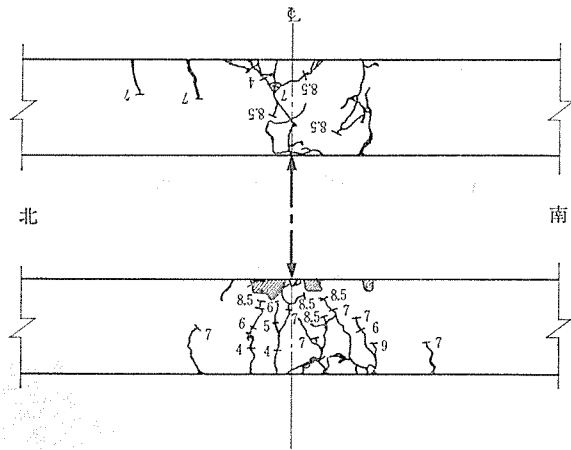


図-16 桁のひびわれ図 (試験体 I-82)

の疲労試験でも観察された。このように、ひびわれが発生するような衝撃荷重が繰り返し作用すれば、上下および横方向のひびわれが発達し、ひびわれに囲まれたコンクリートの領域を生ずる可能性があると考えられるが、これについてはさらに検討を要する。

(6) 桁の力学性状と桁温度との関係について

アスファルト塗布桁 I-22 について、桁の温度差を  $5^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$  に変化させて衝撃試験を試みた。図-6 に、たわみについてその試験結果を示したが、顕著な差は見られなかった。また試験時期の夏冬の気温差による諸特性にも大きな差は見られなかった。

4. 結 論

荷重試験によるアンボンドPC桁の衝撃特性を調べ次のような結論を得た。

- 1) ロードセルで測った衝撃荷重で静的破壊荷重の1.7倍の荷重を加えても桁は破壊しなかった。
- 2) アンボンドPC桁のPC鋼棒端部におけるひずみは、静的試験では破壊荷重以前から生ずるが、衝撃試験ではかなり大きな衝撃力でも生じない。
- 3) 静的試験における破壊直前のたわみ、支間中央のPC鋼棒のひずみ、桁上縁コンクリートのひずみは、同じ衝撃荷重によるこれらの値の約3倍であった。
- 4) 衝撃荷重によるひびわれは、桁上縁からも発生し下縁からのひびわれと必ずしも一致せず、桁の中立

軸付近で分岐した。

- 5) 衝撃による第1撃の作用時間は落下高さにはあまり関係なく、約0.01秒であった。
- 6) アスファルトを塗布したアンボンドPC桁の衝撃特性については塗布剤の温度による顕著な差は見られなかった。

なお、本試験における方法および測定については不十分な点もあり、ここに述べた結論は必ずしも一般的とはいえないが、これについては、今後さらに研究を重ね検討していきたいと考えている。

列車の高速化に伴い軌道構造には瞬間的な大きな衝撃力が作用しているものと推定される。この試験はまくらぎ、軌道スラブ等がこのような衝撃力を受けるときどのような特性を示すかを検討する1つのデータを与えるものと考えられる。落重による衝撃試験でも、通常の疲労試験とは明らかに異なるものであり、部材の瞬間的な挙動を知る上でのより現実的な方法である。

またアンボンドPC工法はグラウトを省略するという点で省力化工法の1つであり、今後PCまくらぎ、軌道スラブ、橋梁の横締め、縦締めに応用されていくものである。本試験では、グラウトありの桁と、アンボンド部材とで、大きな差は生じておらず、衝撃についてはアンボンドPC部材は一般のものと性能的に何ら差がないといえるであろう。

最後に、本研究について御指導いただいた東京大学樋口芳朗教授ならびに実験に御協力いただいた国鉄鉄道技術研究所の皆様へ謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 国分正胤, 池田尚治: RCはりの衝撃抵抗に関する研究, セメント技術年報, 昭和37年.
- 2) 小池 晋, 橋田敏之, 宮坂慶男: 軽量PC曲げ部材の衝撃破壊について, プレストレストコンクリート, Vol. 14, No. 4, 1966年10月.
- 3) 樋口芳朗, 宮本征夫, 鳥居興彦: アンボンドPC桁の静的曲げ試験, プレストレストコンクリート, Vol. 14, No. 4, 昭和47年8月.
- 4) 宮本征夫, 岩崎岩雄: アンボンドPC部材の静的曲げ強度, 鉄道技術研究所報告, No. 836, 1973年1月.
- 5) 樋口芳朗, 宮本征夫: アンボンドPC桁の疲労試験, プレストレストコンクリート, Vol. 17, No. 4, 1975年8月.
- 6) ティモシエンコ: 「工業振動学」. 1976.6.20・受付