

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第3045号

3

土木研究所資料

衝撃荷重を受けるPC, RC桁の応答特性

平成3年12月

建設省土木研究所
構造橋梁部構造研究室

「 Copyright © (1991) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

衝撃荷重を受けるPC, RC桁の応答特性

構造橋梁部	構造研究室	室長	横山功一
構造橋梁部			大塚久哲*
構造橋梁部	構造研究室	研究員	小路泰広**
			金子学***

*現在：建設省建築研究所 国際地震工学部第二耐震工学室長

**現在：建設省土木研究所 積算技術研究センターシステム課

***現在：北海道開発局開発土木研究所 構造部構造研究室

コンクリートで製作される落石覆工の衝撃耐力，エネルギー吸収性能を明らかにしていくための基礎実験として，PC，RC製の単純桁を対象に静的及び衝撃載荷実験を行った。

本実験により，PC桁とRC桁に耐衝撃性能の差異があること，静的耐力より衝撃耐力の方が一般に大きいこと，桁の塑性変形の評価は重錘のもつ位置エネルギーによりの確に行い得ることなどの知見を得た。

キーワード：衝撃荷重，衝撃耐力，PC桁，RC桁，衝撃エネルギー

目 次

まえがき

1. 研究の目的	1
2. 試験の概要	1
2.1 静的載荷試験	1
2.2 衝撃載荷試験	1
3. 試験体	2
3.1 試験体の製作条件及び形状寸法	2
3.2 試験体の概算設計耐力	5
3.3 材料試験	6
3.3.1 コンクリートの28日強度	6
3.3.2 コンクリート試験体の実験時圧縮強度と弾性係数	7
3.3.3 鉄筋引張試験結果	9
4. 静的載荷試験	10
4.1 試験概要	10
4.2 計測要領	10
4.3 P C桁静的載荷試験結果	13
4.4 R C桁静的載荷試験結果	16
5. 衝撃載荷試験	20
5.1 試験概要	20
5.2 計測要領	22
5.3 計測データの整理方法	25
5.4 P C桁衝撃載荷試験結果	28
5.4.1 試験結果の概要	28
5.4.2 試験体1の衝撃載荷試験結果	30
5.4.3 試験体2の衝撃載荷試験結果	31
5.4.4 試験体3の衝撃載荷試験結果	36
5.4.5 衝撃エネルギーの算定	41
5.5 R C桁衝撃載荷試験結果	49
5.5.1 試験結果の概要	49
5.5.2 試験体1の衝撃載荷試験結果	51
5.5.3 試験体2の衝撃載荷試験結果	57
5.5.4 試験体3の衝撃載荷試験結果	62
5.5.5 衝撃エネルギーの算定	67

6. まとめ	77
6.1 静的載荷試験結果の考察	77
6.2 P C 桁と R C 桁の衝撃耐力	79
6.3 衝撃エネルギー	83
6.4 設計へのフィードバック	87
附図	88

ま え が き

落石覆工の設計は通常、落石対策便覧にもとづき、許容応力度設計法が用いられている。しかし、落石覆工のような構造物の場合、構造物のエネルギー吸収性能を設計に適切に考慮していくことが大切である。

ところで、衝撃荷重を受ける落石覆工全体の衝撃エネルギー吸収性能はもとより、構造物材ごとのエネルギー吸収性能および衝撃耐力に関する知見は、現在のところ不十分な状況であるといわざるを得ない。

土木研究所では落石覆工の設計合理化を行うに当たって、まず、単純PC、RC桁に対し静的載荷実験及び衝撃載荷実験を行った。本実験により、PC桁とRC桁の耐衝撃性能の差異、静的耐力と衝撃耐力の関係、重錘の持つエネルギーと桁の応答との関係などに関していくつかの知見を得たので以下に報告する。

1. 研究の目的

本研究は、コンクリートで製作される落石覆工の衝撃耐力、エネルギー吸収性能を明らかにしていくための基礎実験として、PC、RC製の単純桁を対象に静的及び衝撃载荷実験を行ったものである。具体的には、

- (1) 同じ設計荷重に対して設計されたPC、RC単純桁が有する静的耐力、衝撃耐力、ひび割れ形状の差、及び各桁において両耐力の差がどの程度存在するか、
- (2) 衝撃荷重の評価法として、加速度から計算される力積と変位から計算される仕事量のどちらが適切であるか、
- (3) 弾塑性応答後の変形量評価として、荷重の持つ位置エネルギーと衝撃力のどちらを用いるのが適当であるか、

などの検討を行うことを主な目的としている。

2. 試験の概要

本研究の実験内容は、大別して下記に示す2項目である。

①静的载荷試験

②衝撃载荷試験

これらの内容を以下に記す。

2.1 静的载荷試験

静的载荷試験は、PC桁及びRC桁の各1体について試験体に著しい変形が生じるまで载荷し、荷重-変位曲線、荷重-ひずみ曲線を作成するとともに、その結果を検討した。

また、各試験体のコンクリート試験体の圧縮試験、鉄筋の引張試験を実施し、コンクリートの圧縮強度、鉄筋引張強度、コンクリート及び鉄筋の弾性定数等について整理した。

2.2 衝撃载荷試験

衝撃载荷試験は衝撃载荷装置を使用し、PC桁3体、RC桁3体について試験する。

計測は、衝撃荷重、重錘加速度、桁加速度、桁変位、鋼材ひずみの5項目とする。これらの計測結果から、時刻歴波形図を作成するとともに、荷重-変位曲線、荷重-ひずみ曲線等を作成し、その結果を整理した。

また、重錘の衝撃エネルギー及び桁に作用する衝撃エネルギーを算定しその関係を整理する。衝撃エネルギーは、重錘加速度の作用時間に関する積分に質量を掛けて求める方法と、荷重（ロードセルの値）の桁変位に関する積分から求める方法の2方法で算出した。

3. 試験体

3.1 試験体の製作条件及び形状寸法

静的載荷試験及び衝撃載荷試験に用いる試験体は、下記の条件で製作した。

①PC桁及びRC桁の設計耐力は3tとする。

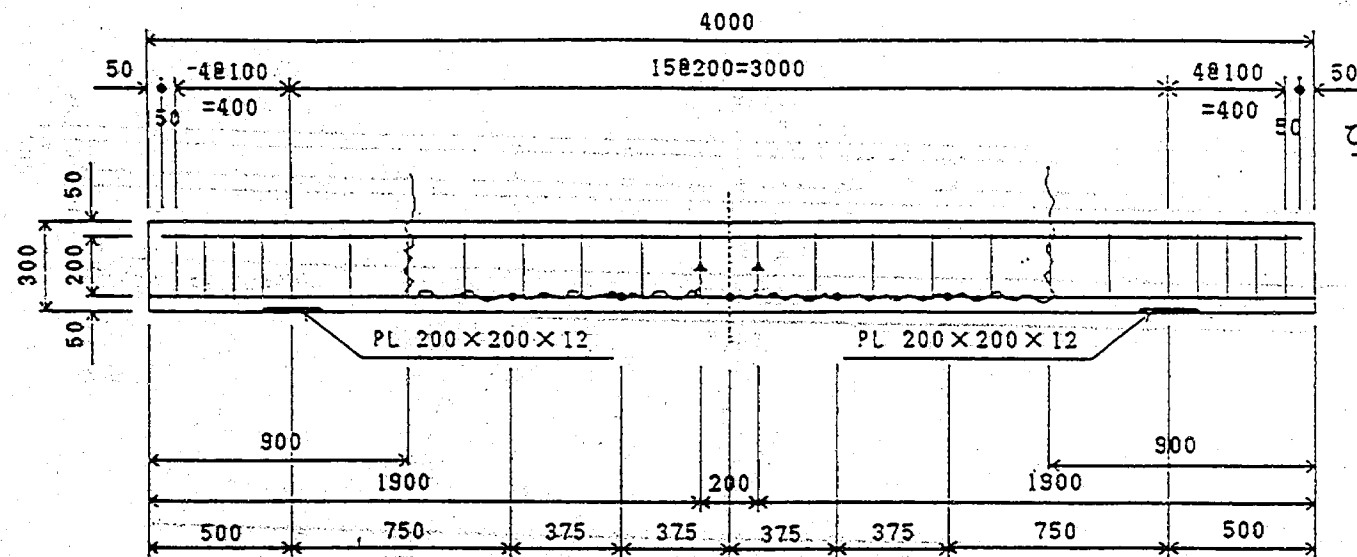
②試験装置の規模から、試験体は支間長3mの矩形断面とし、部材の全長は4mとする。

③主筋に相当する鋼材は、PC桁はPC鋼より線(SWPR7A, 9.3mm 7本より)、RC桁はSD30(D16)を使用する。

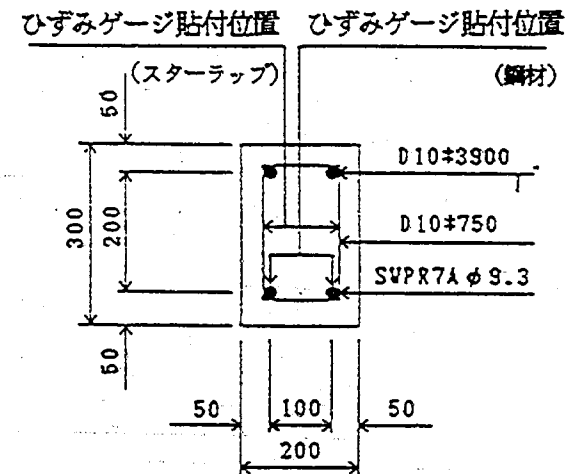
④PC鋼線及び主鉄筋にはひずみゲージを張り付ける。

PC桁、RC桁の形状寸法を図-3.1、図-3.2に示す。

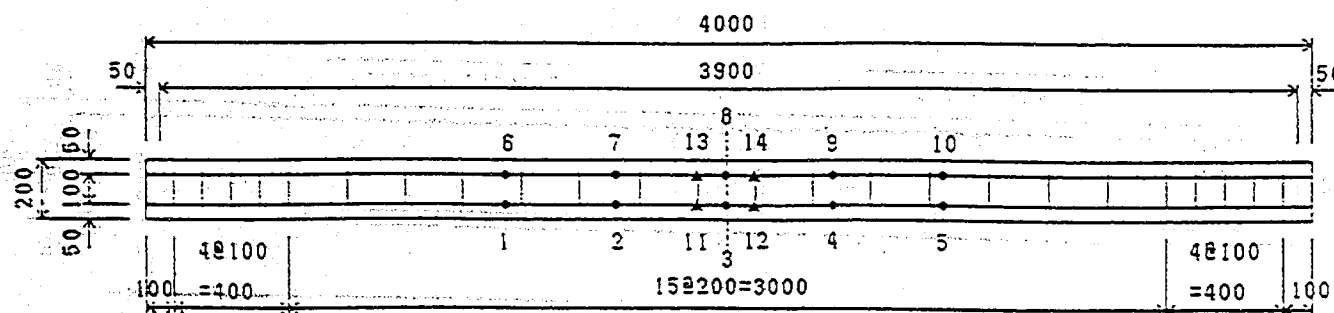
側面図



断面図



背面図

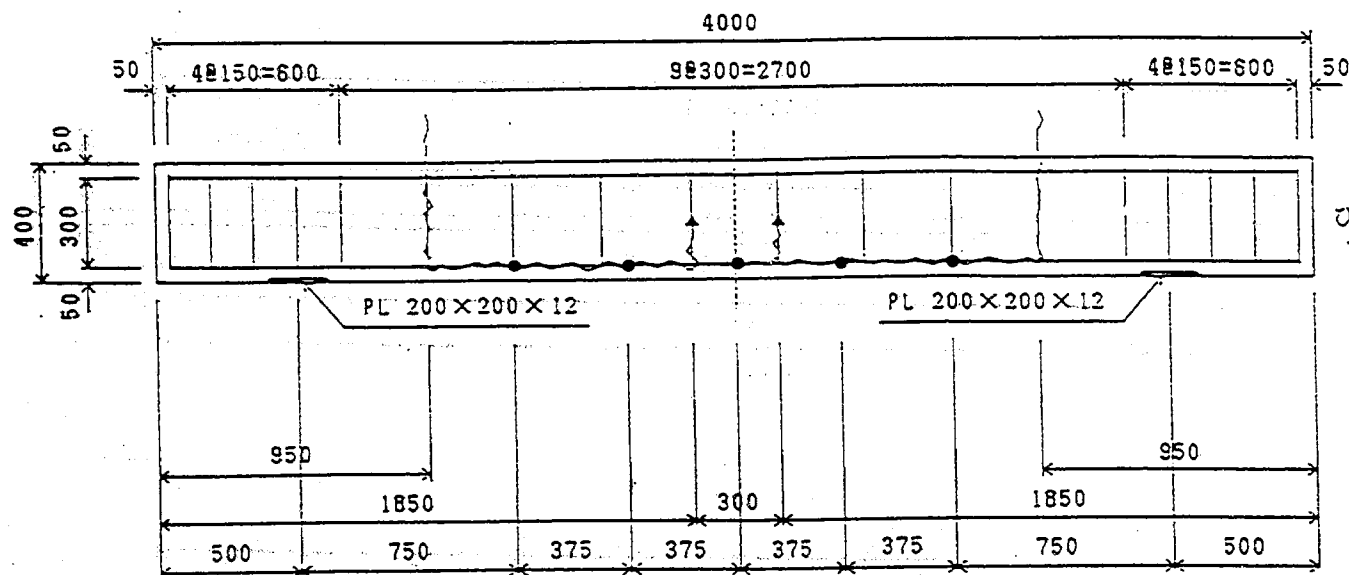


凡例

- 10枚 PC鋼線
- ▲ 4枚 スターラップ

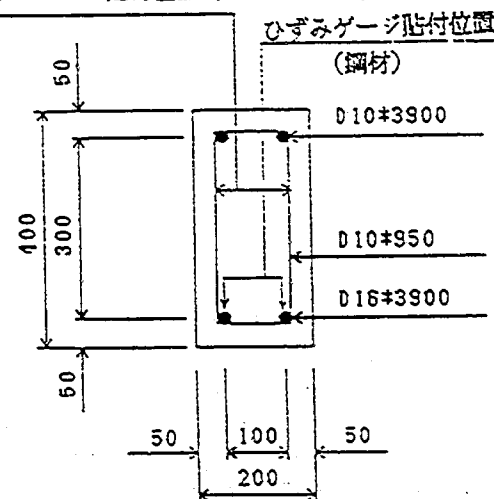
図-3. 1 PC桁試験体の形状寸法 (単位mm)

側面図



断面図

ひずみゲージ貼付位置 (スターラップ)



凡例

- 12枚 引張鉄筋
- ▲ 4枚 スターラップ

背面図

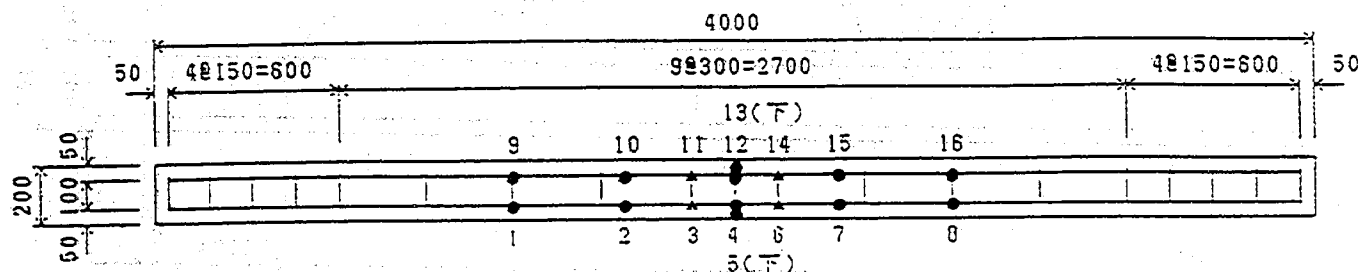


図-3.2 RC桁試験体の形状寸法 (単位mm)

3.2 試験体の概算設計耐力

(1) PC桁試験体

1) 常時相当の耐力

使用PC鋼線: SWPR7A 9.3mm

断面積: $A_p = 51.61 \text{ mm}^2$

破断強度: 9050kg以上 ($\sigma_{pu} = 175 \text{ kg/mm}^2$)

常時相当の荷重に対しては破断強度の50%程度と考える。

$$\text{引張力: } T = N \cdot A_p \cdot \sigma_{pu} = 2 \times 51.61 \times \frac{175}{2} = 9.0 \text{ t}$$

$$\text{抵抗モーメント: } M = T \cdot Z = 9.0 \times 0.25 = 2.25 \text{ tm}$$

$$\text{耐力: } P = \frac{4M}{l} = \frac{4 \times 2.25}{3.0} = 3.0 \text{ t}$$

2) 破壊時の耐力

$$\text{引張力: } T = 2 \times 51.61 \times 175 = 18.0 \text{ t}$$

$$\text{抵抗モーメント: } M = 18.0 \times 0.25 = 4.5 \text{ tm}$$

$$\text{耐力: } P = \frac{4 \times 4.5}{3.0} = 6.0 \text{ t}$$

(2) RC桁試験体

1) 常時相当の耐力 ($\sigma_{ss} = 1800 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{cs} = 70 \text{ kg/cm}^2$)

$$M = \sigma_{ss} \cdot J \cdot d \cdot A_s$$

$$A_s = 1.986 \times 2 = 3.972 \text{ cm}^2$$

$$\text{抵抗モーメント: } M = 1800 \times 0.9 \times 35 \times 3.972 = 2.25 \text{ tm}$$

$$\text{耐力: } P = \frac{4M}{l} = \frac{4 \times 2.25}{3.0} = 3.0 \text{ t}$$

2) 異常時相当の耐力 ($\sigma_{ss} = 2700 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{cs} = 105 \text{ kg/cm}^2$)

常時の1.5倍となるため, $P = 4.5 \text{ t}$ となる。

3) 破壊時の耐力 ($\sigma_t = 5100 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{cs} = 210 \text{ kg/cm}^2$)

$$\text{抵抗モーメント: } M = 5100 \times 0.9 \times 35 \times 3.972 = 6.38 \text{ tm}$$

$$\text{耐力: } P = \frac{4 \times 6.38}{3.0} = 8.5 \text{ t}$$

*は実験値である。

3.3 材料試験

3.3.1 コンクリートの28日強度

PC桁コンクリート試験体の28日強度を表-3.1に、RC桁コンクリート試験体の28日強度を表-3.2に示す。強度は、PC桁で設計基準強度 $400\text{kg}/\text{cm}^2$ に対し、平均値で $432\sim 508\text{kg}/\text{cm}^2$ であった。また、RC桁では設計基準強度 $210\text{kg}/\text{cm}^2$ に対し、平均値で $209\sim 380\text{kg}/\text{cm}^2$ であった。

表-3.1 PC桁コンクリートの28日強度（設計基準強度： $\sigma_{ck28}=400\text{kg}/\text{cm}^2$ ）

	破壊荷重(kg)	圧縮強度(kg/cm^2)	平均値(kg/cm^2)
試験体 No.1 打設日：2/5	40 100	505	508
	43 400	552	
	37 100	467	
試験体 No.2 打設日：2/13	34 500	433	432
	33 300	424	
	34 800	438	
試験体 No.3 打設日：2/15	33 700	422	455
	37 800	478	
	36 500	464	
試験体 No.4 打設日：12/18	35 300	450	462
	36 700	467	
	36 900	468	

表-3.2 RC桁コンクリートの28日強度（設計基準強度： $\sigma_{ck28}=210\text{kg}/\text{cm}^2$ ）

	破壊荷重(kg)	圧縮強度(kg/cm^2)	平均値(kg/cm^2)
試験体 No.1 打設日：2/15	30 150	383	380
	29 400	372	
	30 250	384	
試験体 No.2 打設日：2/13	16 000	204	209
	16 000	204	
	17 250	218	
試験体 No.3 打設日：2/7	26 500	333	319
	25 900	329	
	23 500	296	
試験体 No.4 打設日：2/5	27 800	353	334
	25 700	323	
	25 600	326	

3.3.2 コンクリート試験体の実験時圧縮強度と弾性係数

圧縮強度試験結果より、コンクリートの圧縮強度及び弾性定数 E_c を求める。これらの算出方法は以下に示すとおりである。

圧縮強度 σ_{max} (kg/cm²)

$$\sigma_{max} = P_{max} / A$$

P_{max} : 試験体が破壊するまでの最大荷重 (kg/cm²)

A : 試験体断面積 (cm²)

弾性定数 E_c

$$E_c = \frac{0.4 P_{max} - P_1}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}$$

ε_1 : 初期載荷荷重時のひずみ ($\times 10^{-6}$)

ε_2 : 0.4 P_{max} におけるコンクリートひずみ ($\times 10^{-6}$)

P_1 : コンクリートひずみ ε_1 における載荷荷重 (kg)

P_{max} : 最大荷重 (kg)

A : 試験体断面積 (cm²) = $\pi D^2 / 4$

なお、弾性定数 E_c の算定方法は「土木材料実験」(技報堂)によった。圧縮強度及び弾性定数算出結果を表-3.3, 表-3.4に示す。

表-3.3 PCコンクリート試験体圧縮強度試験結果

試験体番号	打設日	試験体番号	破壊荷重 (t)	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性定数×10 ⁵ (kg/cm ²)	
					Ee	Ey
No. 1	平成3年2月6日	No. 1	37.10	472.37	3.177	2.093
		No. 2	45.10	574.23	3.132	2.837
		No. 3	33.30	423.99	3.560	2.278
		平均値	38.50	490.20	3.290	2.385
No. 2	平成3年2月13日	No. 1	33.50	426.53	2.930	2.321
		No. 2	32.80	417.62	3.050	2.387
		No. 3	34.30	436.72	2.909	2.527
		平均値	33.53	426.96	2.963	2.412
No. 3	平成3年2月16日	No. 1	35.00	445.63	2.913	2.096
		No. 2	37.70	480.01	2.884	2.230
		No. 3	34.60	440.54	2.956	2.291
		平均値	35.77	455.73	2.918	2.206
No. 4	平成2年12月18日	No. 1	42.30	538.58	2.716	1.997
		No. 2	38.50	490.20	2.730	2.236
		No. 3	39.10	497.84	2.776	2.336
		平均値	39.97	508.87	2.741	2.190

表-3.4 RCコンクリート試験体圧縮強度試験結果

試験体番号	打設日	試験体番号	破壊荷重 (t)	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性定数×10 ⁵ (kg/cm ²)	
					Ee	Ey
No. 1	平成3年2月15日	No. 1	30.75	391.52	2.494	1.786
		No. 2	29.70	378.15	2.619	2.062
		No. 3	34.05	433.54	2.661	1.886
		平均値	31.50	401.07	2.591	1.911
No. 2	平成3年2月13日	No. 1	24.60	313.22	2.724	2.146
		No. 2	18.90	240.64	2.624	2.154
		No. 3	22.25	283.30	2.894	2.116
		平均値	21.92	279.05	2.747	2.139
No. 3	平成3年2月7日	No. 1	29.05	369.88	2.692	1.947
		No. 2	27.60	351.41	2.542	1.783
		No. 3	27.80	353.96	2.586	1.988
		平均値	28.15	358.42	2.607	1.906
No. 4	平成3年2月5日	No. 1	24.70	314.49	2.530	1.449
		No. 2	25.90	329.77	2.269	1.189
		No. 3	26.60	336.68	2.887	1.556
		平均値	25.73	327.65	2.562	1.398

3.3.3 鉄筋引張試験結果

鉄筋引張試験結果より、鉄筋の弾性定数 E_s を求める。弾性定数の算出方法は以下に示すとおりである。

$$E_s = \sigma_y / \varepsilon_y$$

σ_y : 降伏時の応力 $\sigma_y = P_y / A$ (kg/cm^2)

P_y : 降伏荷重(kg), A : 鉄筋断面積(cm^2), ε_y : 降伏ひずみ

降伏荷重, 降伏ひずみ, 破断荷重及び弾性定数算出結果を表-3.5 試験結果総括表に示す。

表-3.5 試験結果総括表

鉄筋呼 び 径	試験体 番 号	破 断 荷 重 (t)	降 伏 荷 重 (t)	降 伏 ひ ず み (μ)	弾 性 定 数 $\times 10^6 (\text{kg}/\text{cm}^2)$
D 1 0	No. 1	3.82	2.66	2 364	1.533
	No. 2	3.64	2.58	2 620	1.425
	No. 3	3.70	2.57	1 943	1.824
	平均値	3.72	2.60	2 309	1.594
D 1 6	No. 1	10.30	6.90	2 091	1.686
	No. 2	10.34	6.80	2 106	1.640
	No. 3	10.28	6.89	1 895	1.831
	平均値	10.31	6.86	2 031	1.719

4. 静的載荷試験

4.1 試験概要

静的載荷試験は、建設省土木研究所の大型構造物試験機及びその他の施設を使用して実施した。試験は、P C 桁、R C 桁各々 1 体につき荷重－変位曲線の勾配がほぼ水平になるまで載荷し、各載荷ステップごとに荷重、変位、ひずみを測定するとともに、ひびわれ状況を調査した。

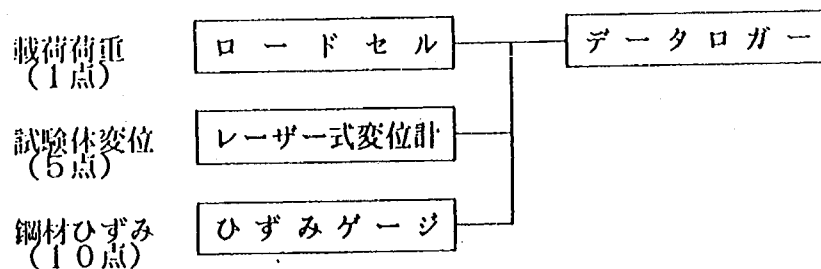
これらの結果から、荷重－変位曲線、荷重－ひずみ曲線等を作成し、ひびわれ時、降伏時の荷重、終局耐力を調査した。

4.2 計測要領

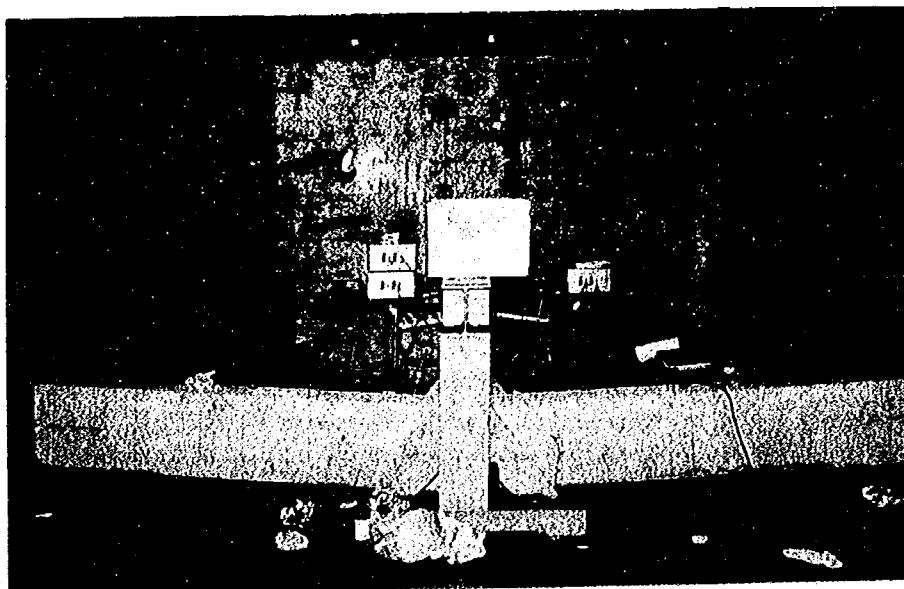
計測は図－4. 1 に示すように、ロードセルにより載荷荷重を、レーザー式変位計により試験体鉛直変位を、試験体埋設ひずみゲージにより鋼材ひずみを測定し、これらのデータをデータロガーにより収録した。

また、破壊状況を調査するため、各載荷ステップごとにひびわれ状況のマーキング及び写真撮影を実施した。

静的載荷試験に使用する各計測器の配置は図－4. 2、図－4. 3 に示すとおりである。

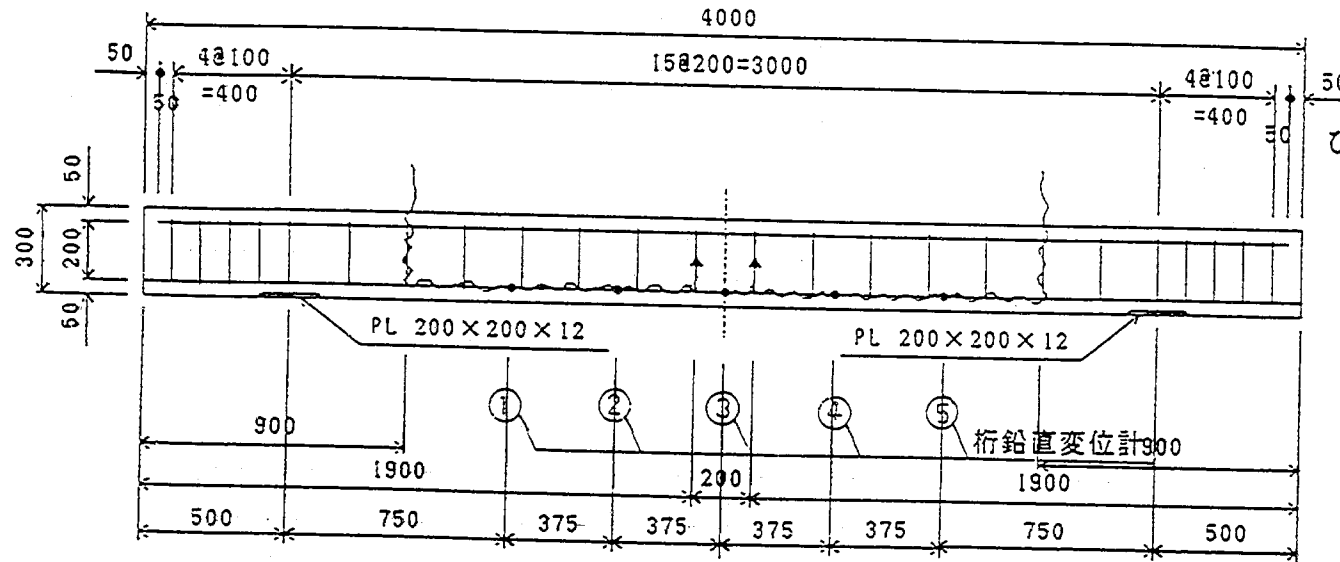


図－4. 1 計測器の構成

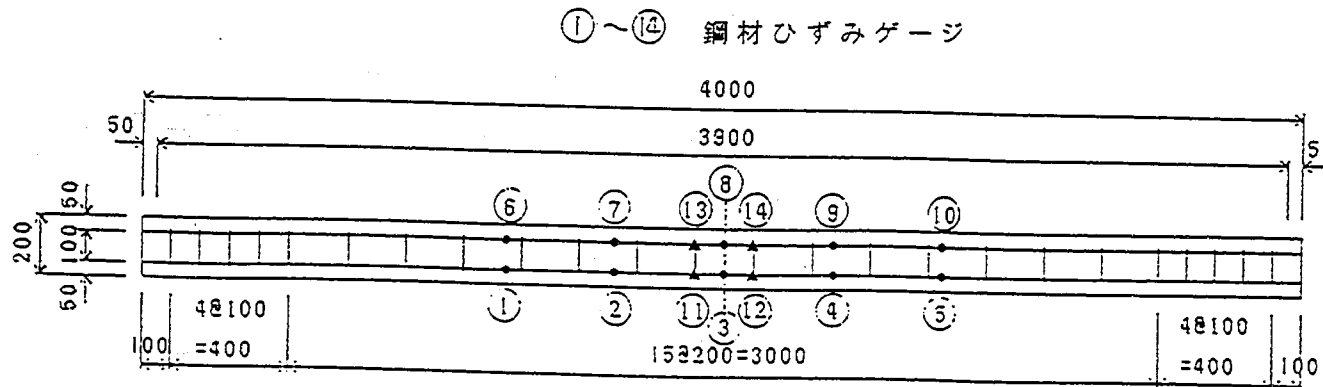


写真－4. 1 破壊後のRC桁

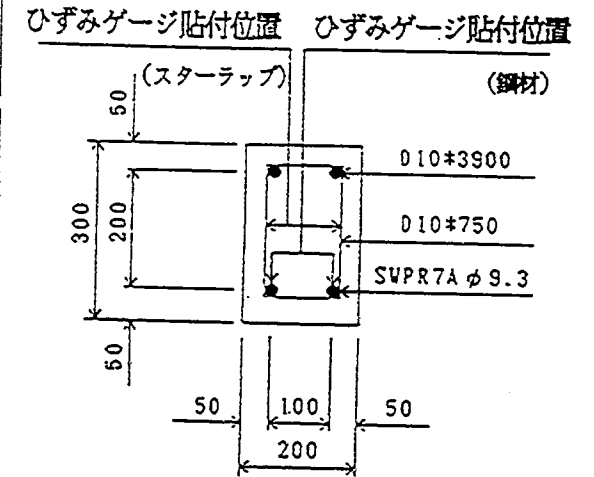
側面図



背面図



断面図



凡例

- 10枚 PC鋼線
- ▲ 4枚 スターラップ

図-4.2 PC桁試験体計器配置図

4.3 PC桁静的載荷試験結果

PC桁の静的載荷試験は、本研究所内の大型構造物試験機を使用し、10tジャッキにより荷重載荷を行った。荷重の載荷ステップは、0~4.2tまでは200kg刻みで、4.2tから荷重が減少するまでは100kg刻みで載荷した。また、最大荷重発生後は変位制御で桁中央変位40mmまで載荷した。

荷重、変位、ひずみ等のデータは、載荷ステップごとにデータロガーに収録した。

図-4.4に荷重と変位の関係を示す。荷重と変位の関係では、設計値3t（PC鋼線引張耐力の50%相当）に対し、荷重4tまでは弾性的な挙動を示し、それ以降は変位20mm程度まで荷重が増加し続け、最大7t程度まで上昇した後、徐々に荷重が減少する傾向となった。

図-4.5~図-4.7に荷重とひずみの関係を示す。荷重とひずみの関係では、桁中央部で4t程度までは弾性的な挙動を示していることがわかる。ゲージNo.2では5t以上まで、No.1では破壊直前まで弾性的な挙動を示している。

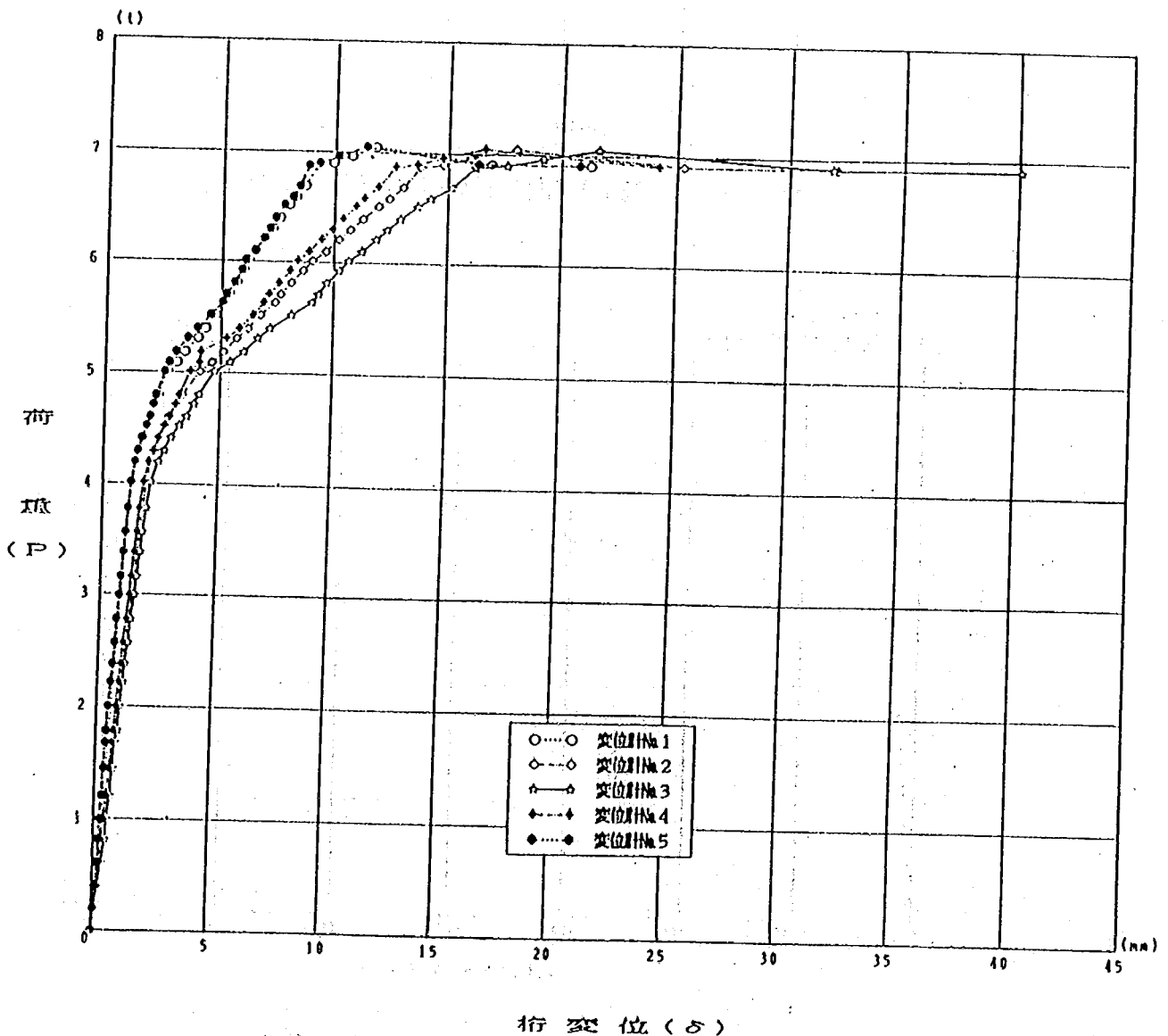


図-4.4 荷重と桁変位との関係 (PC桁 No. 4)

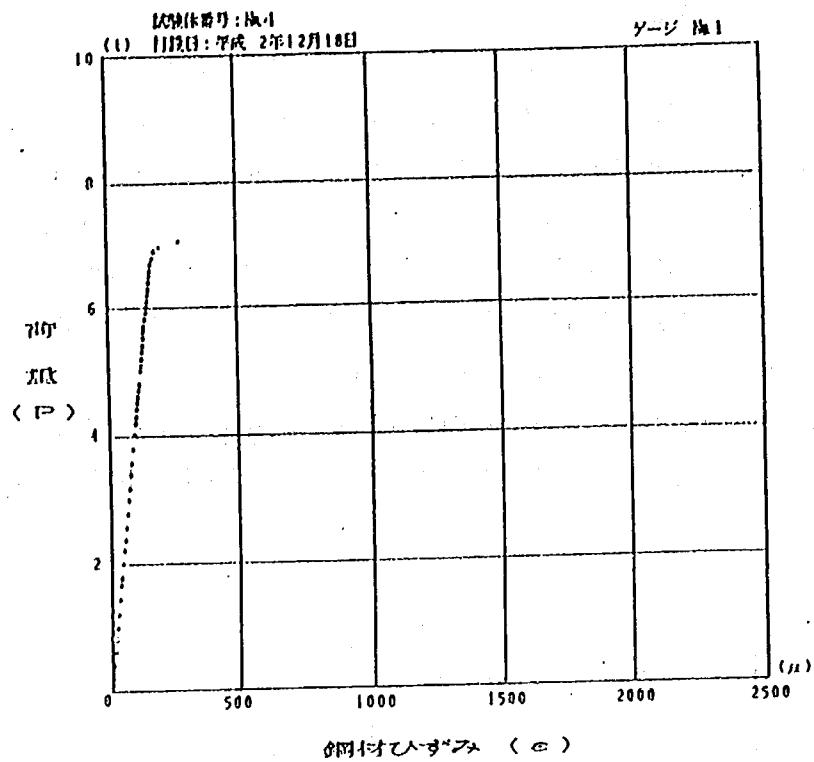


図-4.5 荷重と鋼材ひずみの関係 (PC桁 No. 4)

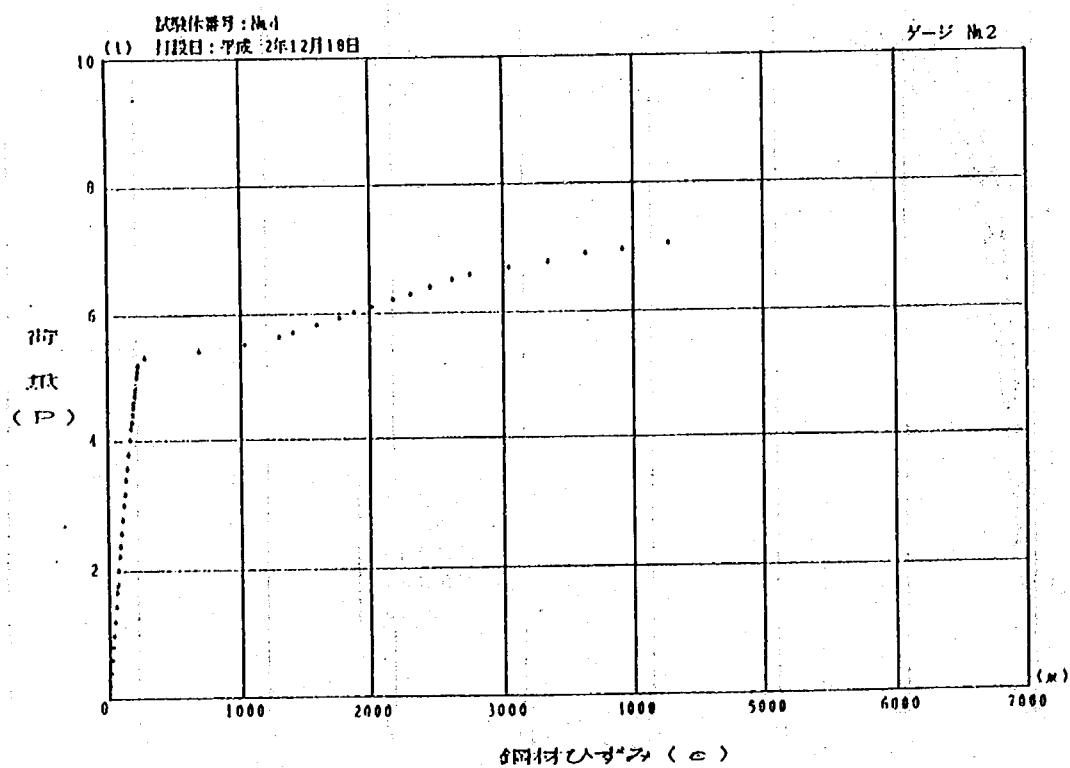


図-4.6 荷重と鋼材ひずみの関係 (PC桁 No. 4)

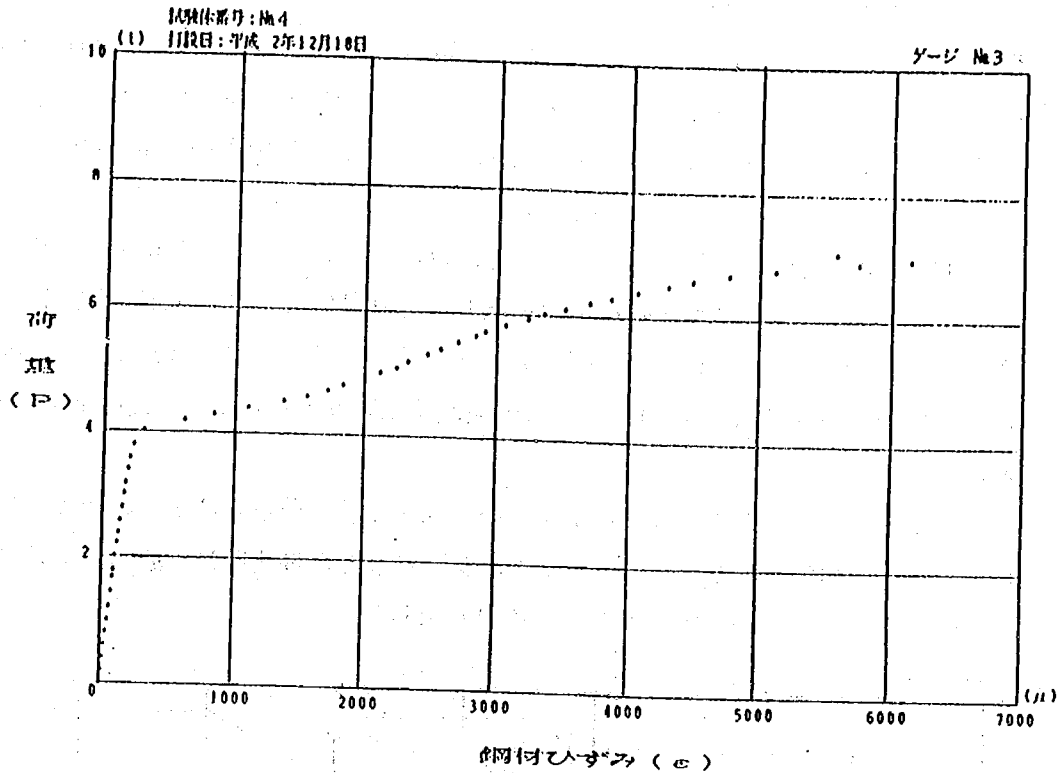


図-4.7 荷重と鋼材ひずみの関係 (PC 桁 No. 4)

桁の最初のひび割れは荷重4.2tで発生した。最大荷重は7tで、そのときの桁中央の変位は22mmであった。荷重が減少傾向を示した後は、載荷試験は桁中央の変位で制御し最大40mmまで載荷したが、PC鋼線は破断しなかった。コンクリートのひび割れは桁中央付近に1箇所、その両側に桁中央に向かって斜め方向に2箇所、合計3箇所発生した。ジャッキ直下のコンクリートの圧潰は見られなかった。コンクリート強度が大きいためと思われる。桁の破壊状況を図-4.8に示す。

スターラップ間隔 200 mm

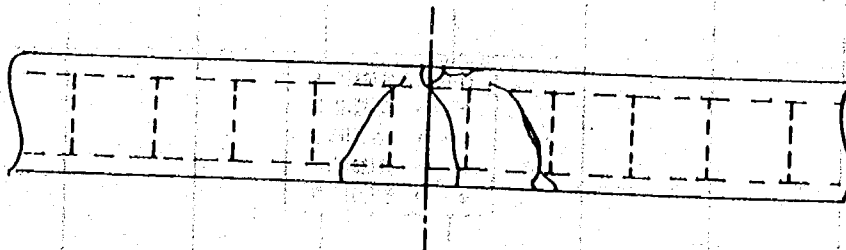


図-4.8 桁の破壊状況

4.4 RC桁静的載荷試験結果

RC桁の静的載荷試験も、PC桁と同じ試験機を用いて、10tジャッキにより荷重載荷を行った。荷重の載荷ステップは、0～1tまでは500kg刻みで、1t～4tまでは200kg刻みで、4tから荷重が減少するまでは100kg刻みで載荷した。また、最大荷重発生後は変位制御で桁中央の変位80mmまで載荷した。

荷重、変位、ひずみ等のデータは、載荷ステップごとにデータロガーに収録した。

図-4.9に荷重と変位の関係を示す。荷重と変位の関係では、設計荷重3t（鉄筋応力 $1800\text{kg}/\text{cm}^2$ 相当）に対し、荷重3.5tまでは弾性的な挙動を示し、それ以降は変位5mm程度まで同じ傾向で荷重が上昇し続け6.8tまで上昇した。その後の載荷ステップでは、一旦6.6tまで減少し、それ以降さらに上昇し続け最大7.85tまで上昇した。このときの桁中央変位は70mmであった。変位80mmでは6.35tとなり減少する傾向を示している。

図-4.10～図-4.14に荷重とひずみの関係を示す。荷重とひずみの関係では、桁中央部で2.6t程度までは弾性的な挙動を示している。これは、ひびわれ発生時に対応する。ひびわれが右側に多いため、ひずみも右側が早期に大きくなる傾向を示した。

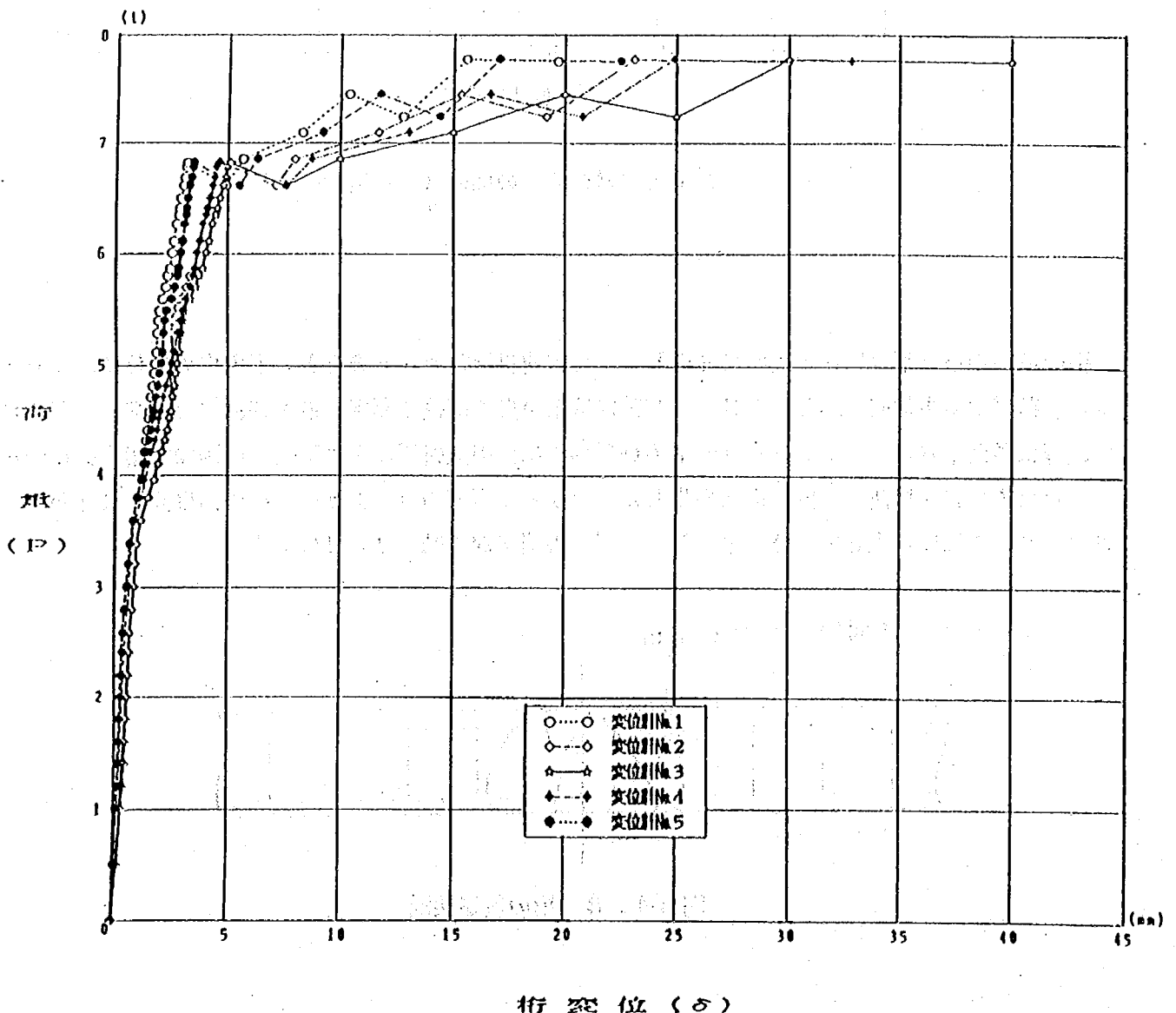


図-4.9 荷重と鋼材ひずみの関係 (RC桁 No. 4)

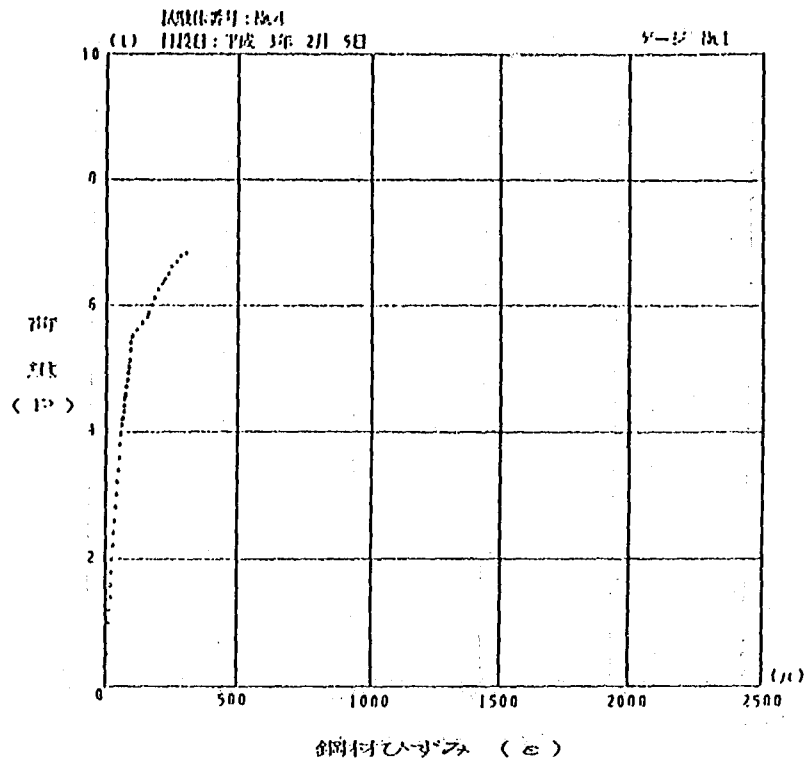


図-4.10 荷重と鋼材ひずみの関係 (RC桁 No. 4)

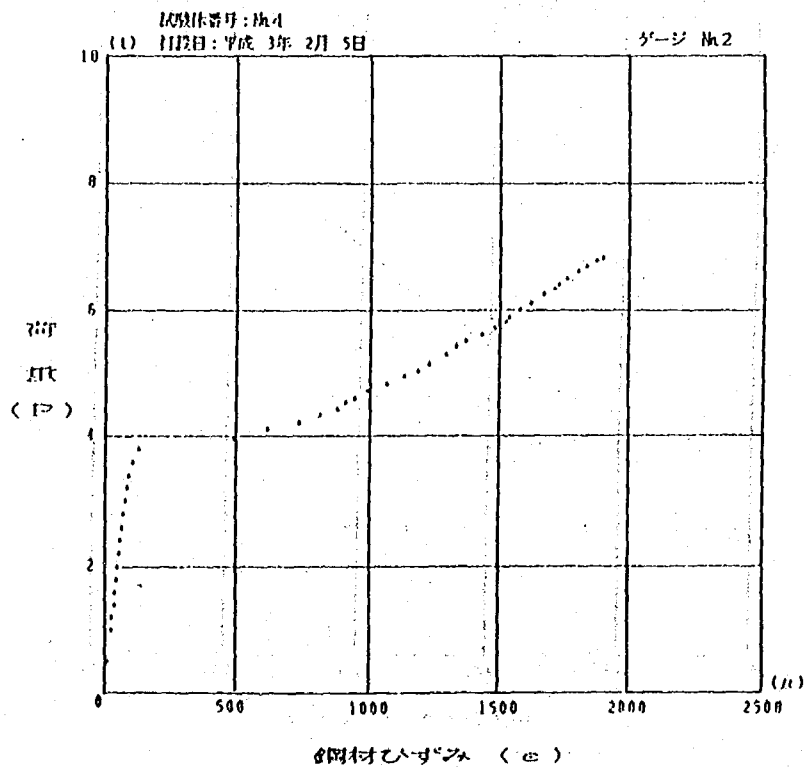


図-4.11 荷重と鋼材ひずみの関係 (RC桁 No. 4)

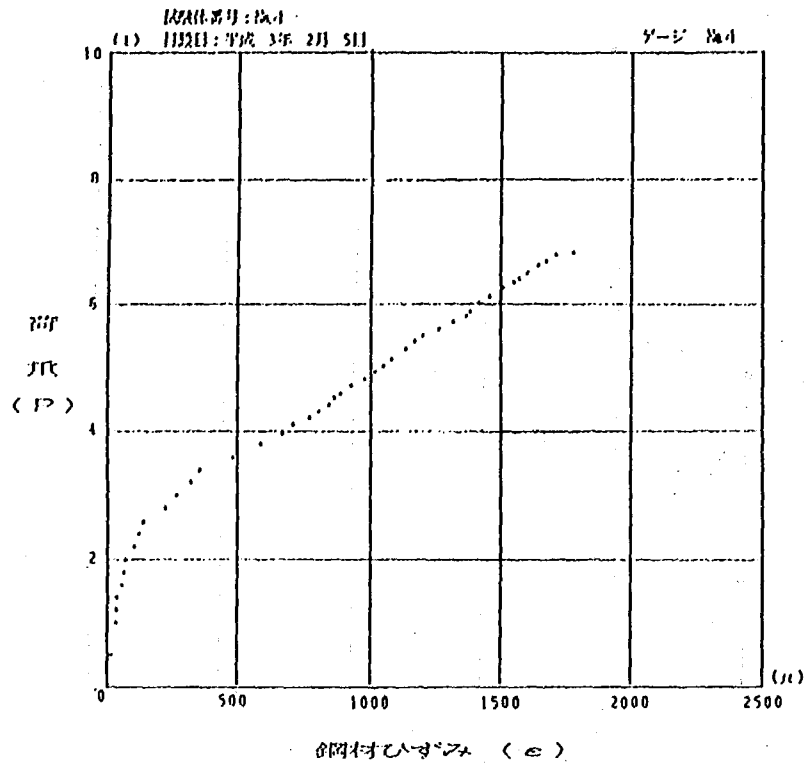


図-4.12 荷重と鋼材ひずみの関係 (RC桁 No. 4)

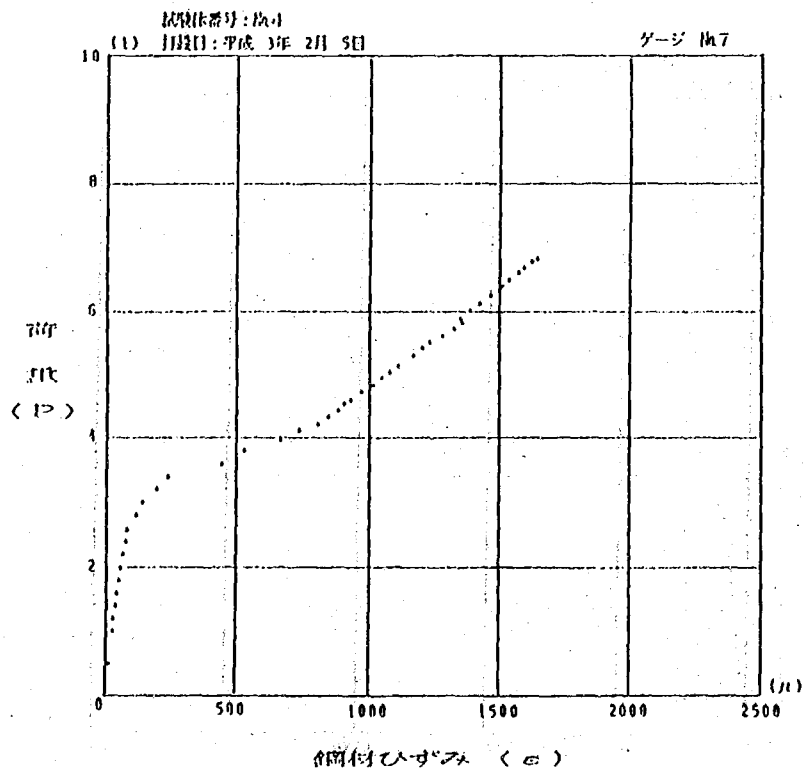


図-4.13 荷重と鋼材ひずみの関係 (RC桁 No. 4)

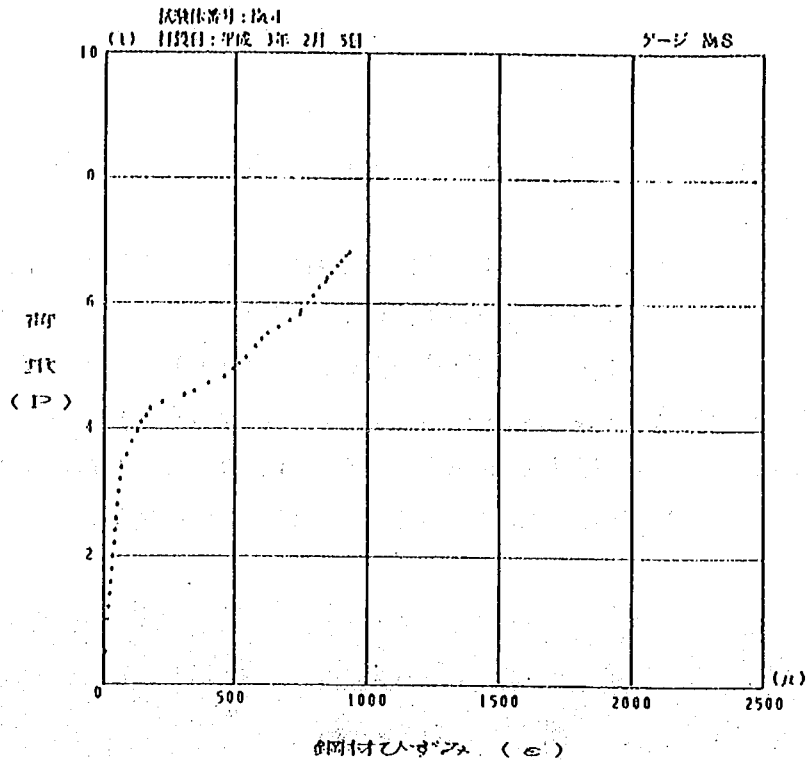


図-4.14 荷重と鋼材ひずみの関係 (RC桁 No. 4)

桁の最初のひび割れは荷重2.8tで桁中央部に発生した。荷重4.1tでひび割れは桁中心部に達した。荷重が減少傾向を示した後は桁中央の変位で制御し最大80mmまで載荷したが、鉄筋は破断しなかった。桁中央部でのコンクリートと鉄筋の付着が切れ、鉄筋が拘束されないために、大きな変形にもかかわらず鉄筋の引張力はさほど大きく作用しなかったと推定される。コンクリートのひび割れは十数箇所におよび、このうち、桁中央付近の斜め方向のひび割れは桁の上下面を貫通するものであった。また、ジャッキ下面ではコンクリートの圧潰が見られた。PC桁に比較しコンクリート強度が小さいためと思われる。桁の破壊状況を図-4.15に示す。

スラーブ間隔 300mm

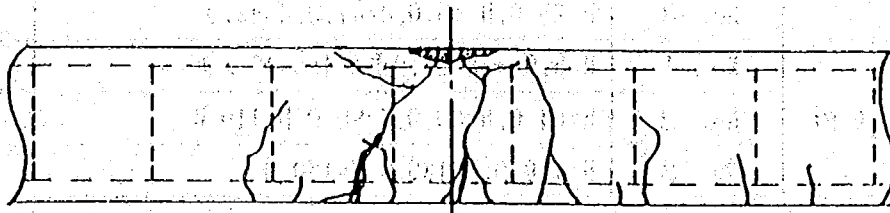


図-4.15 桁の破壊状況

5. 衝撃載荷試験

5.1 試験概要

衝撃載荷試験は本研究所の衝撃載荷装置（図-5.1）を使用して行った。衝撃試験に用いた重錘の重量は500kgとし、自由落下に近い状態で載荷した。

衝撃荷重は、重錘と試験体の間にロードセルを設置して直接測定する方法と、重錘加速度より求める方法の2とおりについて行った。ロードセルの下部には載荷鋼板200mm×200mmを設置し荷重分散を図った。また、重錘とロードセル、載荷板と試験体の間には緩衝材として厚さ50mmの橋梁用簡易ゴム支承材（日本道路公団 B種規格品）を2枚設置した。これらの構造を写真-5.1に示す。

載荷方法は衝撃載荷による残留変形が比較的小さい場合には、更に大きな荷重を繰り返し載荷した。また、試験体番号が増すごとに初回の落下高さを高くした。各試験体の衝撃載荷ステップを表-5.1に示す。

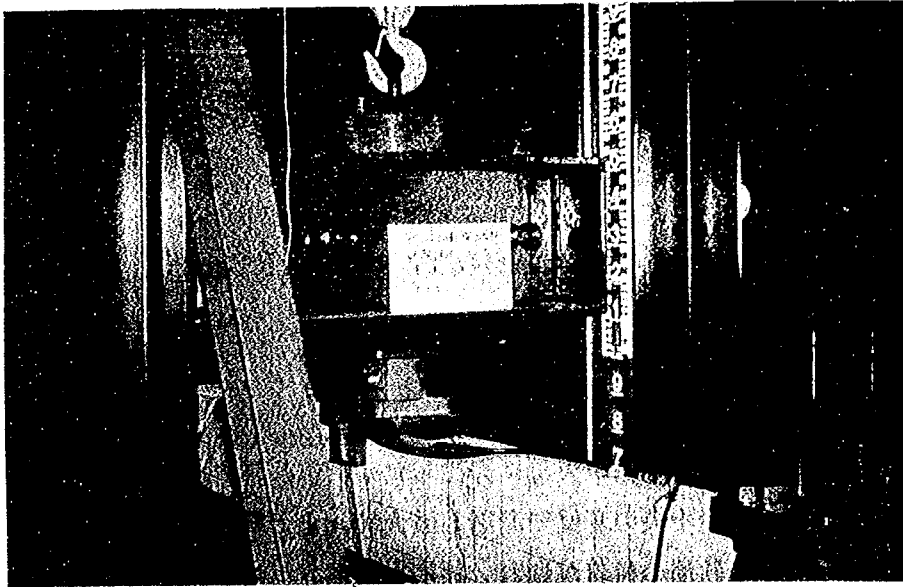


写真-5.1 セット状況

表-5.1 衝撃載荷ステップ

桁種別	試験体番号	載荷ステップ [落下高さH(cm)]	載荷回数
P C 桁	No. 1	H=1.0, H=50.0	2回
	No. 2	H=5.0 ~ H=45.0まで2cm ビッチ	21回
	No. 3	H=25.0, H=45.0, H=47.0, H=49.0	4回
R C 桁	No. 1	H=5.0 ~ H=61.0まで4cm ビッチ	15回
	No. 2	H=61.0, H=80.0, H=90.0, H=110.0	4回
	No. 3	H=110.0, H=130.0, H=150.0	3回

なお、P C 桁No. 1の載荷試験では、重錘重量は1.0tを使用し、ロードセル下部には緩衝材を装着していない。

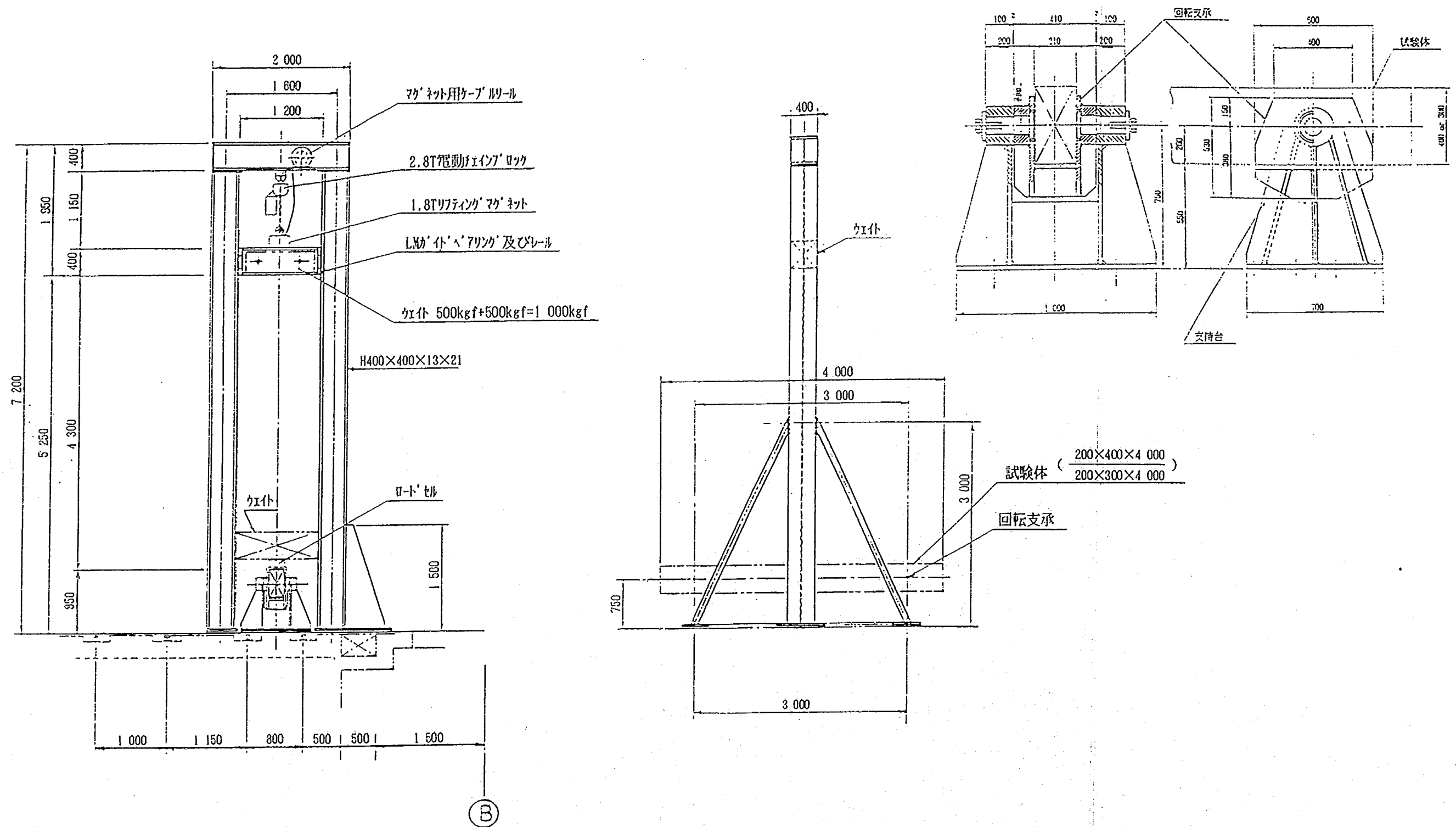


図-5.1 衝撃試験装置 (単位mm)

5.2 計測要領

計測項目は、重錘加速度、桁加速度、載荷荷重、桁変位、鋼材ひずみの5項目とし、図-5.2に示すように加速度計により重錘加速度と桁加速度を、ロードセルにより載荷荷重を、光学式変位計により試験体中央点の鉛直変位を、試験体埋設ひずみゲージにより鋼材ひずみを測定し、デジタル・データ・レコーダーに収録した。具体的な計器配置を図-5.3、図-5.4に示す。

破壊パターンを調べるため、載荷ステップごとにひびわれ部分の写真撮影を行い、同時に残留変形量を計測した。

デジタル・データ・レコーダーへのデータ収録は以下に示すとおりである。

- 収録内容：重錘及び桁の加速度，ロードセルの値，試験体鉛直変位，鋼材ひずみ
- サンプリング周波数：2000 Hz
- 収録時間：落下直前から桁の振動が納まるまでの間（約6秒）

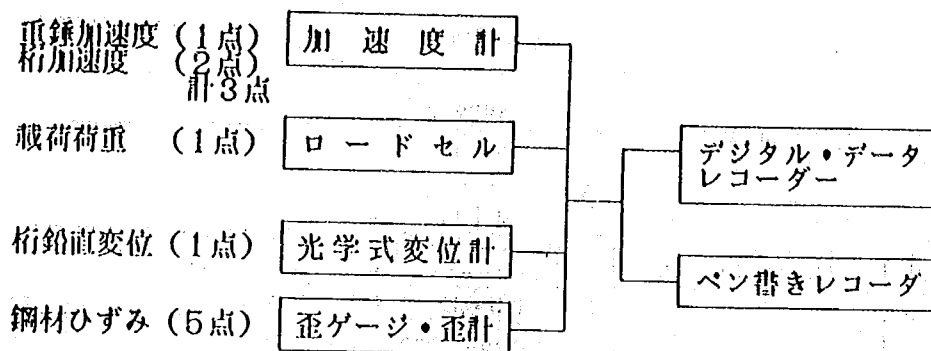


図-5.2 計測器の構成

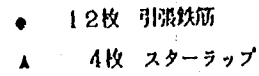
実験に用いた計測器機は以下に示すとおりである。

- 加速度計：（共和電業AS-200HA，200G） 3個
- ロードセル：BL-100TB 100t 1基
- 光学式変位計：チショー オプトロン500M 1基
- MT：TEAC-MT800 1基
- アンプ：TEAC-DR-2000B 1基
- 動歪計：（共和電業DPM-611A） 1基
- ペン書きレコーダー：三栄8チャンネル 1基
- その他（簡易式鉛直変位記録計） 1式

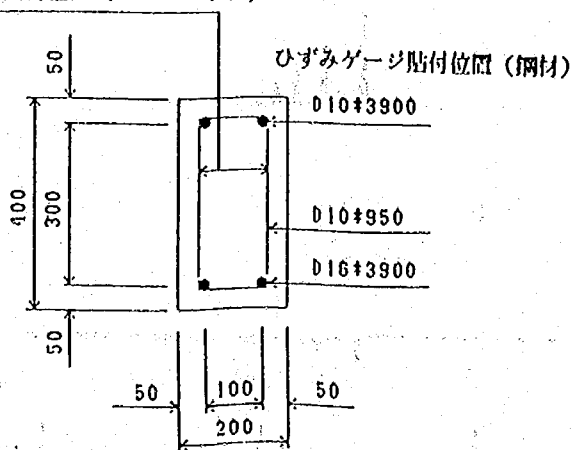
北側



凡例



ひずみゲージ貼付位置（スターラップ）



— 24 —

5.3 計測データの整理方法

衝撃荷重下でのPC部材、RC部材の挙動特性を把握するため、以下の手順で衝撃载荷試験結果の解析を行った。

(1) 時刻歴波形図の作成

デジタル・データ・レコーダーによりMTに収録されたデータから衝撃波形を取り出し、図-5.5に示すような時刻歴波形図を作成した。

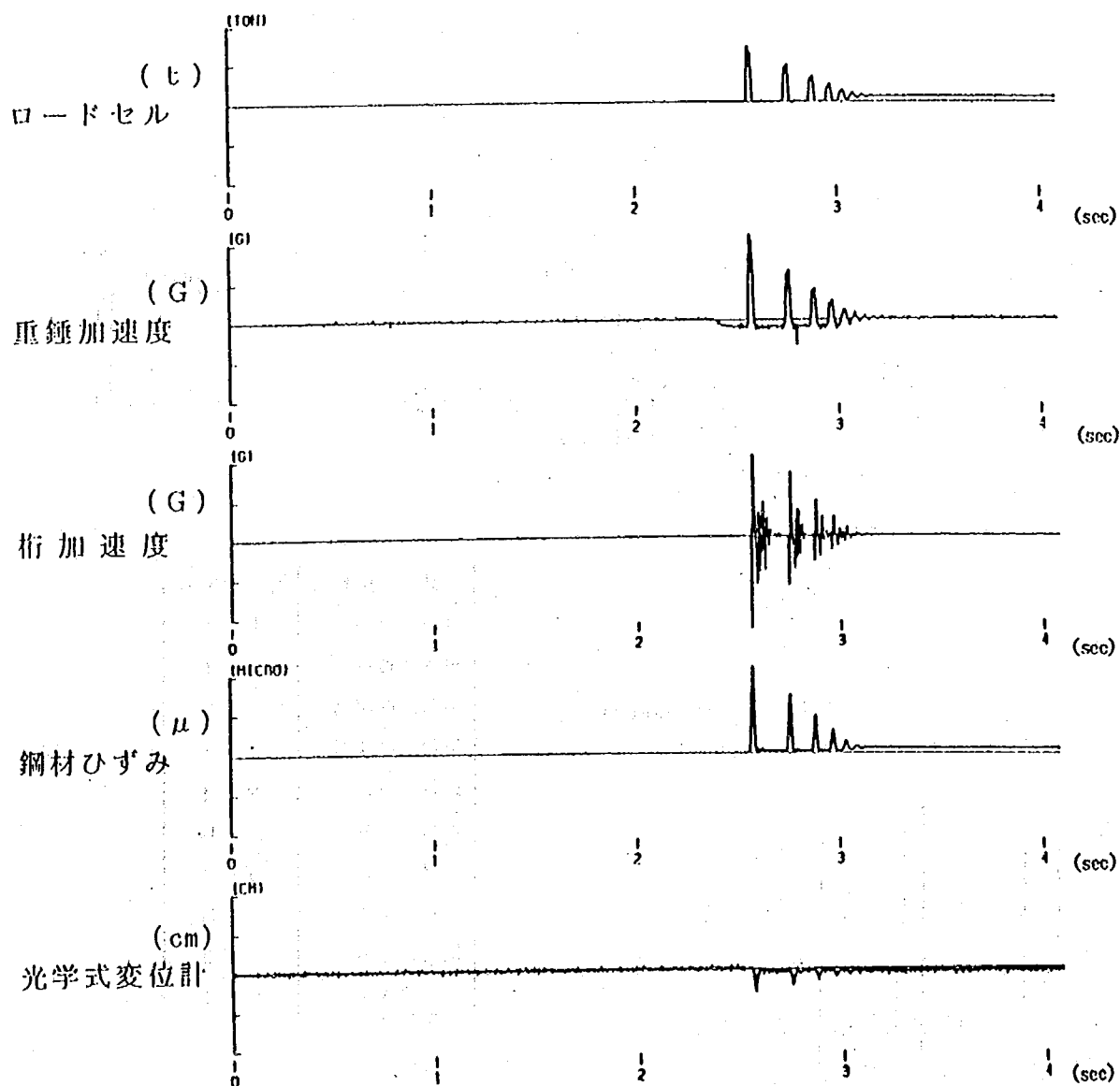


図-5.5 時刻歴波形図

(2) 衝撃力の算定

ロードセルおよび重錘加速度の時刻歴波形から衝撃力を算定した。衝撃力は、重錘の加速度 $\times$ 質量とロードセルの荷重最大値の両方の値を算出した。これらの値と重錘の位置エネルギーを対比して表に整理した。

(3) 衝撃荷重と変位、歪みのとりまとめ

ロードセルおよび重錘加速度より求まる衝撃力と、これに対応する試験体鉛直変位、鋼材ひずみの値を求めた。変位、ひずみは荷重に対し時間遅れを伴うため、波形の最大値を用いた。

この値を使用し、衝撃荷重下での荷重-変位、荷重-ひずみ曲線を作成した。また、落下高さと変位の関係を整理した。

(4) 衝撃エネルギーの算定

時刻歴波形図より重錘加速度及び桁加速度の同時刻歴波形図（重ね書き）を作成し、重錘と桁の同時刻歴における振動を把握するとともに、重錘（桁）加速度、衝撃荷重の作用時間、重錘（桁）の有効質量より衝撃エネルギーを算定した。また、重錘エネルギーと桁エネルギーの比を算出した。

さらに、荷重と桁変位の関係から衝撃吸収エネルギーを算定した。

これらの2つの衝撃エネルギーの算出方法を以下に示す。

1) 加速度から求める方法

重錘と桁が衝突する場合、衝撃エネルギーと桁のパネ特性により重錘は数回にわたってリバウンドを繰り返す。一方、桁はリバウンドを伴う重錘の衝撃力によって自由減衰運動を繰り返す。

図-5.6は衝突直後の重錘と桁速度波形を時間軸を拡大して示したものである。重錘加速度波形の斜線部は、重錘が1Gで落下し、桁に衝突した時点からリバウンドしさらに1Gで落下するまでの重錘加速度と作用時間の面積を示すものである。これを重錘のもつ衝撃エネルギーとする。

桁は、重錘と桁が衝突し重錘がリバウンドする間に数回にわたって自由減衰運動を繰り返すが、図中の斜線部で示す第1波目の桁加速度と作用時間の面積を桁の衝撃エネルギーと考えることにする。

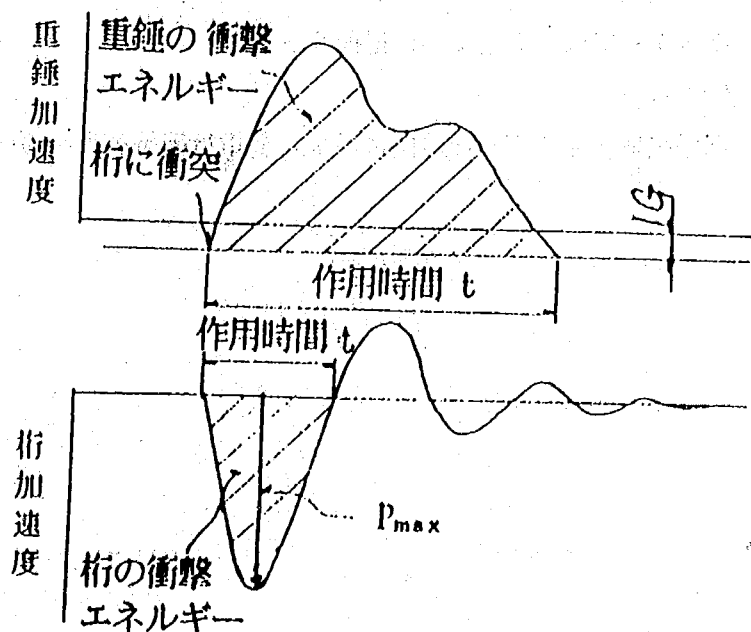


図-5.6 衝突直後の重錘と桁の加速度波形

したがって加速度から求める場合の衝撃エネルギーは以下の式で算出できることになる。

$$\text{重錘の衝撃エネルギー}(E) = \left[\int \text{重錘加速度}(G) dt \right] \times \text{重錘質量}(W)$$

$$\text{桁の衝撃エネルギー}(E) = \left[\int \text{桁加速度}(G) dt \right] \times \text{桁の有効質量}(W)$$

ここで求まる衝撃エネルギーの単位は $\text{tf} \cdot \text{sec}$ となり重錘がなす仕事量を意味する。

桁の有効質量は、単純梁の場合の加速度分布が概ね放物線に近いと考えられるため支間長の $1/2$ を考慮した。

2) 荷重と桁変位の関係から求める方法

図-5.7に荷重と桁変位の履歴曲線を示す。図中の斜線部の面積は、衝撃荷重を受け桁が変形する過程における桁の衝撃吸収エネルギーと考えられる。したがって衝撃エネルギーは次式で計算される。

$$\text{衝撃吸収エネルギー}(E) = \int \text{荷重}(P) d\delta$$

ただし、積分は桁が破壊しない場合は最大変位まで行い、桁が破壊した場合には、荷重が0となるまでの変位に対して行うものとする。ここで求まる衝撃吸収エネルギーの単位は $\text{tf} \cdot \text{cm}$ となり、重錘が有する位置エネルギーと同単位となる。したがって衝撃吸収エネルギーと位置エネルギーを対比することにより、エネルギー吸収率を定量的に把握することが可能となる。

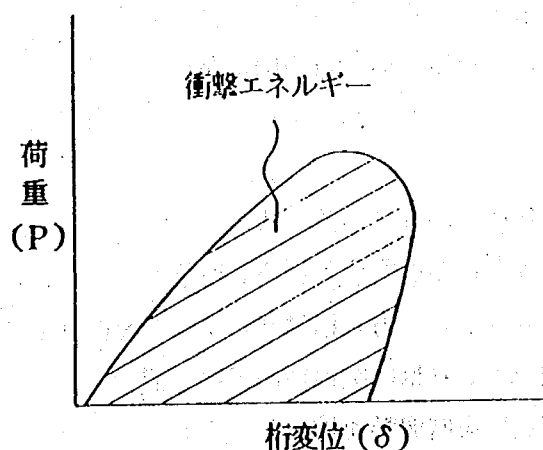


図-5.7 荷重と桁変位の履歴曲線

衝撃吸収エネルギーの算出に用いる荷重は衝撃荷重を直接的に計測したロードセルの値を使用する。

5.4 PC桁衝撃載荷試験結果

5.4.1 試験結果の概要

PC桁の衝撃載荷試験は、試験体1については、重錘重量1.0t、落下高さは1.0cmと50cmで2回繰り返し載荷し、落下高さ50cmで破壊した。試験体2については、重錘重量0.5t、落下高さは5cm～45cmまで2cmピッチで21回繰り返し載荷し、落下高さ45cmで破壊した。試験体3は、重錘重量0.5t、落下高さは25cm、45cm、47cm、49cmまで4回繰り返し載荷し、落下高さ49cmで破壊した。PC桁の載荷試験結果を表-5.2～表-5.4に示す。

表-5.2 PC桁No.1 衝撃載荷試験結果 (重錘 1.0t)

計測項目	記号	落下高さ		単位
		H=1cm	H=50cm	
ロードセル	L-1	5.82	15.88	t
重錘加速度	A-1	6.13	22.88	G
桁加速度南側	A-2	6.54	75.77	//
桁加速度北側	A-3	6.10	48.57	//
鋼材ひずみ	S-3	229.50	5 336.89	μ
//	S-8	234.09	5 175.61	//
//	S-2	183.32	5 300.25	//
//	S-11	144.27	5 213.32	//
//	S-7	234.61	5 129.00	//
光学式変位計	OPT	0.27	11.20	cm

表-5.4 PC桁No.3 衝撃載荷試験結果 (重錘 0.5t)

計測項目	記号	落下高さ				単位
		H=25cm	H=45cm	H=47cm	H=49cm	
ロードセル	L-1	9.34	11.06	10.67	10.61	t
重錘加速度	A-1	16.94	20.08	21.70	21.80	G
桁加速度南側	A-2	21.93	31.90	35.50	40.00	//
桁加速度北側	A-3	18.81	31.45	34.68	38.34	//
鋼材ひずみ	S-3	5 127.04	0.0	0.0	0.0	μ
//	S-8	6 096.36	0.0	0.0	0.0	//
//	S-2	3 362.81	4 258.00	5 202.76	23 330.19	//
//	S-11	67.30	52.27	37.56	61.29	//
//	S-7	2 864.57	3 599.12	17 549.36	0.0	//
光学式変位計	OPT	1.52	2.78	3.29	10.86	cm

表-5.3 PC桁No.2衝撃載荷試験結果(重錘 0.5t)

単位: t, G, μ , cm

計測項目	記号	落下高さ						
		H=5cm	H=7cm	H=9cm	H=11cm	H=13cm	H=15cm	H=17cm
ロードセル	L-1	5.23	5.99	6.66	7.01	7.48	8.70	8.04
重錘加速度	A-1	7.54	8.58	9.96	10.52	11.43	12.16	12.70
桁加速度南側	A-2	10.99	12.85	14.93	18.54	20.04	19.49	21.20
桁加速度北側	A-3	10.07	12.76	15.28	18.23	20.98	21.28	22.25
鋼材ひずみ	S-3	2 516.20	3 379.04	4 140.00	4 383.24	4 800.94	0.0	0.0
〃	S-8	2 349.85	3 183.22	3 719.29	4 011.36	0.0	0.0	0.0
〃	S-2	246.00	284.00	350.00	1 438.00	2 017.00	2 578.00	2 842.00
〃	S-11	88.00	56.00	70.00	70.00	175.00	590.85	641.41
〃	S-7	228.00	262.92	263.00	912.00	1 333.00	-4 798.00	-2 631.00
光学式変位計	OPT	0.38	0.55	0.69	0.83	1.00	1.11	1.24

計測項目	記号	落下高さ						
		H=19cm	H=21cm	H=23cm	H=25cm	H=27cm	H=29cm	H=31cm
ロードセル	L-1	9.79	8.91	9.09	9.62	9.09	9.28	9.89
重錘加速度	A-1	13.03	13.37	13.99	14.86	15.73	15.67	17.15
桁加速度南側	A-2	21.03	22.64	23.98	24.81	29.18	30.19	27.38
桁加速度北側	A-3	20.25	21.85	22.55	25.14	27.50	30.29	27.31
鋼材ひずみ	S-3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
〃	S-8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
〃	S-2	2 052.00	-2 233.64	-2 894.00	-2 348.86	-1 754.00	-1 789.00	-1 754.00
〃	S-11	860.96	607.84	638.25	700.32	70.00	0.0	0.0
〃	S-7	-1 614.00	-1 473.00	-2 010.93	-2 224.15	-1 754.00	-1 964.00	-1 894.00
光学式変位計	OPT	1.38	1.52	1.62	1.79	1.97	2.18	2.33

計測項目	記号	落下高さ						
		H=33cm	H=35cm	H=37cm	H=39cm	H=41cm	H=43cm	H=45cm
ロードセル	L-1	9.65	9.10	9.96	12.28	13.02	11.27	11.83
重錘加速度	A-1	16.60	18.52	17.90	18.35	18.24	18.35	18.14
桁加速度南側	A-2	33.40	30.50	31.00	35.00	33.75	36.60	34.20
桁加速度北側	A-3	33.84	29.85	30.96	32.40	33.27	35.91	34.90
鋼材ひずみ	S-3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
〃	S-8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
〃	S-2	-1 894.00	-2 316.00	-2 105.00	-2 526.00	13 436.86	-11 789.00	-1 1789.00
〃	S-11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
〃	S-7	2 446.10	-2 192.00	1 087.00	2 210.00	5 863.85	2 701.00	2 456.00
光学式変位計	OPT	2.49	2.67	2.87	3.08	3.24	3.42	9.79

5.4.2 試験体1の衝撃荷重試験結果

衝撃荷重試験結果から、落下高さ1cmの場合、衝撃荷重はロードセルで5.8tで、重錘加速度から求めた場合6.1tであり概ね同じ値となった。落下高さ50cmでは、ロードセルで16t、重錘加速度から求めた場合23tであり、ロードセルの方が3割程度小さな値を示した。

落下高さ50cmにおける試験体の破壊状況は、載荷板端部のあたりで試験体下面から上面にかけて概ね鉛直にコンクリートが破壊し、同時にP C鋼線も破断した。なお、上面の鉄筋は破断しなかった。重錘とロードセルの間には緩衝材（ゴム板）を設置したが、載荷板と試験体の間には緩衝材は設置していない。破壊の状況から見て、載荷板端部における応力集中による破壊と思われる。試験体の破壊状況を図-5.8に示す。

その他の部分では、桁中央付近に別に1箇所、中央から40cm付近に左右対称に1箇所ずつひび割れが発生していた。また、ロードセル直下付近のコンクリートの圧潰は見られなかった。コンクリート強度が大きいと思われる。

試験体2以降の試験では、載荷板と試験体の間に厚さ50mmのゴム板を設置し荷重分散を図った。

スターラップ間隔 200mm

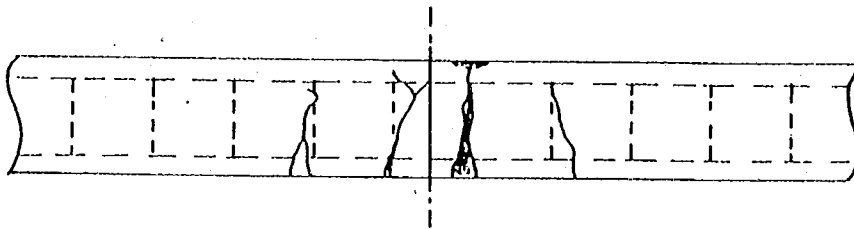


図-5.8 桁の破壊状況

5.4.3 試験体2の衝撃載荷試験結果

各載荷ステップにおける荷重と桁変位の測定結果を表-5.5に示す。

図-5.10に落下高さと荷重の関係を示す。荷重と落下高さの関係は、落下高さ35cmでロードセルと重錘加速度から求めた荷重がほぼ同じ値を示したが、それ以外の載荷ステップではロードセルの方が1t~3t程度大きな値を示した。図よりロードセルから求めた荷重は変動が大きいこと、一方重錘加速度から求めた荷重は落下高さの増加と共にめらかな増大を示すが、落下高35cm以上で荷重の増加がみられないなど、測定値に対する信頼性が十分とは言えないようである。

荷重と桁変位の関係を図-5.11に示す。落下高さの増加と共に変位は単調に増加しているが、荷重が変動していないため、図のように複雑な折線形状となる。

落下高さと桁中央変位（残留変位及び合計変位）の関係を図-5.12上段に示す。桁の残留変位は落下高さ45cmまでの累積で2cm程度であった。落下高さと衝撃による桁中央最大変位（残留変位を除いた値）の関係を図-5.12下段に示す。桁中央最大変位は落下高さがにほぼ比例して増加する傾向を示している。

桁の破壊状況を図-5.9に示す。最初のひびわれは落下高さ9cmで発生し、以後落下高さを高くするに伴いひび割れの進行が見られた。ひび割れはロードセル直下の桁中央部で鉛直に1箇所、その両側で桁中央部に向かって斜め方向に2箇所、鉛直方向に1箇所大きな割れが発生した。最終的には桁中央部でP C鋼線が破断したが、コンクリート強度が大きいとため、ロードセル直下付近のコンクリートの圧潰は見られなかった。

スターラップ間隔 200mm

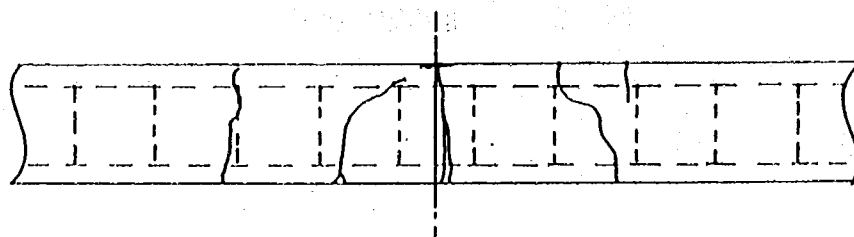


図-5.9 桁の破壊状況

表-5.5 各載荷ステップにおける荷重と桁変位の関係 (PC桁 No. 2, 重錘 0.5t)

[単位: t, cm]

落下高さ (II) cm	ロードセルから求めた荷重	重錘加速度から求めた荷重	累積残留変位	衝撃最大変位	合計変位
5	5.23	3.77	—	0.38	0.380
7	5.99	4.29	0.047	0.55	0.597
9	6.66	4.98	0.046	0.69	0.736
11	7.01	5.26	0.055	0.83	0.885
13	7.48	5.72	0.078	1.00	1.078
15	8.70	6.08	0.046	1.11	1.156
17	8.04	6.35	0.065	1.24	1.305
19	9.79	6.52	0.077	1.38	1.457
21	8.91	6.69	0.089	1.52	1.609
23	9.09	7.00	0.101	1.62	1.721
25	9.62	7.43	0.146	1.79	1.936
27	9.09	7.87	0.188	1.97	2.158
29	9.28	7.84	0.242	2.18	2.422
31	9.89	8.58	0.303	2.33	2.633
33	9.65	8.30	0.385	2.49	2.875
35	9.10	9.26	0.516	2.67	3.186
37	9.96	8.95	0.681	2.87	3.551
39	12.28	9.18	0.864	3.08	3.944
41	13.02	9.12	1.099	3.24	4.339
43	11.27	9.18	1.397	3.42	4.817
45	11.83	9.07	1.810	9.79	11.600

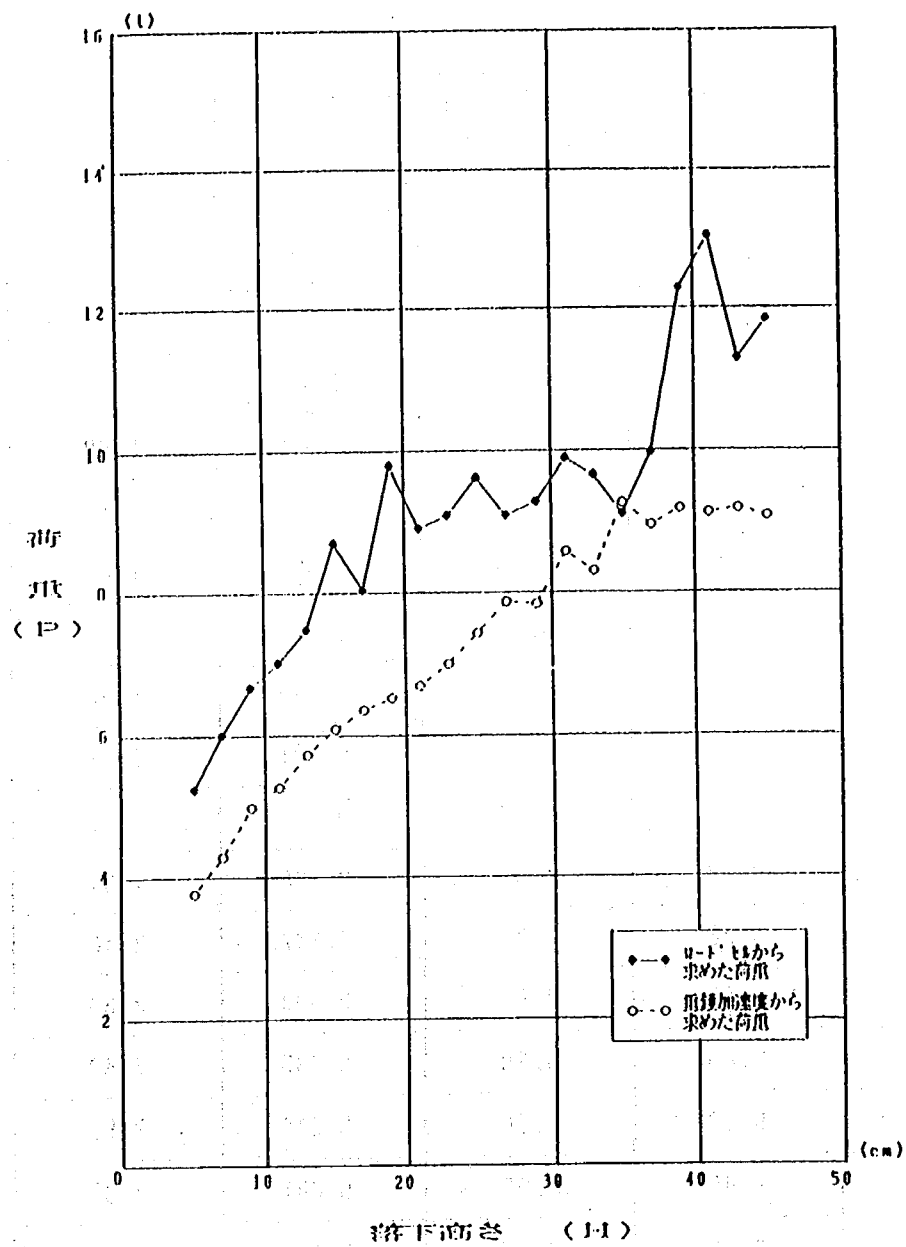


図-5.10 落下高さと荷重の関係 (PC桁 No. 2, 重錘 0.5t)

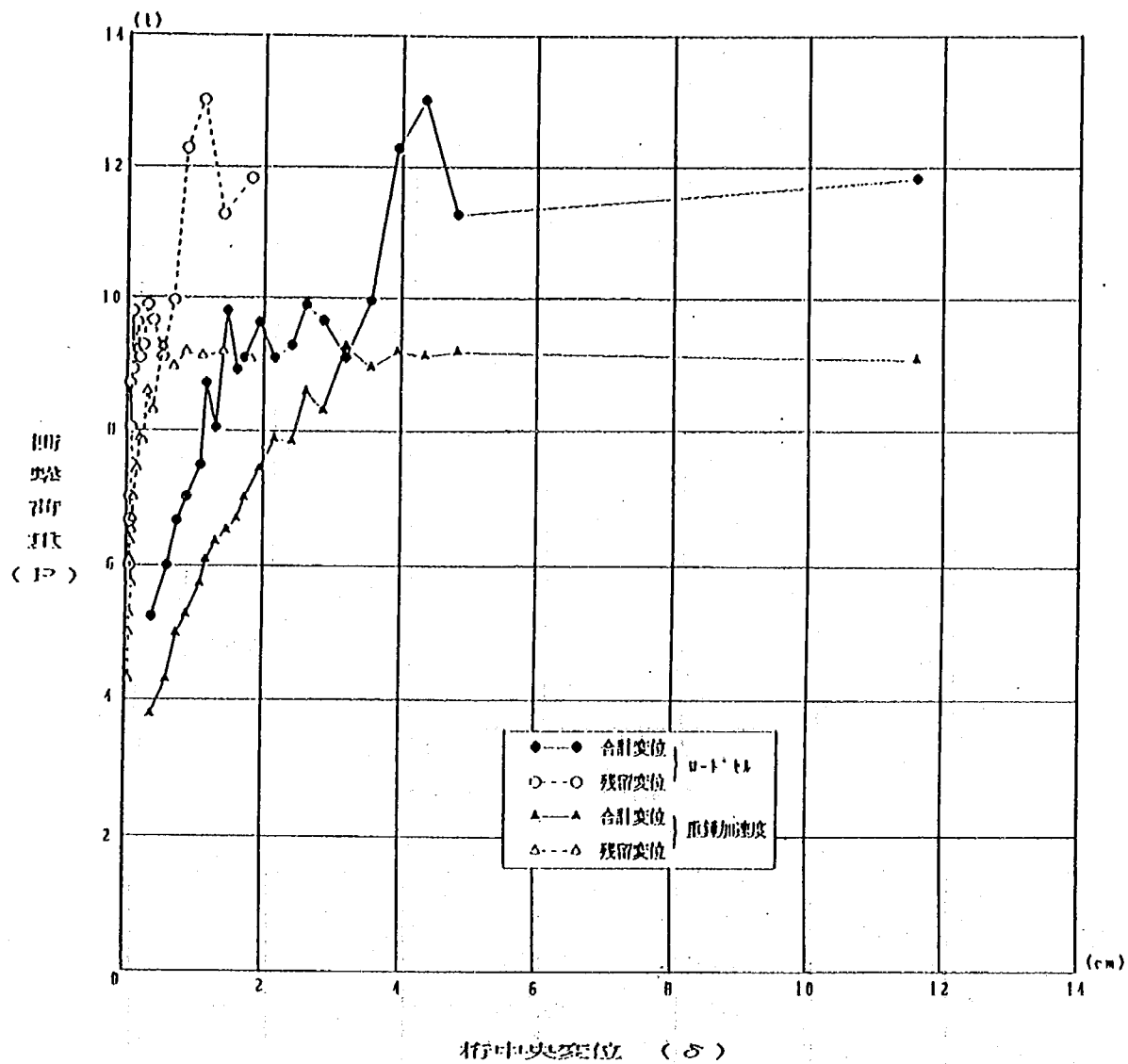


図-5.11 荷重と桁変位の関係 (PC桁 No. 2, 重錘 0.5t)

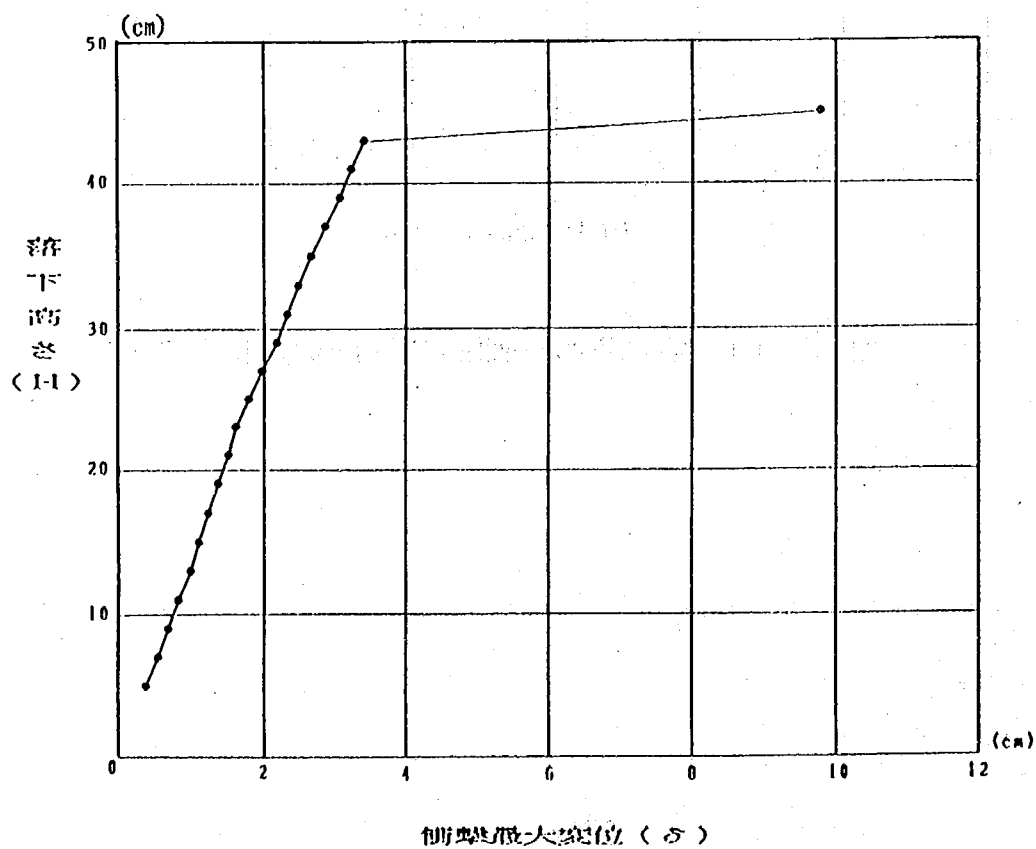
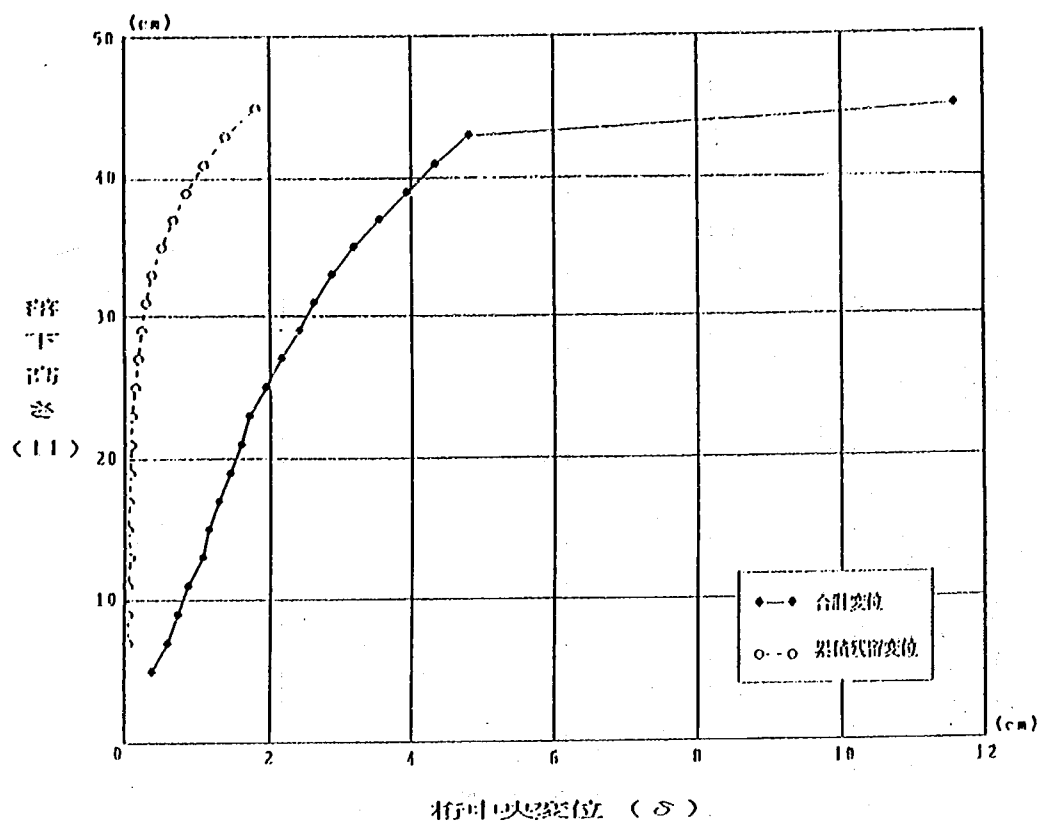


図-5.12 落下高さと桁中央変位および桁最大変位の関係 (PC桁 No. 2, 重錘 0.5t)

5. 4. 4 試験体3の衝撃载荷試験結果

各载荷ステップにおける荷重, 桁の変位をまとめて表-5. 6に示す。

荷重と落下高さの関係は図-5. 14に示すとおりであり, ロードセルと重錘加速度から求めた荷重は概ね同程度の値を示した。荷重と桁変位の関係を図-5. 15に示す。桁の残留変位は落下高さ49cmまでの累積で1.5cm程度であり, 試験体2に比較し少ない値となった。これは, 試験体2に比較し载荷繰り返し回数が少ないことに起因していると思われる。桁の耐荷力は概ね10.5t程度であった。

落下高さと桁中央変位の関係を図-5. 16に, 落下高さと衝撃による桁中央最大変位との関係を図-5. 17に示す。この場合にも落下高さと衝撃最大変位は, 破壊までは比例していることがわかる。

桁の破壊状況は, 落下高さ25cmで桁中央部に鉛直方向に1箇所及びその両側斜め方向に2箇所, 計3箇所にひび割れが発生した。ひび割れは桁の中心部まで達していた。破壊は桁中央部においてPC鋼線も破断したが, 上面の鉄筋は破断しなかった。また, コンクリート強度が大きいため, ロードセル直下のコンクリートの圧潰は見られなかった。桁の破壊状況を図-5. 13に示す。

ス タ ー ラ ッ プ 間 隔 2 0 0 m m

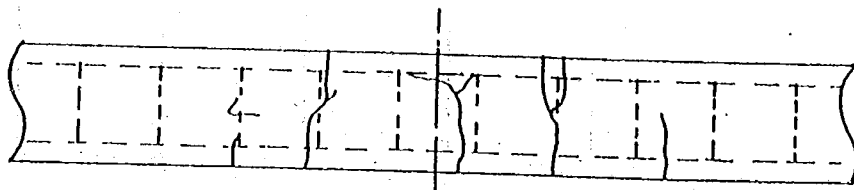


図-5. 13 桁の破壊状況

表-5. 6 各载荷ステップにおける荷重と桁変位の関係 (PC桁 No. 3, 重錘 0.5t)

[単位: t, cm]

落 下 高 さ (II) cm	ロードセルから求めた荷重	重錘加速度から求めた荷重	累積残留変位	衝撃最大変位	合 計 変 位
25	9.34	8.47	—	1.520	1.520
45	11.06	10.04	0.045	2.779	2.824
47	10.67	10.85	0.563	3.291	3.854
49	10.61	10.90	1.452	10.864	12.316

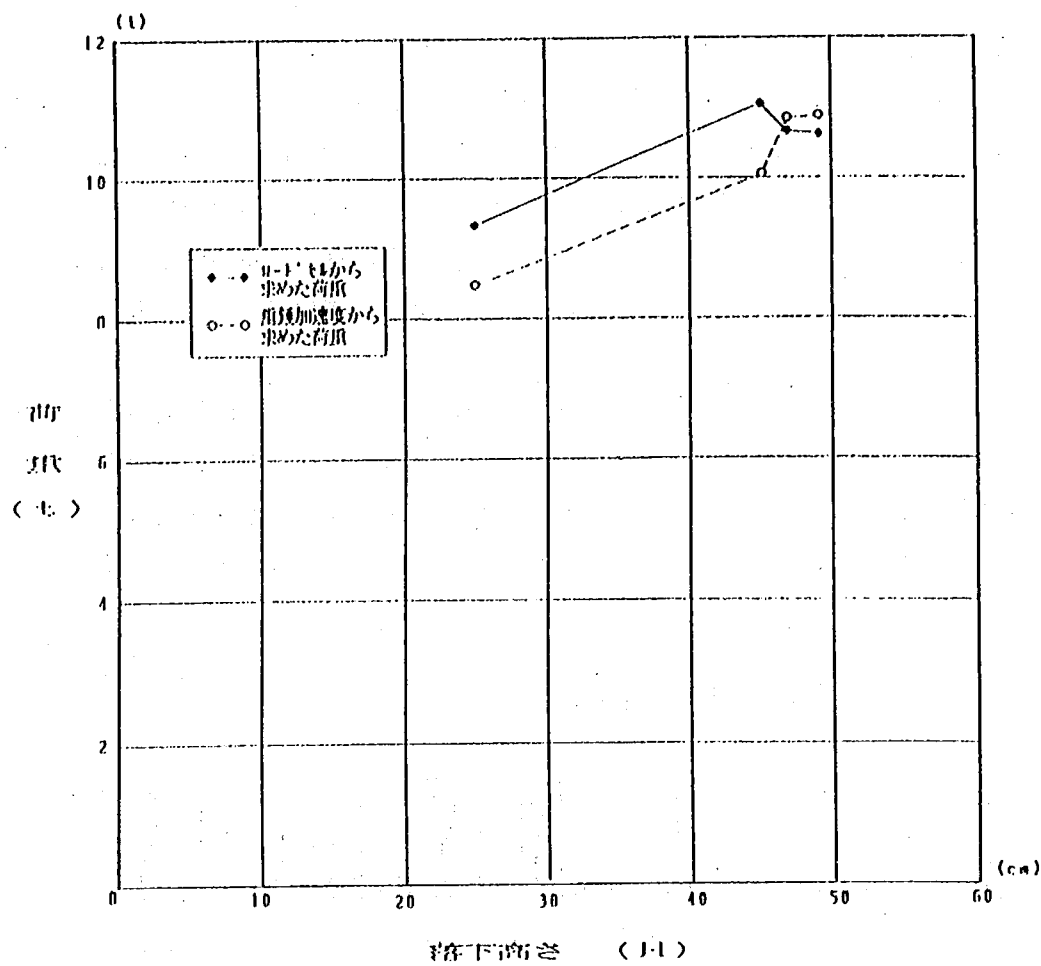


図-5.14 落下高さと荷重の関係 (PC材 No. 3, 重錘 0.5t)

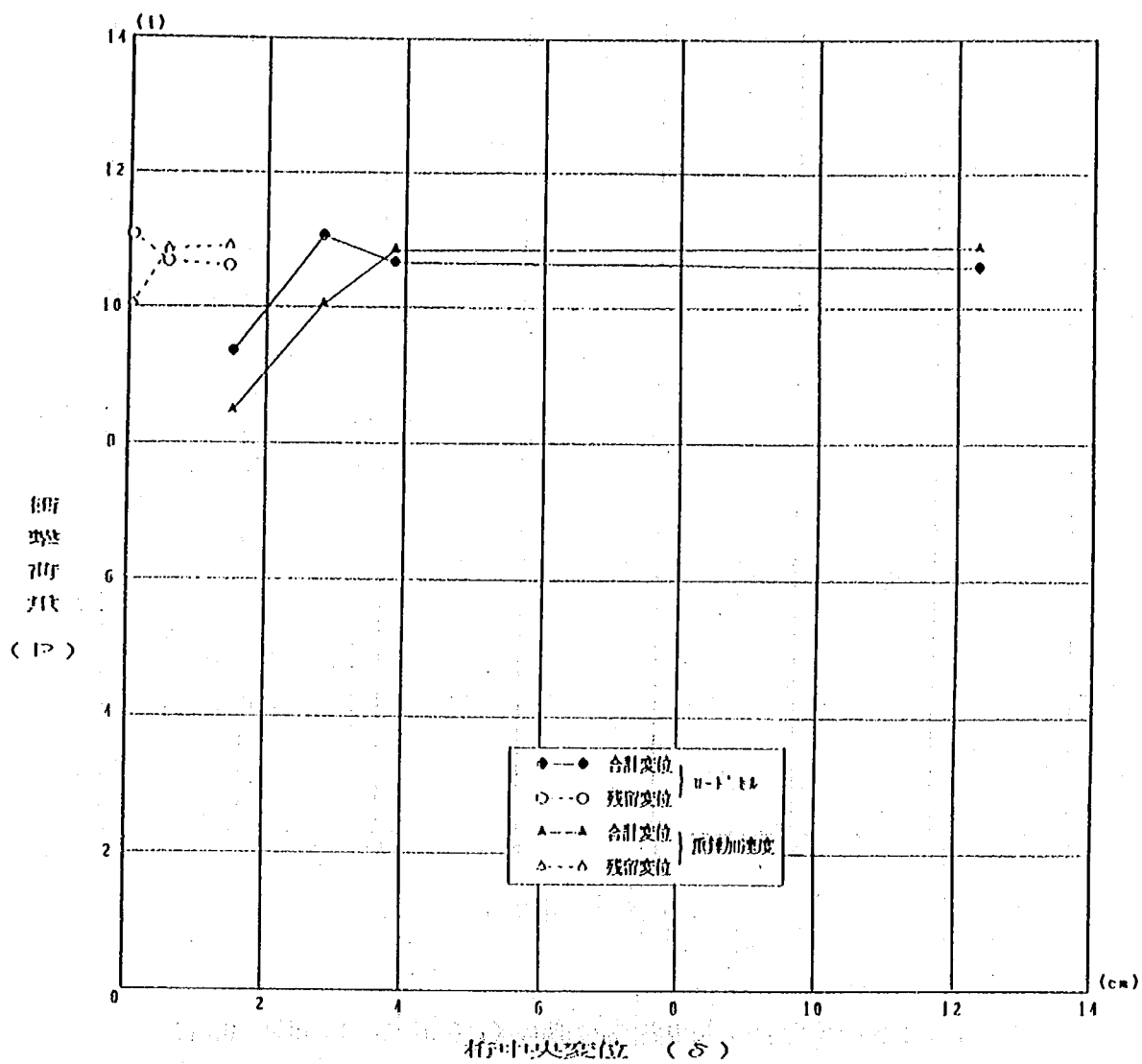


図-5.15 荷重と桁変位の関係 (PC桁 No. 3, 重錘 0.5t)

注) 最終変位は拘束があるため実際はこの値以上である。

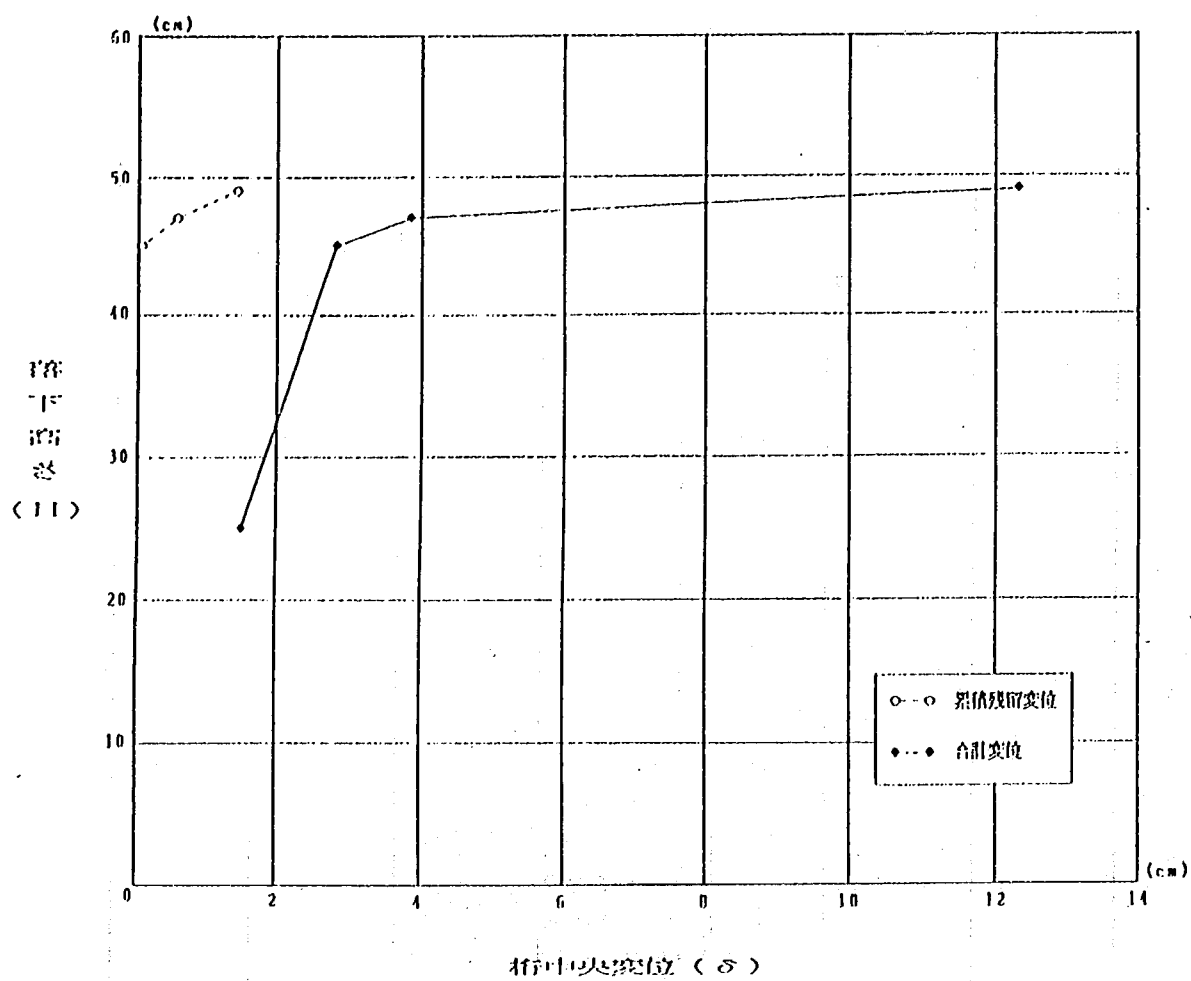


図-5.16 落下高さと桁中央変位の関係 (PC桁 No. 3, 重錘 0.5t)

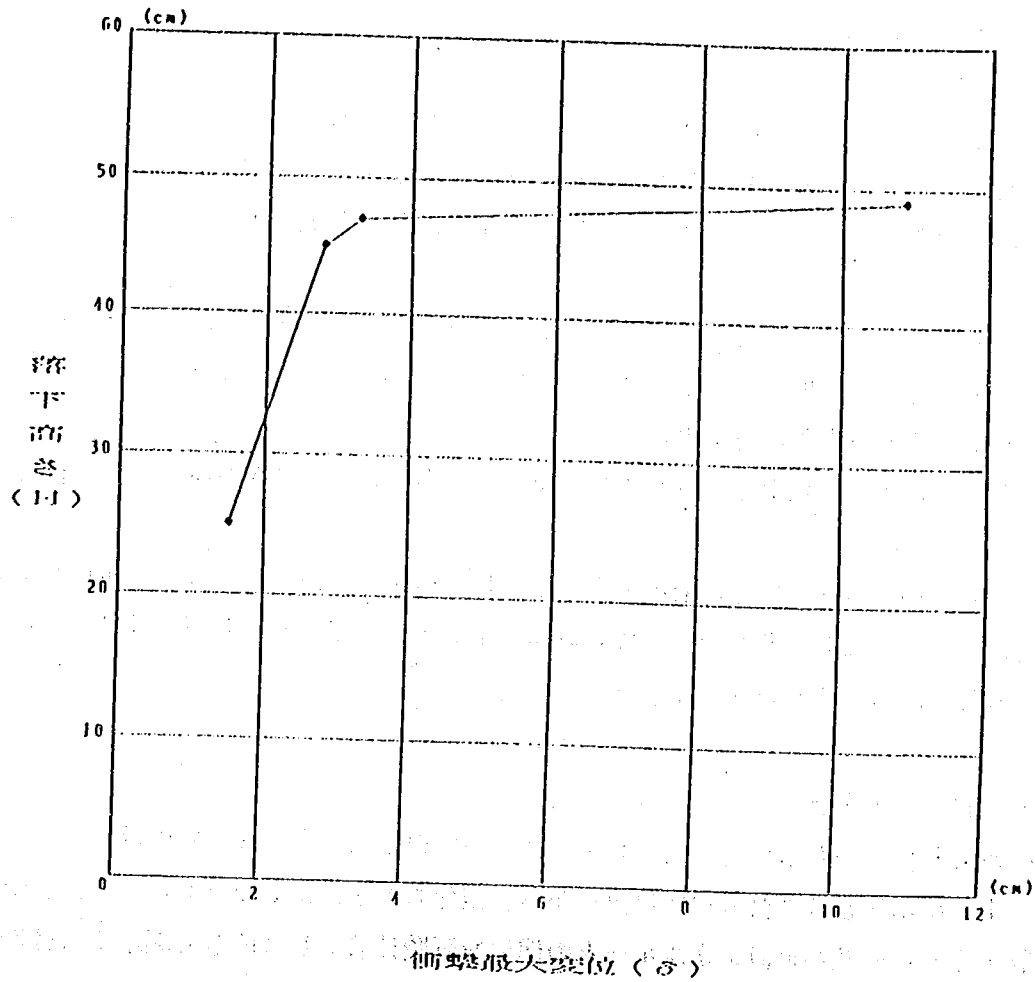


図-5.17 落下高さと衝撃最大変位の関係 (PC 桁 No. 3, 重錘 0.5t)

5. 4. 5 衝撃エネルギーの算定

(1) 加速度から求めた衝撃エネルギー

重錘及び桁の加速度の時間に関する積分を表-5. 7に示す。これは附図-1. 1~附図-1. 7に示すような時刻歴データから各落下高さに対して求めたものである。桁の積分値は、重錘の積分値の概ね20%~60%に分布し、落下高さが高くなるのに伴って、桁の積分値の割合は大きくなる傾向を示している。

表-5. 7の値に質量をかけて両者のもつ衝撃エネルギーを計算すると表-5. 8を得る。また、これらの関係を試験体2, 3に関して図示すれば図-5. 18, 図-5. 19を得る。ここで桁の有効質量は張り出し部を除く支間部の質量の1/2とした。

重錘と桁の衝撃エネルギーの比率は、概ね10%~25%に分布し、落下高さが高くなるに伴って桁に及ぼす影響は大きくなる傾向を示している。

これらの結果から、加速度から求めた桁のエネルギーは、重錘エネルギーと大きくかけ離れることがわかった。桁は、衝撃により振動を行うため、最初の半波のみを積分しても桁の受けたエネルギーを適切に評価することにはならないと言えよう。

(2) 桁の衝撃吸収エネルギー

荷重と変位の積分から求めた桁の衝撃吸収エネルギーの算出結果を表-5. 9に示す。これは附図-1. 8~1. 16に示すような荷重-変位曲線から、積分して求めたものである。また、落下高さと桁の衝撃吸収エネルギー及び位置エネルギーとの関係を試験体2, 3に関して図示すれば図-5. 20, 図-5. 21をえる。

試験体1において、位置エネルギーと桁の衝撃吸収エネルギーの比は、落下高さ50cmで93%となっており、位置エネルギーに概ね近い値を示している。試験体2及び3では、位置エネルギーと桁の衝撃吸収エネルギーの比は平均値で80%程度となっており、概ね近似した値を示している。

試験全体からみて、PC桁の場合、ロードセルの荷重と桁変位の積分から求めた桁の衝撃吸収エネルギーは、重錘の位置エネルギーに対して8割程度の値となった。桁の支点部から地盤へ伝達されるエネルギー量、ガイドレールとベアリングとの摩擦抵抗等がどの程度あるのかは明確ではないが、それらを考慮すると桁が吸収するエネルギー量としては妥当な値と考えられる。

仕事量から求めた桁の衝撃吸収エネルギーは、重錘の落下高さの如何にかかわらず重錘のもつ位置エネルギーと安定した関係を有しており、設計にこの仕事量を利用することが可能であると思われる。

表-5.7 重錘及び桁に作用する加速度と時間の積分

PC試験体 No. 1

高さ (cm)	重錘落下 加 速 度 (G)	重錘加速度と 時間の積分 $\Lambda-1$ ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	桁に作用する加速度と 時間の積分		$\Lambda-2, \Lambda-3$ の平均値 ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	$\Lambda-1$ と桁の平 均値との比 (%)
			$\Lambda-2$ ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	$\Lambda-3$ ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)		
1.0	- 0.423	6.131	- 0.699	- 1.314	- 1.007	16.42
50.0	- 0.931	23.501	- 34.142	- 27.969	- 31.056	132.15

PC試験体 No. 2

高さ (cm)	重錘落下 加 速 度 (G)	重錘加速度と 時間の積分 $\Lambda-1$ ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	桁に作用する加速度と 時間の積分		$\Lambda-2, \Lambda-3$ の平均値 ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	$\Lambda-1$ と桁の平 均値との比 (%)
			$\Lambda-2$ ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	$\Lambda-3$ ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)		
5.0	- 0.928	18.334	- 3.57	- 3.90	- 3.74	20.40
7.0	- 0.941	22.008	- 6.25	- 5.67	- 5.96	27.08
9.0	- 0.926	24.719	- 7.55	- 7.55	- 7.55	30.54
11.0	- 0.886	27.133	- 9.15	- 8.15	- 8.65	31.88
13.0	- 0.924	29.659	- 10.00	- 10.02	- 10.01	33.75
15.0	- 0.924	31.415	- 10.01	- 10.35	- 10.18	32.40
17.0	- 0.977	33.512	- 11.33	- 12.04	- 11.69	34.88
19.0	- 0.823	34.189	- 12.60	- 11.72	- 12.16	35.57
21.0	- 0.827	34.805	- 13.94	- 13.33	- 13.64	39.19
23.0	- 0.944	37.210	- 14.15	- 14.22	- 14.19	38.13
25.0	- 0.995	37.052	- 15.03	- 15.52	- 15.28	41.24
27.0	- 0.948	37.906	- 15.93	- 16.31	- 16.12	42.53
29.0	- 0.967	39.250	- 16.62	- 17.31	- 16.97	43.24
31.0	- 0.856	37.910	- 17.66	- 17.70	- 17.68	46.64
33.0	- 1.007	40.234	- 18.30	- 18.75	- 18.53	46.06
35.0	- 0.930	39.720	- 18.87	- 19.42	- 19.15	48.21
37.0	- 0.919	39.695	- 19.51	- 20.29	- 19.90	50.13
39.0	- 0.873	39.516	- 20.53	- 20.73	- 20.63	52.21
41.0	- 0.954	39.675	- 20.78	- 21.78	- 21.27	53.61
43.0	- 0.907	39.470	- 22.31	- 22.48	- 22.40	56.75
45.0	- 1.181	25.237	- 23.62	- 20.86	- 22.24	88.12

PC試験体 No. 3

高さ (cm)	重錘落下 加 速 度 (G)	重錘加速度と 時間の積分 $\Lambda-1$ ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	桁に作用する加速度と 時間の積分		$\Lambda-2, \Lambda-3$ の平均値 ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	$\Lambda-1$ と桁の平 均値との比 (%)
			$\Lambda-2$ ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	$\Lambda-3$ ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)		
25.0	- 0.868	36.101	- 13.727	- 13.036	- 13.382	37.08
45.0	- 0.933	43.824	- 19.760	- 19.292	- 19.526	44.56
47.0	- 0.734	36.426	- 23.267	- 21.269	- 22.268	61.13
49.0	- 0.899	15.065	- 29.449	- 25.516	- 27.483	182.13

表-5.8 重錘及び桁の衝撃エネルギー

PC試験体 No. 1 (重錘 1.0t)

高さ (cm)	重錘落下 加速度 (G)	重錘エネルギー	桁に作用する衝撃エネルギー		A-2, A-3 の平均値 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	重錘と桁の衝 撃エネルギー の比 (%)
		A-1 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	A-2 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	A-3 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)		
1.0	- 0.423	3.066	- 0.161	- 0.302	- 0.267	8.71
50.0	- 0.931	11.751	- 7.853	- 6.433	- 7.143	60.79

PC試験体 No. 2 (重錘 0.5t)

高さ (cm)	重錘落下 加速度 (G)	重錘エネルギー	桁に作用する衝撃エネルギー		A-2, A-3 の平均値 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	重錘と桁の衝 撃エネルギー の比 (%)
		A-1 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	A-2 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	A-3 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)		
5.0	- 0.926	9.167	- 0.821	- 0.897	- 0.859	9.37
7.0	- 0.941	11.004	- 1.433	- 1.304	- 1.369	12.44
9.0	- 0.926	12.360	- 1.737	- 1.737	- 1.737	14.05
11.0	- 0.886	13.567	- 2.105	- 1.875	- 1.990	14.67
13.0	- 0.924	14.830	- 2.300	- 2.305	- 2.303	15.53
15.0	- 0.924	15.708	- 2.302	- 2.381	- 2.342	14.91
17.0	- 0.977	16.756	- 2.606	- 2.769	- 2.688	16.04
19.0	- 0.823	17.095	- 2.898	- 2.696	- 2.797	16.36
21.0	- 0.827	17.403	- 3.206	- 3.066	- 3.136	18.02
23.0	- 0.944	18.605	- 3.255	- 3.271	- 3.263	17.54
25.0	- 0.995	18.526	- 3.457	- 3.570	- 3.514	18.97
27.0	- 0.948	18.953	- 3.664	- 3.751	- 3.708	19.56
29.0	- 0.967	19.625	- 3.823	- 3.981	- 3.902	19.88
31.0	- 0.856	18.955	- 4.062	- 4.071	- 4.067	21.46
33.0	- 1.007	20.117	- 4.209	- 4.313	- 4.261	21.18
35.0	- 0.930	19.860	- 4.340	- 4.467	- 4.403	22.17
37.0	- 0.919	19.848	- 4.487	- 4.667	- 4.577	23.06
39.0	- 0.873	19.758	- 4.722	- 4.768	- 4.745	24.02
41.0	- 0.954	19.838	- 4.775	- 5.009	- 4.892	24.66
43.0	- 0.907	19.735	- 5.131	- 5.170	- 5.151	26.10
45.0	- 1.181	12.619	- 5.433	- 4.798	- 5.116	40.54

PC試験体 No. 3 (重錘 0.5t)

高さ (cm)	重錘落下 加速度 (G)	重錘エネルギー	桁に作用する衝撃エネルギー		A-2, A-3 の平均値 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	重錘と桁の衝 撃エネルギー の比 (%)
		A-1 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	A-2 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	A-3 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)		
25.0	- 0.868	18.051	- 3.157	- 2.998	- 3.078	17.05
45.0	- 0.933	21.912	- 4.545	- 4.437	- 4.491	20.50
47.0	- 0.734	18.213	- 5.351	- 4.892	- 5.122	28.12
49.0	- 0.899	7.533	- 6.773	- 5.869	- 6.321	83.91

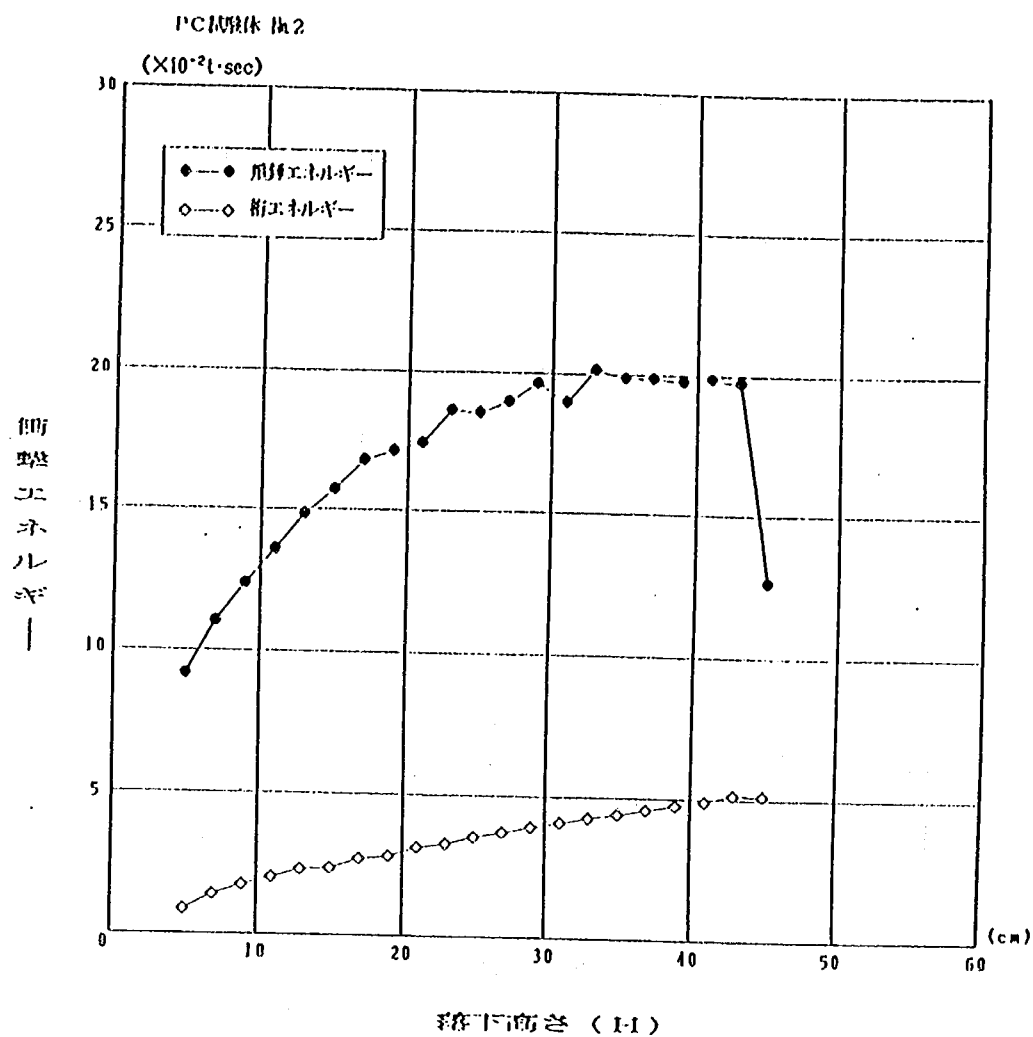


図-5.18 落下高さと衝撃エネルギー (PC桁 No. 2)

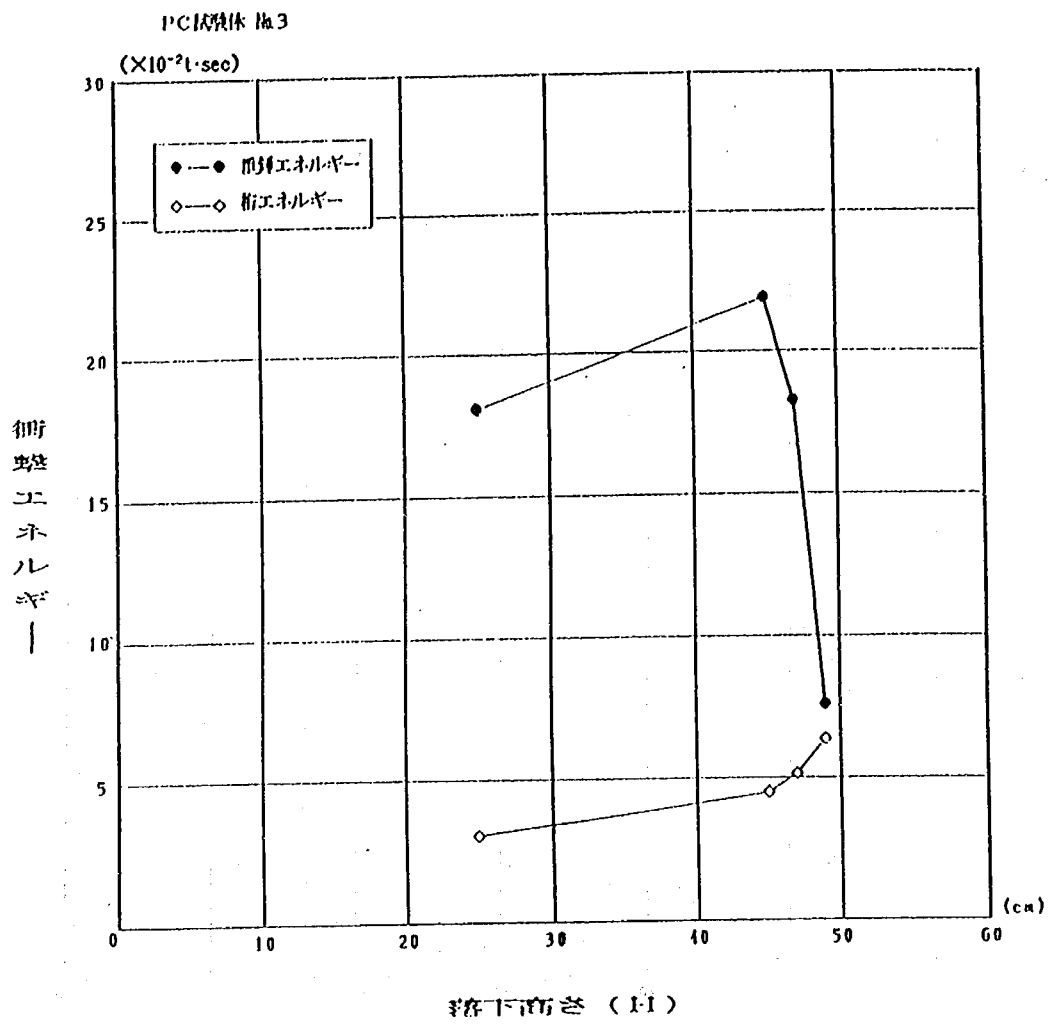


図-5.19 落下高さと衝撃エネルギー (PC桁 No.3)

表-5.9 桁の衝撃吸収エネルギー

PC桁 No. 1 (重錘 1.0t)

落下高さH (cm)	ロードセルの 最大荷重 (t)	桁中央変位 (cm)	桁の衝撃吸収エネ ルギー (t・cm)	位置エネルギー (t・cm)	位置エネルギーと桁衝 撃吸収エネルギーの比
1.0	5.817	0.216	0.614	1.0	0.61
50.0	15.880	8.253	46.630	50.0	0.93

PC桁 No. 2 (重錘 0.5t)

落下高さH (cm)	ロードセルの 最大荷重 (t)	桁中央変位 (cm)	桁の衝撃吸収エネ ルギー (t・cm)	位置エネルギー (t・cm)	位置エネルギーと桁衝 撃吸収エネルギーの比
5.0	5.039	0.378	1.638	2.5	0.66
7.0	5.604	0.520	2.453	3.5	0.70
9.0	6.085	0.682	3.299	4.5	0.73
11.0	6.574	0.818	4.057	5.5	0.74
13.0	6.966	0.969	4.994	6.5	0.77
15.0	7.579	1.100	5.823	7.5	0.78
17.0	7.647	1.224	6.624	8.5	0.78
19.0	7.996	1.365	7.467	9.5	0.79
21.0	8.061	1.506	8.065	10.5	0.77
23.0	7.800	1.649	8.582	11.5	0.75
25.0	8.868	1.806	10.230	12.5	0.82
27.0	8.534	1.962	10.359	13.5	0.77
29.0	8.647	2.120	11.437	14.5	0.79
31.0	8.788	2.286	11.917	15.5	0.77
33.0	8.929	2.466	13.768	16.5	0.83
35.0	9.218	2.645	13.824	17.5	0.79
37.0	9.201	2.850	14.568	18.5	0.79
39.0	9.711	3.029	16.098	19.5	0.83
41.0	9.226	3.211	17.100	20.5	0.83
43.0	9.410	3.386	17.383	21.5	0.81
45.0	9.486	5.078	19.000	22.5	0.84
					平均 0.78

PC桁 No. 3 (重錘 0.5t)

落下高さH (cm)	ロードセルの 最大荷重 (t)	桁中央変位 (cm)	桁の衝撃吸収エネ ルギー (t・cm)	位置エネルギー (t・cm)	位置エネルギーと桁衝 撃吸収エネルギーの比
25.0	8.895	1.473	9.561	12.5	0.76
45.0	10.502	2.738	18.700	22.5	0.83
47.0	10.092	3.256	20.356	23.5	0.87
49.0	9.749	4.506	15.958	24.5	0.65
					平均 0.78

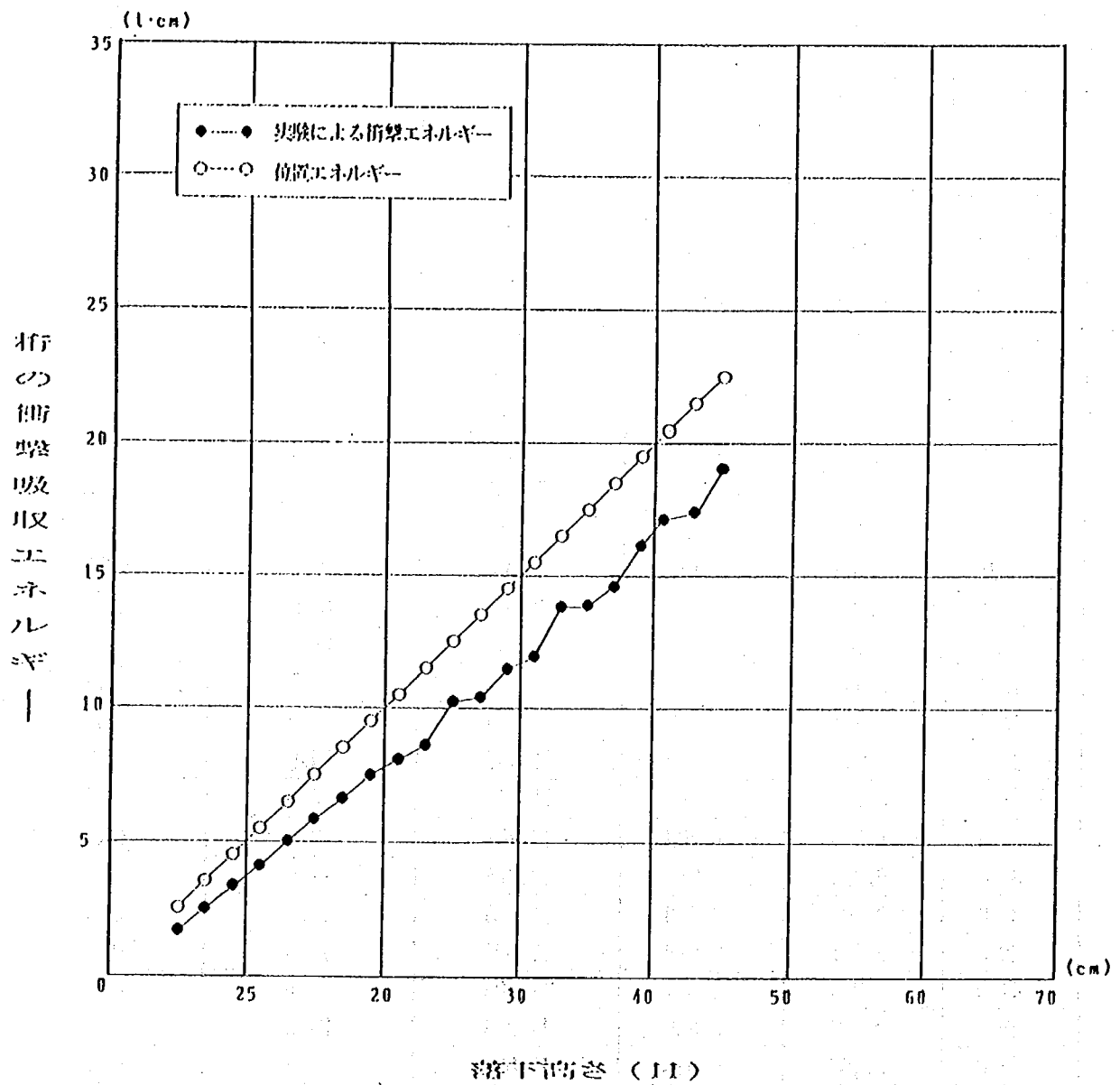


図-5.20 落下高さと桁の衝撃吸収エネルギーの関係 (PC桁 No.2)

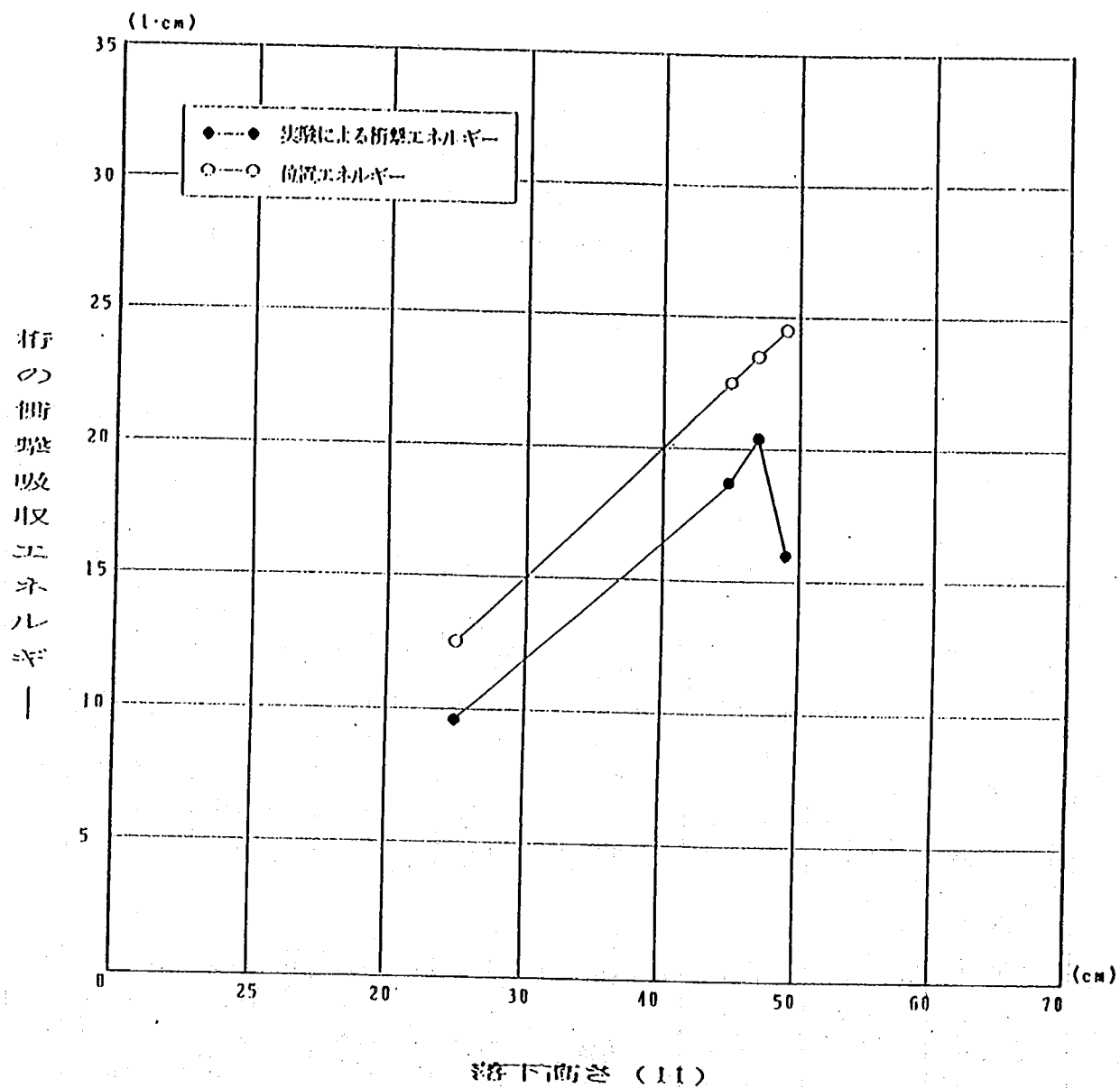


図-5.21 落下高さと樹脂の衝撃吸収エネルギーの関係 (PC樹脂 No. 3)

5.5 RC桁衝撃載荷試験結果

5.5.1 試験結果の概要

RC桁の衝撃載荷試験は重錘重量0.5tで試験した。試験体1については、落下高さ5cm～61cmまで4cmピッチで15回繰り返し載荷し、落下高さ61cmで破壊した。試験体2は、落下高さ61cm, 80cm, 90cm, 110cmまで4回繰り返し載荷し、落下高さ110cmで破壊した。試験体3は110cm, 130cm, 150cmまで3回繰り返し載荷し、落下高さ150cmで破壊した。RC桁の衝撃載荷試験結果を表-5.10～表-5.18に示す。

表-5.10 RC桁No.1 衝撃載荷試験結果(重錘 0.5t)

単位: t, G, μ , cm

計測項目	記号	落 下 高 さ						
		H=5cm	H=8cm	H=13cm	H=17cm	H=21cm	H=26cm	H=29cm
ロードセル	L-1	5.93	0.95	7.92	8.71	9.35	10.00	10.61
重錘加速度	A-1	9.98	10.68	12.79	14.42	15.81	17.98	17.89
桁加速度南側	A-2	7.13	11.68	14.60	17.07	19.02	21.06	23.27
桁加速度北側	A-3	7.13	11.44	14.00	16.43	18.40	20.00	21.64
鋼材ひずみ	S-4	1 679.99	2 148.97	2 338.24	2 832.48	24 203.31	0.0	0.0
〃	S-12	1 537.45	2 017.23	2 303.84	14 518.73	0.0	0.0	0.0
〃	S-2	353.24	1 031.92	1 180.49	1 139.57	1 238.47	1 311.85	1 387.33
〃	S-10	194.60	762.51	1 046.63	958.65	1 033.10	1 066.62	1 091.78
〃	S-3	72.36	58.49	58.16	53.01	-281.31	89.69	235.14
光学式変位計	OPT	0.28	0.61	0.74	0.94	1.06	1.18	1.33

計測項目	落 下 高 さ							
	H=33cm	H=37cm	H=41cm	H=45cm	H=49cm	H=53cm	H=57cm	H=61cm
ロードセル	11.04	11.42	11.75	12.09	12.31	12.66	12.61	12.90
重錘加速度	19.00	21.09	21.84	25.64	25.06	22.59	22.50	—
桁加速度南側	23.86	27.13	28.79	28.65	29.67	32.57	40.22	47.32
桁加速度北側	22.08	25.63	29.39	30.41	31.78	33.15	39.00	—
鋼材ひずみ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
〃	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
〃	1 482.15	1 597.68	1 707.12	1 810.60	1 883.32	2 075.80	24 950.93	0.0
〃	1 117.31	1 154.07	1 187.41	1 179.22	1 241.02	1 275.08	1 292.01	1 331.70
〃	55.55	86.04	89.38	113.20	110.43	127.90	120.19	145.79
光学式変位計	1.49	1.67	1.77	1.83	1.91	2.11	1.70	0.31

表-5.11 RC桁No.2衝撃載荷試験結果(重錘 0.5t)

単位: t, G, μ , cm

計測項目	記号	落下高さ				摘要
		H=61cm	H=80cm	H=90cm	H=110cm	
ロードセル	L-1	14.66	15.39	15.71	15.82	
重錘加速度	A-1	29.33	37.44	41.20	32.87	
桁加速度南側	A-2	36.63	35.16	40.55	56.25	
桁加速度北側	A-3	42.87	33.71	48.46	47.83	
鋼材ひずみ	S-4	25 029.14	0.0	0.0	0.0	
"	S-12	24 947.46	0.0	0.0	0.0	
"	S-2	2 728.27	23 027.50	0.0	0.0	
"	S-10	798.15	1 224.57	1 319.19	1 228.70	
"	S-3	501.67	899.27	459.69	465.76	
光学式変位計	OPT	2.27	3.06	3.64	2.04	

表-5.12 RC桁No.3衝撃載荷試験結果(重錘 0.5t)

単位: t, G, μ , cm

計測項目	記号	落下高さ			摘要
		H=110cm	H=130cm	H=150cm	
ロードセル	L-1	18.53	18.93	19.50	
重錘加速度	A-1	50.53	47.53	52.18	
桁加速度南側	A-2	41.08	38.19	47.75	
桁加速度北側	A-3	34.66	38.43	42.15	
鋼材ひずみ	S-4	25 051.28	0.0	0.0	
"	S-12	24 963.24	0.0	0.0	
"	S-2	2 120.82	2 091.77	24 143.15	
"	S-10	1 405.32	1 405.10	1 452.07	
"	S-3	86.68	-138.43	864.47	
光学式変位計	OPT	3.88	5.68	3.79	

5.5.2 試験体1の衝撃載荷試験結果

各載荷ステップにおける荷重と桁変位の測定結果を表-5.13に示す。

図-5.23に落下高さと荷重の関係を示す。荷重と落下高さの関係は、落下高さ45cm, 49cmで重錘加速度から求めた荷重がロードセルの荷重に比較し大きな値を示したが、それ以外はロードセルの方が1t~1.5t程度大きな値を示した。ロードセルから求めた荷重は、落下高さの増加に伴いなだらかに増大していることがわかり、PC桁の場合と異なっている。

荷重と桁変位の関係を図-5.24に示す。荷重が9t程度までは桁変位は比較的少ないが、それ以降は荷重増分に対する変位増大が大きくなる傾向を示している。桁の耐荷力は10t程度と思われる。

落下高さと桁中央変位（残留変位及び合計変位）の関係を図-5.25に示す。桁の残留変位は落下高さ61cmまでの累積で10cm程度となった。落下高さと衝撃最大変位の関係を図-5.26に示す。衝撃最大変位は落下高さに概ね比例して増加する傾向を示している。

桁の破壊状況を図-5.22に示す。落下高さ5cmの載荷ステップで桁中央及びその両側に合計5箇所ひび割れが発生した。このうち、桁中央部のひび割れは桁中心部にまで達していた。それ以降は落下高さを増す毎にひび割れの進行及び新たなひび割れの発生を繰り返し、落下高さ37cm以降の載荷では、ロードセル直下のコンクリートが圧潰した。また、鉄筋とコンクリートの付着が切れ、かぶり部のコンクリートが剝離した。落下高さ61cmの載荷ステップではコンクリートは破壊状態にあったが鉄筋は破断しなかった。

スケーラップ間隔 300mm

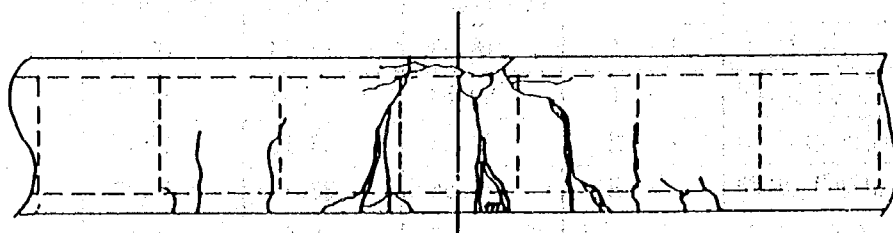


図-5.22 桁の破壊状況

表-5.13 各載荷ステップにおける荷重と相変位の関係 (RC桁 No. 1, 重錘 0.5t)

[単位: t, cm]

落 下 高 さ (H) cm	ロードセルか ら求めた荷重	重錘加速度か ら求めた荷重	累積残留変位	衝撃最大変位	合 計 変 位
5	5.93	4.99	—	0.280	0.280
9	6.95	5.34	0.000	0.610	0.610
13	7.92	6.40	0.030	0.740	0.770
17	8.71	7.21	0.151	0.940	1.091
21	9.35	7.91	0.404	1.060	1.464
25	10.00	8.99	0.850	1.180	2.030
29	10.61	8.95	1.365	1.330	2.695
33	11.04	9.50	2.324	1.490	3.184
37	11.42	10.55	3.407	1.670	5.077
41	11.75	10.92	4.447	1.770	6.240
45	12.09	12.82	5.403	1.830	7.233
49	12.31	12.53	6.425	1.910	8.335
53	12.66	11.30	7.617	2.110	9.727
57	12.61	11.25	8.768	2.650	11.418
61	12.90	—	10.156	2.900	13.056

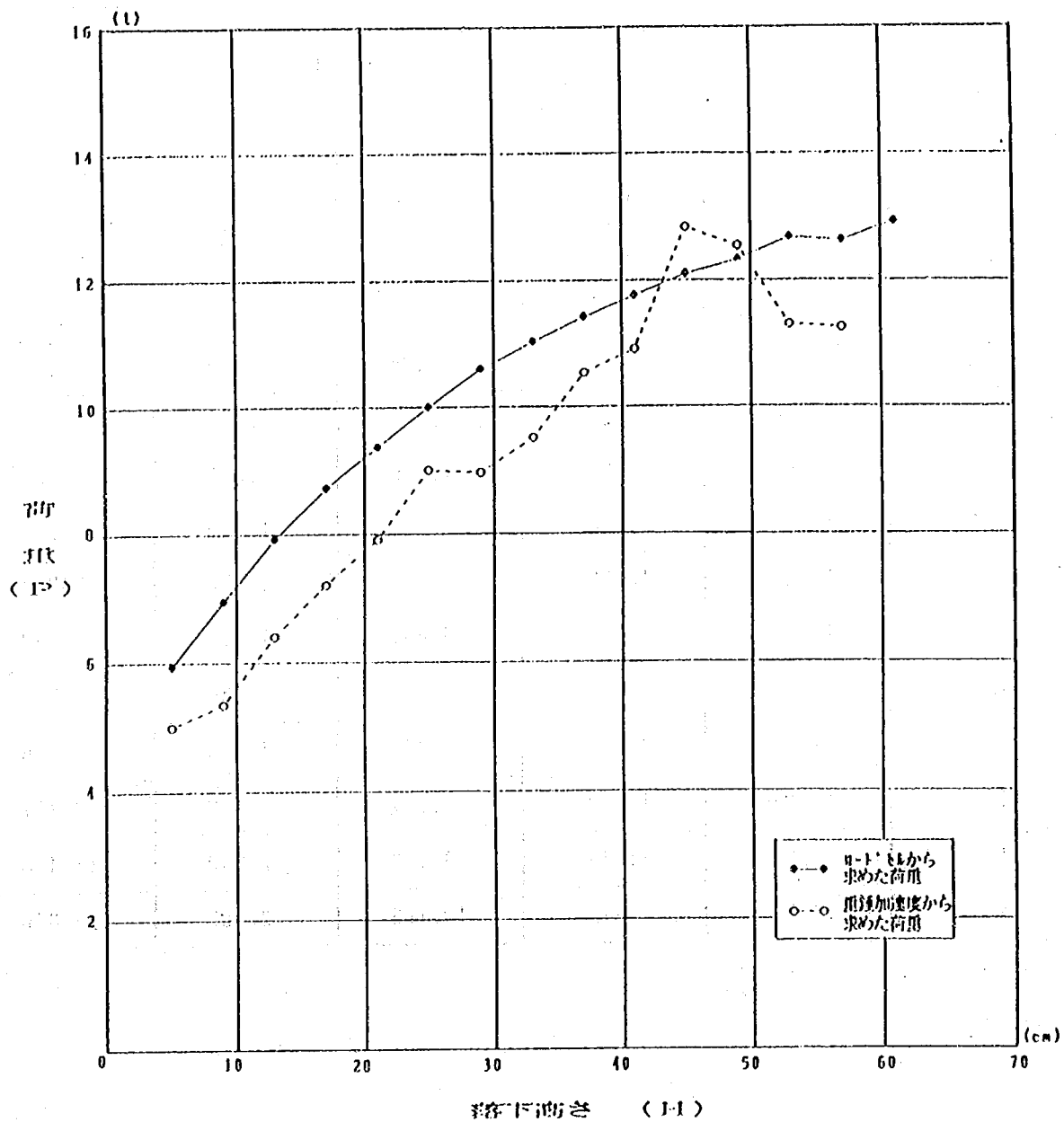


図-5.23 落下高さと荷重の関係 (RC桁 No. 1, 重錘 0.5t)

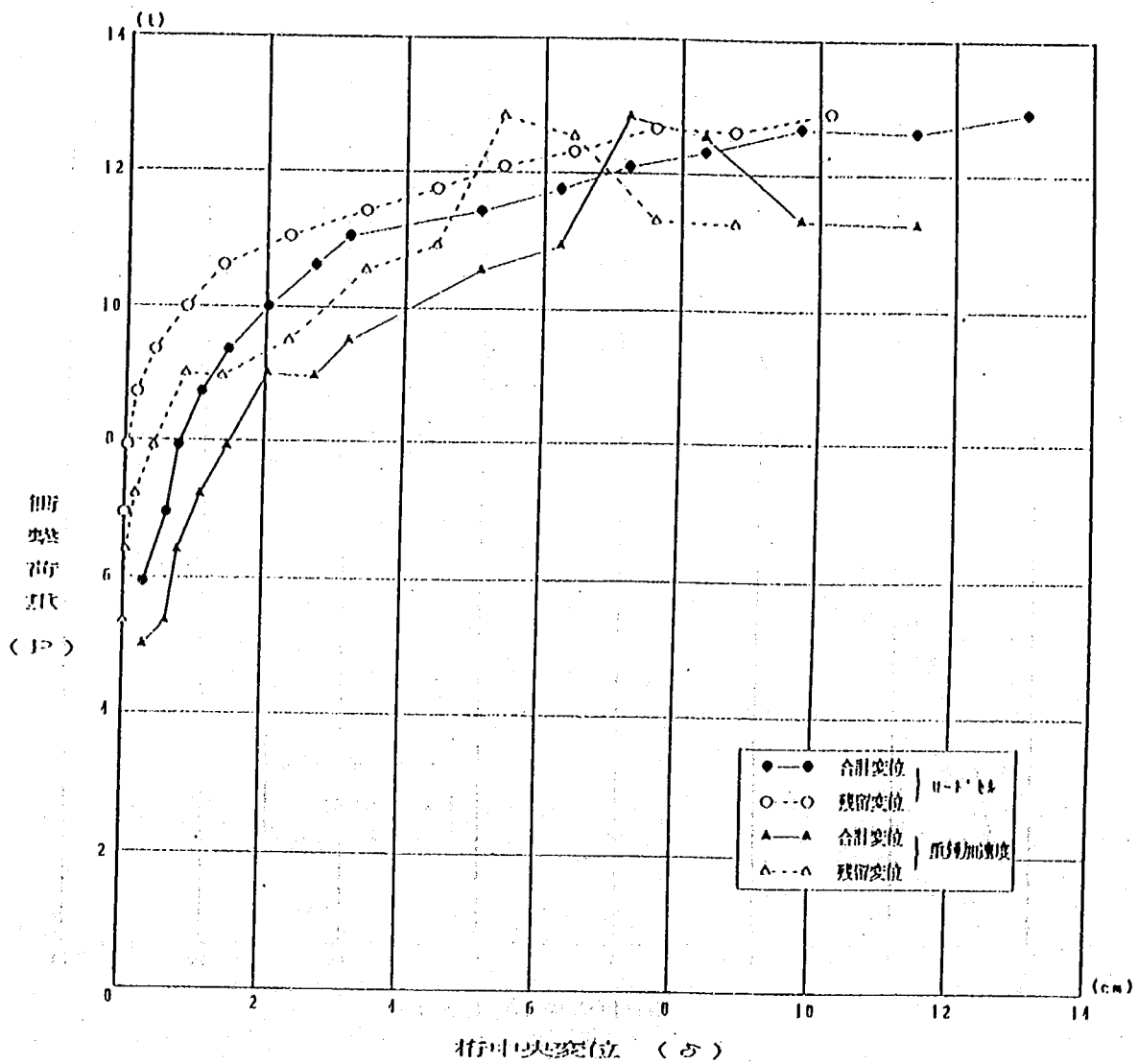


図-5.24 荷重と桁変位の関係 (RC桁 No. 1, 重錘 0.5t)

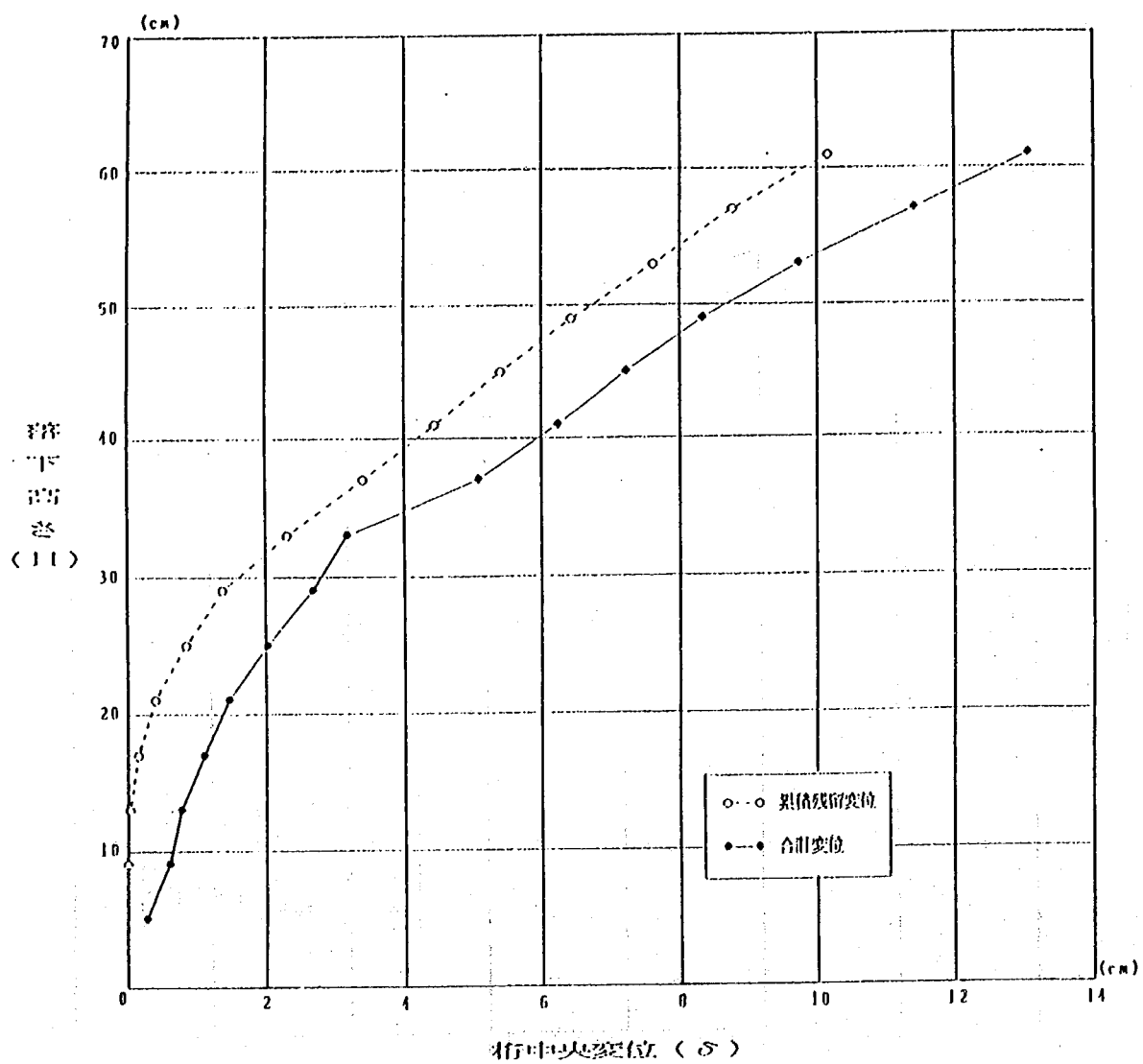


図-5.25 落下高さと桁中央変位の関係 (RC桁 No. 1, 重錘 0.5t)

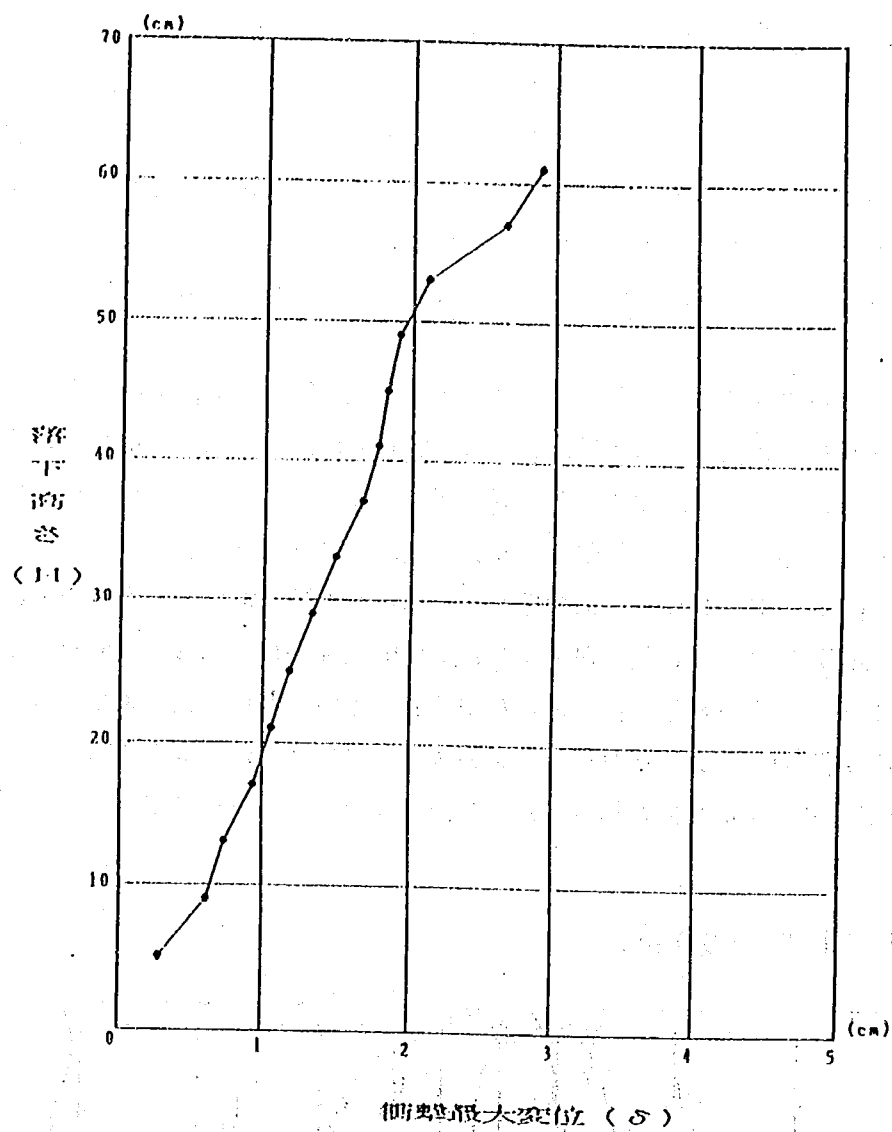


図-5.26 落下高さと衝撃最大変位の関係 (RC桁 No. 1, 重錘 0.5t)

5.5.3 試験体2の衝撃載荷試験結果

各載荷ステップにおける荷重と桁変位の測定結果を表-5.14に示す。

図-5.28に荷重と落下高さの関係を示す。ロードセルから求めた荷重は、落下高さ61cm~110cmで14.7t~15.8tであり、落下高さが2倍程度に増加したにもかかわらず荷重の増加は僅かであった。重錘加速度から求めた荷重は、落下高さ80cm, 90cmでロードセルに比較し大きな値を示したが、その他の載荷ステップではロードセルと概ね同じ値を示した。

荷重と桁中央変位の関係を図-5.29に示す。荷重の増分は僅かであるが変位は大きな値を示している。

落下高さと桁中央変位の関係を図-5.30に、落下高さと衝撃最大変位の関係を図-5.31に示す。桁衝撃最大変位は落下高さの増加に伴い概ね比例して増加する傾向を示している。落下高さ61cm~90cmの間ではほぼ同じ傾向で増加するが、落下高さ110cmでは大きな変位を示している。桁の耐力としては既にピークを越えており変位が大きく発生したと推察される。

桁の破壊状況を図-5.27に示す。桁の破壊状況は、落下高さ61cmで桁中央部及びその両側に合計6箇所、桁の中心部に達するひび割れが発生した。桁中央部のひび割れは下面から上面にかけて貫通するもので、コンクリートは破壊状態であったが鉄筋は破断しなかった。また、ロードセル直下ではコンクリートの圧潰が見られた。それ以降の載荷ステップでは、落下高さを増すごとにひび割れが進行し、鉄筋とコンクリートの付着が切れ、かぶり部のコンクリートが剝離した。

スーラップ間隔 300mm

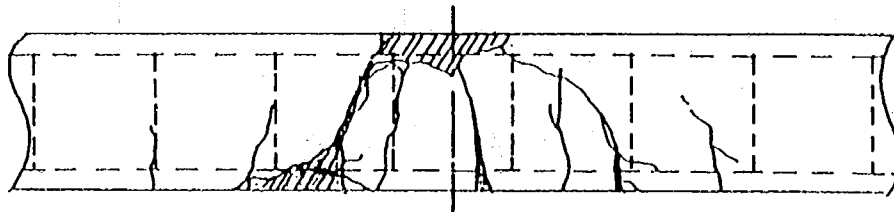


図-5.27 桁の破壊状況

表-5.14 各載荷ステップにおける荷重と桁変位の関係 (RC桁 No. 2, 重錘 0.5t)

[単位: t, cm]

落下高さ (II) cm	ロードセルから求めた荷重	重錘加速度から求めた荷重	累積残留変位	衝撃最大変位	合計変位
61	14.66	14.67	—	2.266	2.266
80	15.39	18.72	3.712	3.064	6.776
90	15.71	20.60	5.980	3.641	9.621
110	15.82	16.44	8.668	※ 8.3	16.97

※印は簡易式鉛直変位計の値を示す。

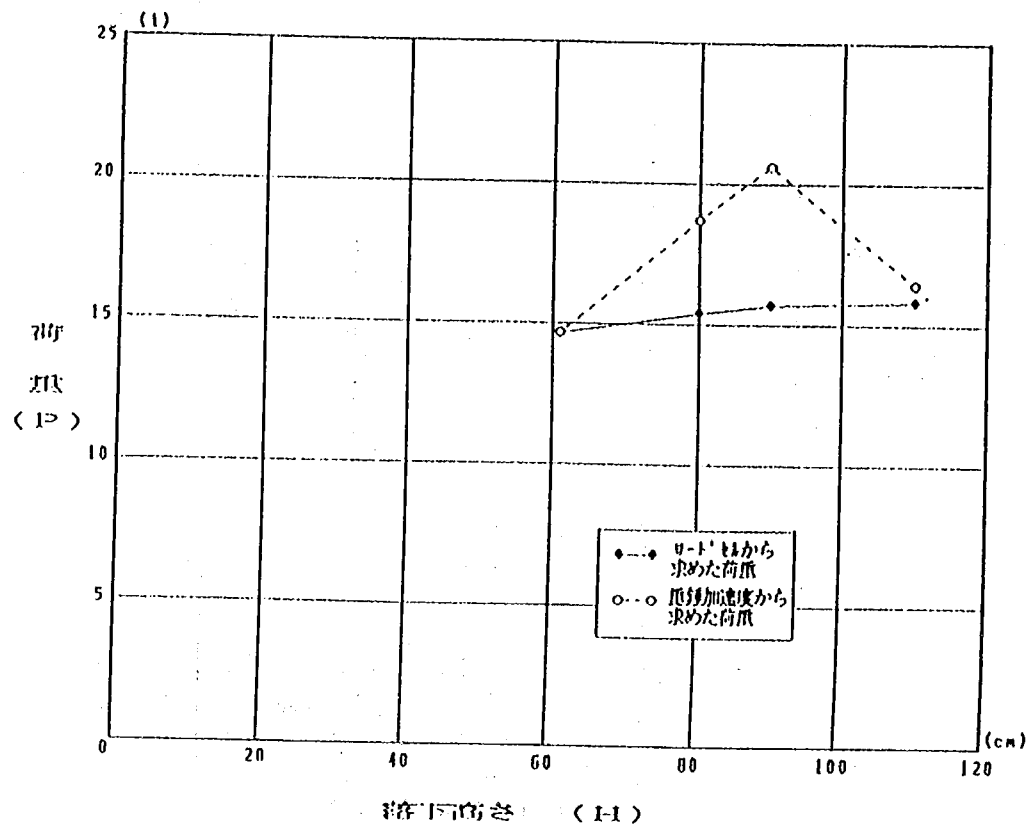


図-5.28 落下高さと荷重の関係 (RC桁 No. 2, 重錘 0.5t)

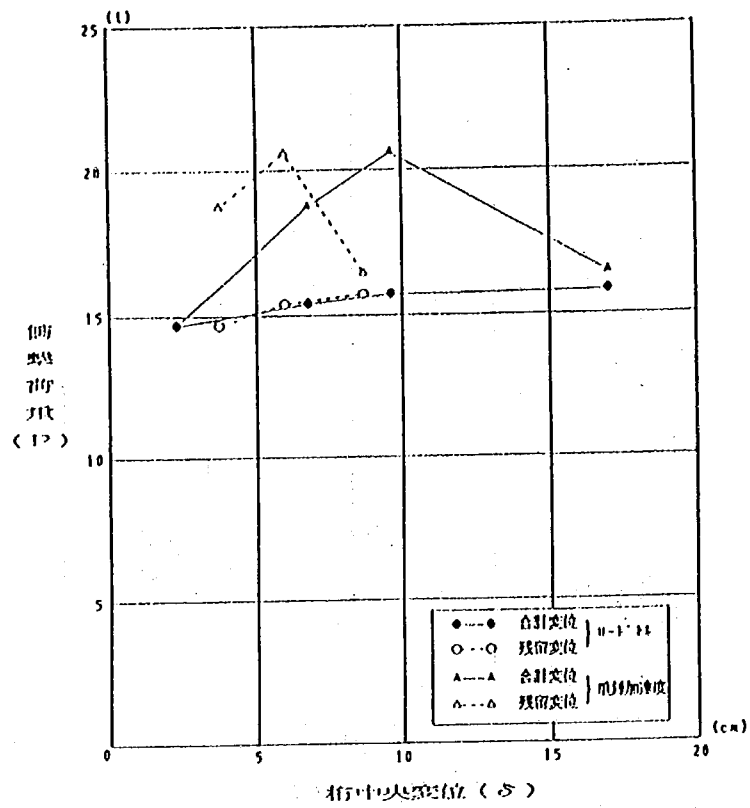


図-5.29 荷重と桁変位との関係 (RC桁 No. 2, 重錘 0.5t)

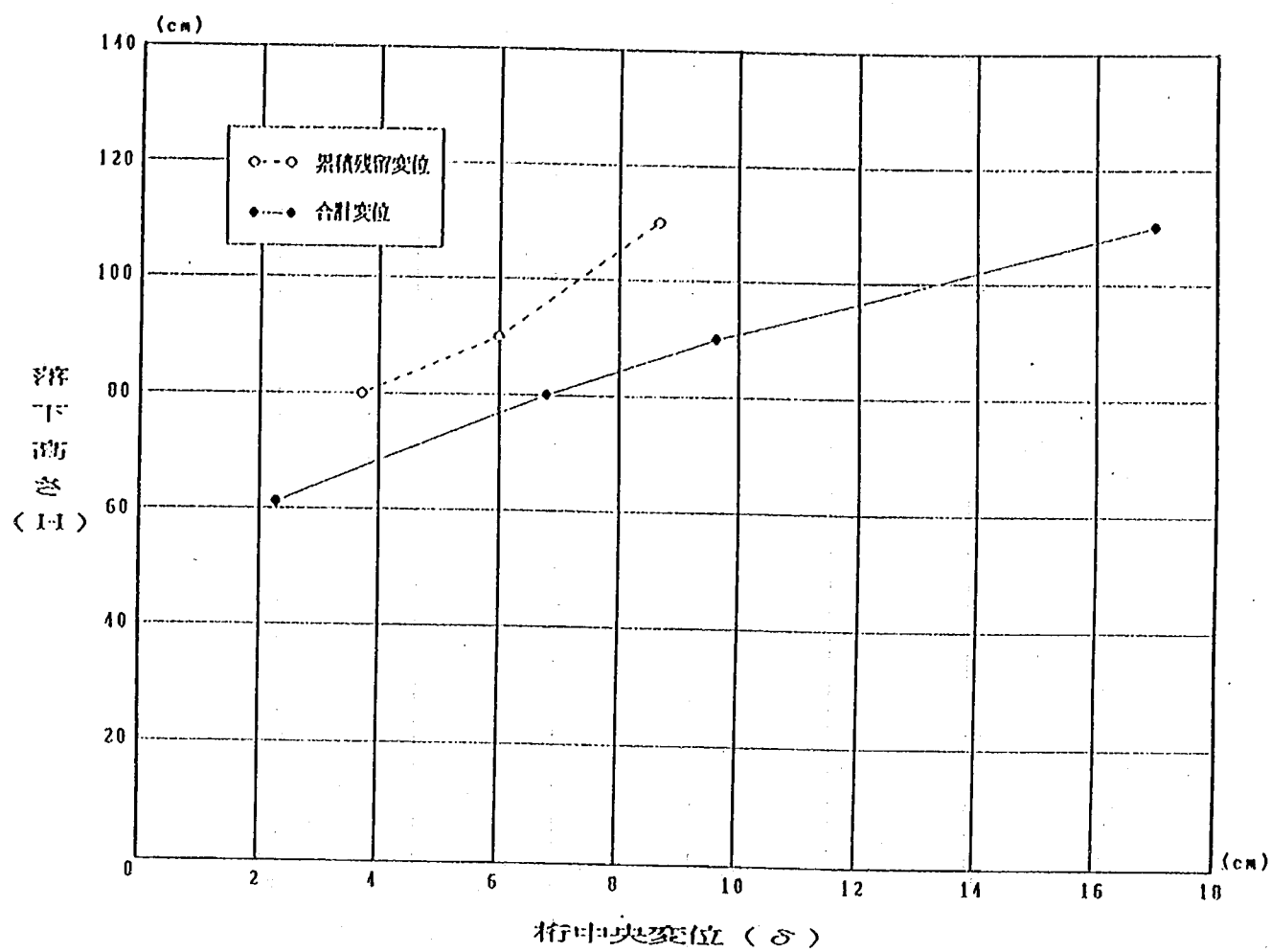


図-5.30 落下高さと桁中央変位の関係 (RC桁 No. 2, 重錘 0.5t)

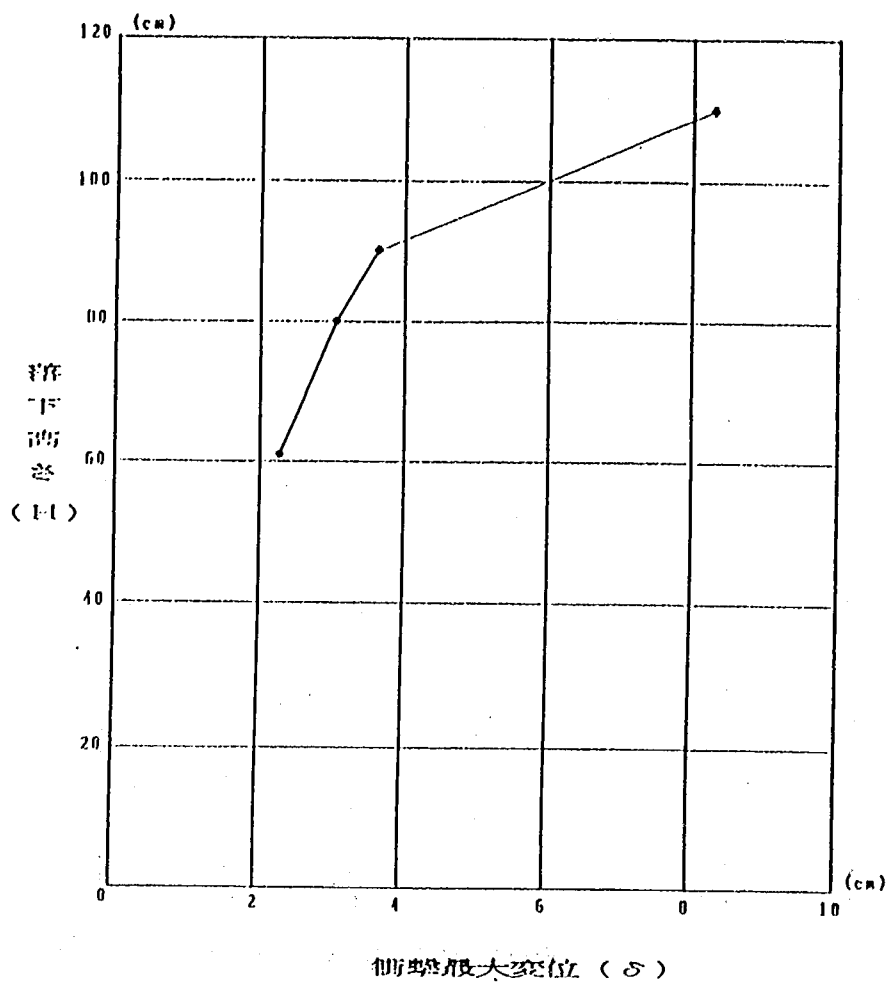


図-5.31 落下高さと衝撃最大変位の関係 (RC桁 No. 2, 重錘 0.5t)

5.5.4 試験体3の衝撃載荷試験結果

各載荷ステップにおける荷重と桁変位の測定結果を表-5.15に示す。

落下高さと荷重の関係を図-5.33に示す。ロードセルから求めた荷重は重錘加速度から求めた荷重に比較し70%~80%程度であり低い値を示している。落下高さの増加に対する荷重の増分はいずれも低い値を示している。

荷重と中央変位の関係を図-5.34に示す。荷重の増分は僅かであるが変位は大きな値を示している。

落下高さと桁中央変位の関係を図-5.35に、落下高さと衝撃最大変位の関係を図-5.36に示す。桁衝撃最大変位は落下高さの増加に伴い概ね比例して増加する傾向を示している。

桁の破壊状況を図-5.32に示す。桁の破壊状況は、落下高さ110cmでロードセル直下のコンクリートの圧潰及び桁上下面を貫通するひび割れが中央部に3箇所、またその他に数箇所ひび割れが発生しコンクリートは破壊状態であった。鉄筋は落下高さ150cmでも破断しなかった。桁の残留変位は最大で7cm程度であった。

スタースラップ間隔 300mm

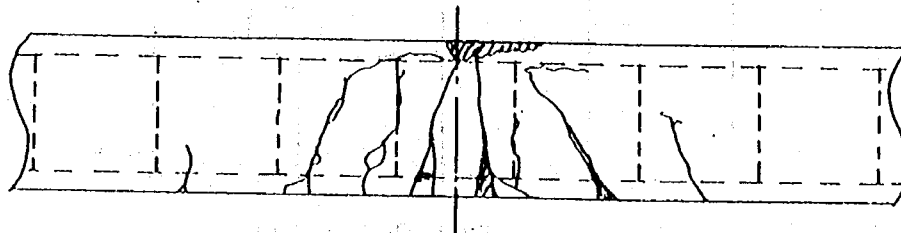


図-5.32 桁の破壊状況

表-5.15 各載荷ステップにおける荷重と桁変位の関係 (RC桁 No.3, 重錘 0.5t)

[単位: t, cm]

落下高さ (II) cm	ロードセルから求めた荷重	重錘加速度から求めた荷重	累積残留変位	衝撃最大変位	合計変位
110	18.53	25.27	—	3.878	3.878
130	18.93	23.77	3.271	4.76	8.031
150	19.50	26.09	7.204	※ 5.9	13.104

※印は簡易式鉛直変位計の値を示す。

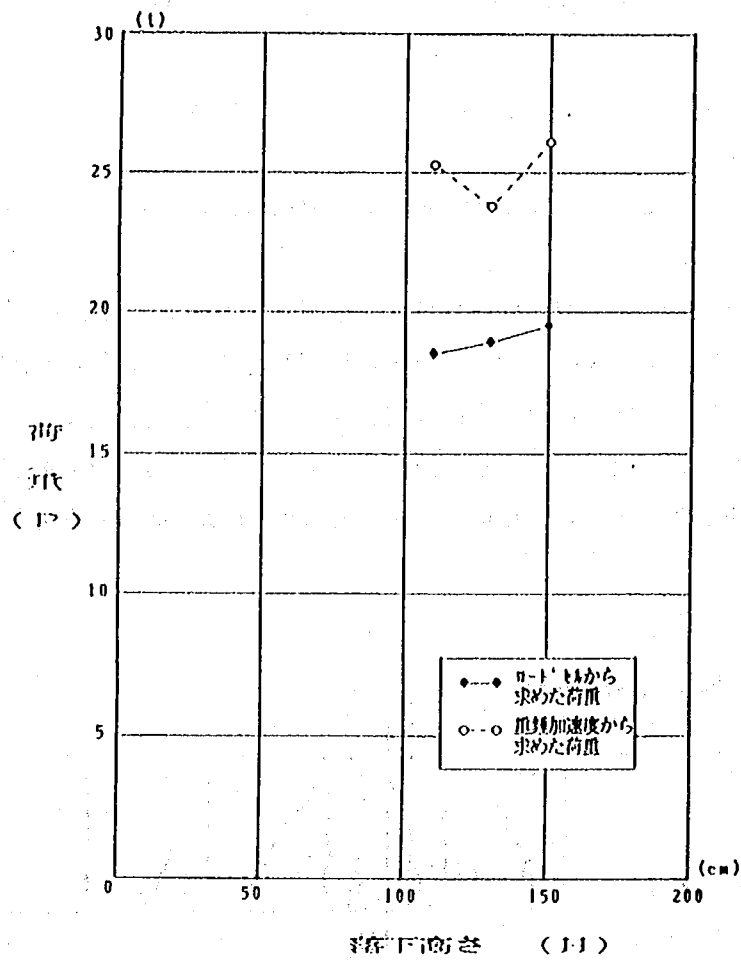


図-5.33 落下高さと荷重の関係 (RC桁 No. 3, 重錘 0.5t)

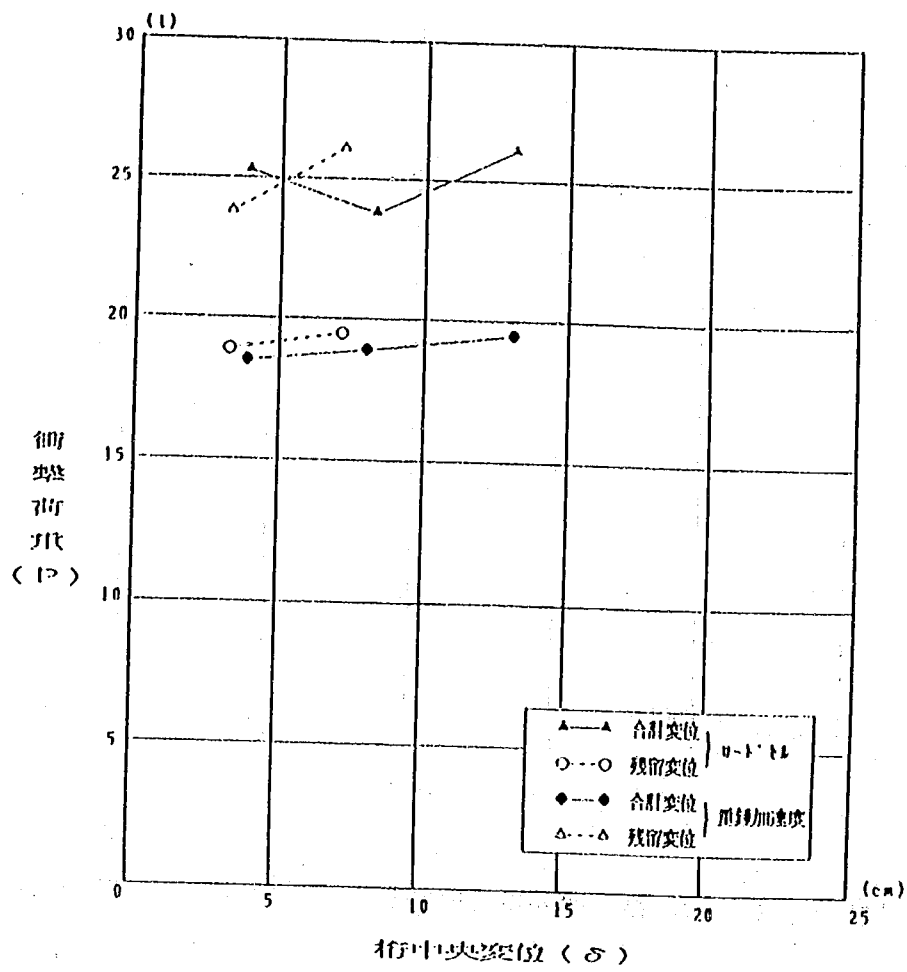


図-5.34 荷重と桁変位の関係 (RC桁 No. 3, 重錘 0.5t)

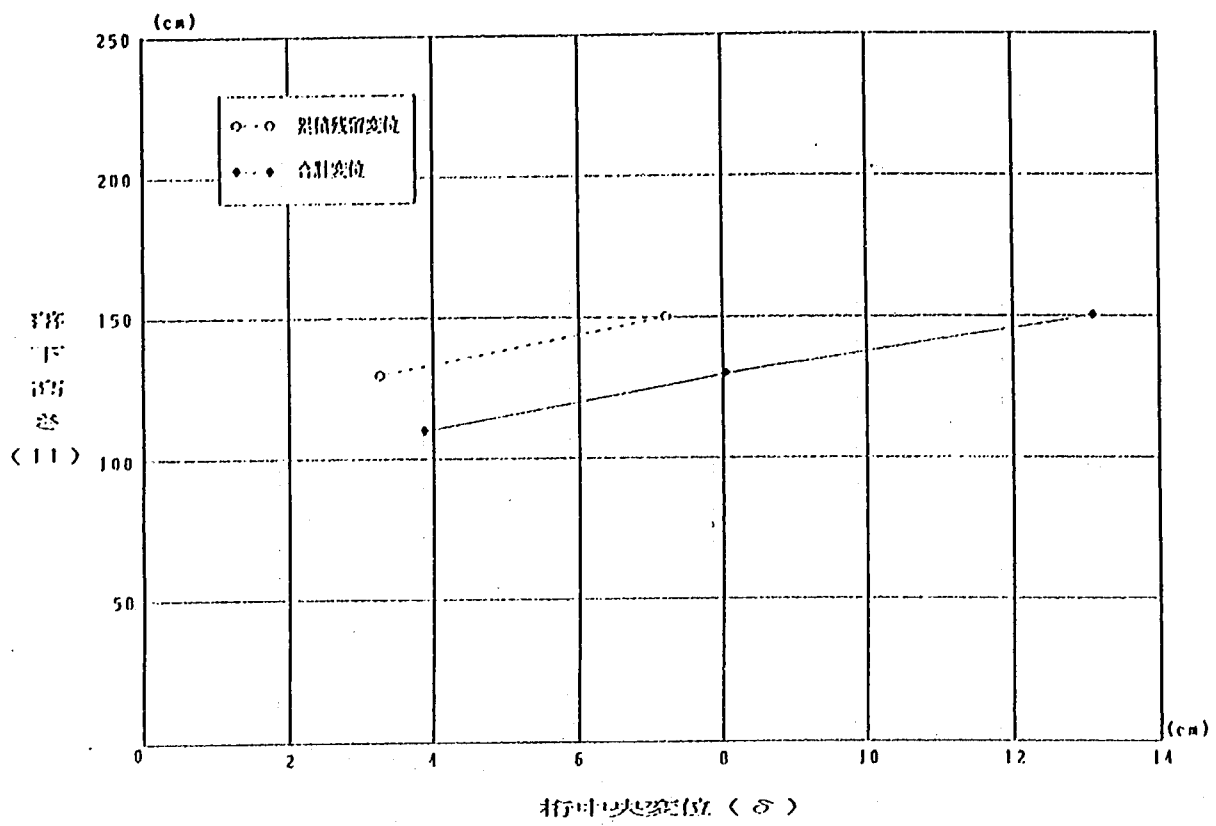


図-5.35 落下高さと桁中央変位の関係 (RC桁 No. 3, 重錘 0.5t)

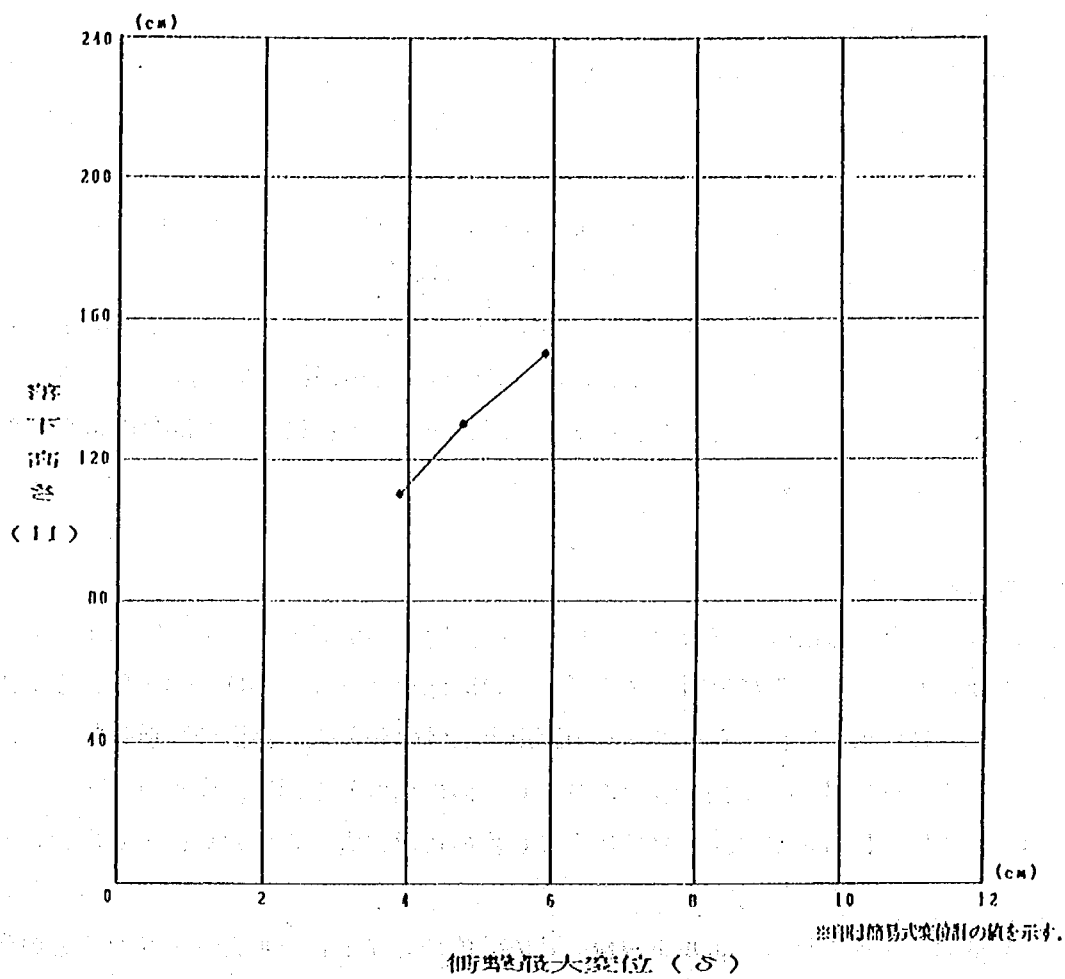


図-5.36 落下高さと衝撃最大変位の関係 (RC桁 No. 3, 重錘 0.5t)

5.5.5 衝撃エネルギーの算定

(1) 加速度から求めた衝撃エネルギー

重錘及び桁の加速度の時間に関する積分を表-5.16に示す。桁の積分値は、重錘の積分値の概ね10%~50%に分布し、落下高さが高くなるのに伴って、桁の積分値の割合は大きくなる傾向を示している。

表-5.16の値に質量をかけて両者のもつ衝撃エネルギーを計算すると、表-5.17を得る。また、これらの関係を図示すれば図-5.37~図-5.39を得る。

重錘と桁の衝撃エネルギーの比率は、概ね10%~30%に分布し、落下高さが高くなるに伴って桁に及ぼす影響は大きくなる傾向を示している。これらの結果からPC桁同様、加速度から求めた桁のエネルギーは、重錘のもつエネルギーと大きく離れることがわかり、力積によっては桁のエネルギーを適切に評価できないと考えられる。

(2) 桁の衝撃吸収エネルギー

荷重と変位の積分から求めた桁の衝撃吸収エネルギーの算出結果を表-5.18に示す。また、落下高さと桁の衝撃吸収エネルギー及び位置エネルギーとの関係を図-5.40、図-5.41に示す。

試験全体からみて、RC桁の場合、ロードセルの荷重と桁変位から求めた桁の衝撃吸収エネルギーは、重錘の位置エネルギーに対して7割程度であり、PC桁に比較し1割程度少ない値となった。これの原因については明確には言えないが、PC桁とRC桁の質量の大きさの違いによる影響と推定される。

桁の支点部から地盤へ伝達されるエネルギー量、試験装置のガイドレールとベアリングとの摩擦抵抗等がどの程度あるのかは明確ではないが、それらを考慮すると桁が吸収するエネルギー量としては妥当な値と考えられる。PC桁の項でも述べたとおり、仕事量から求めた桁の衝撃吸収エネルギーは重錘の落下高さの如何にかかわらず重錘のもつ位置エネルギーと安定した関係を有しており、設計にこの仕事量を利用することが可能であると思われる。

表-5.16 重錘及び桁に作用する加速度と時間の積分

RC桁 No. 1

高さ (cm)	重錘落下 加速度 (G)	重錘加速度と 時間の積分 A-1 ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	桁に作用する加速度と 時間の積分		A-2, A-3 の平均値 ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	A-1 と桁の平 均値との比 (%)
			A-2 ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	A-3 ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)		
5.0	- 0.931	17.605	- 2.84	- 2.13	- 2.21	12.55
9.0	- 0.938	23.334	- 4.66	- 4.54	- 4.60	19.71
13.0	- 0.914	26.103	- 6.40	- 6.48	- 6.44	24.67
17.0	- 0.890	28.740	- 7.59	- 7.22	- 7.41	25.78
21.0	- 0.946	32.396	- 9.12	- 9.02	- 9.07	28.00
25.0	- 0.885	33.980	- 10.34	- 9.20	- 9.77	28.75
29.0	- 0.857	35.251	- 11.37	- 10.70	- 11.29	32.03
33.0	- 0.860	37.848	- 12.61	- 11.45	- 12.03	31.79
37.0	- 0.752	39.585	- 14.42	- 14.41	- 14.42	36.43
41.0	- 0.992	42.797	- 15.84	- 14.69	- 15.27	35.68
45.0	- 1.024	44.703	- 17.20	- 16.52	- 16.86	37.72
49.0	- 1.091	46.405	- 16.28	- 17.28	- 16.78	36.16
53.0	- 0.989	48.429	- 17.01	- 18.15	- 17.58	36.30

RC桁 No. 2

高さ (cm)	重錘落下 加 速 度 (G)	重錘加速度と 時間の積分 A-1 ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	桁に作用する加速度と 時間の積分		A-2, A-3 の平均値 ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	A-1 と桁の平 均値との比 (%)
			A-2 ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	A-3 ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)		
61.0	- 0.819	46.930	- 17.774	- 19.632	- 18.703	39.85
80.0	- 0.750	51.507	- 22.894	- 22.474	- 22.684	44.04
90.0	- 0.999	50.354	- 23.957	- 24.283	- 24.120	48.22
110.0	- 1.116	57.264	- 27.722	- 26.349	- 27.036	47.21

RC桁 No. 3

高さ (cm)	重錘落下 加 速 度 (G)	重錘加速度と 時間の積分 A-1 ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	桁に作用する加速度と 時間の積分		A-2, A-3 の平均値 ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	A-1 と桁の平 均値との比 (%)
			A-2 ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)	A-3 ($\times 10^{-2}G \cdot SEC$)		
110.0	- 1.011	59.922	- 25.216	- 24.529	- 24.873	41.51
130.0		57.441	- 28.357	- 27.410	- 27.884	48.54
150.0	- 1.024	61.014	- 33.081	- 29.535	- 31.308	51.32

表-5.17 重錘及び桁に作用する衝撃エネルギー

RC桁 No. 1

高さ (cm)	重錘落下 加速度 (G)	重錘エネルギー	桁に作用する衝撃エネルギー		A-2, A-3 の平均値 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	重錘と桁の衝 撃エネルギー の比 (%)
		A-1 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	A-2 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	A-3 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)		
5.0	- 0.931	8.803	- 0.852	- 0.639	- 0.746	8.47
9.0	- 0.938	11.667	- 1.398	- 1.362	- 1.380	11.83
13.0	- 0.914	13.052	- 1.920	- 1.944	- 1.932	14.80
17.0	- 0.890	14.370	- 2.277	- 2.166	- 2.222	15.46
21.0	- 0.946	16.198	- 2.736	- 2.706	- 2.721	16.80
25.0	- 0.885	16.990	- 3.102	- 2.760	- 2.931	17.25
29.0	- 0.857	17.626	- 3.411	- 3.210	- 3.311	18.78
33.0	- 0.860	18.924	- 3.783	- 3.435	- 3.609	19.07
37.0	- 0.752	19.793	- 4.326	- 4.323	- 4.325	21.85
41.0	- 0.992	21.399	- 4.752	- 4.407	- 4.580	21.40
45.0	- 1.024	22.352	- 5.160	- 4.956	- 5.058	22.63
49.0	- 1.091	23.203	- 4.884	- 5.184	- 5.034	21.70
53.0	- 0.989	24.215	- 5.103	- 5.445	- 5.274	21.78

RC桁 No. 2

高さ (cm)	重錘落下 加速度 (G)	重錘エネルギー	桁に作用する衝撃エネルギー		A-2, A-3 の平均値 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	重錘と桁の衝 撃エネルギー の比 (%)
		A-1 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	A-2 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	A-3 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)		
61.0	- 0.819	23.465	- 5.332	- 5.890	- 5.611	23.91
80.0	- 0.750	25.754	- 6.868	- 6.742	- 6.805	26.42
90.0	- 0.999	25.177	- 7.187	- 7.285	- 7.236	28.74
110.0	- 1.116	28.632	- 8.317	- 7.905	- 8.111	28.33

RC桁 No. 3

高さ (cm)	重錘落下 加速度 (G)	重錘エネルギー	桁に作用する衝撃エネルギー		A-2, A-3 の平均値 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	重錘と桁の衝 撃エネルギー の比 (%)
		A-1 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	A-2 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)	A-3 ($\times 10^{-2} \text{t} \cdot \text{SEC}$)		
110.0	- 1.011	29.961	- 7.565	- 7.359	- 7.462	24.91
130.0		28.721	- 8.507	- 8.223	- 8.365	29.13
150.0	- 1.024	30.507	- 9.924	- 8.861	- 9.393	30.79

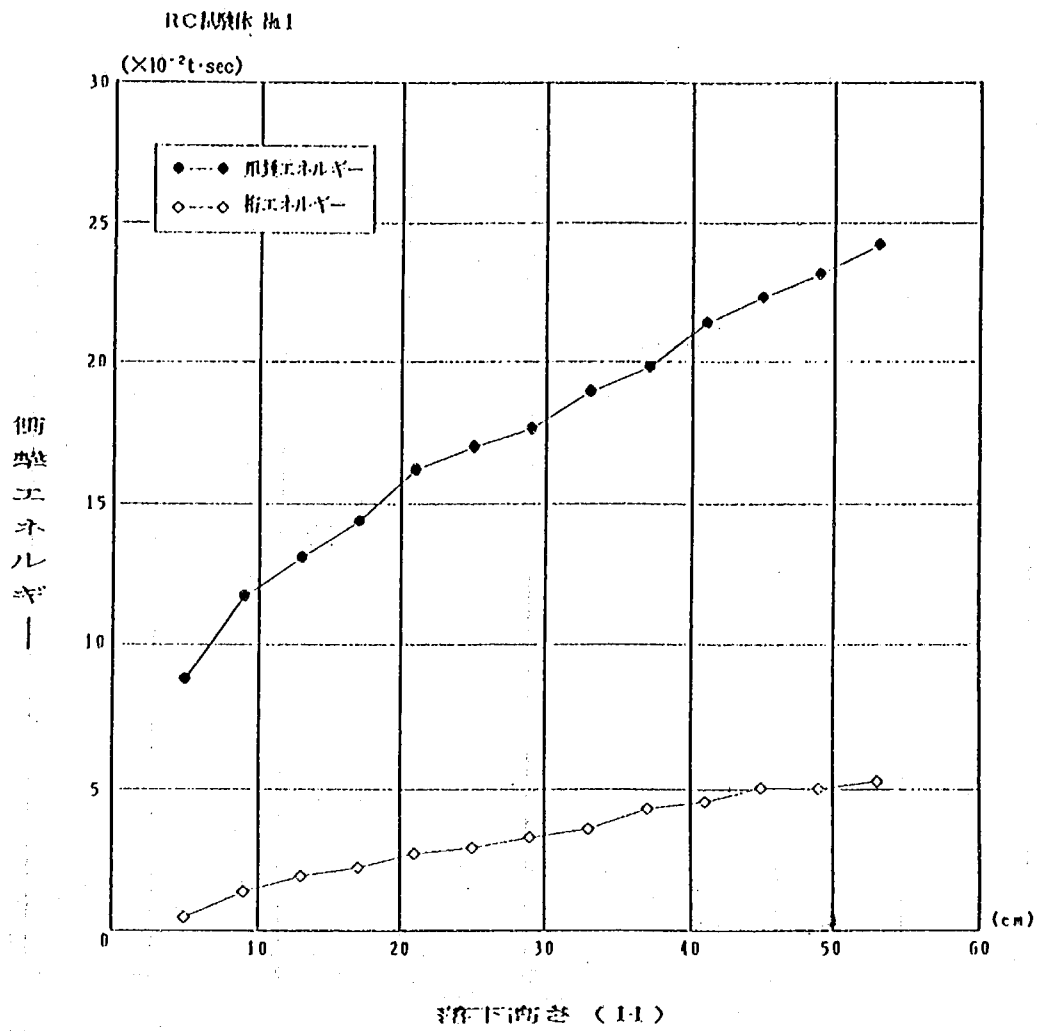


図-5.37 落下高さと衝撃エネルギー

RC試体 No. 2 の落下高さと衝撃エネルギーの関係

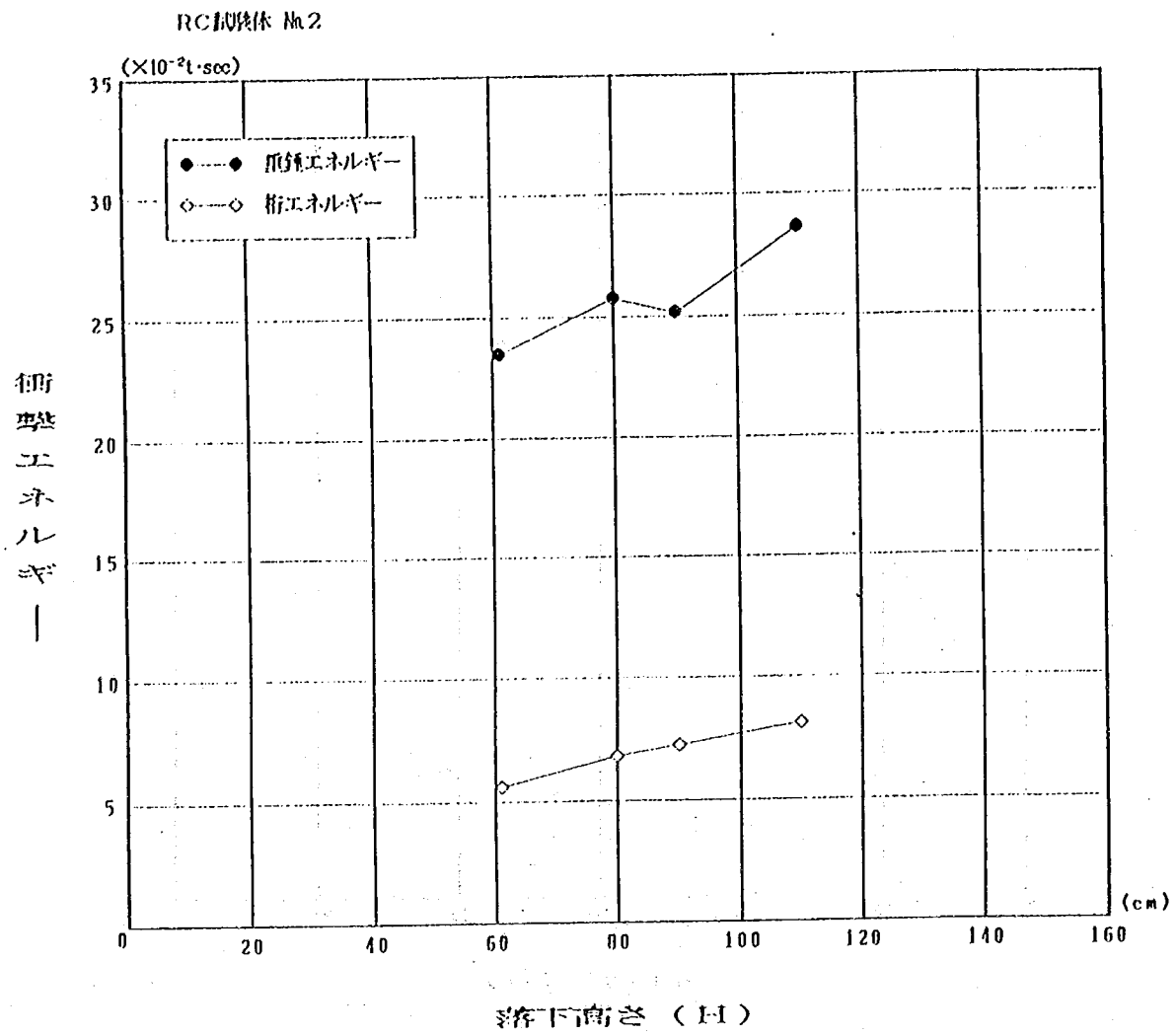


図-5.38 落下高さと衝撃エネルギー

鋼金及び桁に作用する衝撃エネルギー

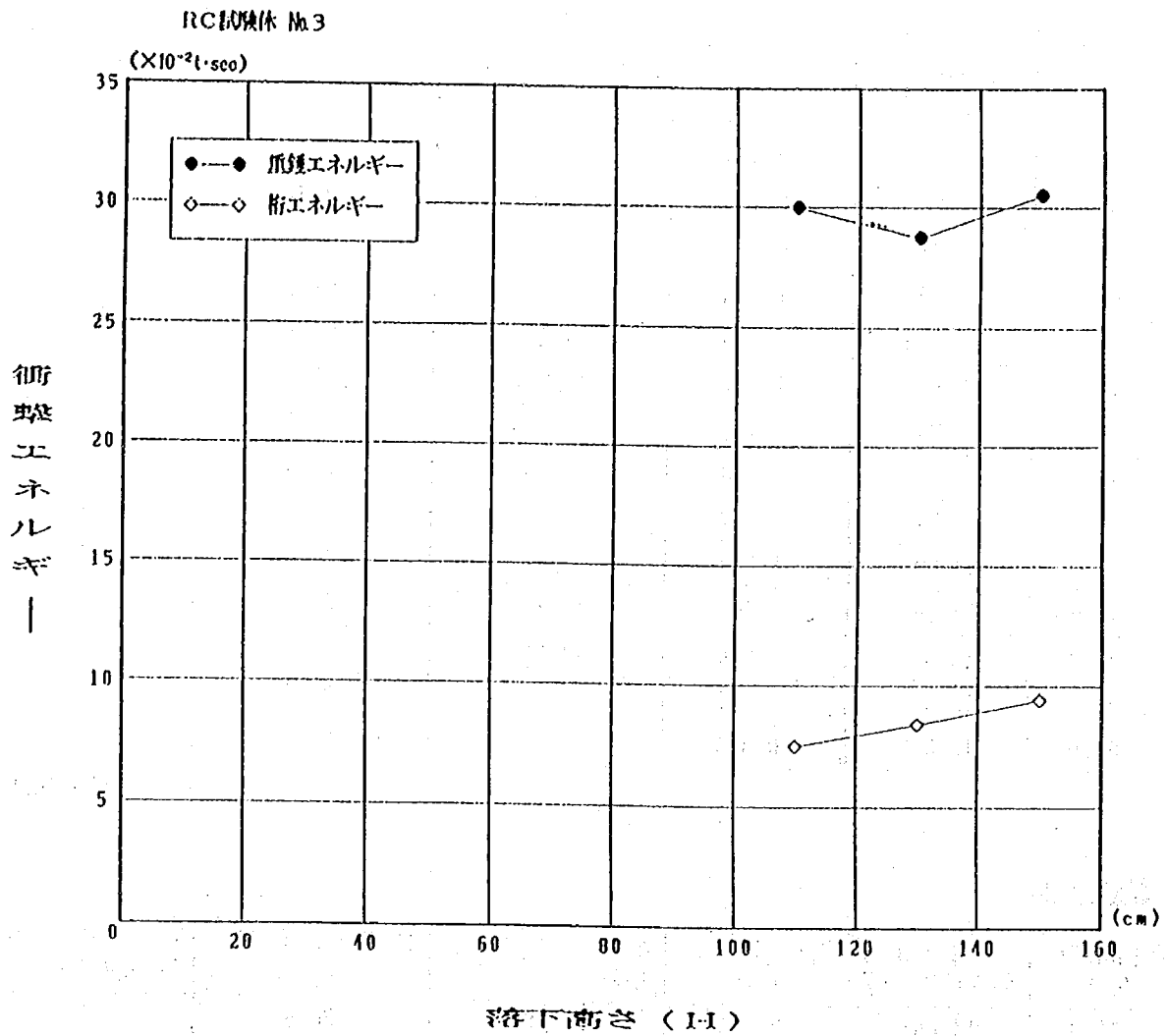


図-5.39 落下高さと衝撃エネルギー

表-5.18 桁の衝撃吸収エネルギー

RC試験体 No. 1

落下高さH (cm)	ロードセルの 最大荷重 (t)	桁中央変位 (cm)	桁の衝撃吸収エネ ルギー (t・cm)	位置エネルギー (t・cm)	位置エネルギーと桁衝 撃吸収エネルギーの比
5.0	5.927	0.342	1.609	2.5	64
9.0	6.953	0.606	2.806	4.5	62
13.0	7.923	0.735	4.688	6.5	72
17.0	8.711	0.943	6.421	8.5	76
21.0	9.353	1.060	7.323	10.5	70
25.0	10.000	1.176	8.970	12.5	72
29.0	10.610	1.331	10.327	14.5	71
33.0	11.041	1.488	12.216	16.5	74
37.0	11.421	1.666	13.452	18.5	73
41.0	11.747	1.767	14.633	20.5	71
45.0	12.093	1.829	15.529	22.5	69
49.0	12.307	1.909	16.274	24.5	66
53.0	12.655	2.076	17.665	26.5	67
57.0	12.613	1.697	19.842	28.5	70
61.0	12.899	0.310	2.787	30.5	—
					平均 70.0

RC試験体 No. 2

落下高さH (cm)	ロードセルの 最大荷重 (t)	桁中央変位 (cm)	桁の衝撃吸収エネ ルギー (t・cm)	位置エネルギー (t・cm)	位置エネルギーと桁衝 撃吸収エネルギーの比
61.0	14.661	2.266	21.260	30.5	70
80.0	15.388	3.064	28.712	40.0	72
90.0	15.714	3.641	31.424	45.0	70
110.0	15.816	2.035	25.922	55.0	—
					平均 71.0

RC試験体 No. 3

落下高さH (cm)	ロードセルの 最大荷重 (t)	桁中央変位 (cm)	桁の衝撃吸収エネ ルギー (t・cm)	位置エネルギー (t・cm)	位置エネルギーと桁衝 撃吸収エネルギーの比
110.0	18.532	3.878	35.382	55.0	64
130.0	18.926	4.781	46.074	65.0	71
150.0	19.499	3.789	44.193	75.0	—
					平均 68

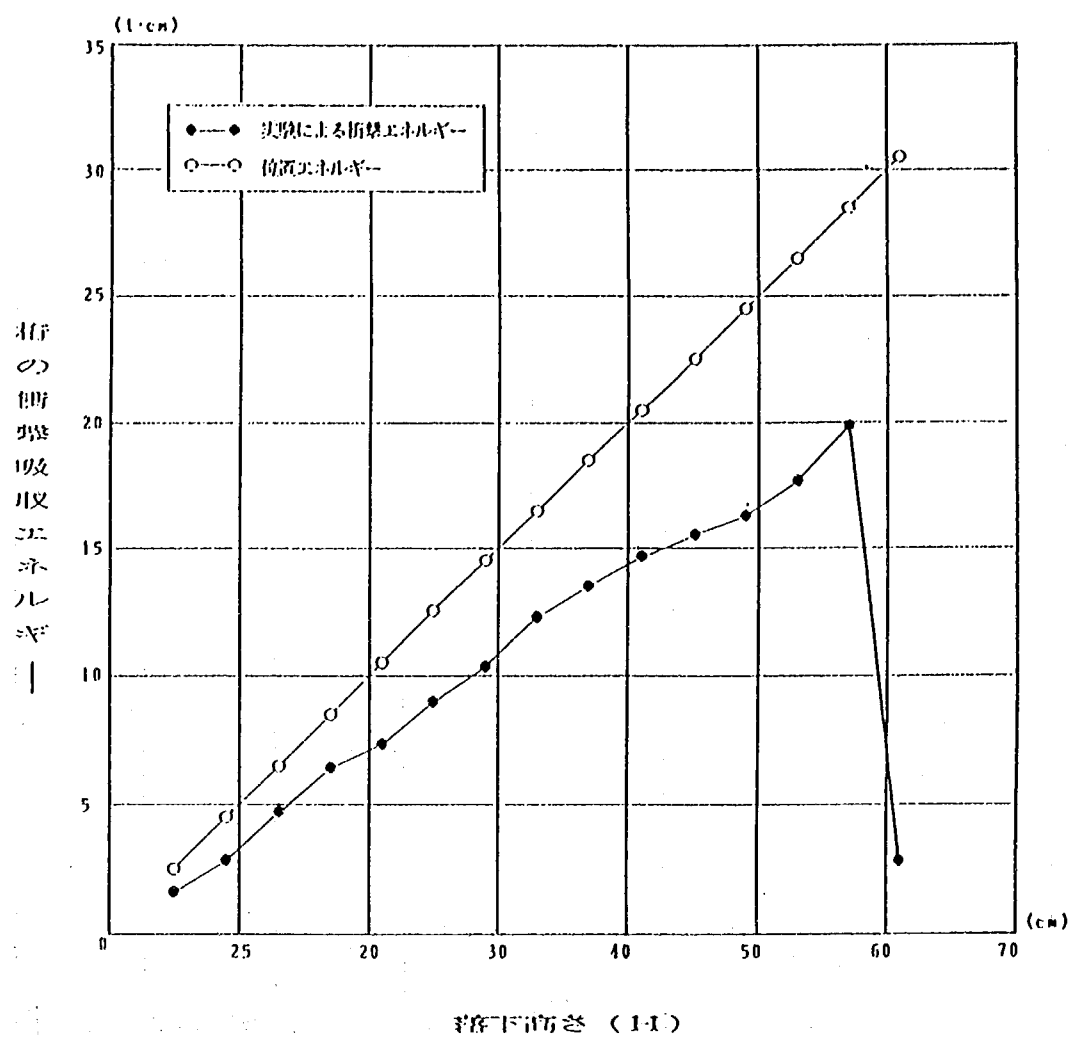
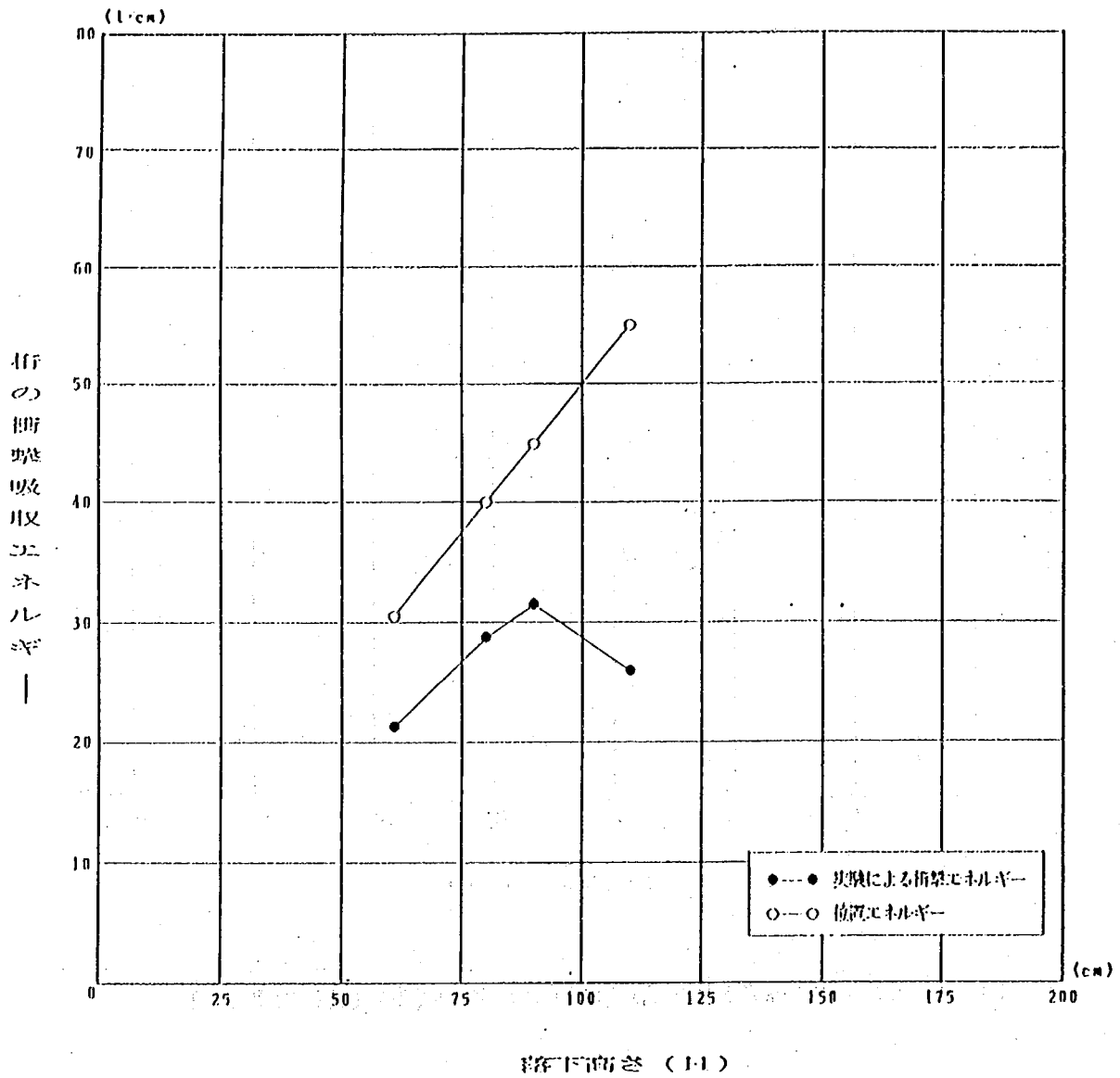


図-5.40 落下高さと桁の衝撃吸収エネルギーの関係 (RC桁 No. 1)

RC模型 No.2



図一5.41 落下高さと桁の衝撃吸収エネルギーの関係 (RC桁 No.2)

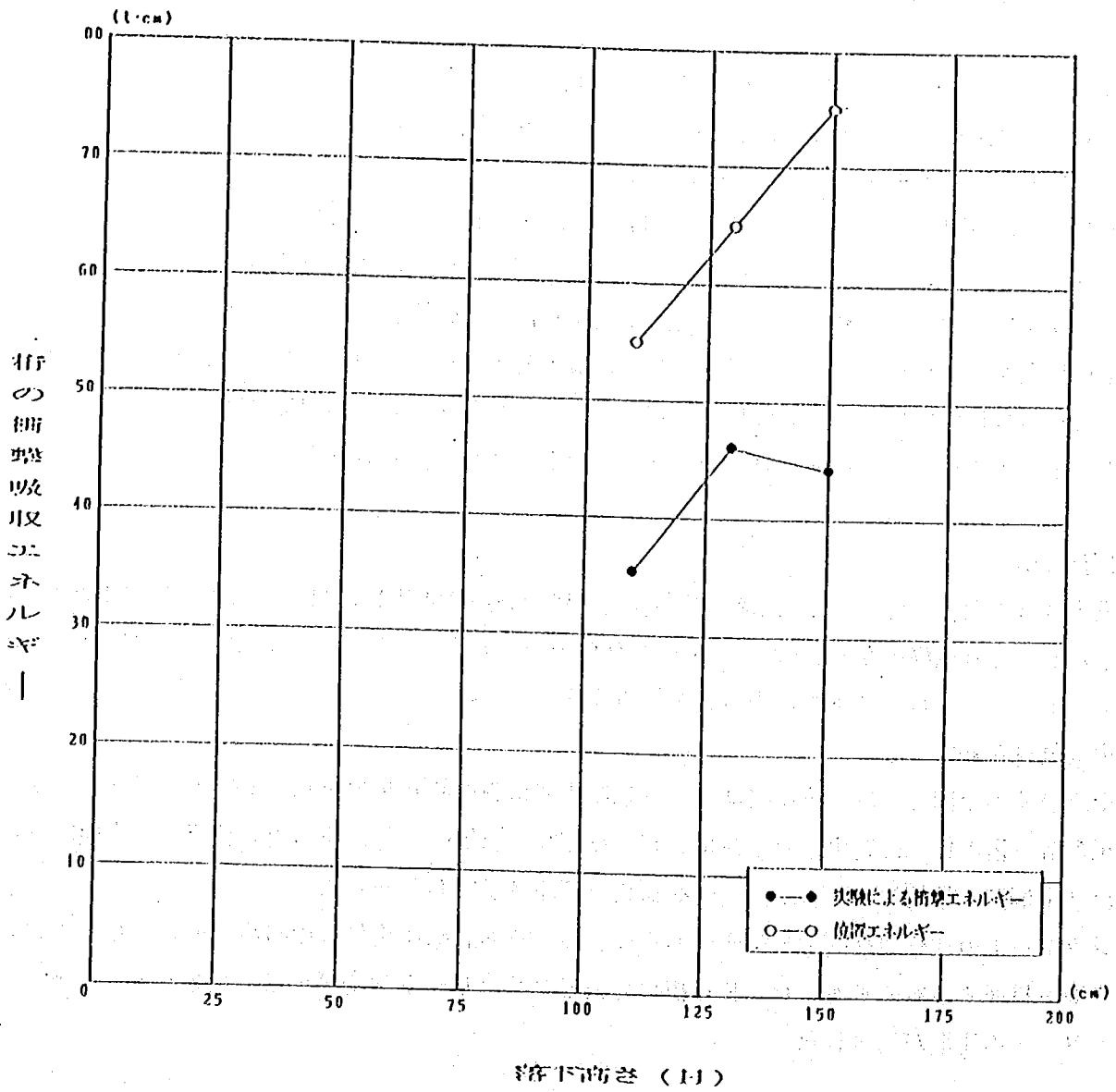


図-5.42 落下高さと桁の衝撃吸収エネルギーの関係 (RC桁 No.3)

6. まとめ

6. 1 静的載荷試験結果の考察 (図-6. 1)

(1) PC 桁

静的載荷の場合、荷重と桁変位の関係では、設計荷重3t (PC鋼線引張耐力の50%相当) に対し、荷重4tまでは弾力的な挙動を示し、それ以降は、変位20mm程度まで荷重が増加し続け、最大7t程度まで上昇した後、徐々に荷重が減少する傾向となった。

荷重とひずみの関係では、桁中央部で4t程度までは弾力的な挙動を示しているがそれ以後は、急激にひずみが増加している。1/4点でのひずみは、破壊荷重7tで急激に増加している。

桁の最初のひび割れは荷重4.2tで中央付近に発生した。その後、桁中央より20~30cm付近の両側から桁中央に向かって斜め方向に2箇所発生した。最大荷重は7tでそのときの桁中央の変位は22mmであった。その後は桁中央の変位で制御し最大40mmまで載荷したが、PC鋼線は破断しなかった。コンクリート強度が大きいことためジャッキ直下のコンクリートの圧潰は見られなかった。

(2) RC 桁

荷重と変位の関係では、設計荷重3t (鉄筋応力 1800kg/cm^2 相当) に対し、荷重3.5tまでは弾力的な挙動を示し、それ以降は変位5mm程度まで同じ傾向で荷重が上昇し続け6.8tまで上昇した。その後の載荷ステップでは、一旦6.6tまで減少し、それ以降さらに上昇し続け最大7.85tまで上昇した。この時の桁中央変位は70mmであった。

荷重とひずみの関係では、桁中央部で2.6t程度までは弾力的な挙動を示している。最初のひび割れは荷重2.8tで桁中央部に発生した。荷重4.1tでひび割れは桁中心部に達した。荷重が減少傾向を示した後は変位制御で載荷したが、最大変位80mmまで鉄筋は破断しなかった。

コンクリートのひび割れは十数箇所におよび、このうち、桁中央付近の斜め方向のひび割れは、桁の上下面を貫通するものであった。PC桁に比較しコンクリート強度が小さいためジャッキ下面でのコンクリートの圧潰が見られた。

(3) 考察

静的な耐荷力は設計荷重3tに対して、PC桁及びRC桁ともに約2倍の7t程度の最終耐力を有していると言えるが、4tから6.8tまではRC桁の方が変位がかなり小さく剛性の低下が遅いことが知られる。

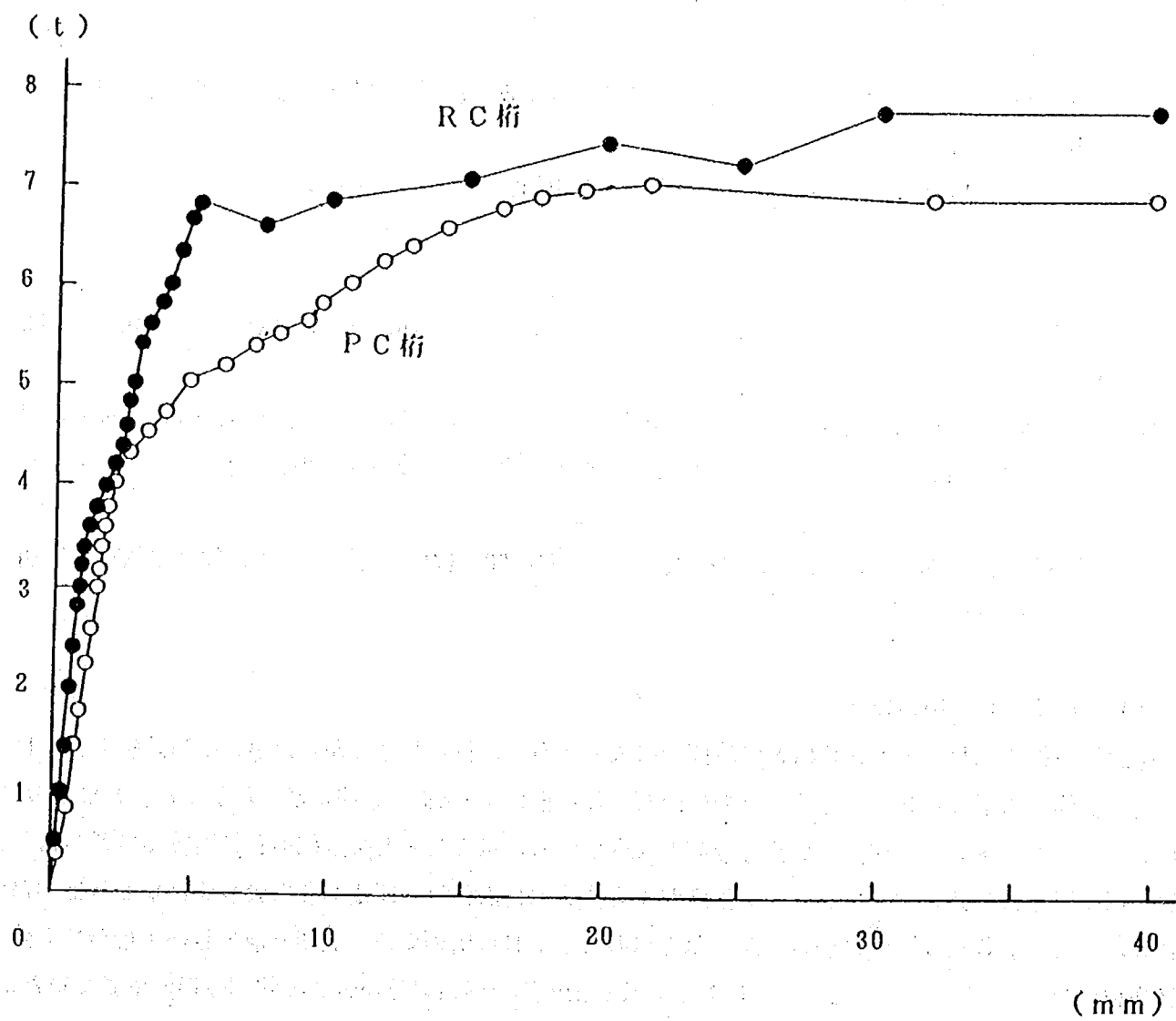


図-6.1 静的載荷時の荷重-変位荷重

6.2 PC桁とRC桁の衝撃耐力

(1) PC桁

静的及び衝撃載荷試験における荷重と桁変位の関係を図-6.2に示す。

静的試験の場合には約7tで最大耐力に達するのに対し、衝撃試験では緩やかに約9t程度まで（重錘加速度から求めた値で）荷重が上昇し続けた。これはひずみ速度効果に伴い、見かけの剛性が増加したためと考えられる。

すなわち、静的載荷に比較し衝撃載荷では荷重は1.3倍程度大きくなった。

(2) RC桁

静的及び衝撃載荷試験における荷重と桁変位の関係を図-6.3に、荷重と鋼材ひずみの関係を図-6.4に示す。

荷重と桁変位の関係では、静的載荷では荷重約8tまでで荷重が上昇しなくなるのに対し、衝撃載荷では12t程度まで徐々に荷重が増加した。したがって衝撃荷重では静的荷重の1.5倍の荷重に耐えうるといえる。

荷重と鋼材ひずみの関係でも、上述の荷重でひずみが2000 μ 程度に達し、その後伸びが急激に増加していることがわかる。

(3) PC桁とRC桁の比較

静的な条件ではPC桁とRC桁とで耐荷力に大きな違いは見られなかったが、衝撃試験では、PC桁試験体は落下高が45cmで破壊したのに対し、RC桁は150cmまで破壊に至らなかった。PC桁の場合、コンクリートの強度が大きいいため載荷点付近に圧潰が見られず引張り側のPC鋼線が破断したが、RC桁の場合には比較的コンクリート強度が小さく、載荷点付近が圧潰し、引張り側に加わる応力が比較的小さく、鉄筋が破断に至らなかったと思われる。PC桁の場合、破壊寸前の載荷の場合でも残留変位は1cm程度とわずかであったのに対し、RC桁の場合残留変位が大きく約10cm程度生じていた。

PC桁とRC桁では静的耐力及び衝撃耐力共に大きな差はないと言えるが、エネルギー吸収能力はRC桁の方が大きい。ただし本実験のPC桁は引張り側にPC鋼より線を配したのみで鉄筋がなく、通常のPC桁より靱性が少ない構造となっていることに注意が必要である。

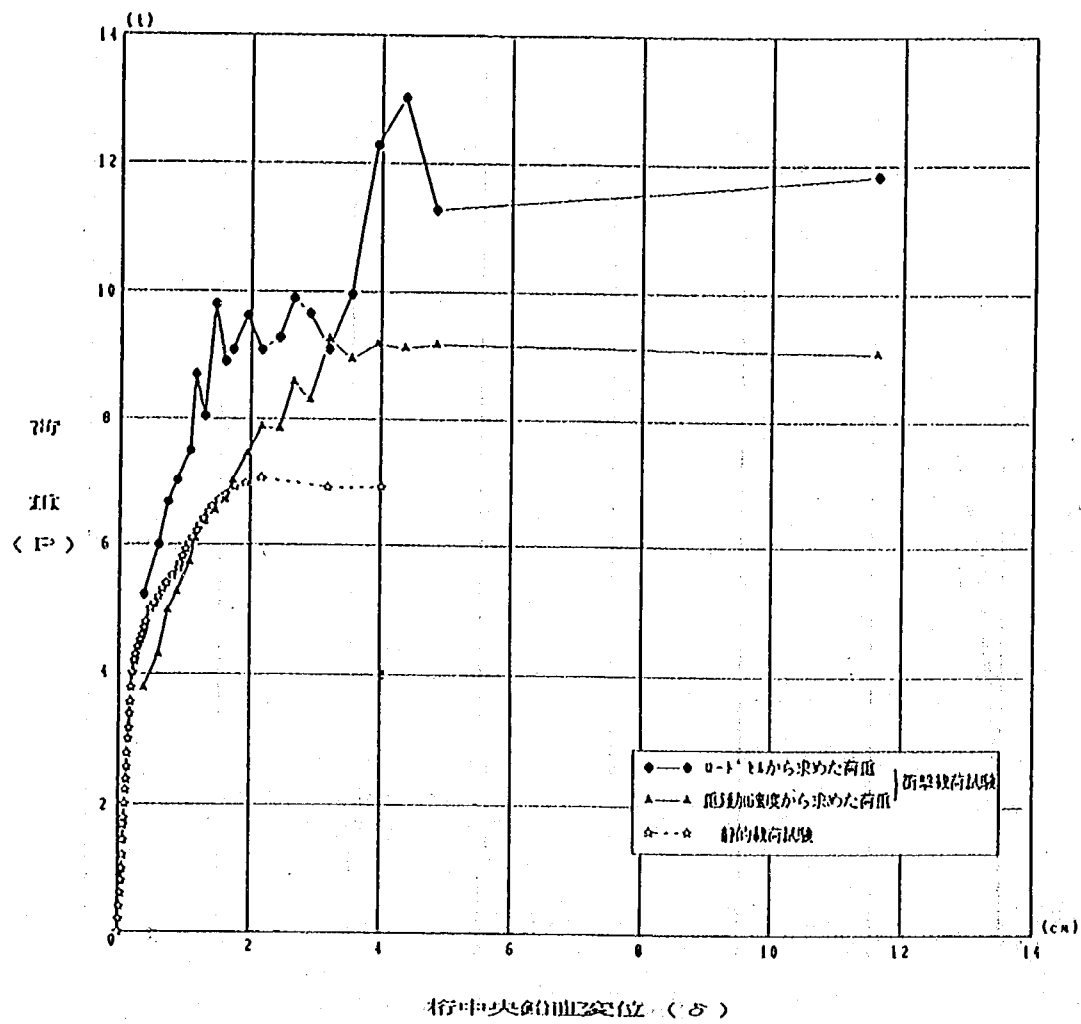


図-6.2 荷重と桁中央鉛直変位の関係

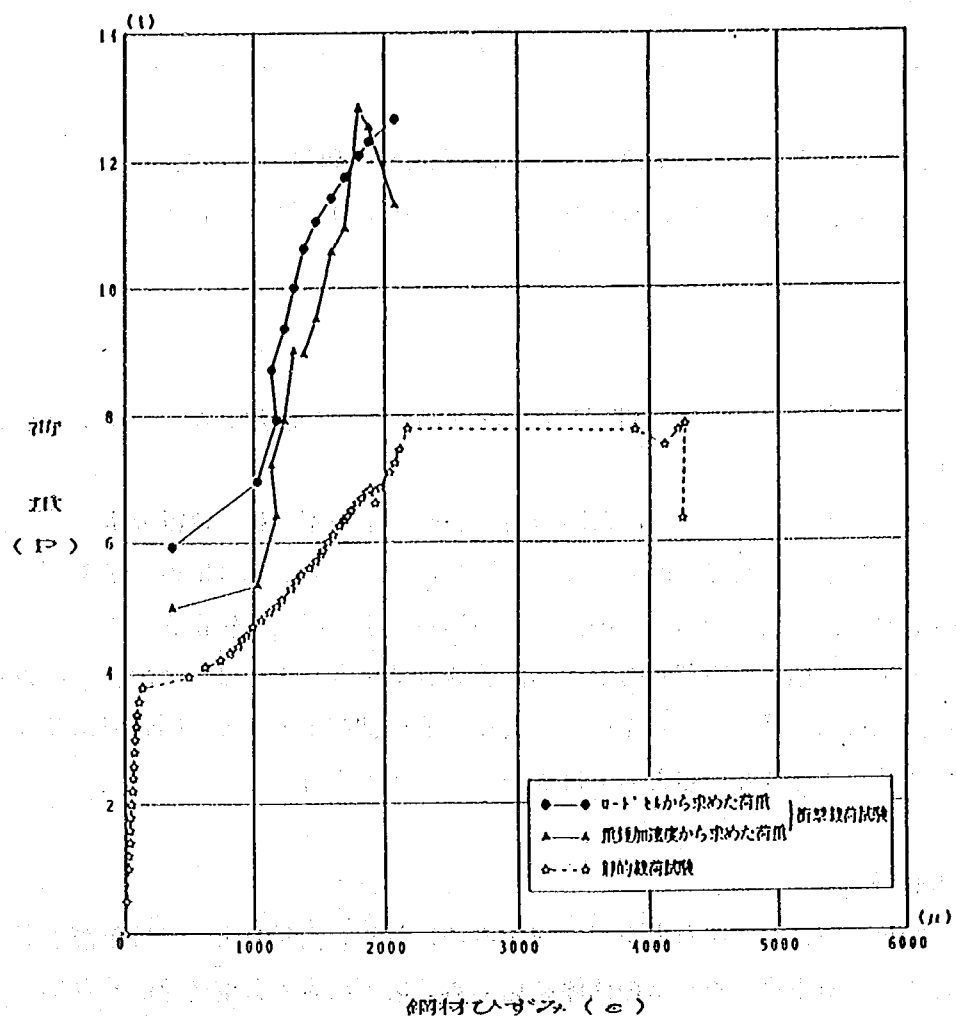


図-6.4 荷重と鋼材ひずみの関係

6.3 衝撃エネルギー

(1) 加速度から求めた衝撃エネルギー

落下高さと重錘及び桁の衝撃エネルギーの関係を図-6.5に、桁と重錘のエネルギー比を図-6.6に示す。

桁と重錘の衝撃エネルギーの比率は、桁質量の1/2を有効質量とした場合、PC、RCともに10%~30%に分布している。どちらの場合も落下高さが高くなるのに伴って、比率が大きくなる傾向を示している。

(2) 桁の衝撃吸収エネルギー

図-6.7にPC桁No.2とRC桁No.1での落下高さと桁の衝撃吸収エネルギー及び位置エネルギーの関係を示す。

ロードセルの荷重と桁変位より求めた桁の衝撃吸収エネルギーは、位置エネルギーに対しPC桁の場合80%程度、RC桁では70%程度であった。PC桁に比較し、RC桁の方が1割程度少ない値となった。これは、PC桁とRC桁の質量の大きさの違いによる影響と想定される。

衝撃試験において、桁の支点部から地盤へ伝達されるエネルギー量、試験装置のガイドレールとベアリングとの摩擦による損失エネルギーなどを定量的に把握することは困難であるが、それらを考慮すると桁が吸収するエネルギー量としては妥当な値と考えられる。

(3) 荷重の評価

静的条件下では荷重により耐荷力を評価できるのに対し、衝撃荷重下では重錘と試験体の挙動が一体ではない。また、落下高さと荷重の関係を見ても、落下高さと荷重は比例しない。

落下高さと衝撃エネルギーの関係は、①エネルギーを加速度で求めると桁の吸収エネルギーは重錘エネルギーの10~30%程度となり、重錘エネルギー量とかけ離れた値となる。②エネルギーを変位から求めると、位置エネルギーに近くPC桁で80%程度、RC桁で70%程度となった。

したがって、桁の吸収エネルギーはロードセルと変位とから計算した値で求められると考えてよい。言い方を換えれば、桁に作用する衝撃荷重の評価は、位置エネルギーにより行う事が有効であると考えられる。

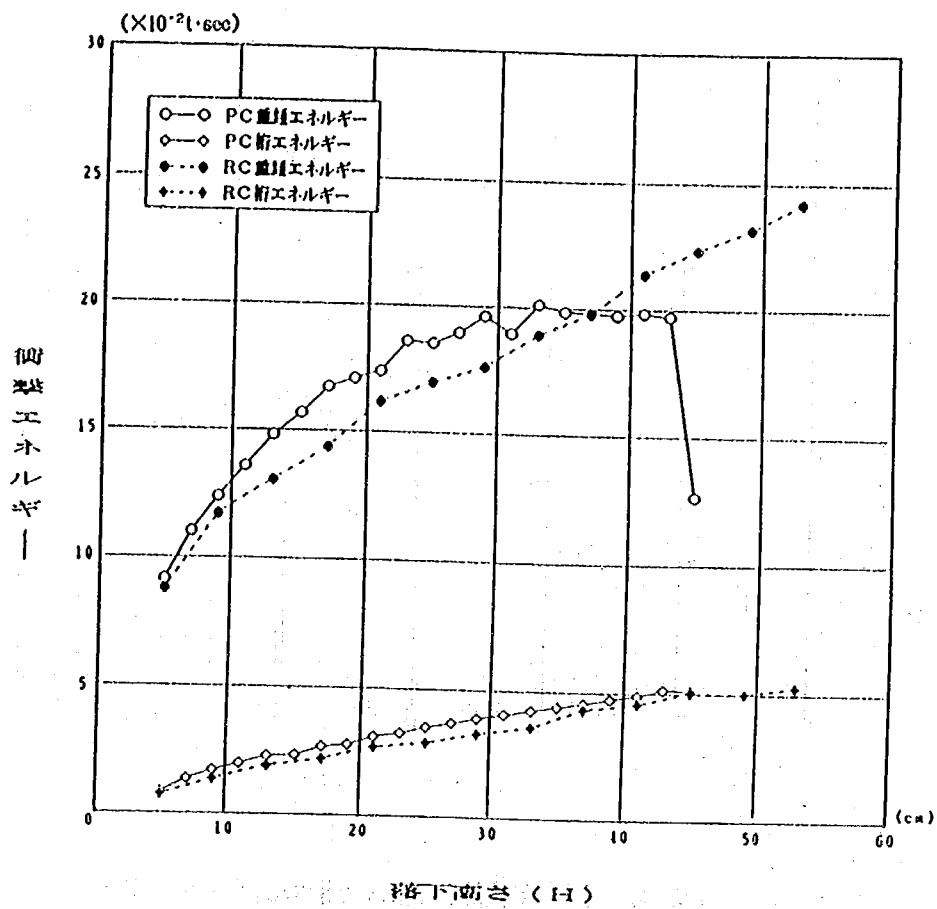


図-6.5 落下高さと衝撃エネルギー

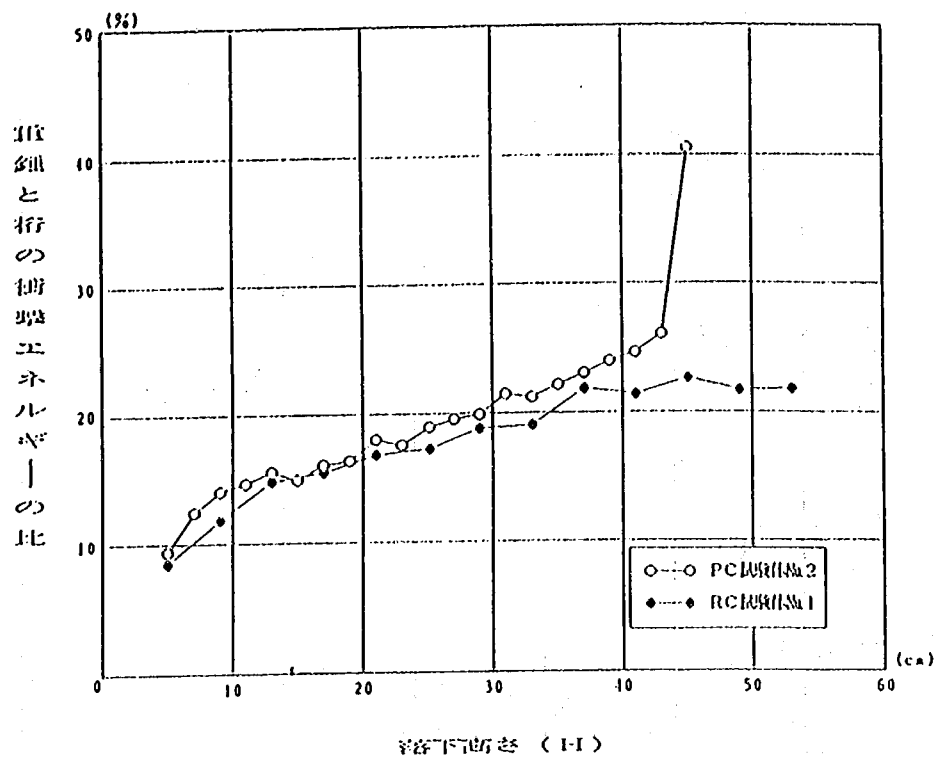


図-6.6 落下高さと重錘と桁の衝撃エネルギー

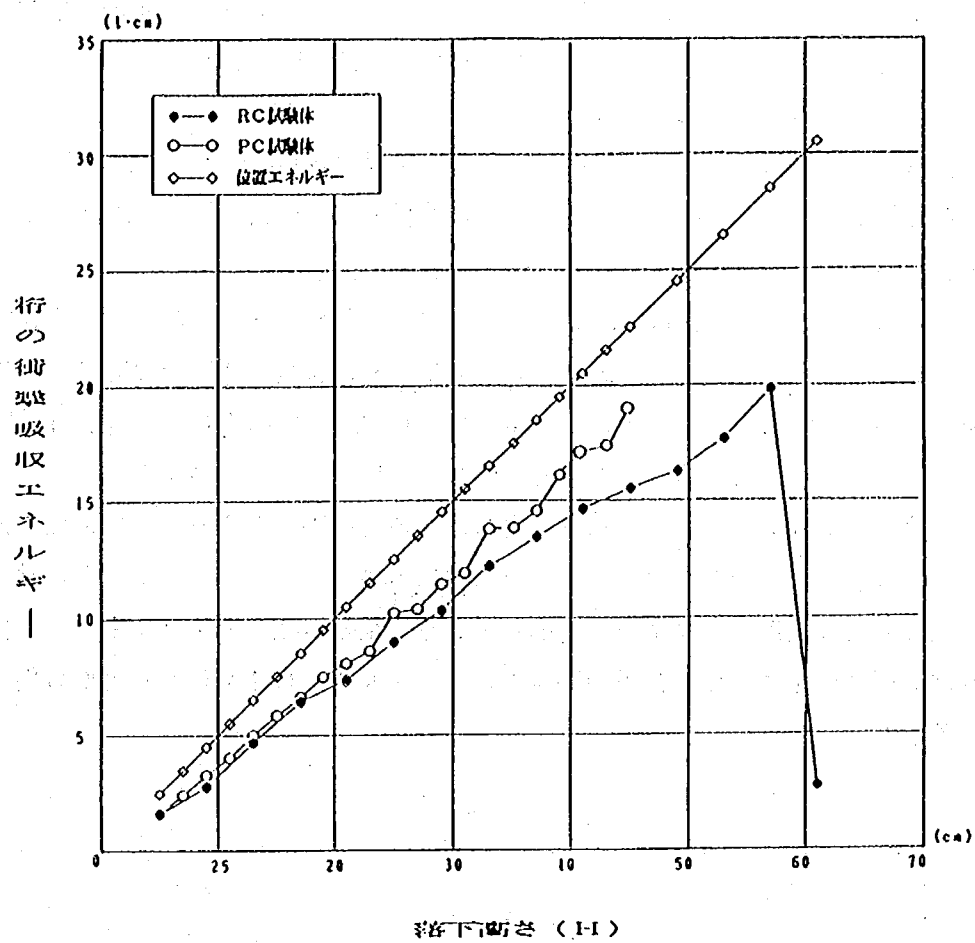


図-6.7 落下高さと桁の衝撃吸収エネルギーの関係

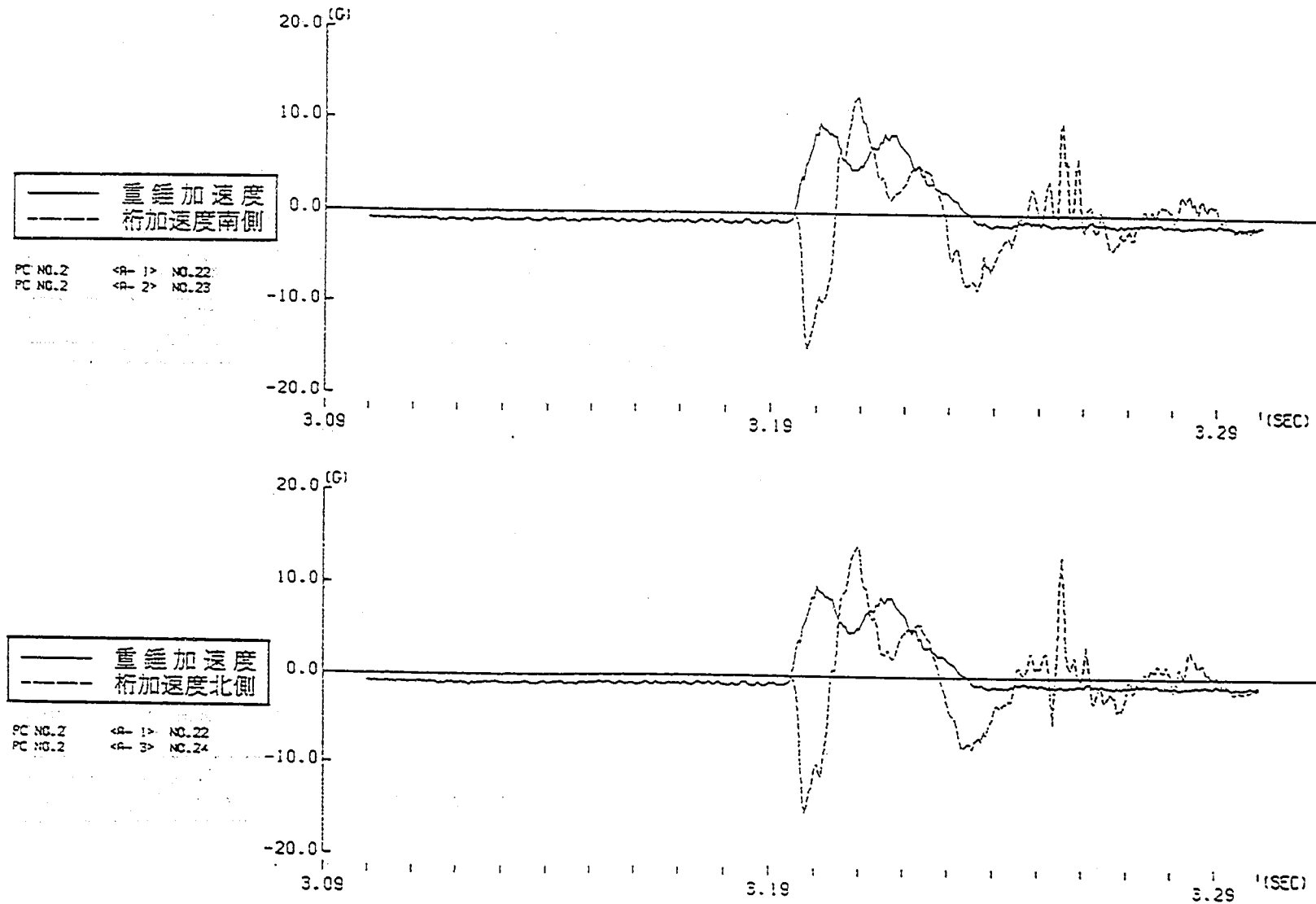
6.4 設計へのフィードバック

- (1) 同一設計荷重に対するPC桁とRC桁では、静的耐力で10数%、衝撃耐力で30数%、RC桁の方が大きい。(ただし、本研究で用いたPC試験体は組立鉄筋を有しておらず、通常のPC桁より靱性の少ない構造となっている。)

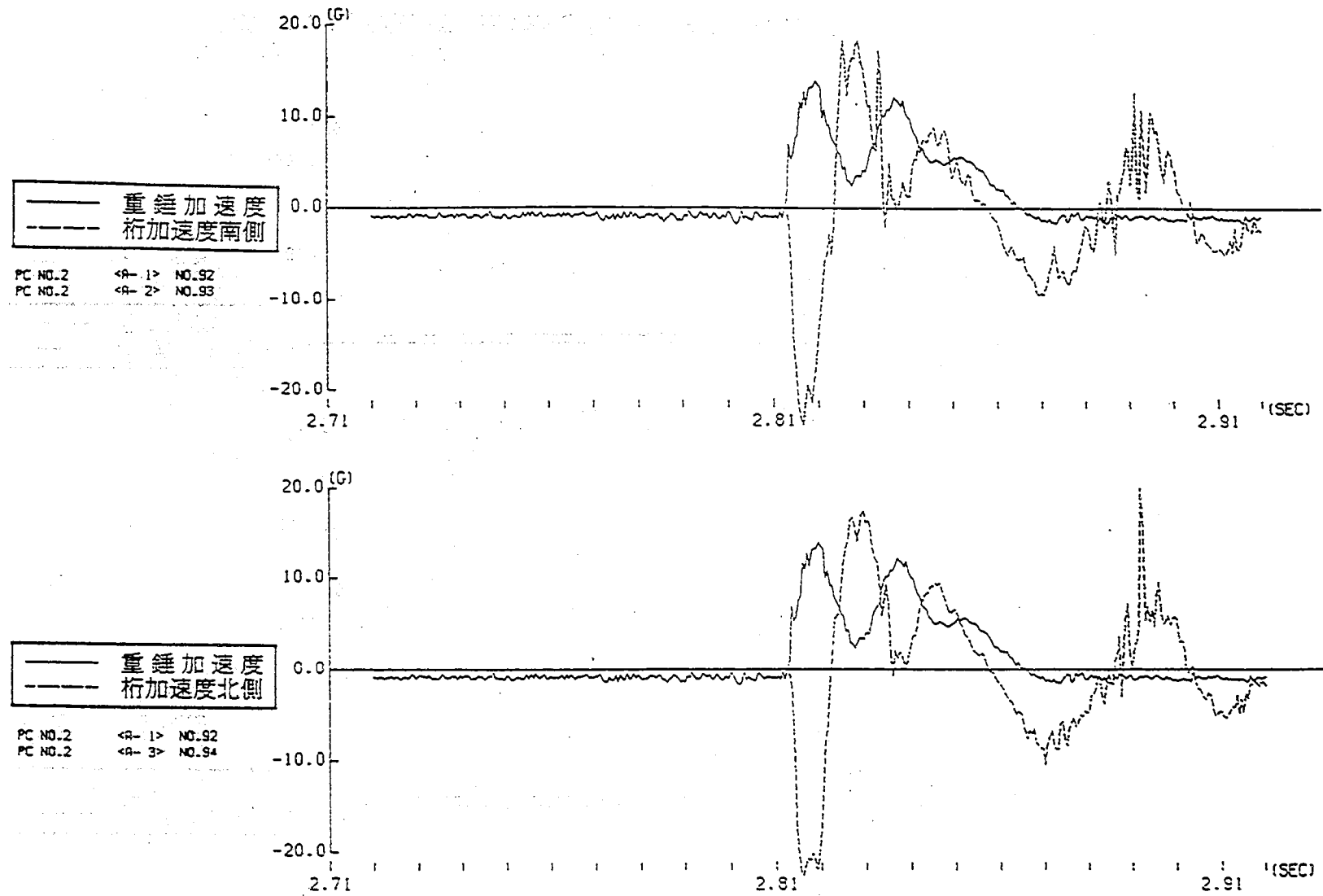
落石覆工の施工においては、現場での交通を確保する必要性から構造部材のプレハブ化が今後とも望まれ、今後の研究課題としてPC部材のPRC化を行い、より靱性の大きい構造の実現に向けての研究を行っていくことが肝要である。

- (2) 衝撃耐力と静的耐力の比は、PC桁で1.3、RC桁で1.5程度となった。これは歪速度効果によるものであると思われる。設計においては厳密には載荷速度の違いによるひずみ速度効果を考慮して衝撃耐力を評価することが望ましいが、静的耐力による評価は設計上、安全サイドの近似であり、耐力の余裕としてもたせておいてもよいといえる。

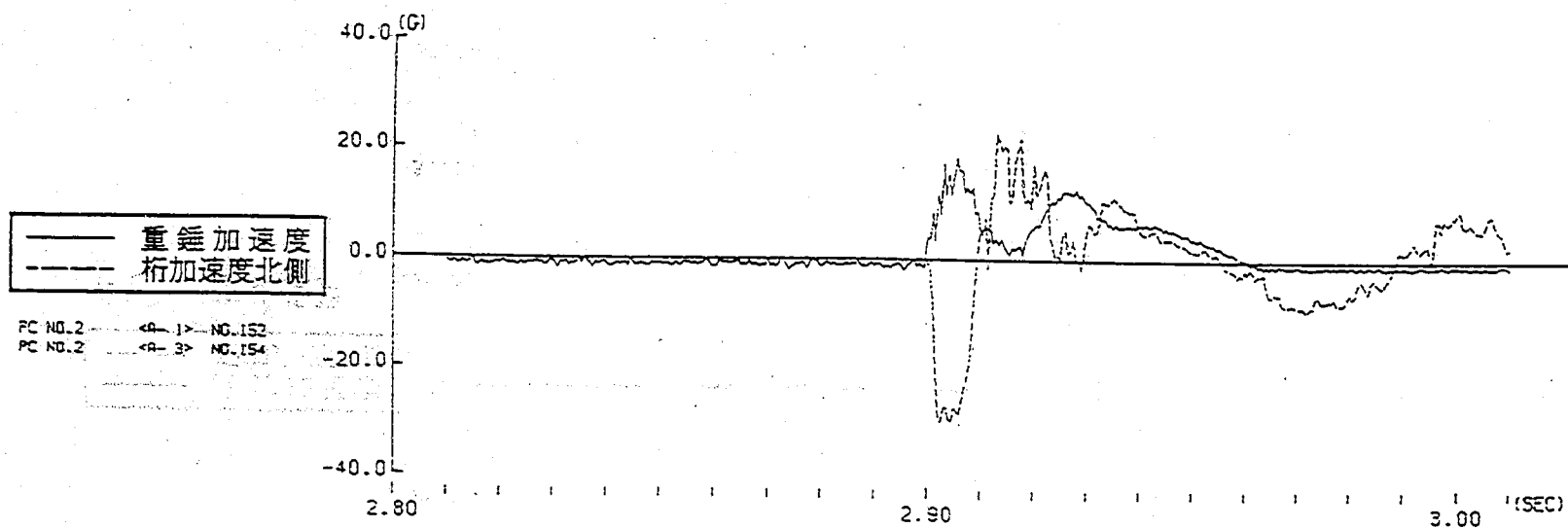
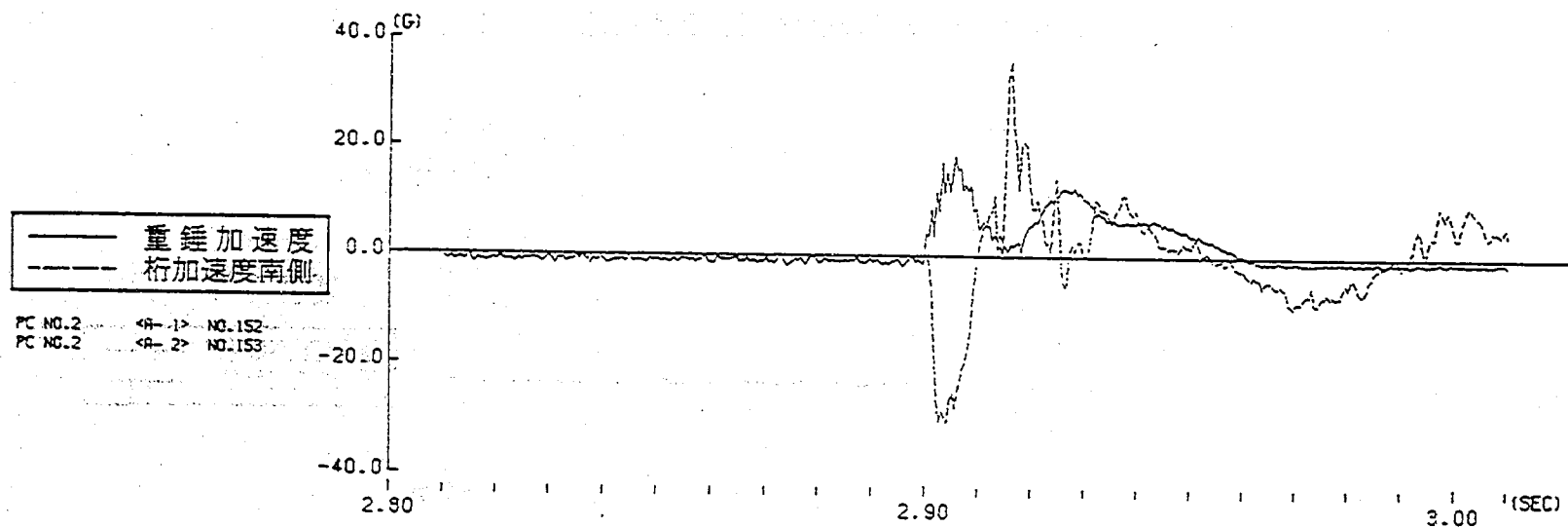
- (3) 衝撃荷重を受ける桁は減衰振動を行うため、最初の半波による力積は重錘の力積の10~30%程度となり、重錘のもつエネルギーを適切に評価できない。一方変位から計算された仕事量は重錘の持つ位置エネルギーと対応しており、桁が吸収するエネルギーの評価が的確に行えれば、桁に作用する衝撃荷重の評価を位置エネルギーにより行うことが有効であると考えられる。



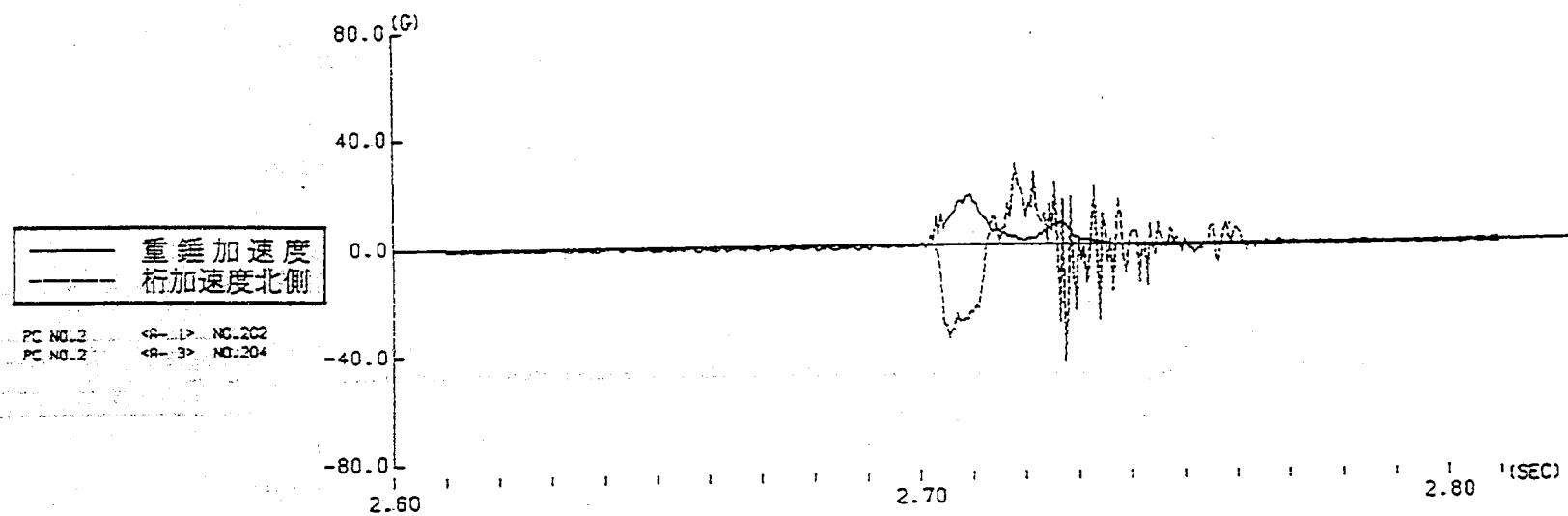
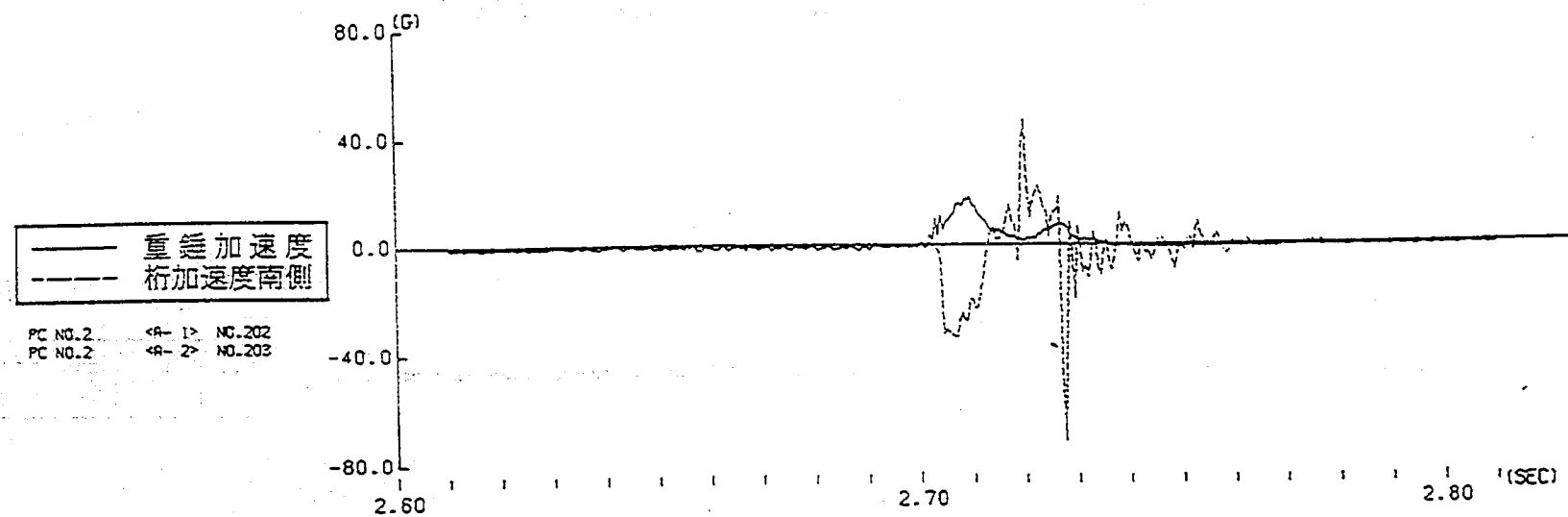
附図-1.1 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (PC桁 No.2, 重錘:0.5t, 落下高さH=9cm)



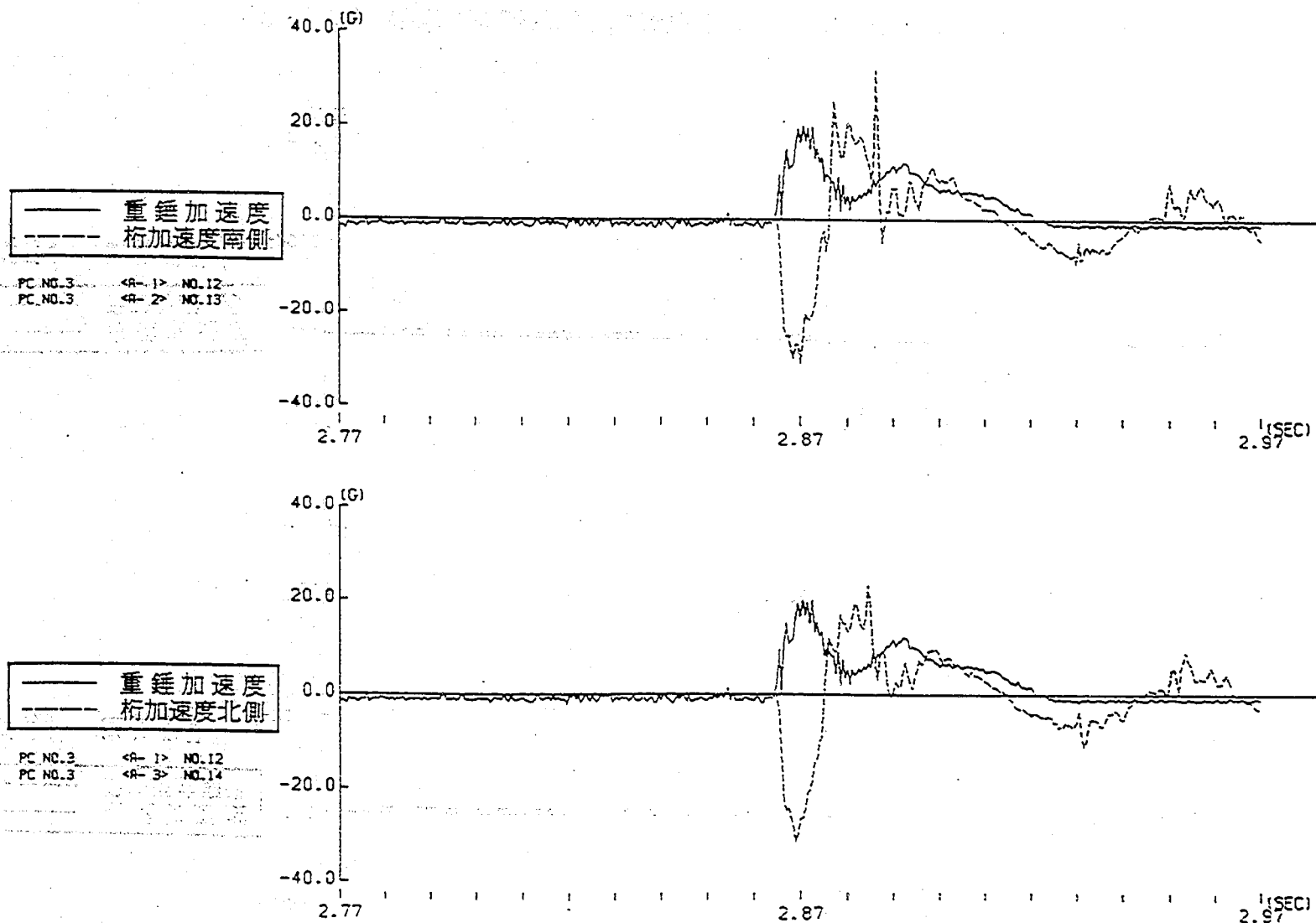
附図-1.2 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (P C 桁 No. 2, 重錘: 0.5t, 落下高さ H=23cm)



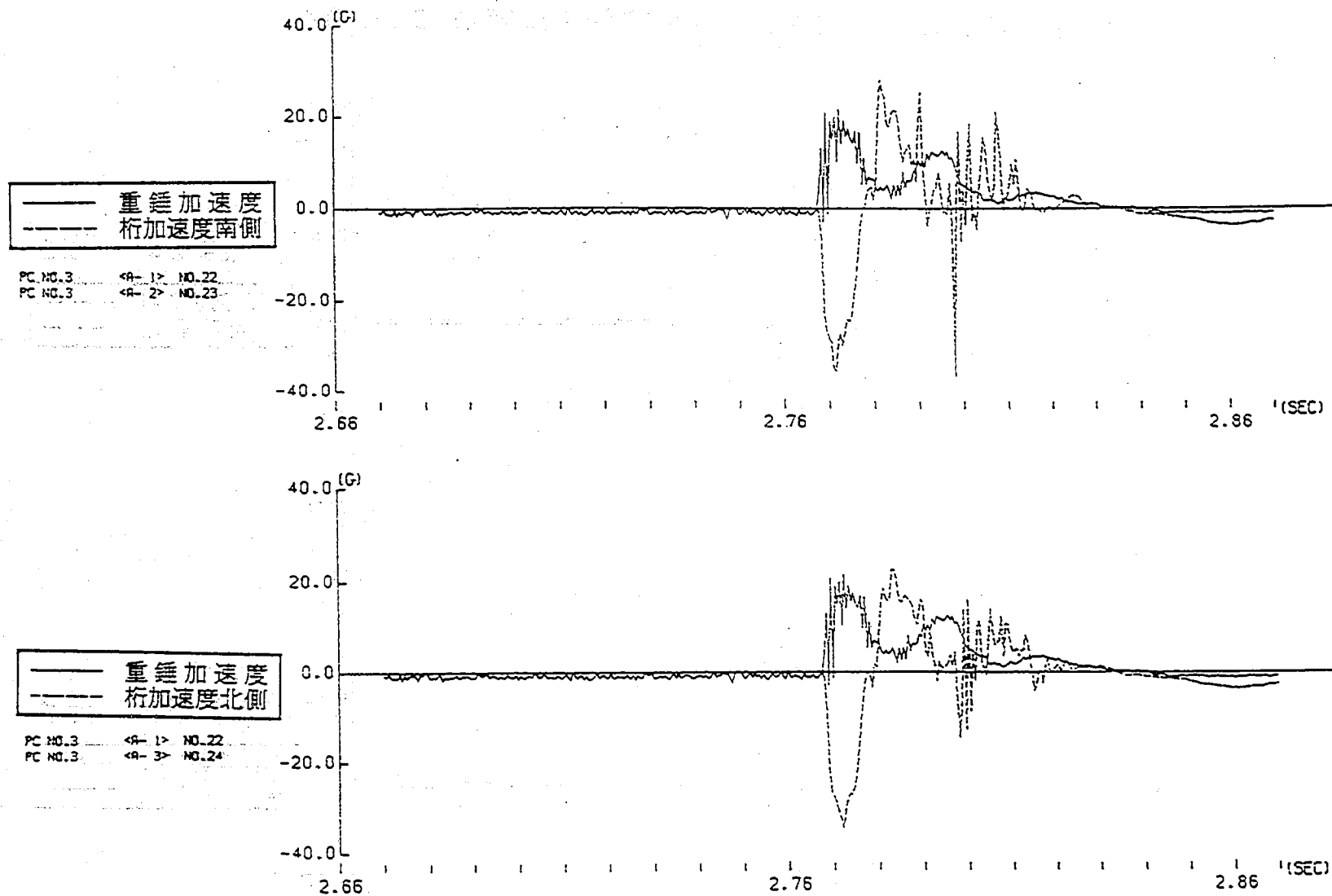
附図-1.3 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (PC桁 No.2, 重錘:0.5t, 落下高さH=35cm)



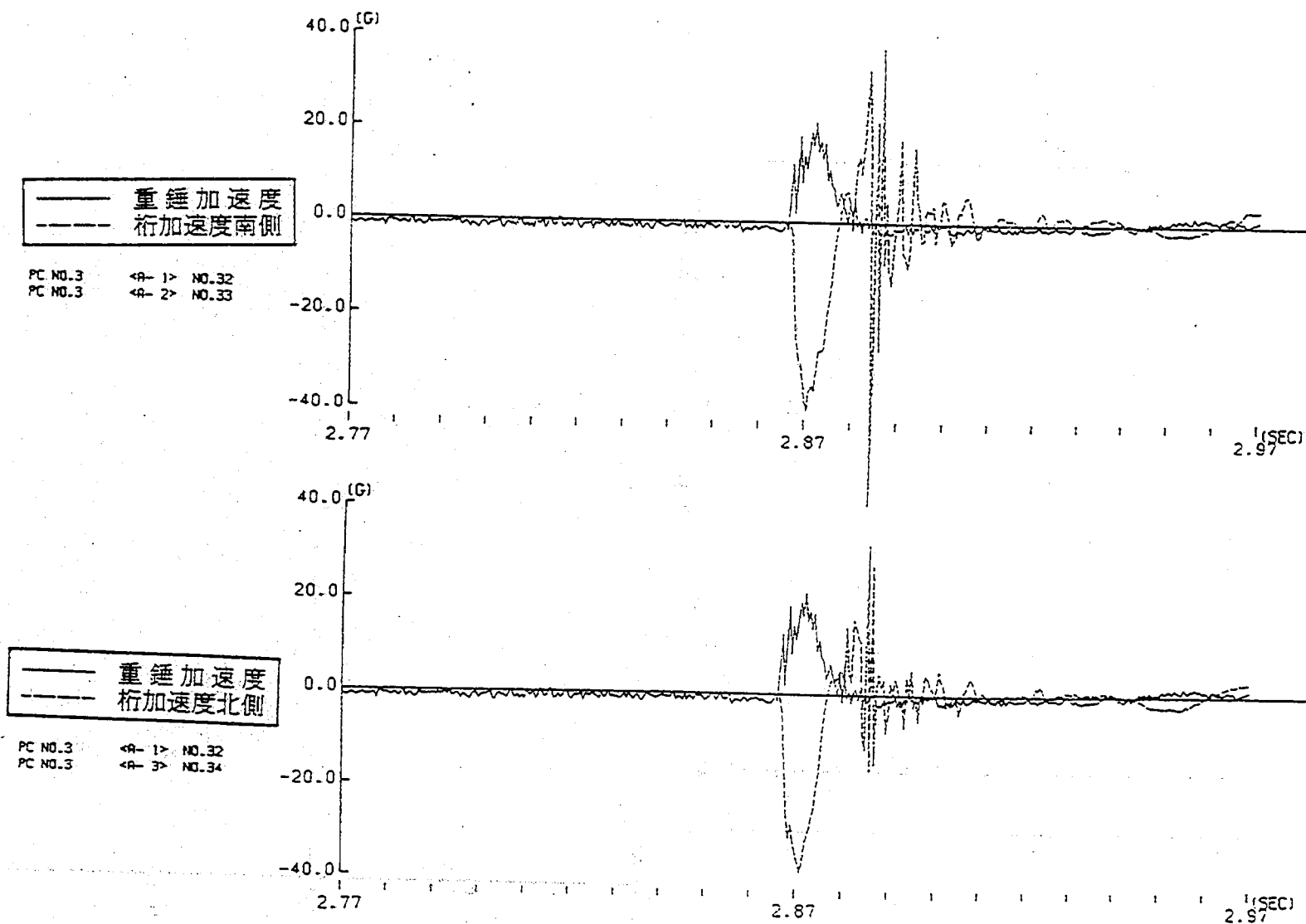
附図-1.4 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (PC桁 No.2, 重錘:0.5t, 落下高さH=45cm)



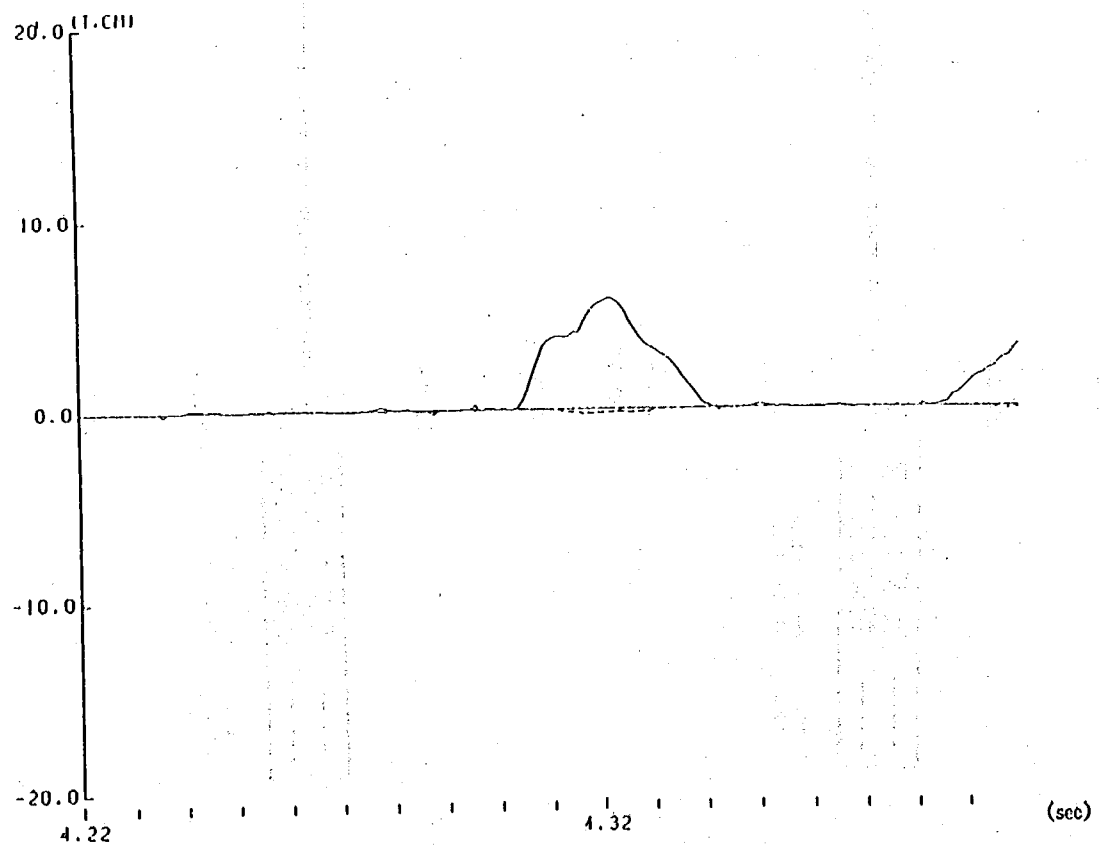
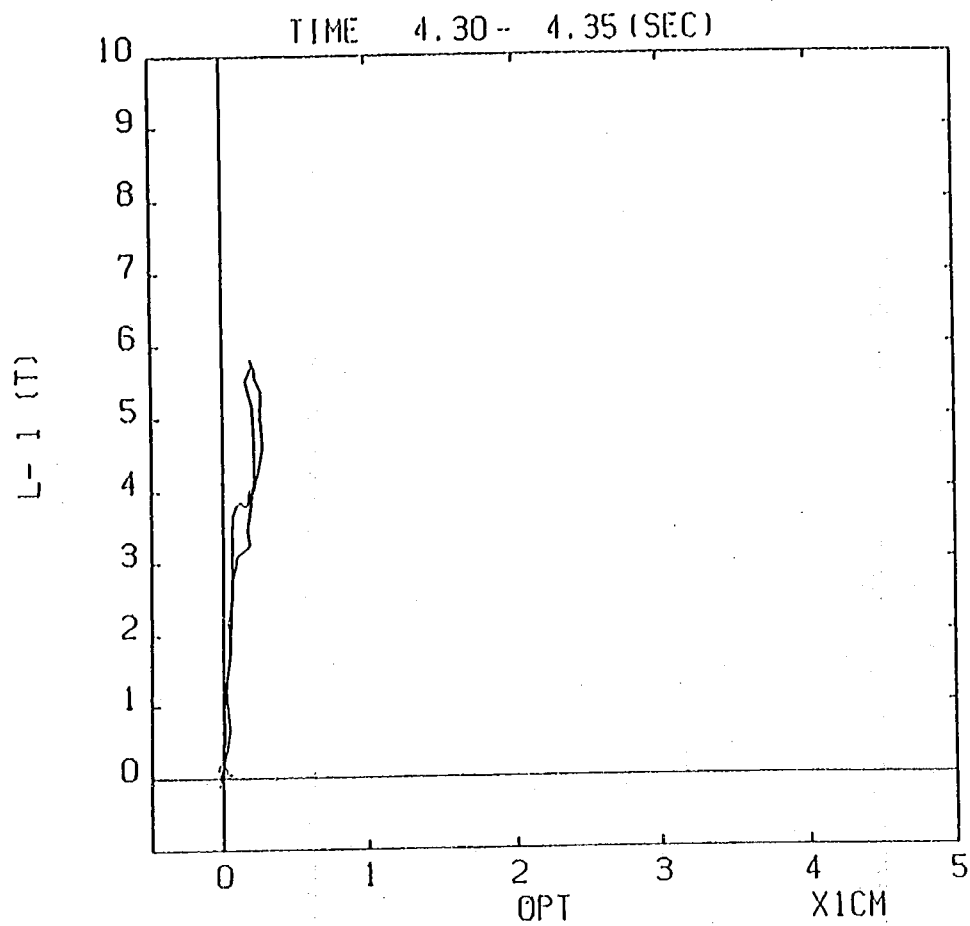
附図-1.5 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (P C 桁 No. 3, 重錘: 0.5t, 落下高さ H=45cm)



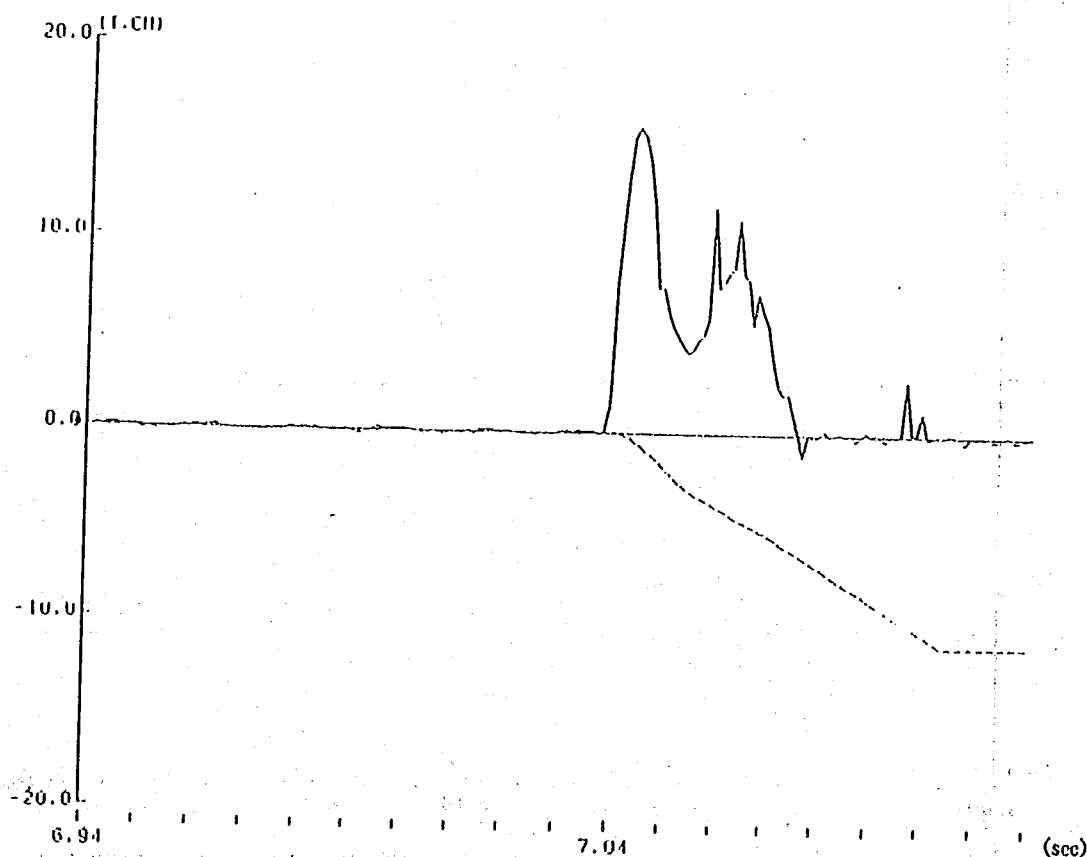
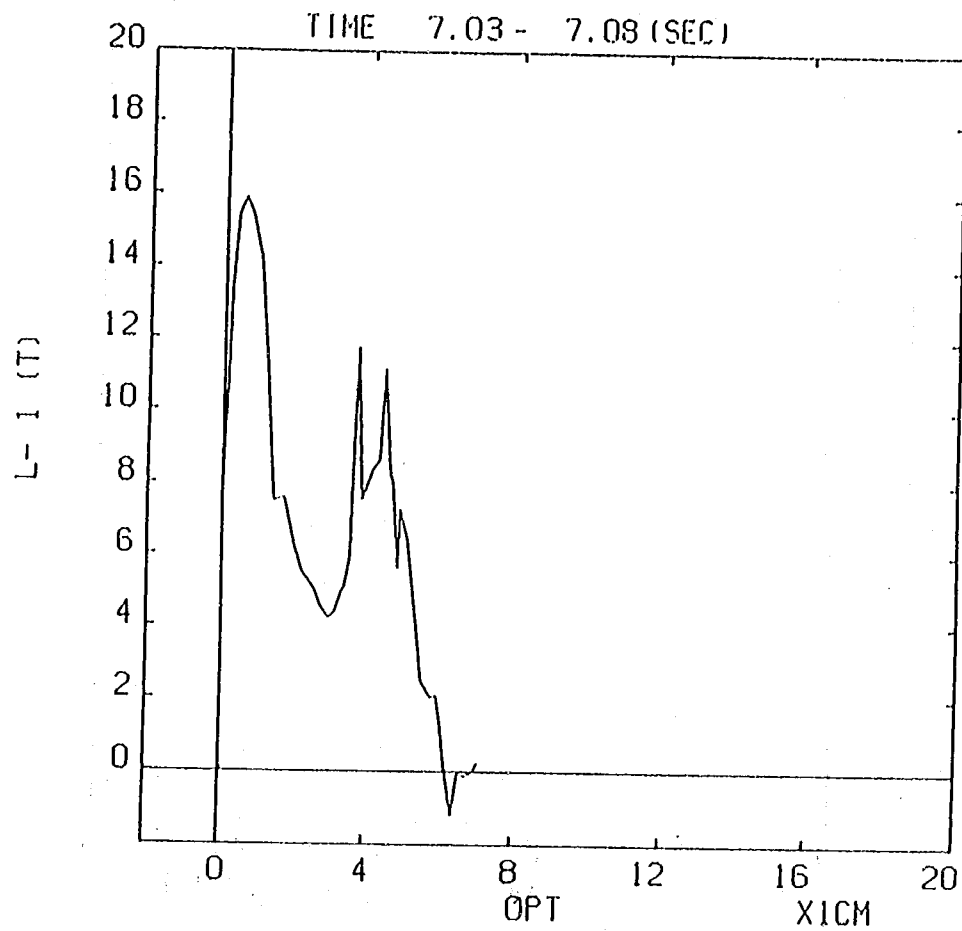
附図-1.6 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (PC桁 No.3, 重錘:0.5t, 落下高さH=47cm)



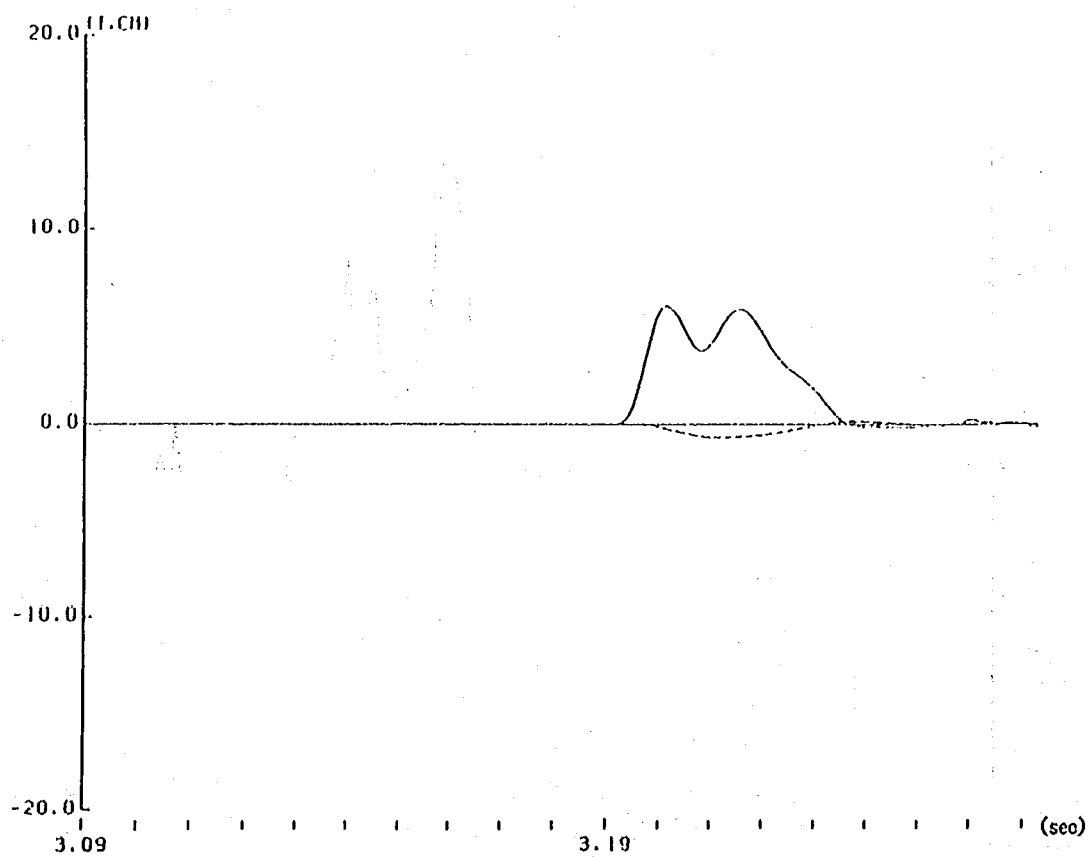
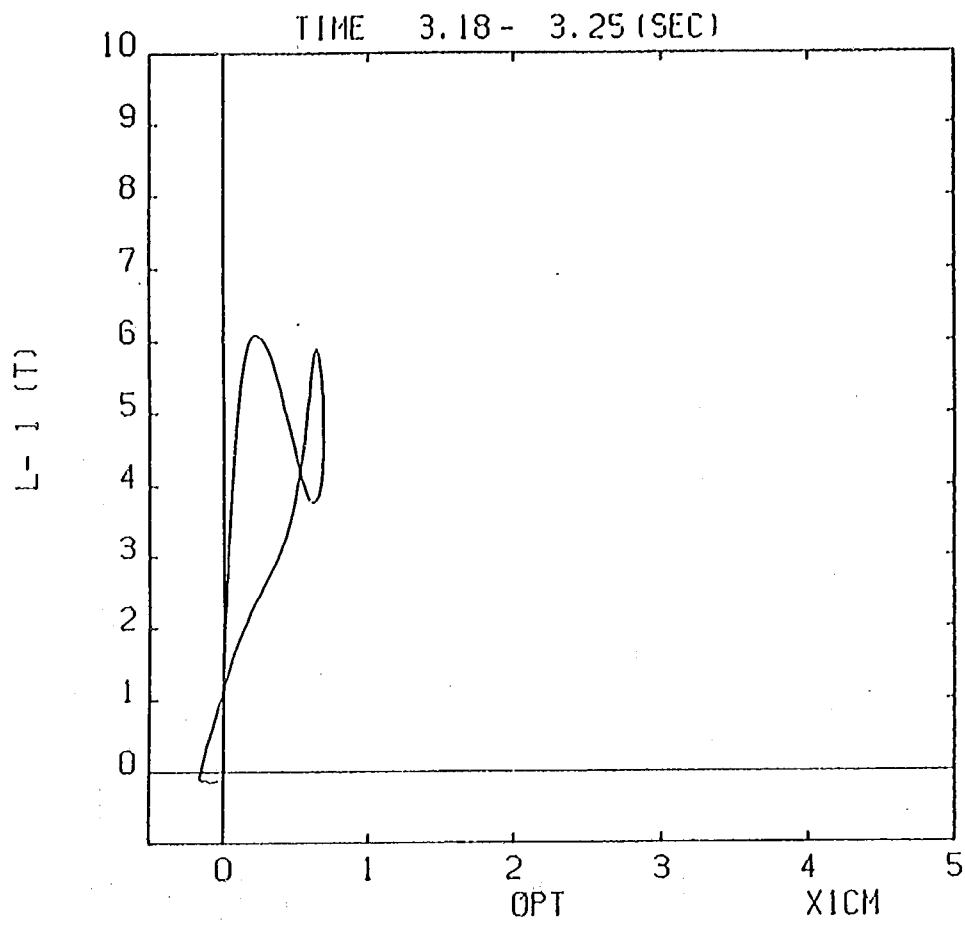
附図-1.7 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (P C桁 No. 3, 重錘: 0.5t, 落下高さH=49cm)



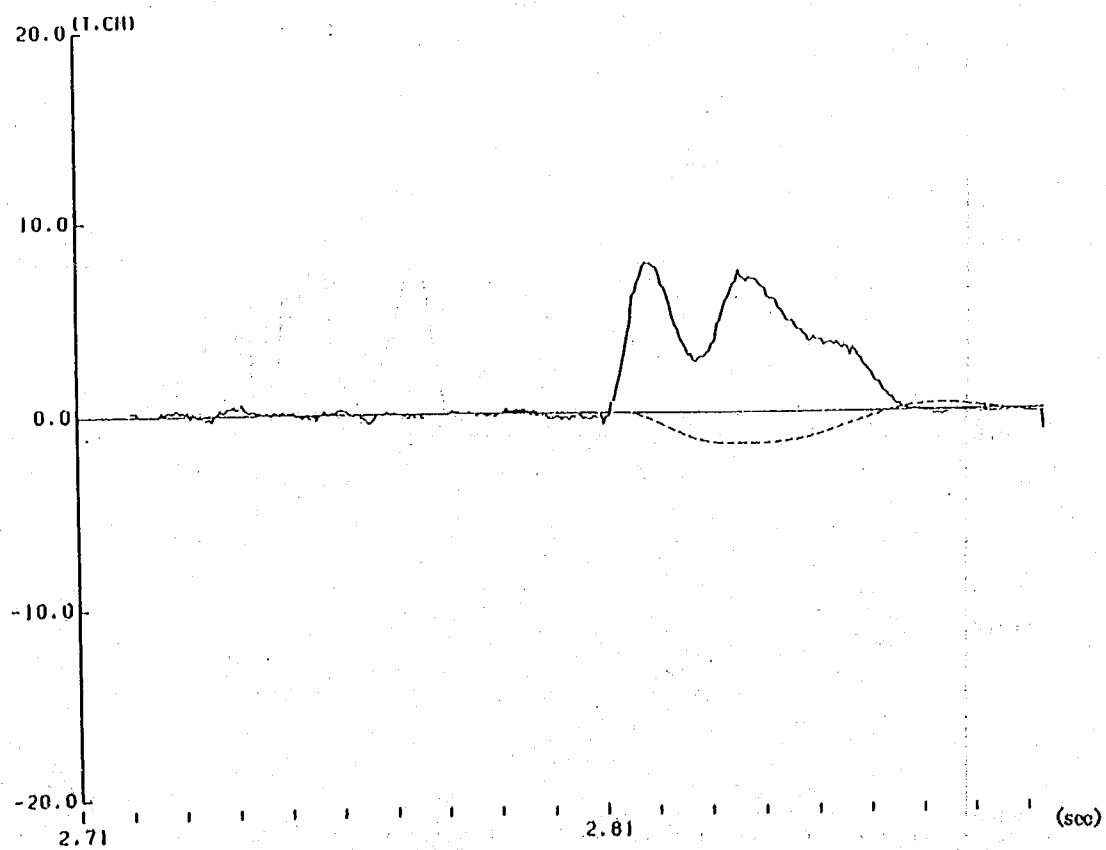
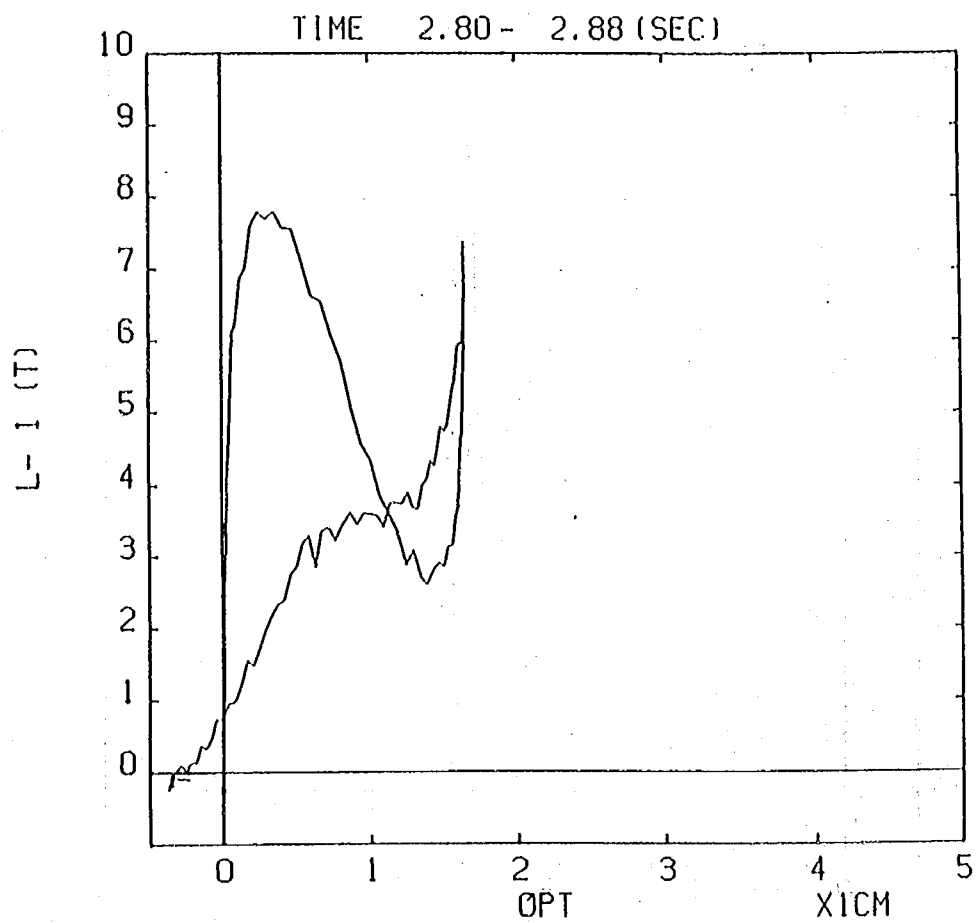
附図-1.8 荷重-変位関係および荷重、変位の経時変化 (PC桁 No. 1, 落下高さH = 1cm)



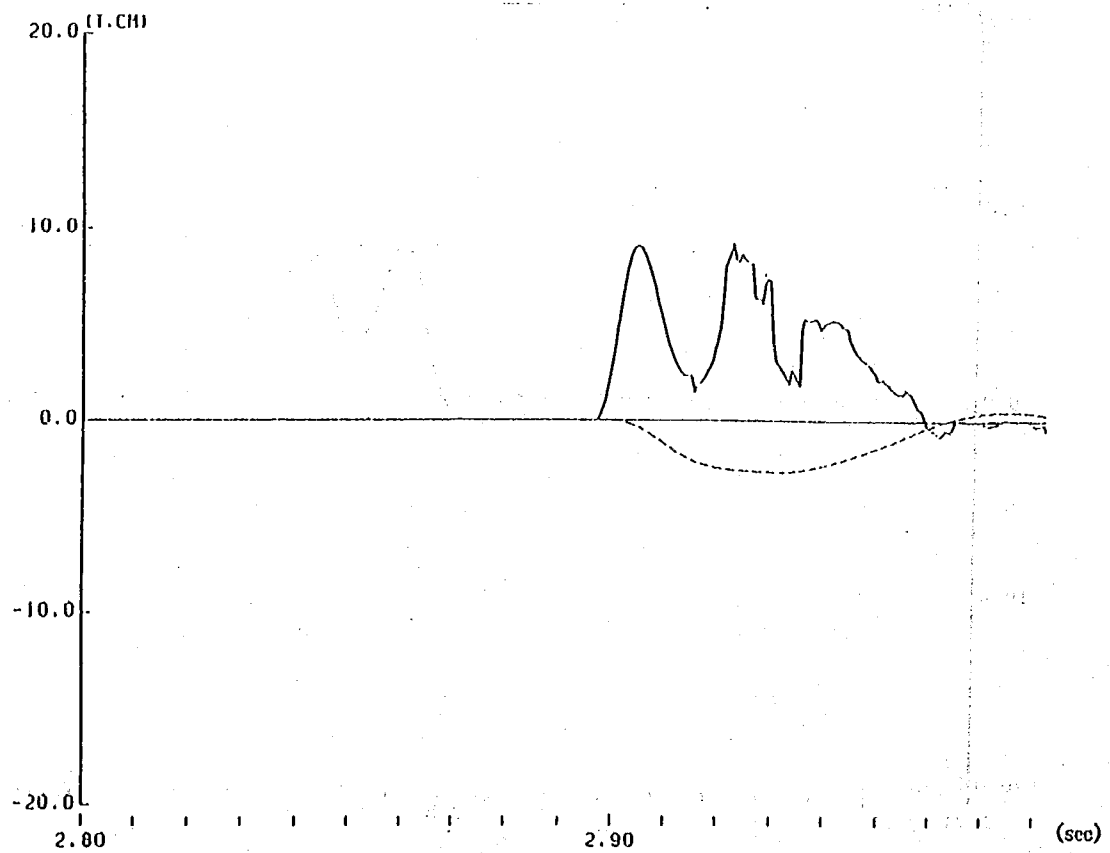
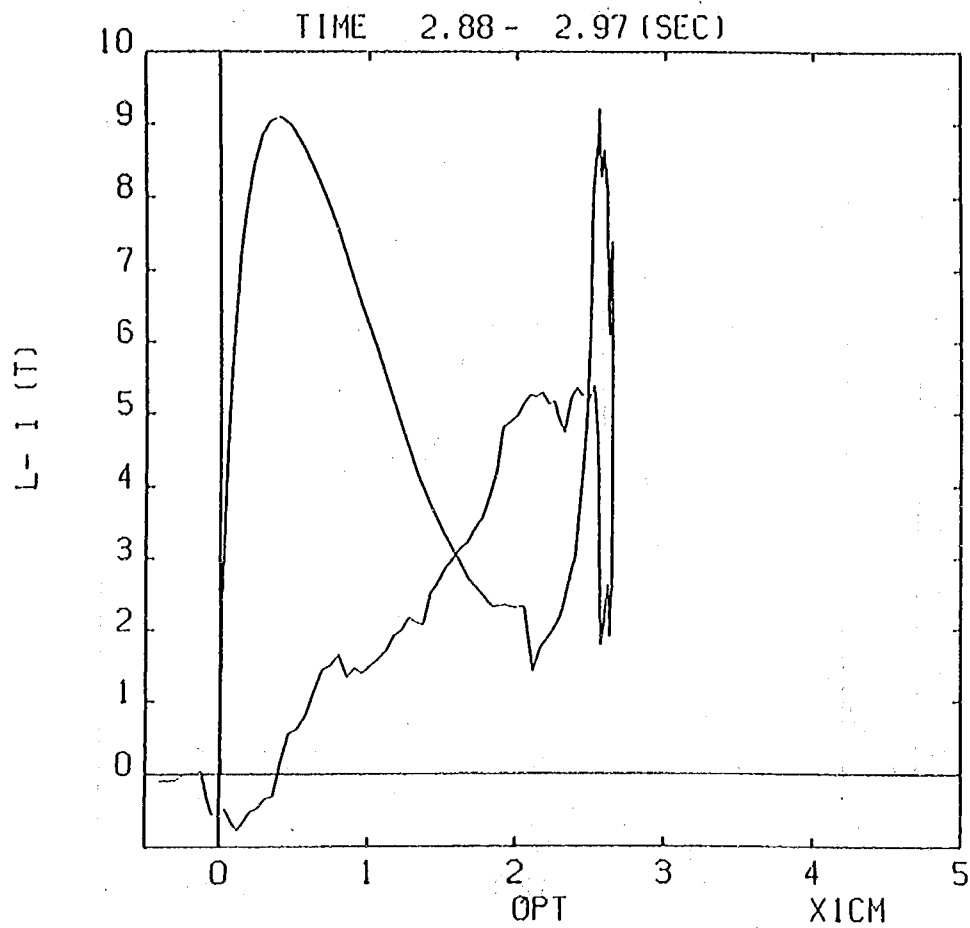
附図-1.9 荷重-変位関係および荷重, 変位の経時変化 (PC桁 No. 1, 落下高さH=50cm)



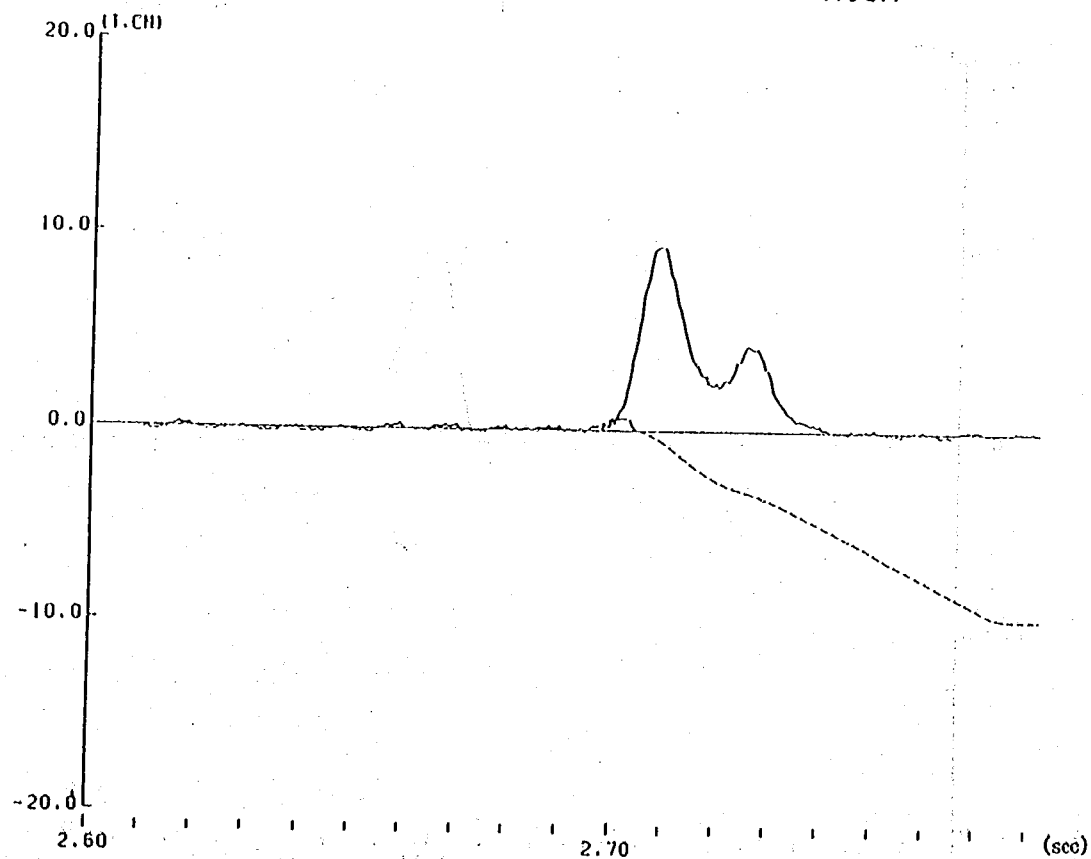
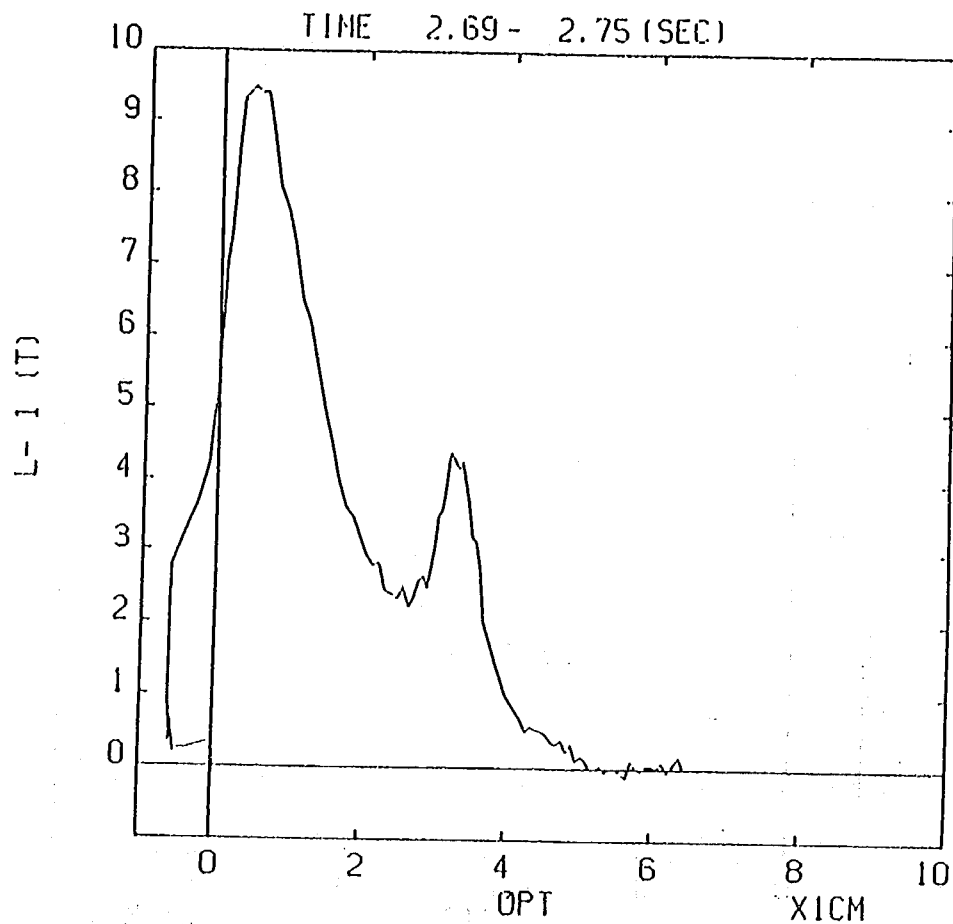
附図-1.10 荷重-変位関係および荷重, 変位の経時変化 (PC桁 No.2, 落下高さH=9cm)



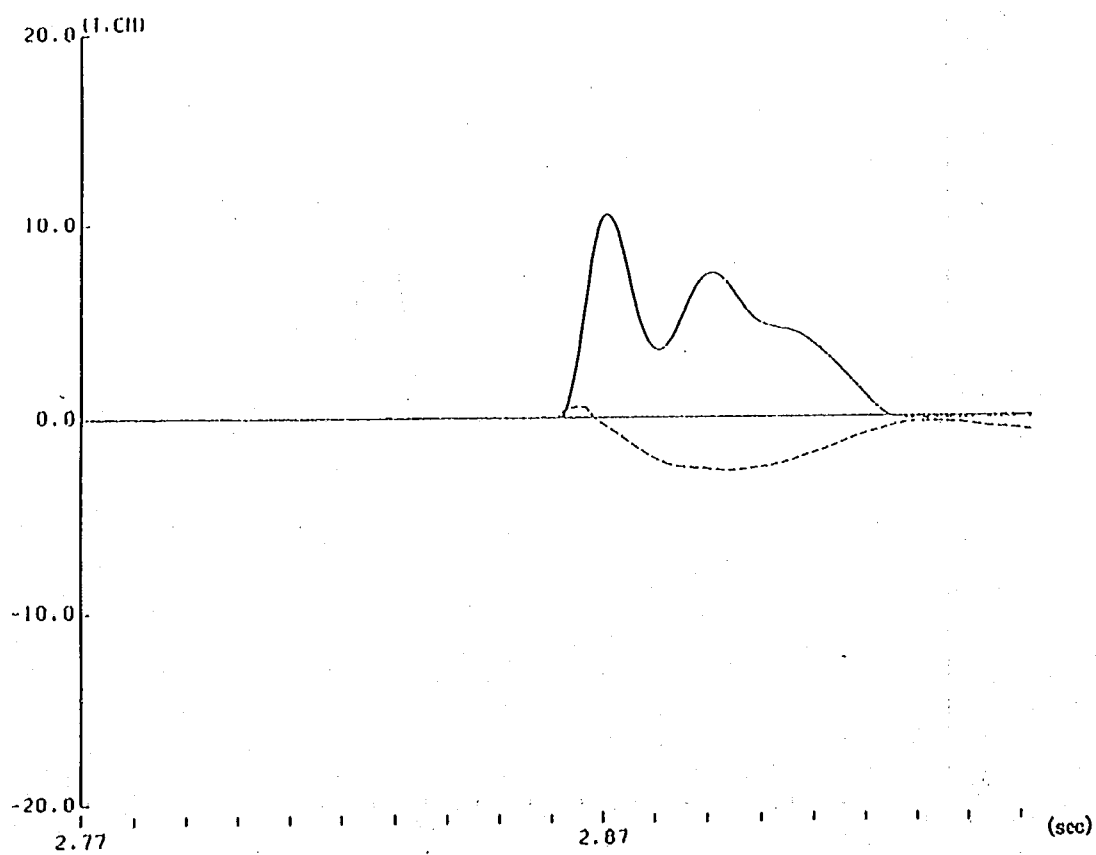
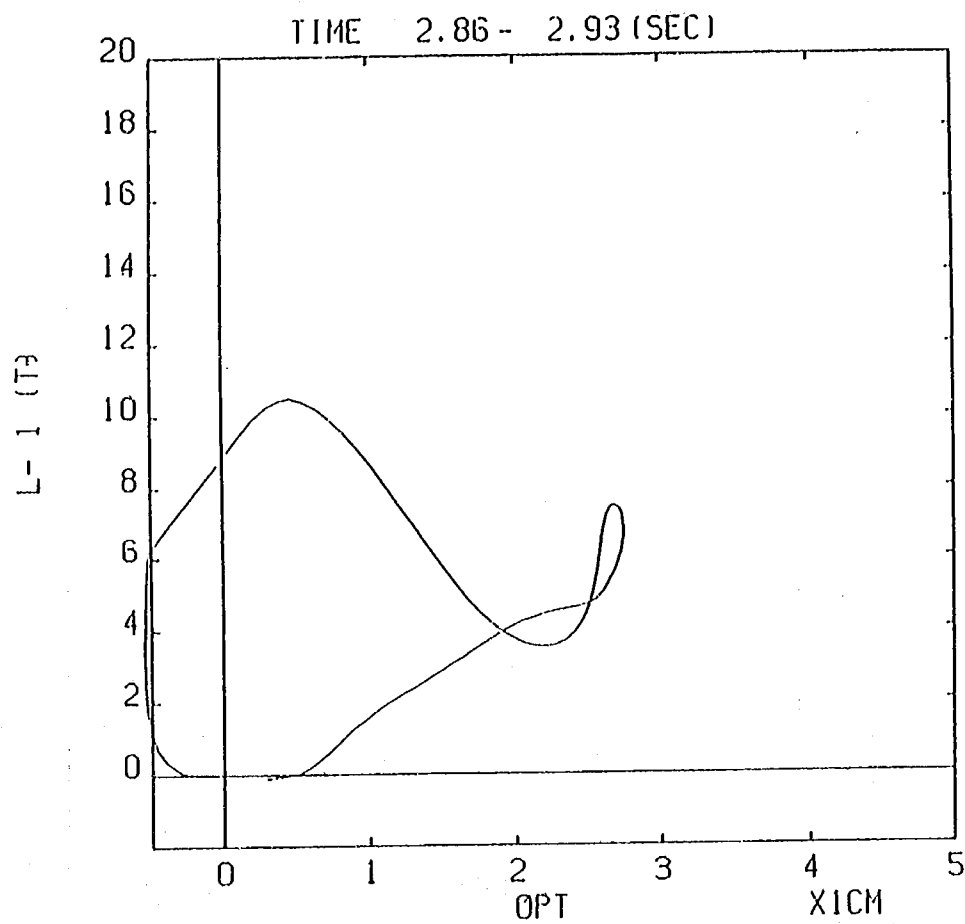
附図-1.11 荷重-変位関係および荷重, 変位の経時変化 (PC桁 No. 2, 落下高さH=23cm)



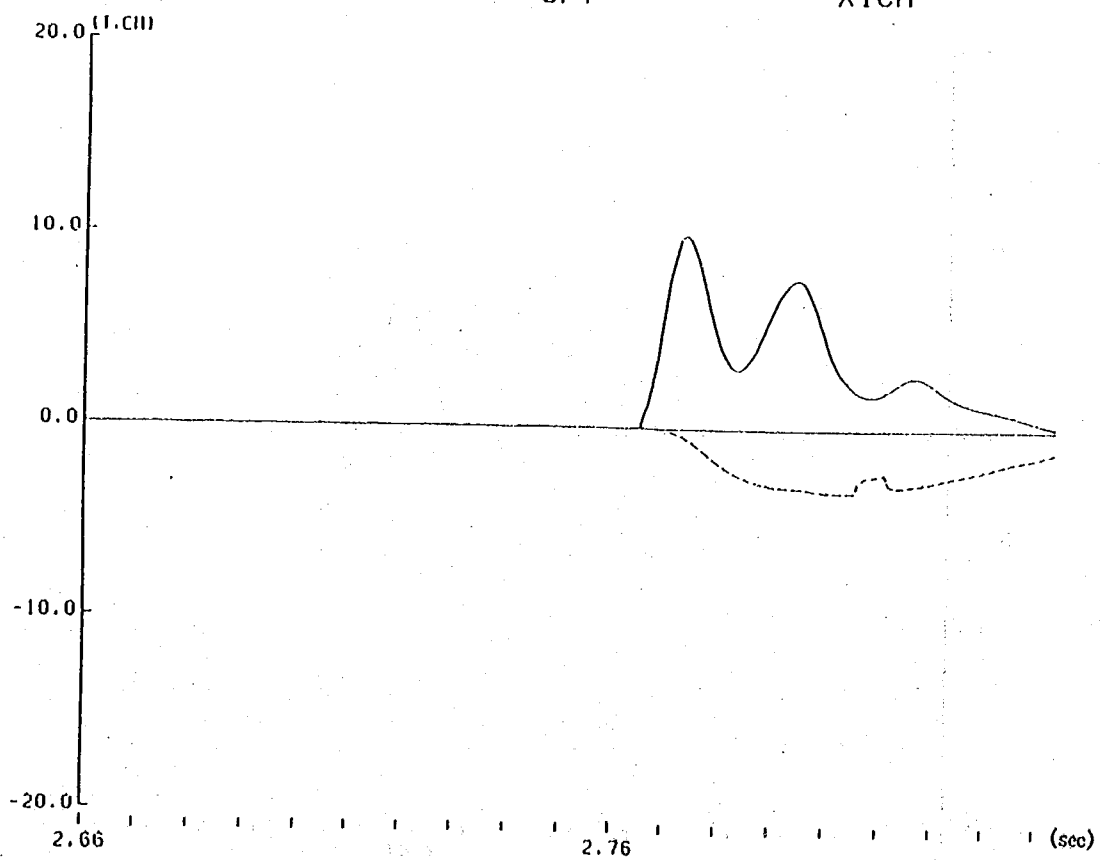
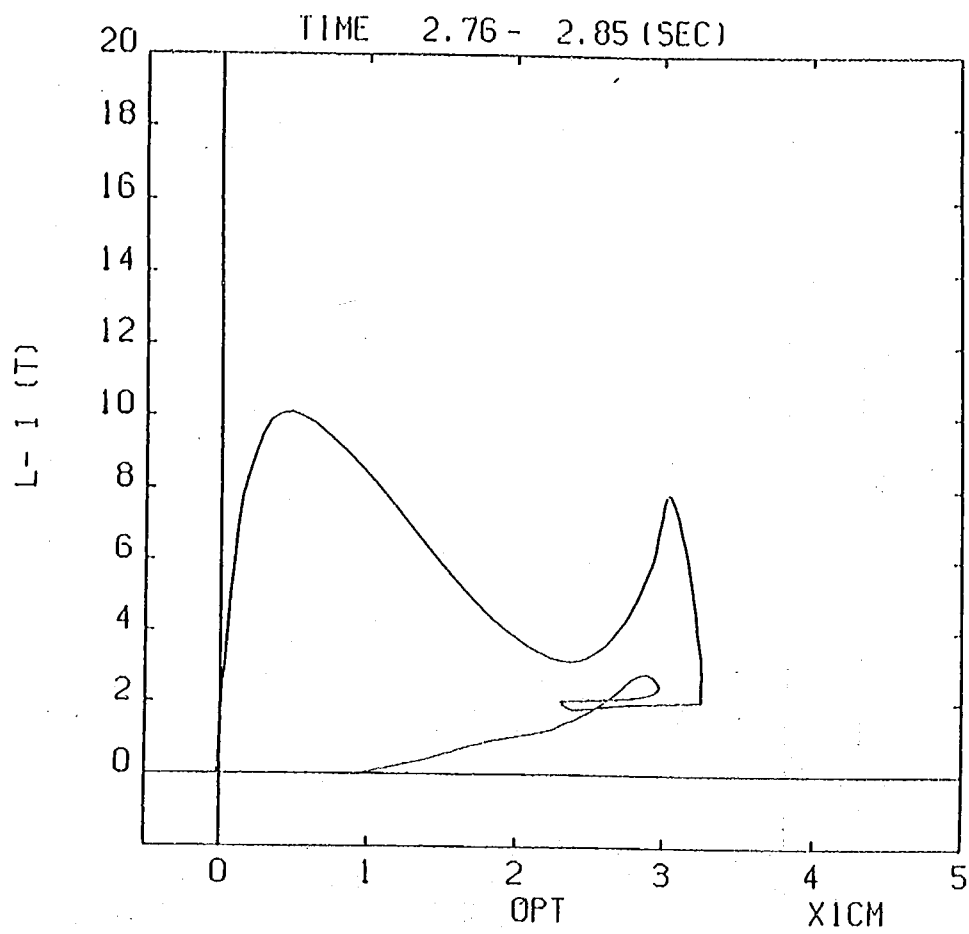
附図-1.12 荷重-変位関係および荷重, 変位の経時変化 (PC桁 No. 2, 落下高さ $H=35\text{cm}$)



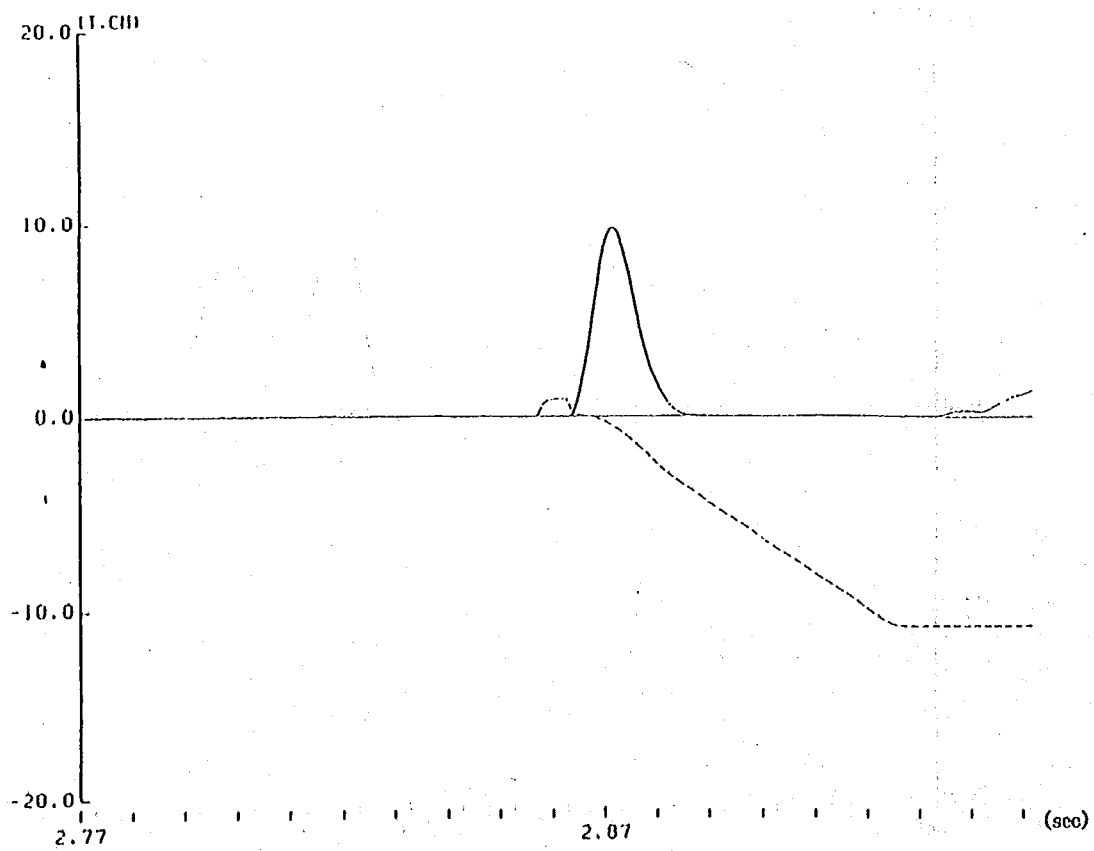
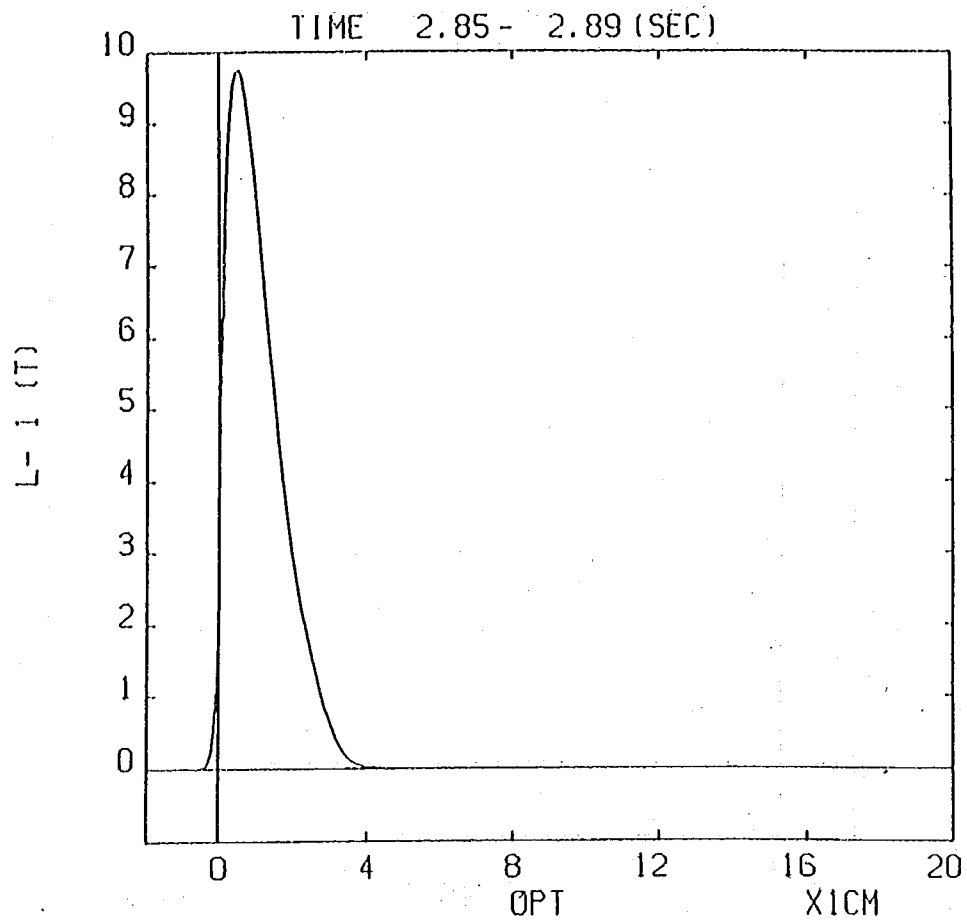
附図-1.13 荷重-変位関係および荷重, 変位の経時変化 (PC桁 No. 2, 落下高さH=45cm)



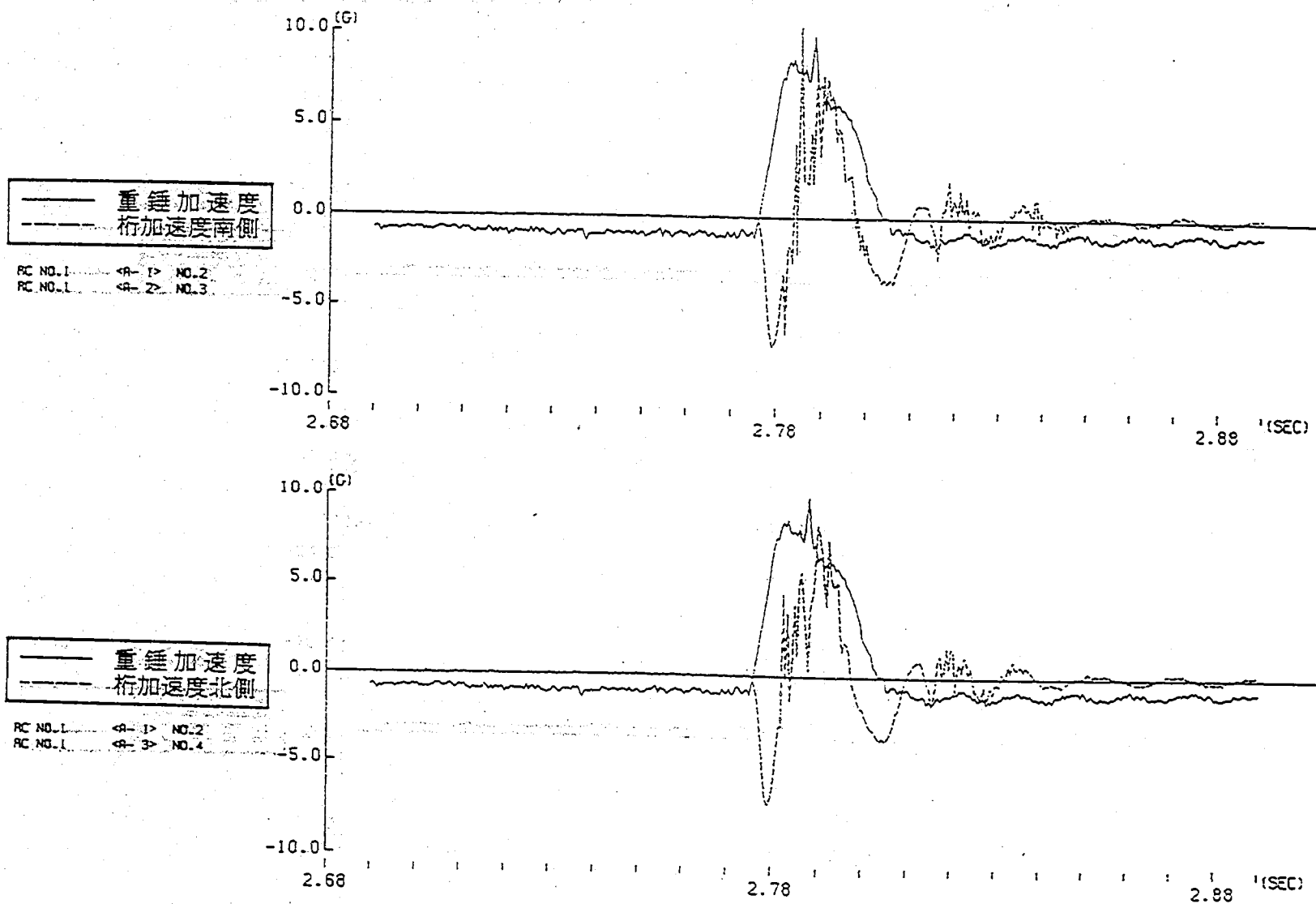
附図-1.14 荷重-変位関係および荷重, 変位の経時変化 (PC桁 No. 3, 落下高さ $H=45\text{cm}$)



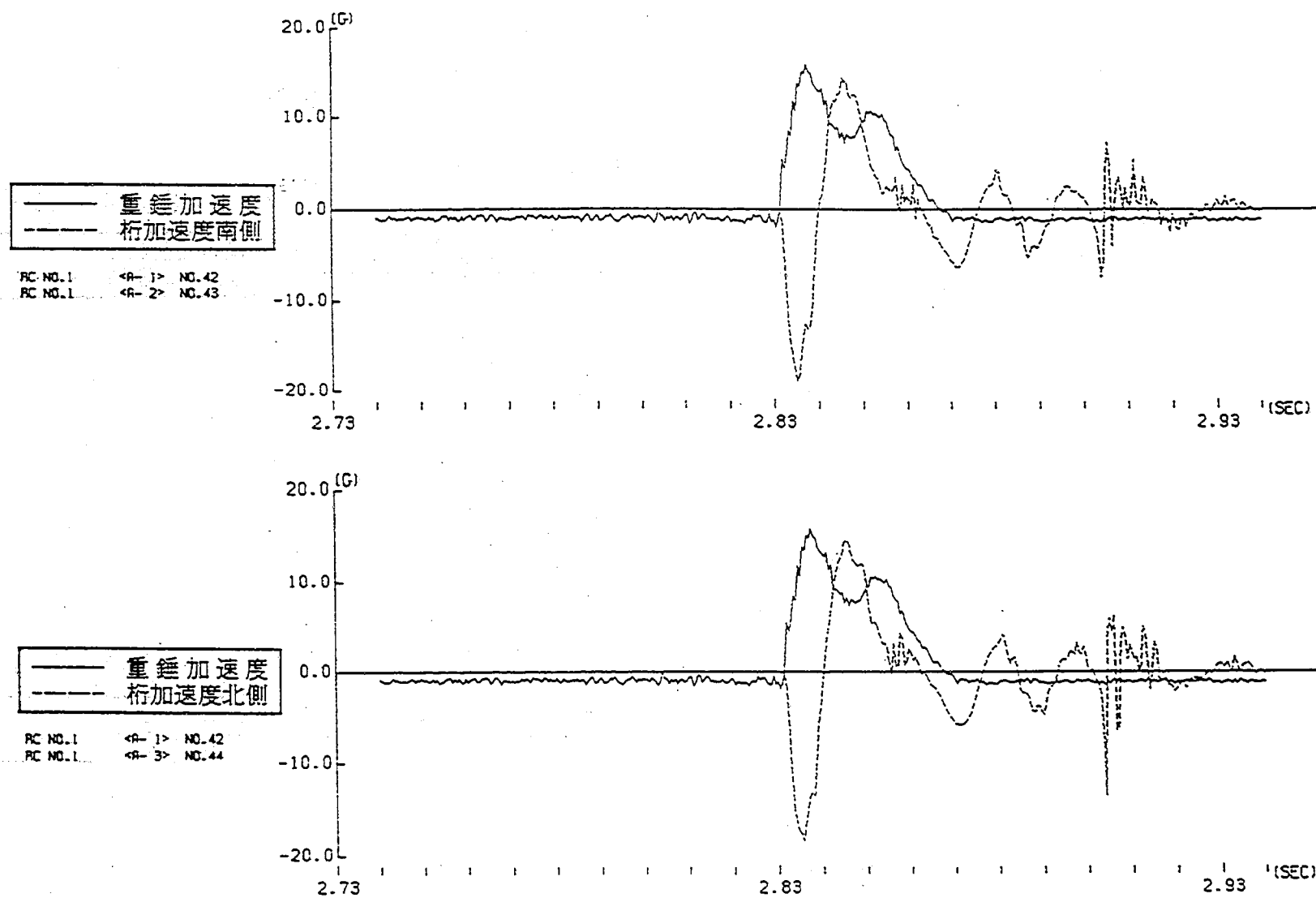
附図-1.15 荷重-変位関係および荷重, 変位の経時変化 (PC桁 No. 3, 落下高さ $H=47\text{cm}$)



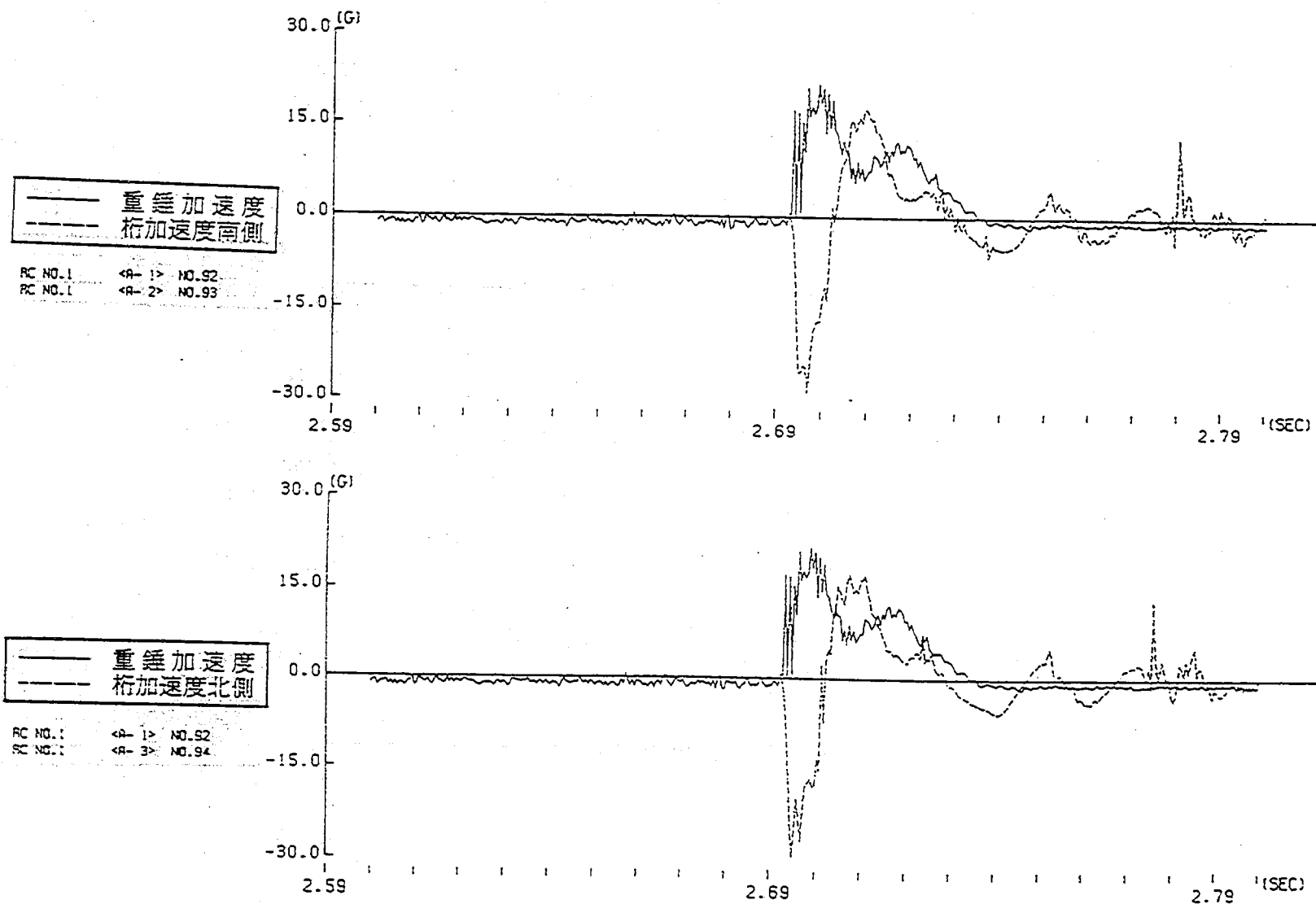
附図-1.16 荷重-変位関係および荷重, 変位の経時変化 (PC 桁 No. 3, 落下高さ $H=49\text{cm}$)



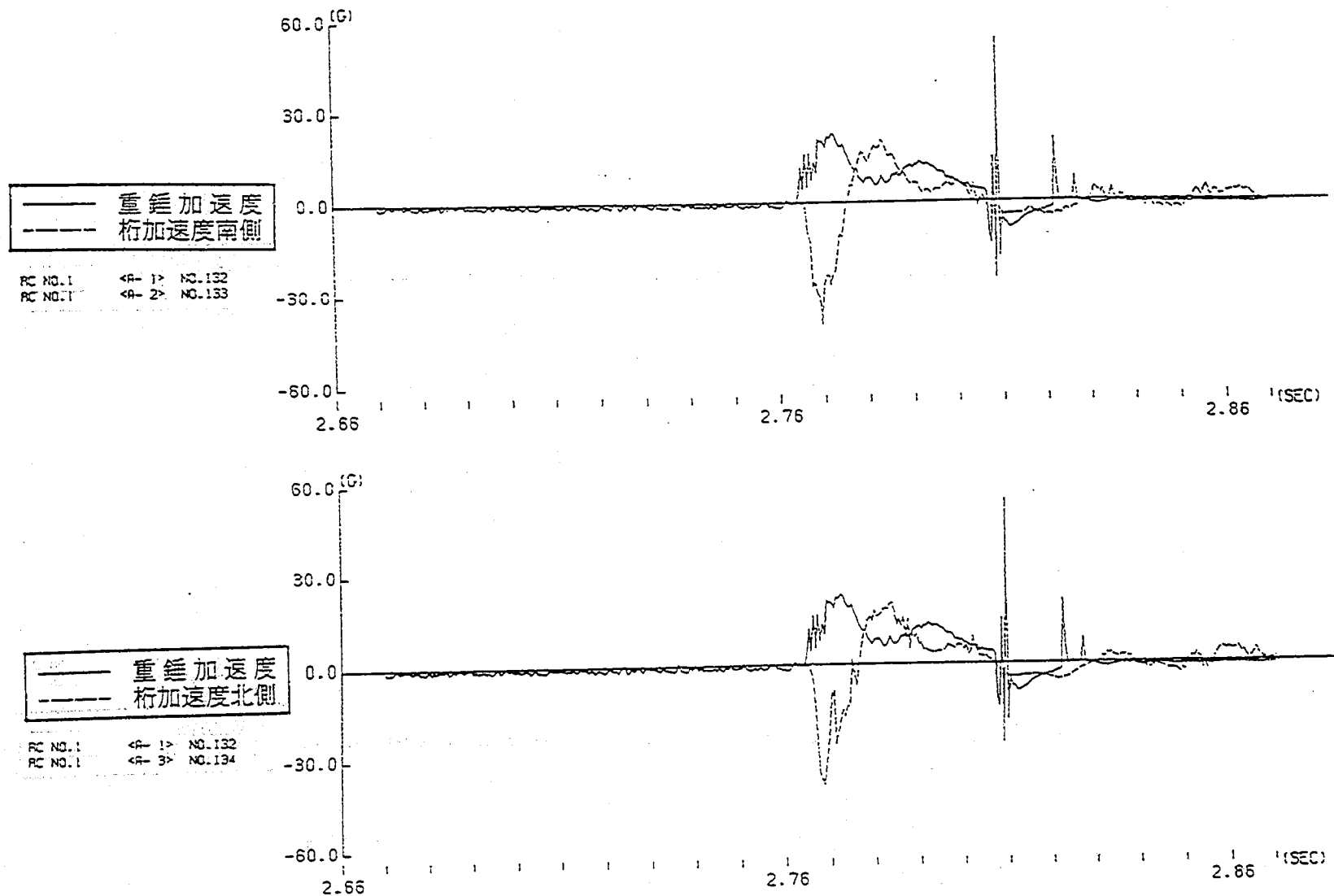
附図-1.17 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (RC桁 No. 1, 重錘: 0.5t, 落下高さH= 5cm)



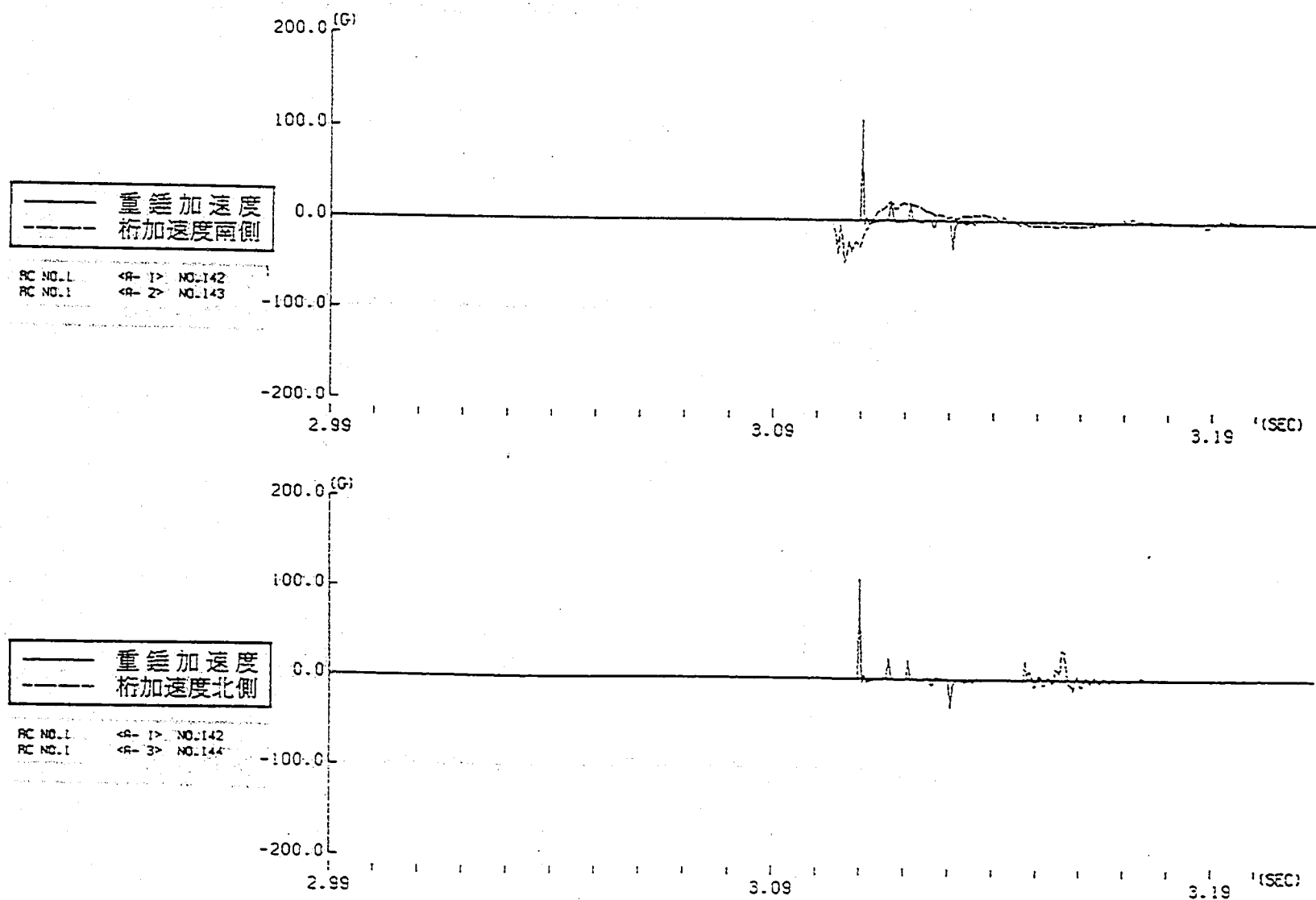
附図-1.18 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (RC桁 No.1, 重錘:0.5t, 落下高さH=21cm)



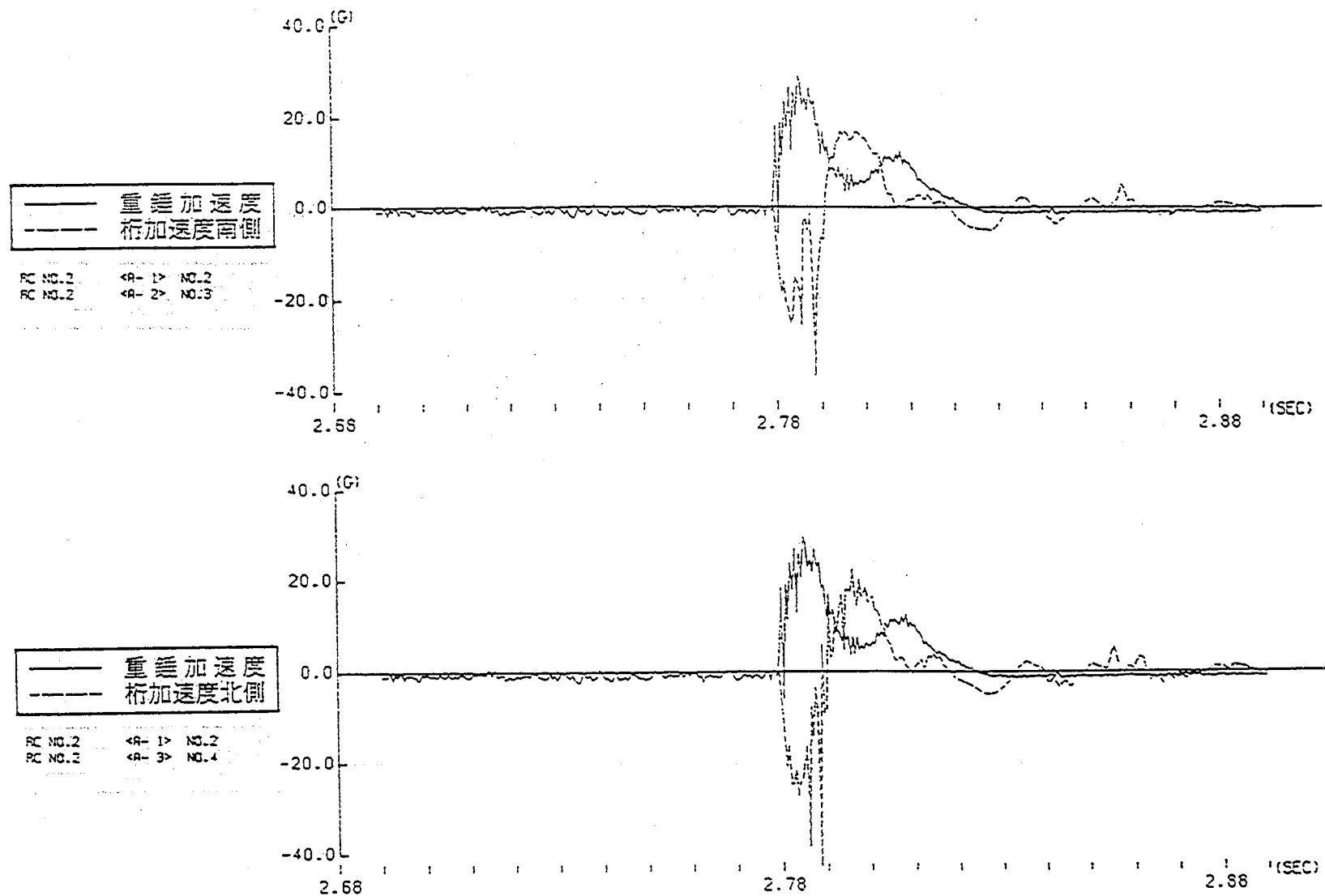
附図-1.19 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (RC桁 No. 1, 重錘: 0.5t, 落下高さH=41cm)



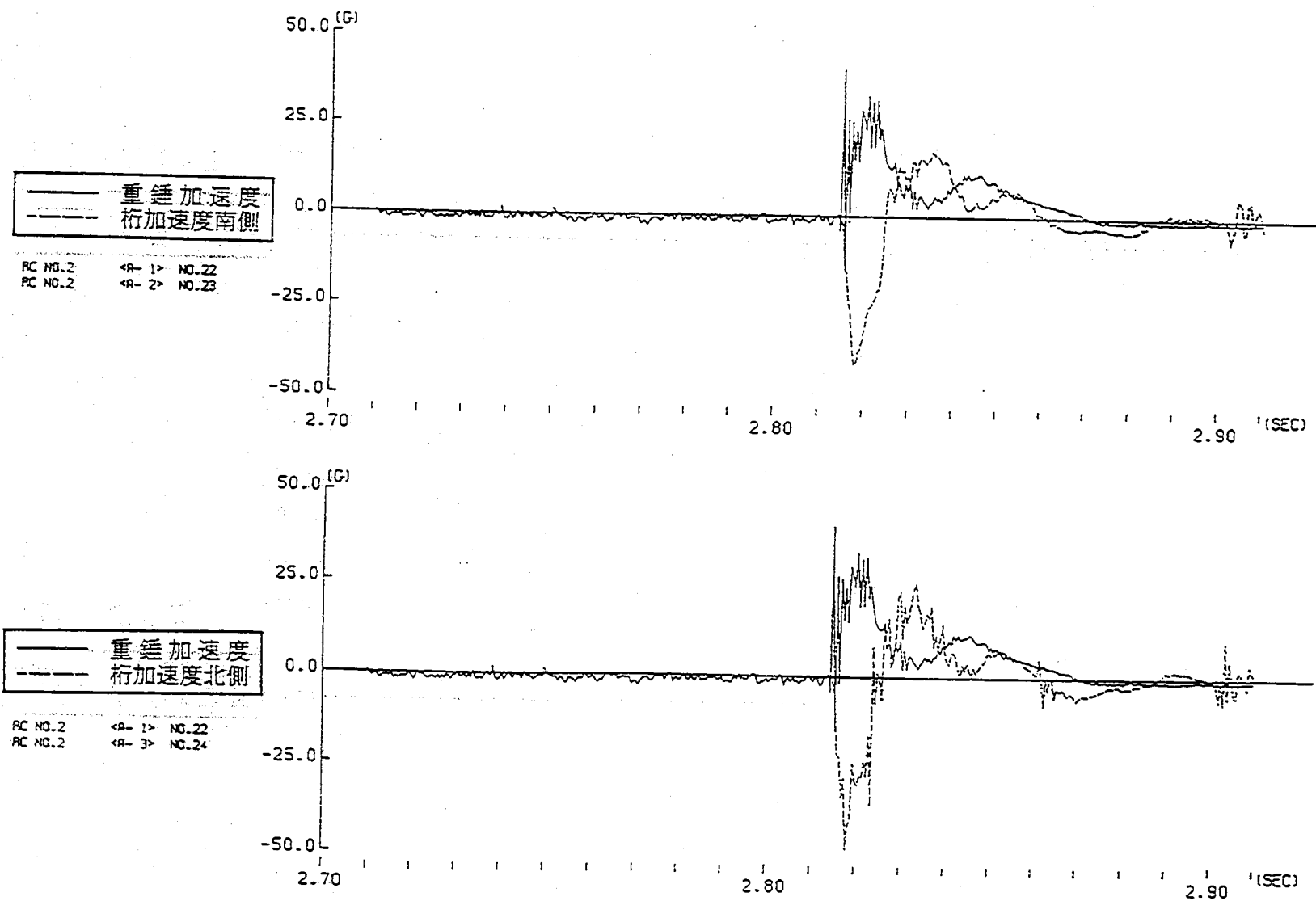
附図-1.20 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (RC桁 No. 1, 重錘: 0.5t, 落下高さH=57cm)



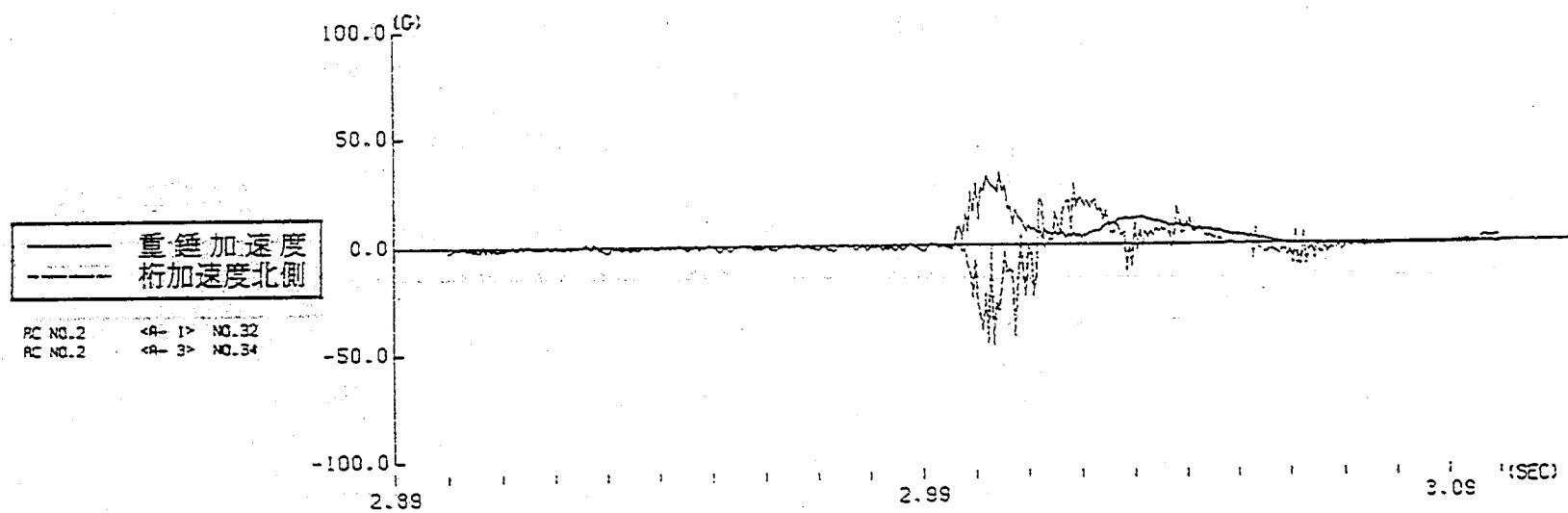
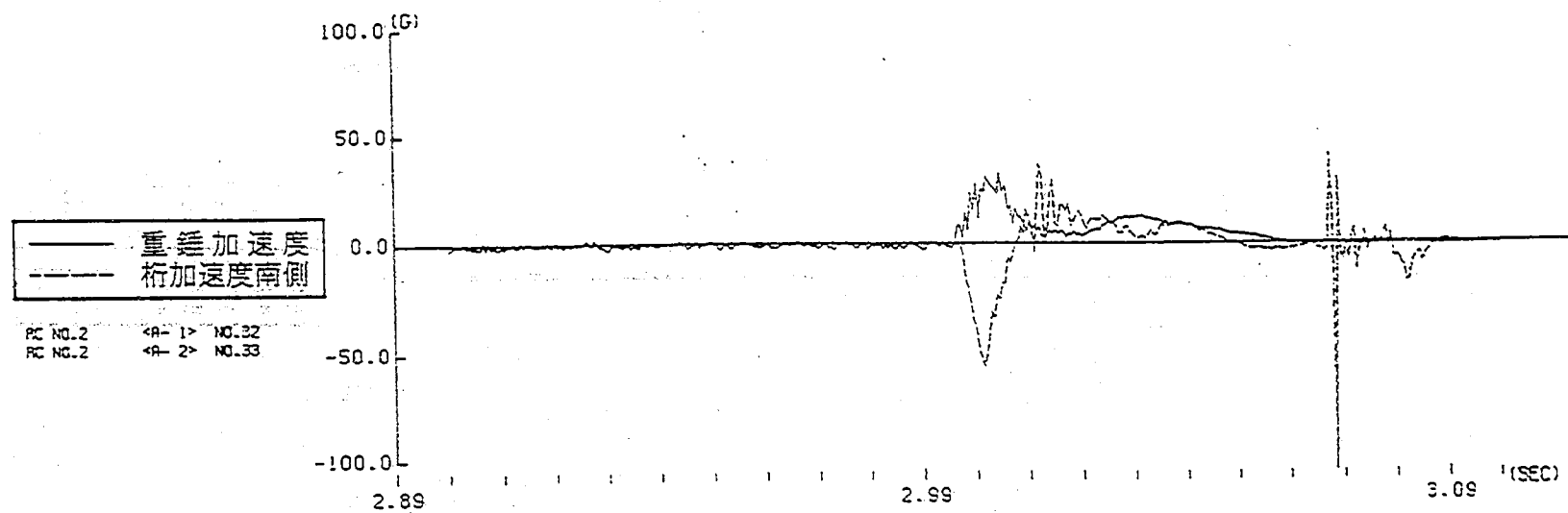
附図-1.21 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (RC桁 No. 1, 重錘: 0.5t, 落下高さH=61cm)



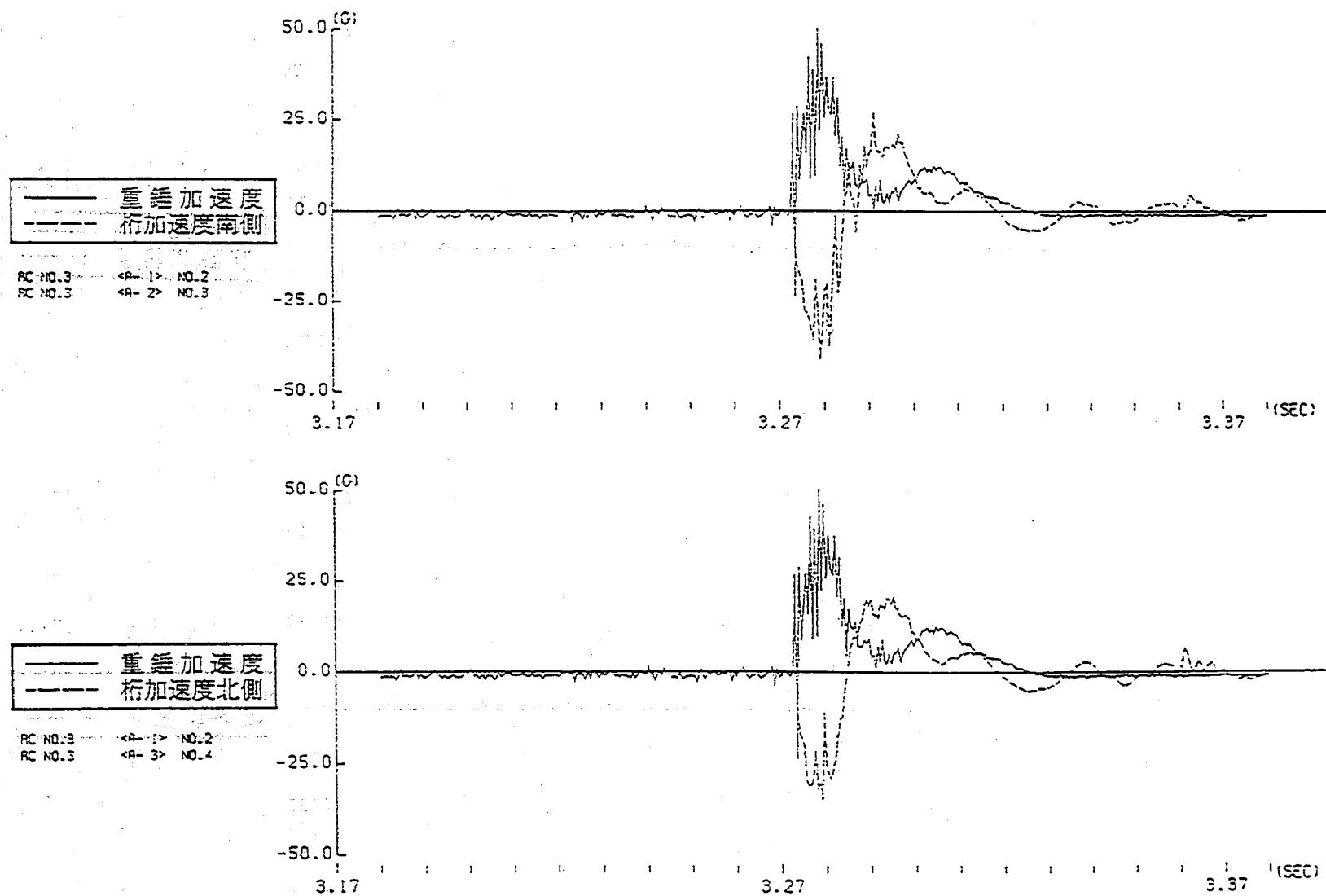
附図-1.22 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (RC桁 No. 2, 重錘: 0.5t, 落下高さH=61cm)



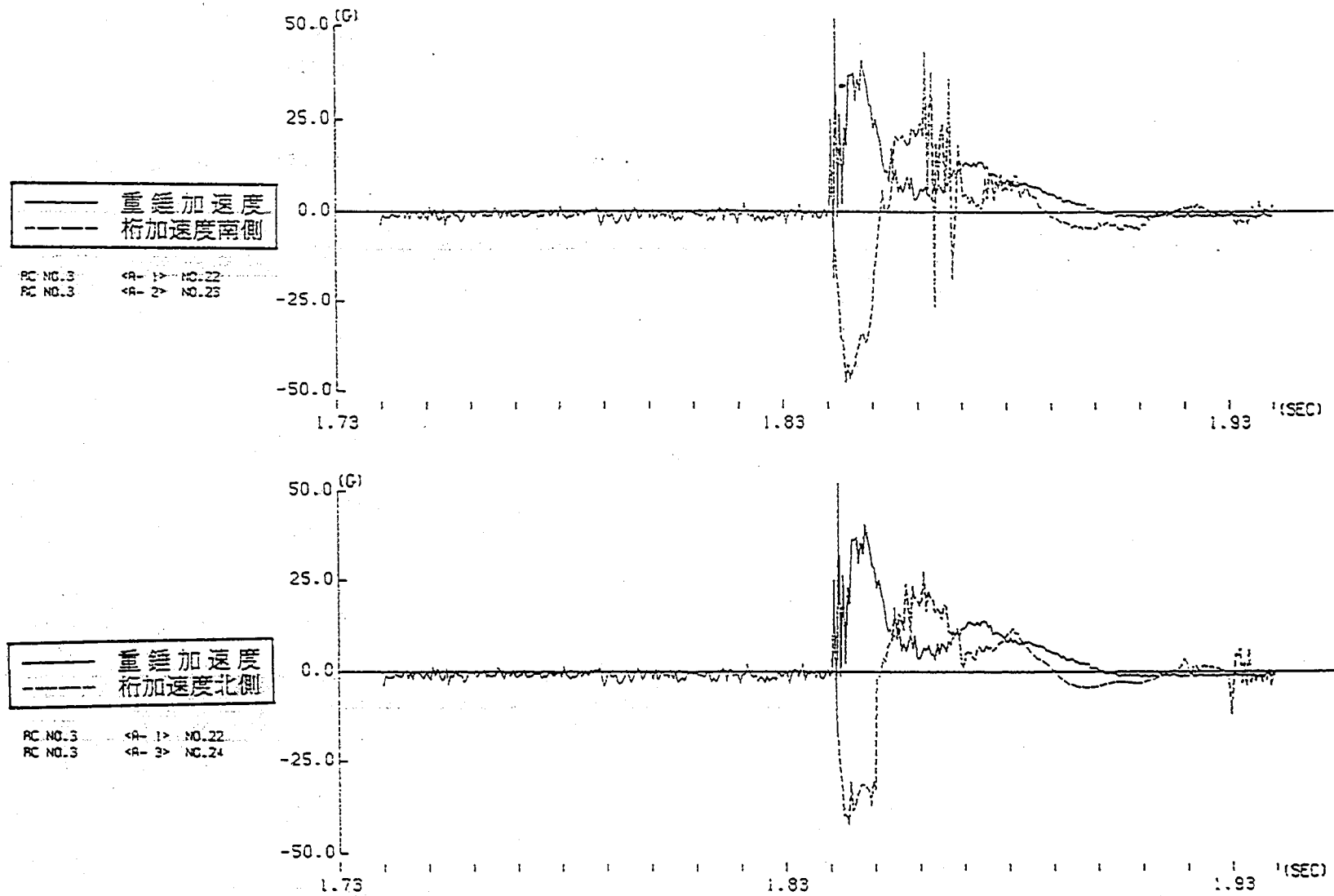
附図-1.23 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (RC桁 No. 2, 重錘: 0.5t, 落下高さ $H=90\text{cm}$)



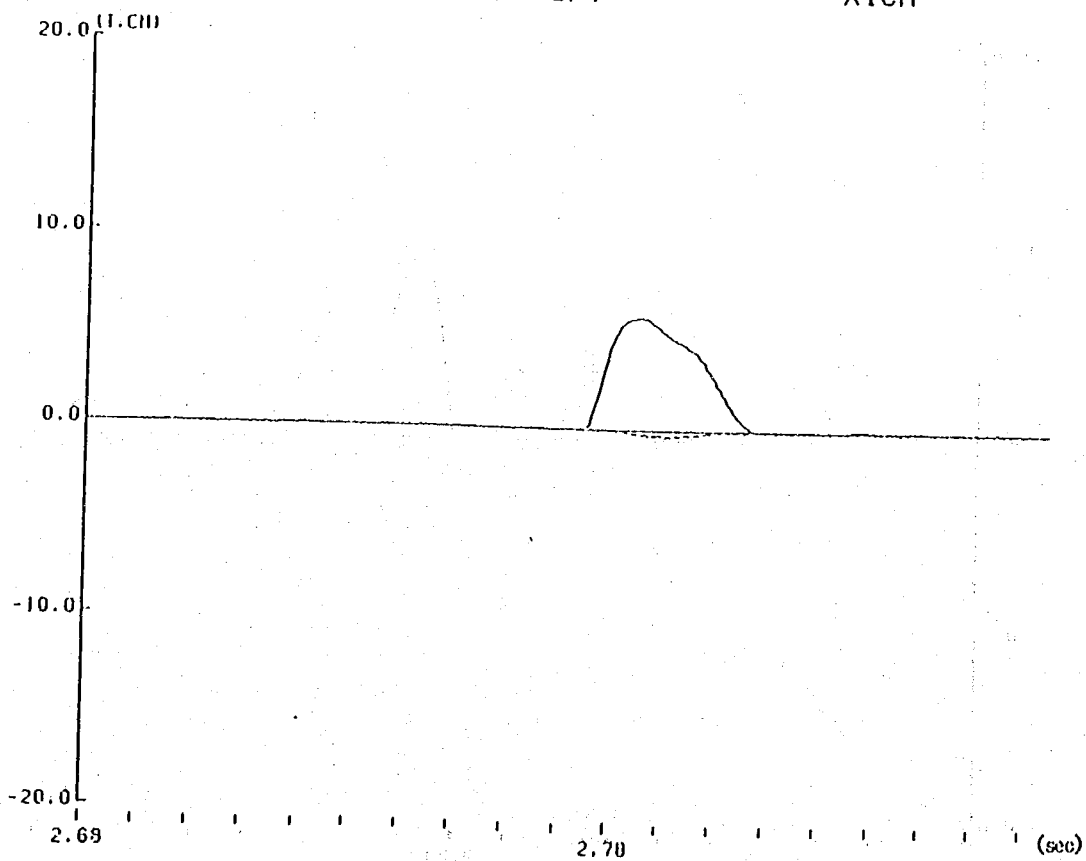
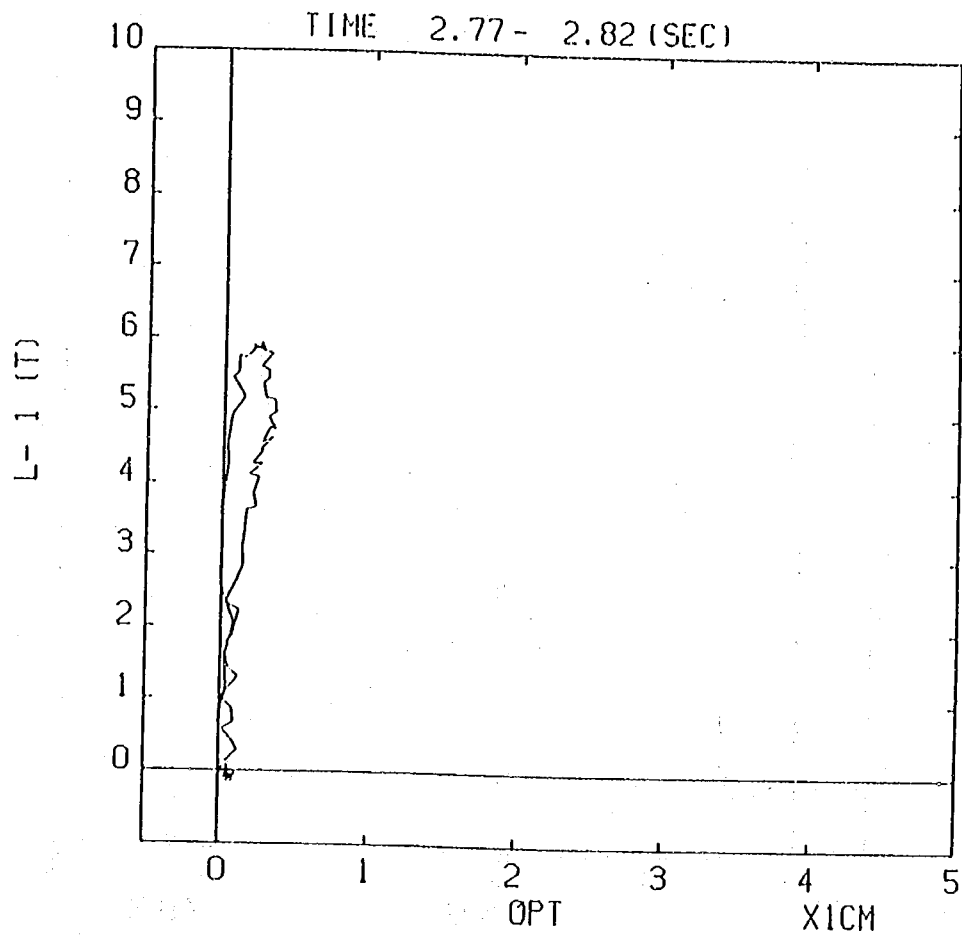
附図-1.24 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (RC桁 No.2, 重錘:0.5t, 落下高さH=110cm)



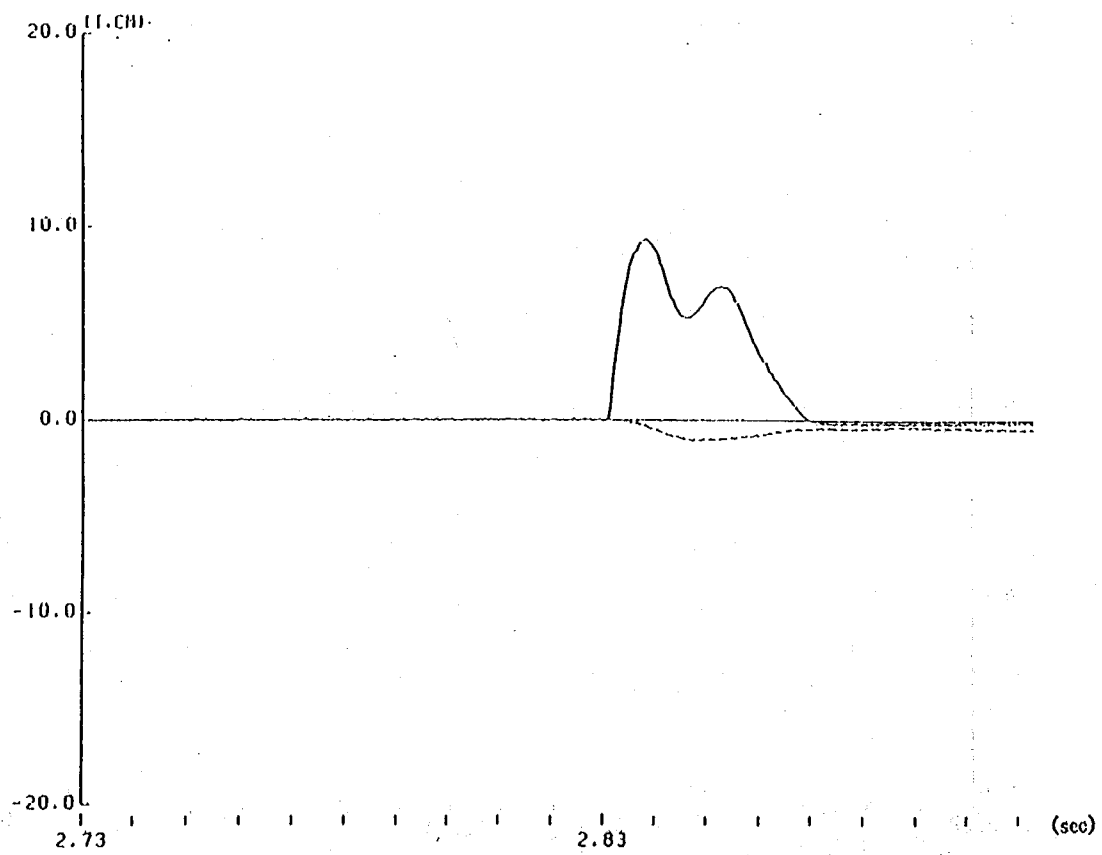
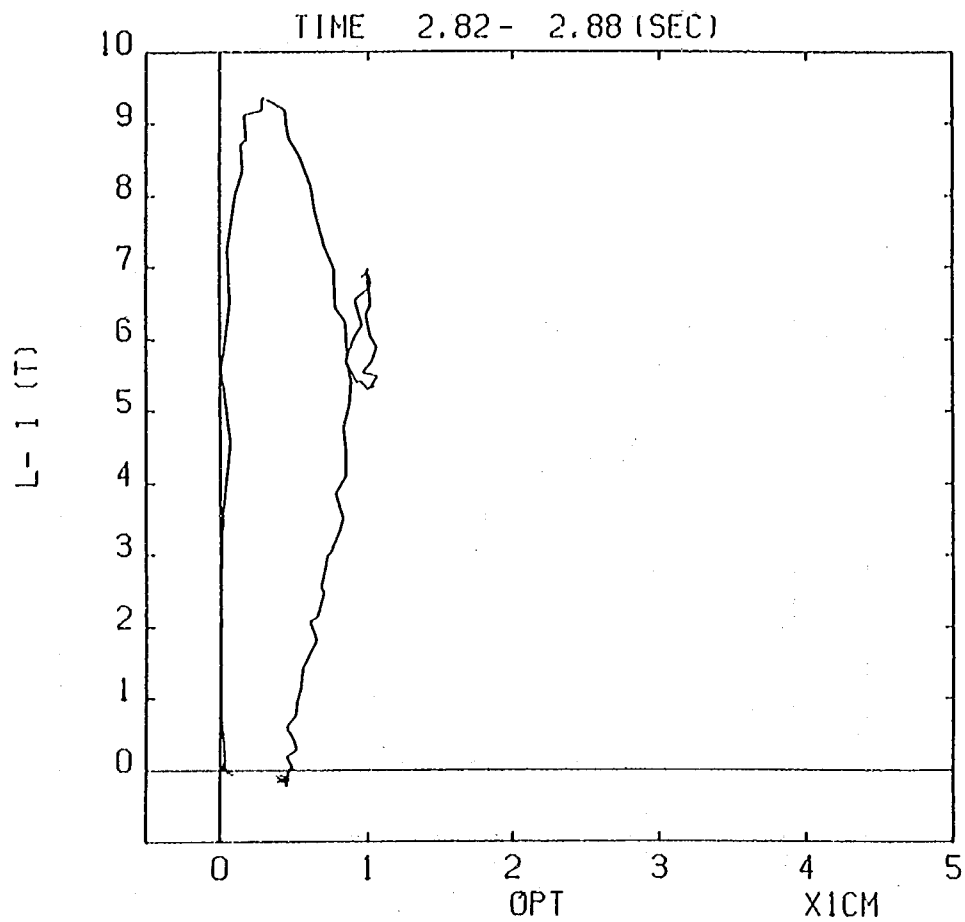
附図-1.25 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (RC桁 No. 3, 重錘: 0.5t, 落下高さH=110cm)



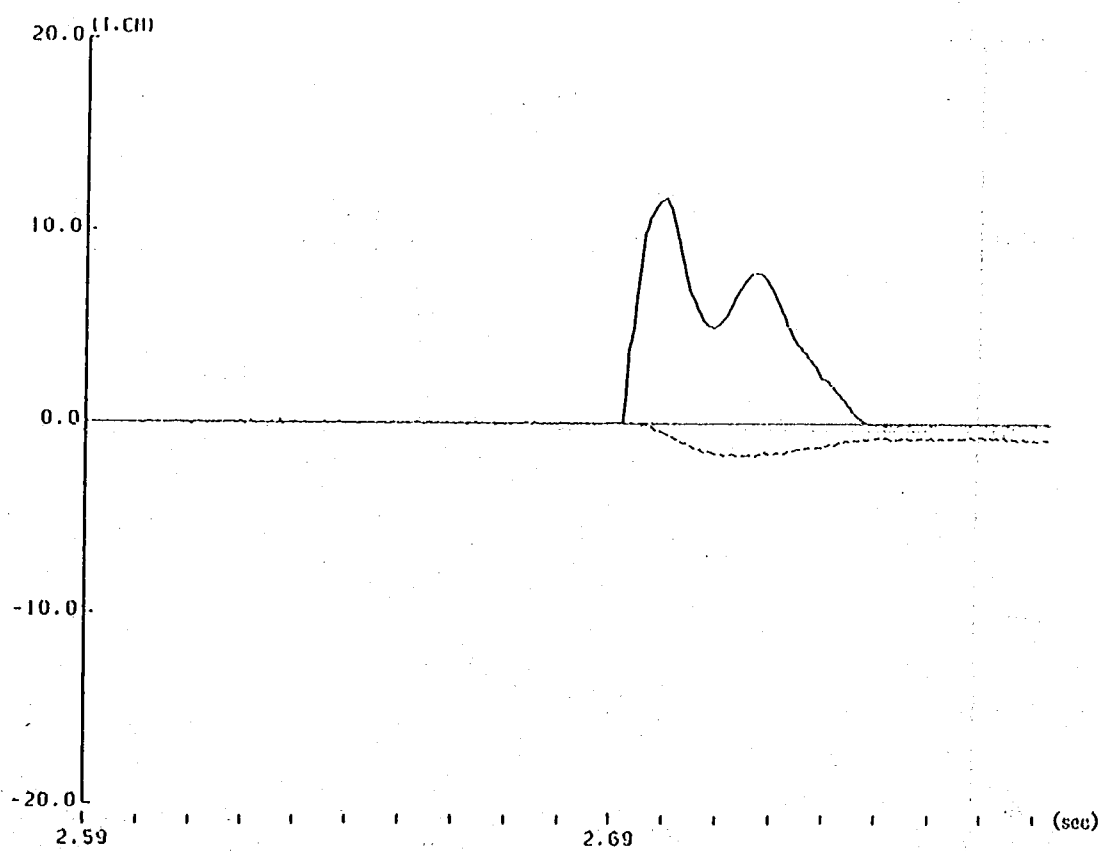
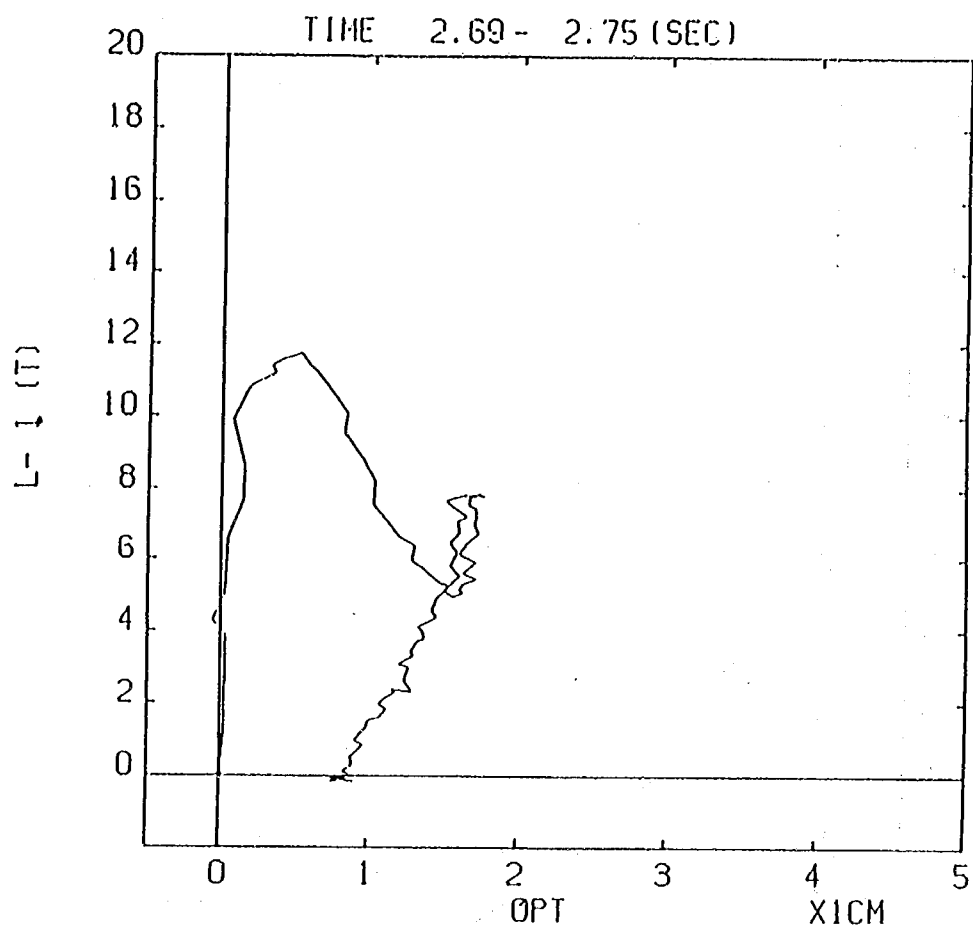
附図-1.26 重錘加速度と桁加速度の時刻歴 (RC桁 No. 3, 重錘: 0.5t, 落下高さ H=150cm)



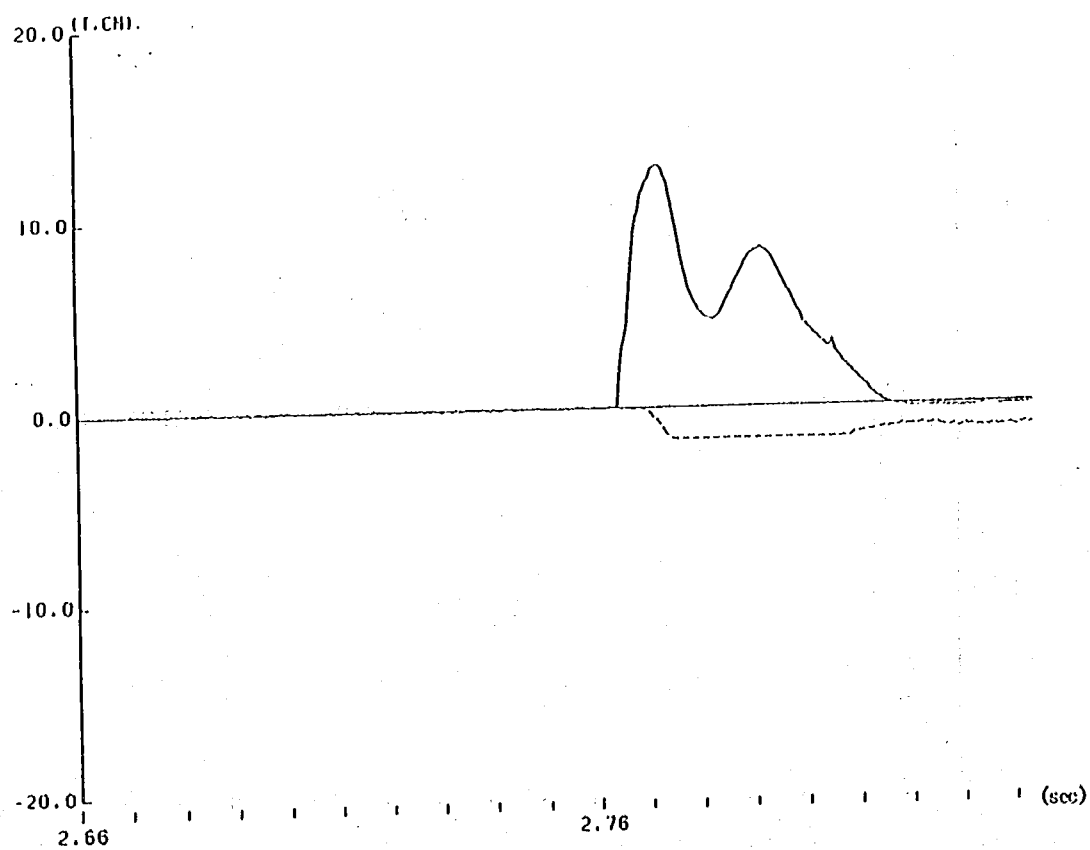
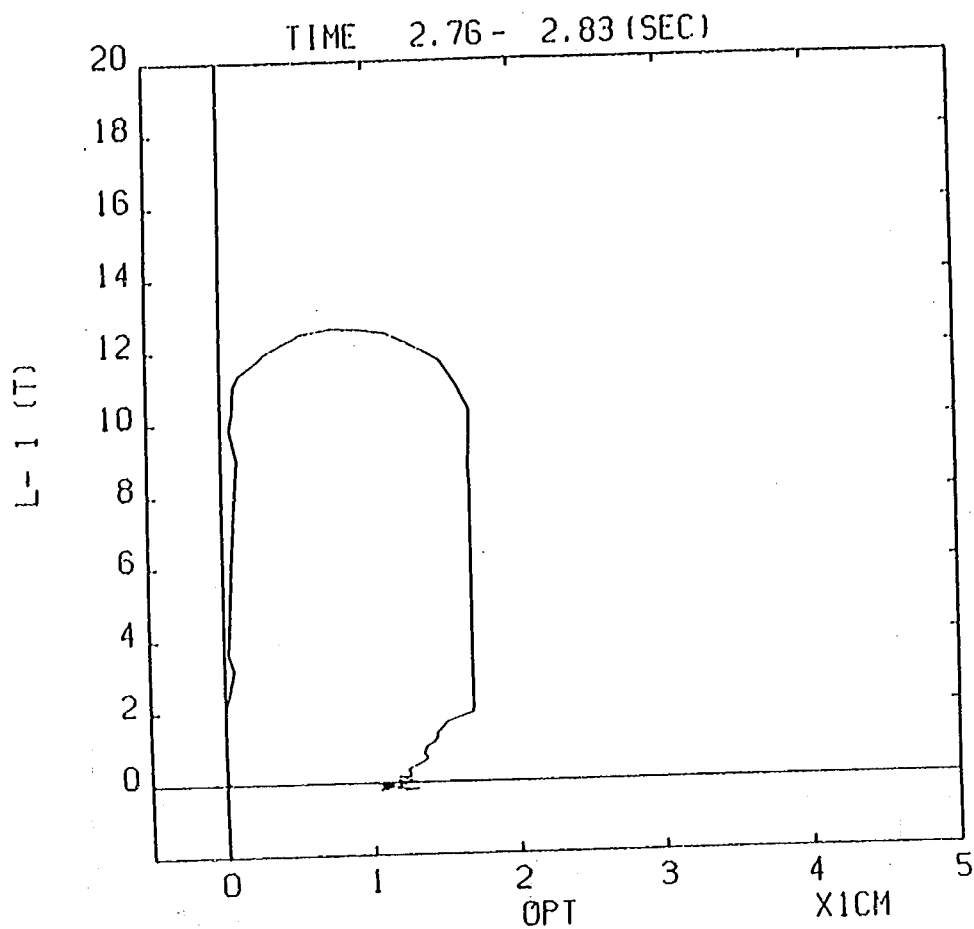
附図-1.27 荷重-変位関係および荷重, 変位の経時変化 (RC桁 No. 1, 落下高さ $H = 5\text{cm}$)



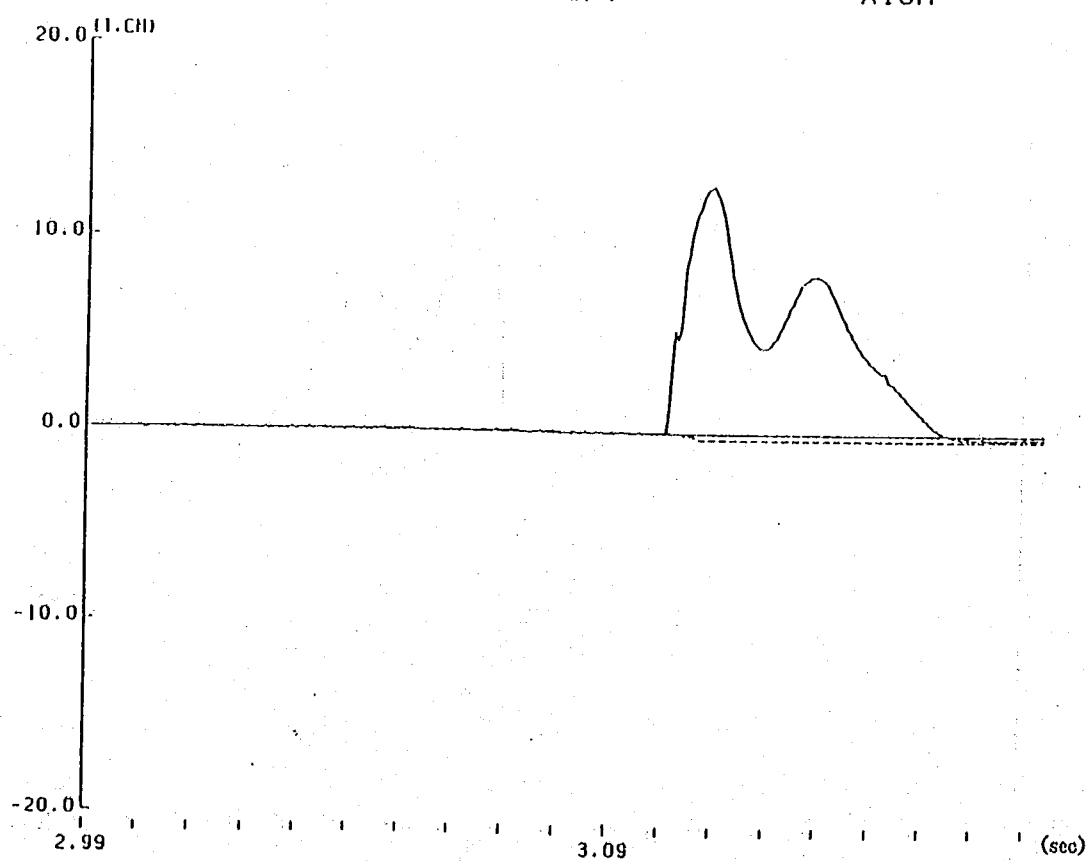
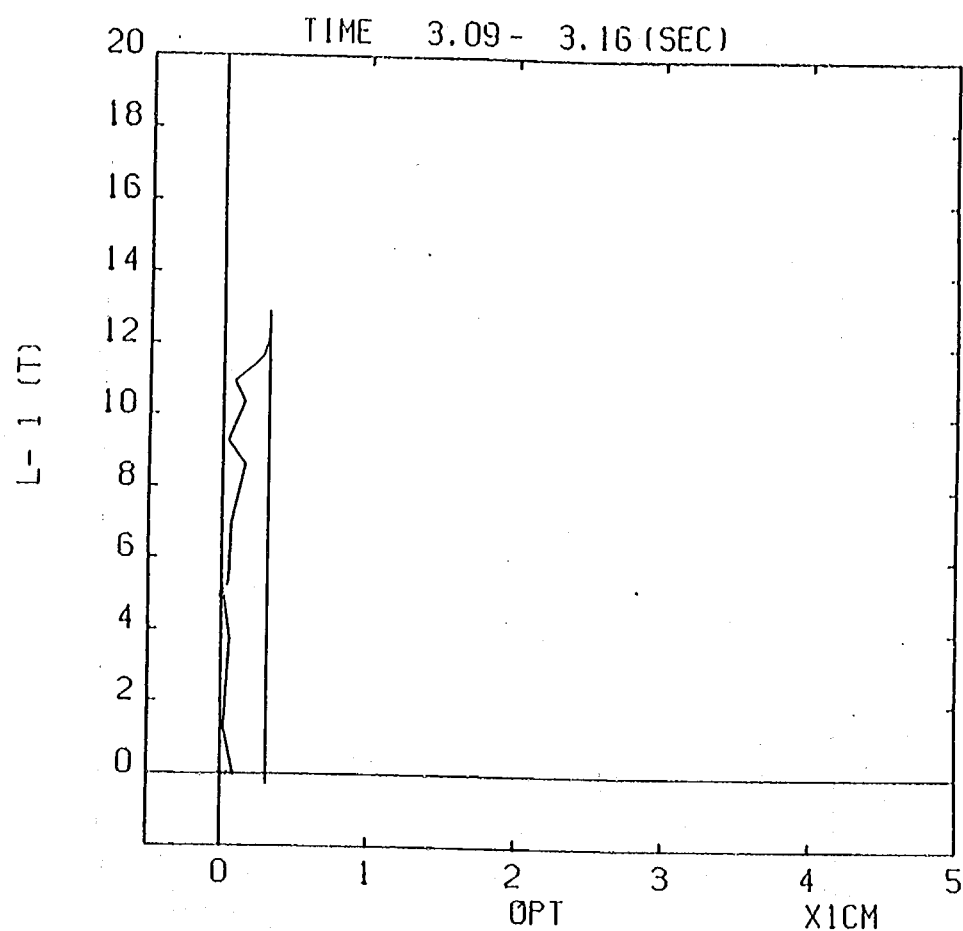
附図-1.28 荷重-変位関係および荷重、変位の経時変化 (RC桁 No. 1, 落下高さ $H=21\text{cm}$)



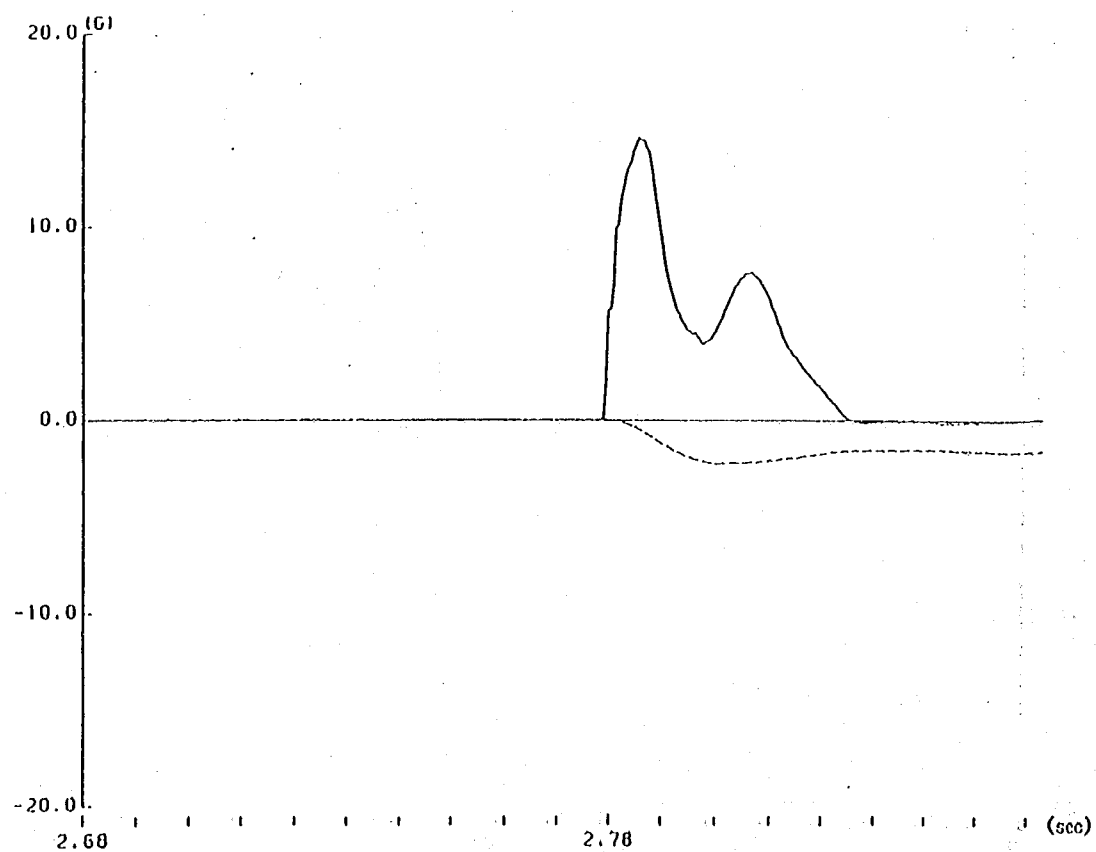
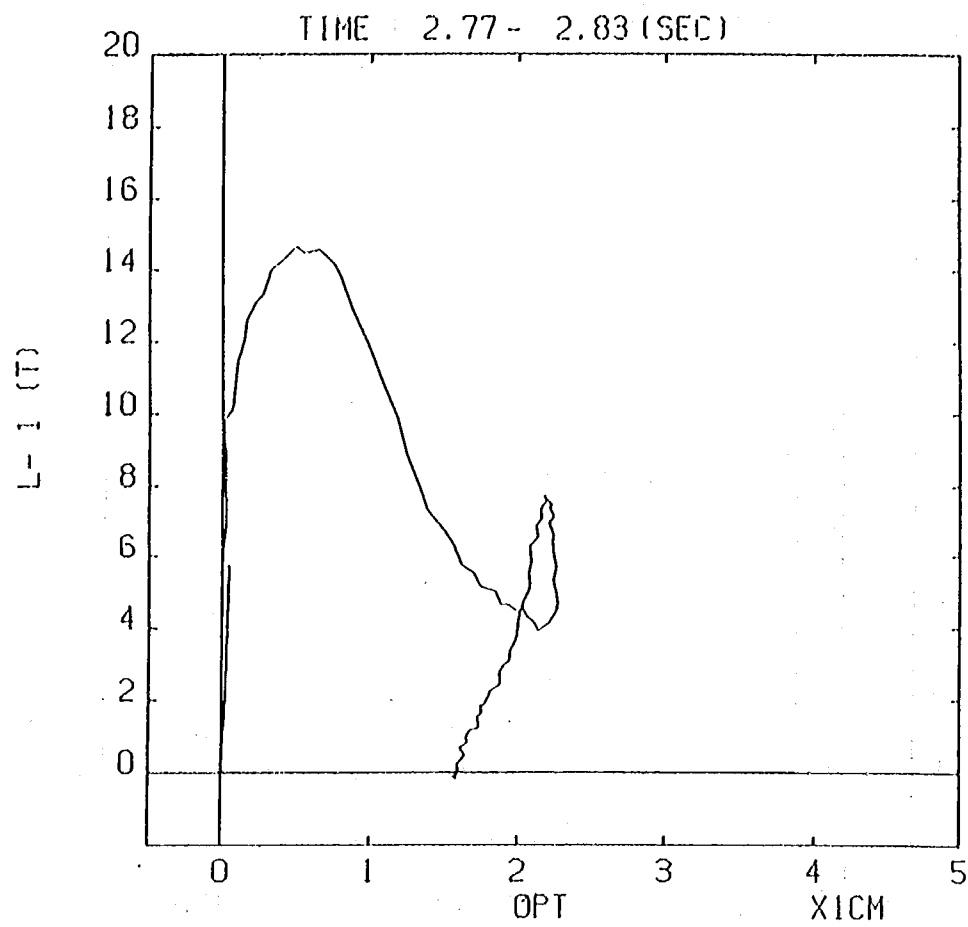
附圖-1.29 荷重-変位関係および荷重, 変位の経時変化 (RC 桁 No. 1, 落下高さ $H=41\text{cm}$)



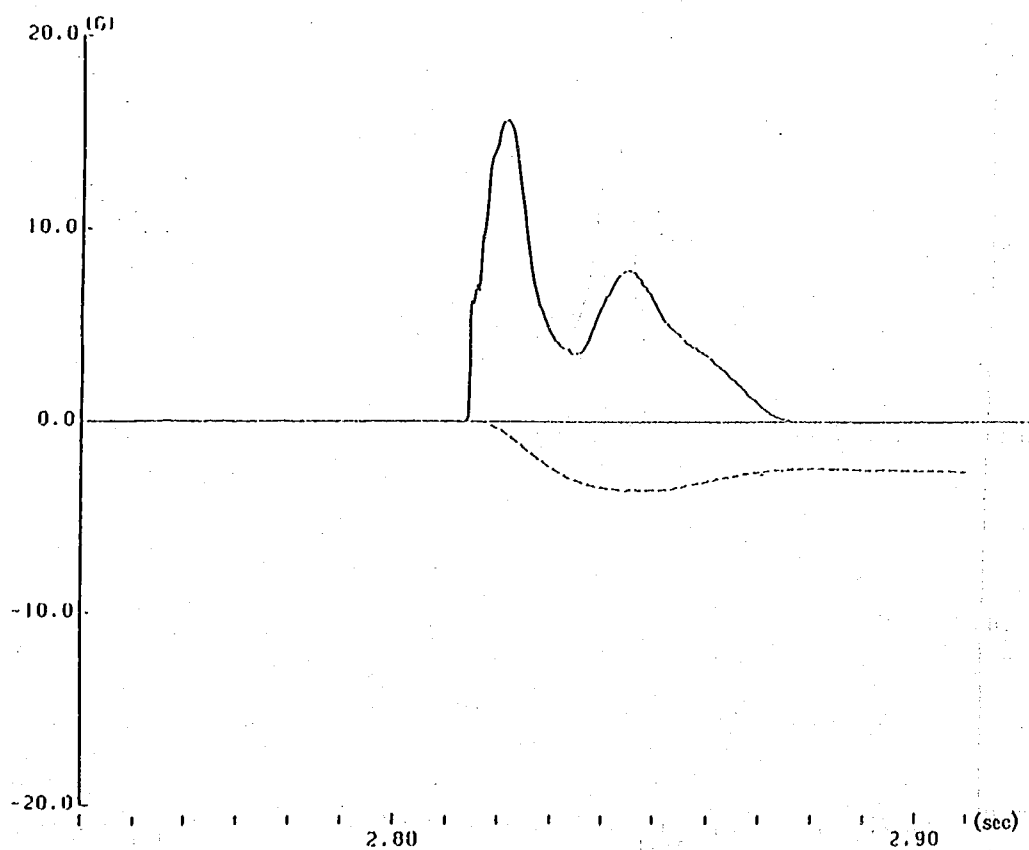
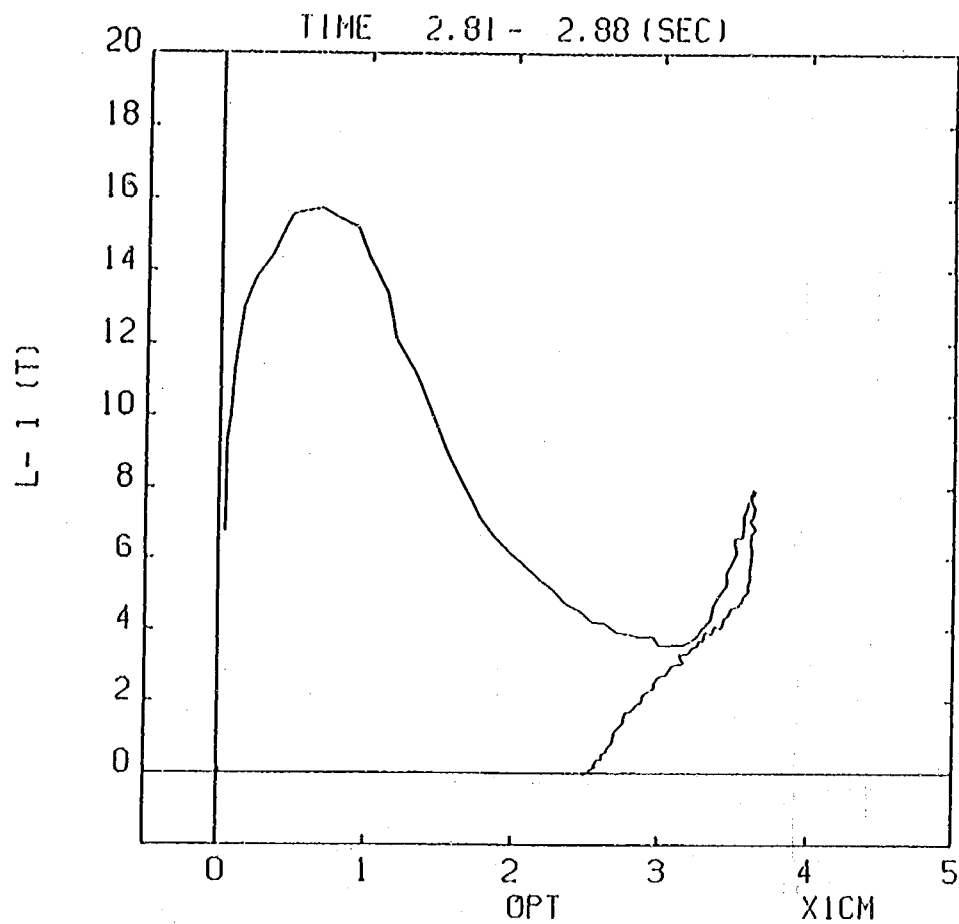
附図-1.30 荷重-変位関係および荷重, 変位の経時変化 (RC桁 No. 1, 落下高さH=57cm)



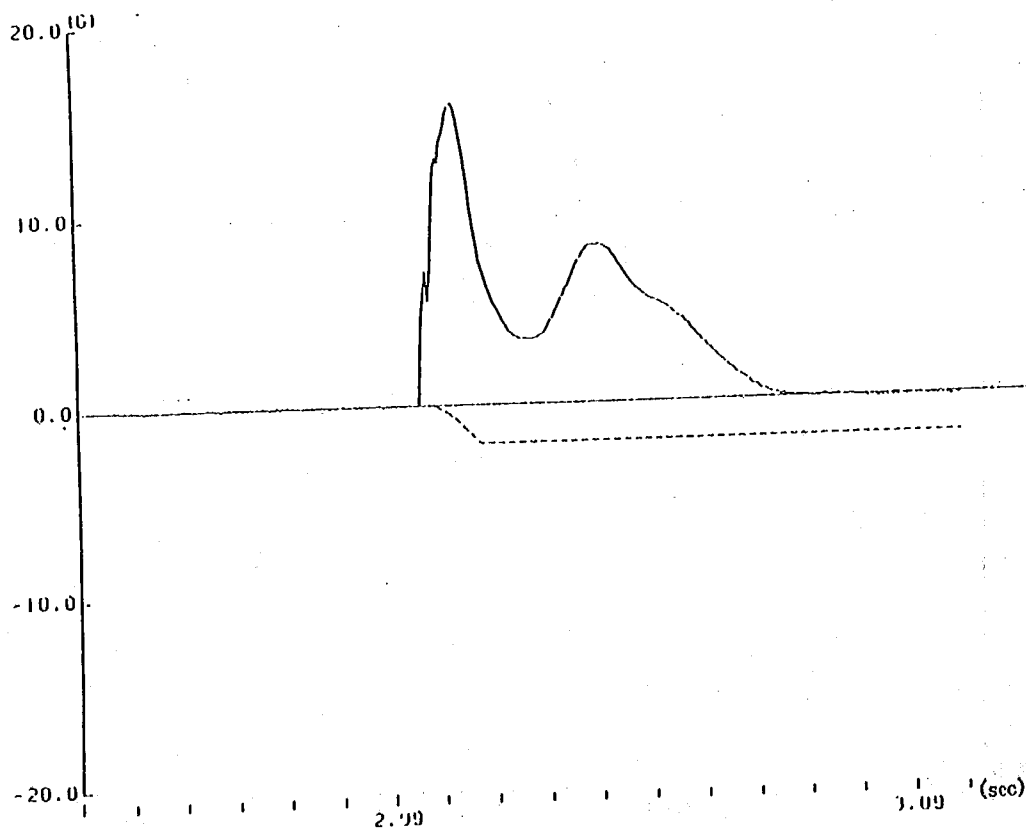
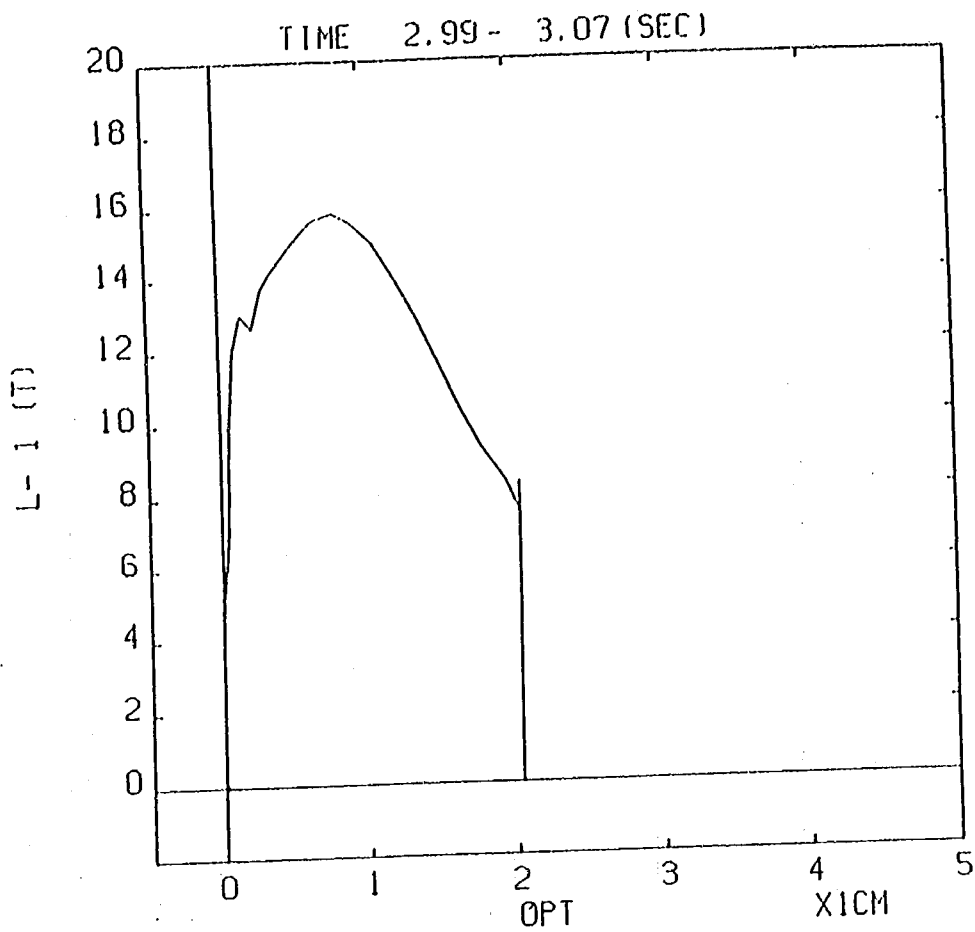
附図-1.31 荷重-変位関係および荷重, 変位の経時変化 (RC桁 No. 1, 落下高さ $H=61\text{cm}$)



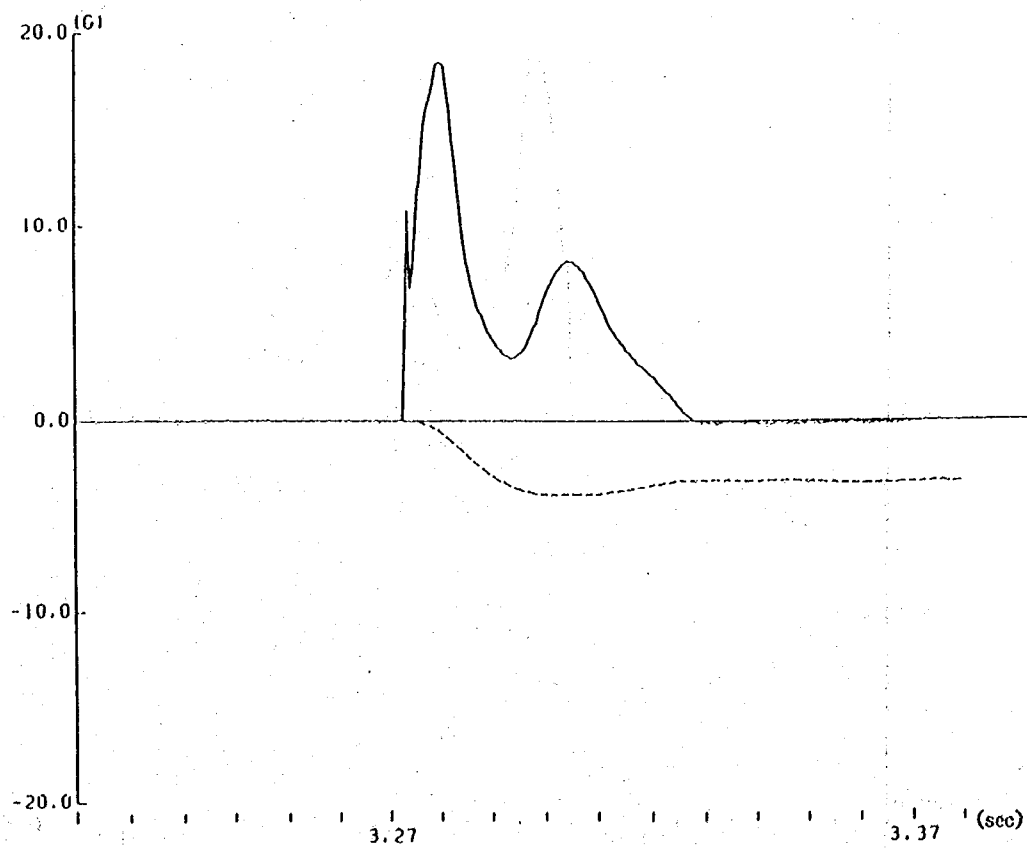
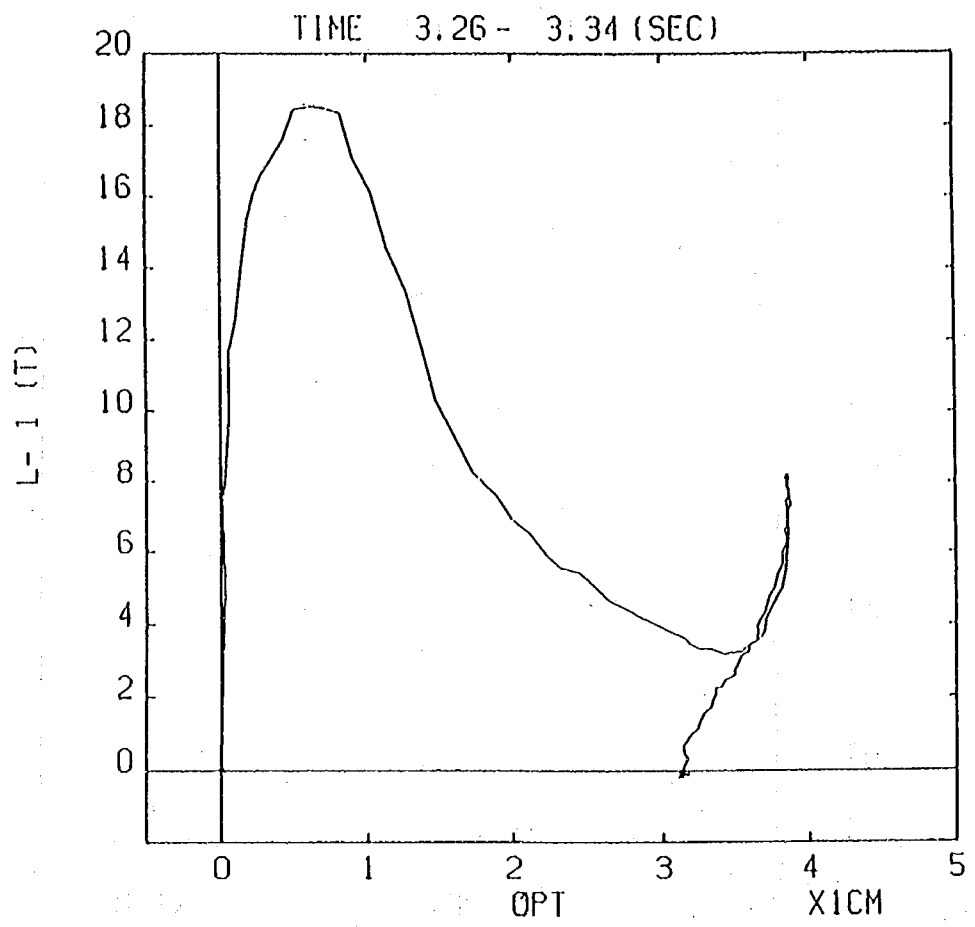
附図-1.32 荷重-変位関係および荷重、変位の経時変化 (RC桁 No. 2, 落下高さ $H=61\text{cm}$)



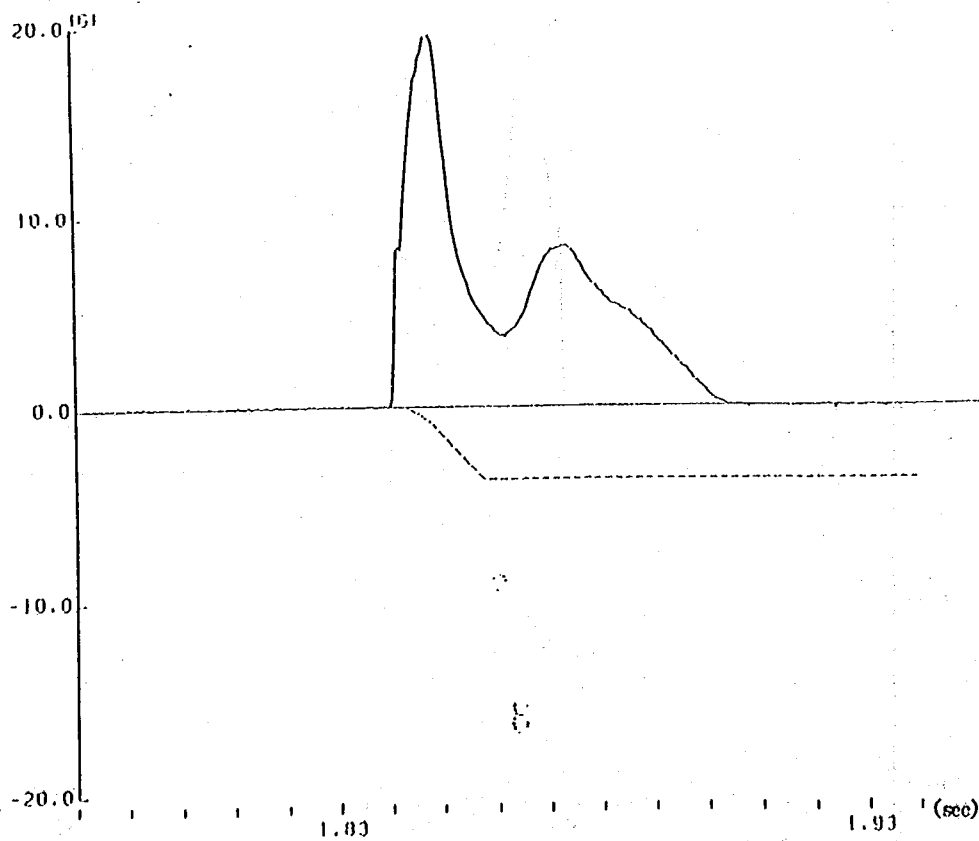
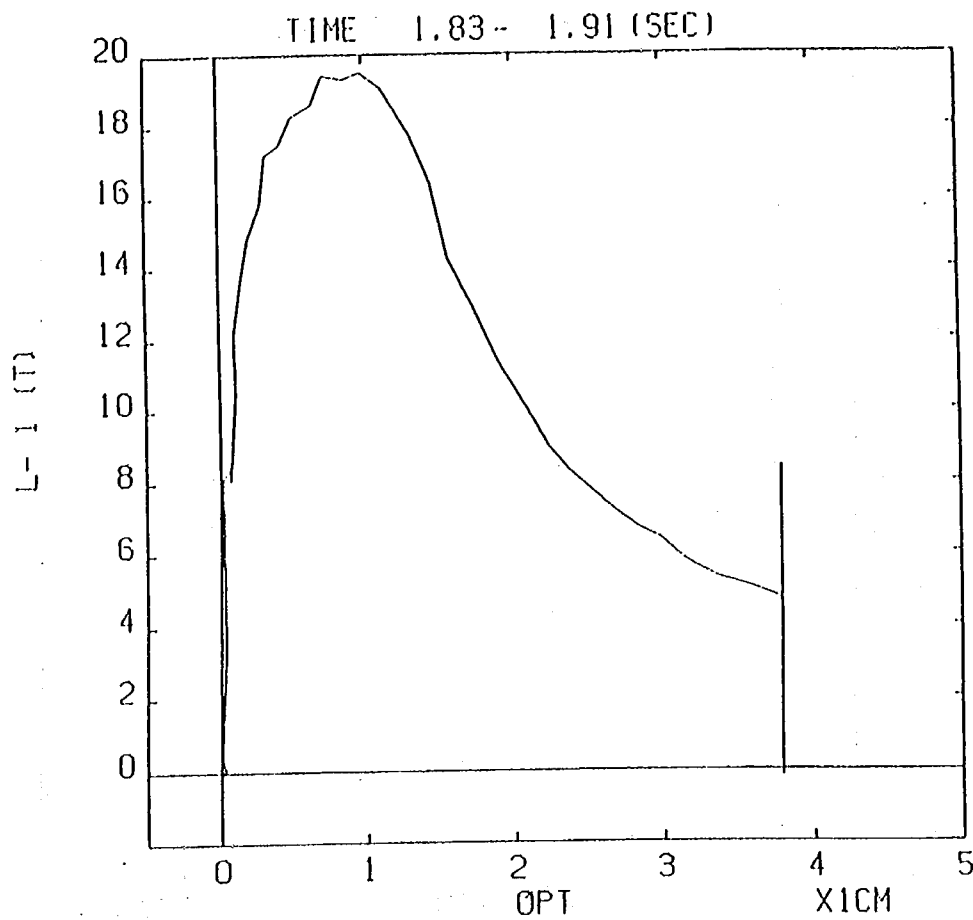
附図-1.33 荷重-変位関係および荷重、変位の経時変化 (RC桁 No. 2, 落下高さ $H=90\text{cm}$)



附図-1.34 荷重-変位関係および荷重、変位の経時変化 (RC桁 No. 2, 落下高さ $H=110\text{cm}$)



附図-1.35 荷重-変位関係および荷重、変位の経時変化 (RC桁 No. 3, 落下高さH=110cm)



附図-1.36 荷重-変位関係および荷重、変位の経時変化 (RC桁 No. 3, 落下高さH=150cm)

衝撃荷重を受けるPC, RC桁
の応答特性

ISSN 0386-5876
土木研究所資料第3045号
平成3年12月 (1991)
横山 功一, 大塚 久哲
小路 泰広, 金子 学

要 旨 コンクリートで製作される落石覆工の衝撃耐力, エネルギー吸収性能を明らかにしていくための基礎実験として, PC, RC製の単純桁を対象に静的及び衝撃載荷実験を行った。

本実験により, PC桁とRC桁に耐衝撃性能の差異があること, 静的耐力より衝撃耐力の方が一般に大きいこと, 桁の塑性変形の評価は重錘のもつ位置エネルギーにより的確に行い得ることなどの知見を得た。

キーワード: 衝撃荷重, 衝撃耐力, PC桁, RC桁, 衝撃エネルギー



郵便はがき

切手をは
いて下さ
い。

305.□□

茨城県つくば市旭一番地

建設省土木研究所

構造橋梁部構造研究室 行

No. 3

No. 3

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第3045号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印