

衝撃によってせん断損傷を受けた PC 梁の残存耐力評価法に関する考察

防衛大学校 学生員〇畑野真吾 正会員 黒田一郎 正会員 古屋信明 (株)日本サミコン 正会員 中村佐智夫

1 はじめに

落石覆工に用いられるコンクリート梁は、RC、PC を問わず、曲げ破壊が脆性的なせん断破壊に先行するように設計されているが、衝撃荷重の載荷位置と支承位置によってはせん断損傷を受ける危険性は避けられない。また、衝撃を受けてせん断損傷を受けたコンクリート梁が有する残存耐力を知ることは実務上、大変重要である。これに関する実験手法として損傷したコンクリート梁が終局状態に至るまで、繰返し衝撃載荷実験を行う方法と静的載荷を行う方法とがある。そこで筆者達は、PC 梁を対象に両手法の実験結果を比較して、残存耐力評価法の妥当性を検討した。

2 実験要領

2.1 実験器材

表-1 に材料の諸元を、図-1 に PC 梁の形状および断面寸法を示す。PC 鋼より線（導入プレストレス量：66.6kN/本）の定着を十分確保するために、供試体の全長は 2000mm とし、さらに梁両端に厚さ 12mm の定着鋼板を設けている。PC 鋼より線は 2 本ずつ 2 段に分けて計 4 本配置しており、ボンド状態（コンクリートとの付着有り）としている。スターラップは、梁全長にわたって D6 鉄筋を 100mm 間隔で 19 本配置している。これは、通常設計される PC 落石覆工部材においてせん断補強筋が一番少ない部類に相当する。

載荷点には、ロードセルを置き、ロードセルと PC 梁の間には幅 150mm・厚さ 25mm・長さ 75mm の鋼板（SS400）（以降、載荷板と呼ぶ）を挟んだ。

2.2 実験方法および実験結果の一覧

図-2 に載荷実験要領を示す。今回は、質量 0.3t の重錘を所定の高さから PC 梁に 1 回だけ落下させる単一重錘落下をまず行ってせん断損傷を与え、その後、PC 梁が終局状態に至るまで静的載荷を同一の支持条件で続ける方式（2 段階載荷実験：NC シリーズ）と、衝撃を繰返し与える方式（NC/rep. シリーズ）を用いた。重錘先端形状は半径 100mm の円柱形で、最先端部は平坦である。載荷点荷重はロードセルにより、載荷点下縁の鉛直方向変位はレーザー式変位計により計測した。載荷スパンは、確実にせん断破壊させるために 250mm+750mm の左右非対称（せん断スパン比：a/d 1.3）とした。

表-2 に実験ケースおよび結果の一覧を示す。供試体名の、75 は載荷板長さ (mm)，1.1H または 1.4H は初期落下高さ (m) である。

3 実験結果

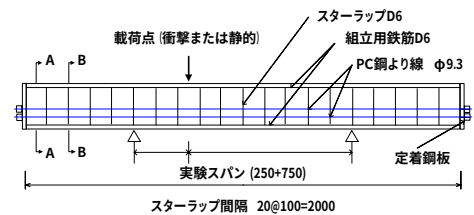
3.1 繰返し衝撃載荷実験

繰返し衝撃載荷実験の報告は多くないので、まずこれ (NC/rep.) について述べる。

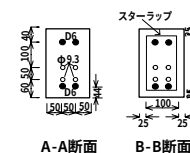
図-3 に累積残留変位 ($\sum \delta_R$) - 累積落下高さ ($\sum H$) の関係、図-4 に累積吸収エネルギー

表-1 材料諸元

材料名	項目	数値等
コンクリート	水セメント比(%)	35
	セメント(kg/m ³)	389
	水(kg/m ³)	136
	細骨材(kg/m ³)	752
	粗骨材(kg/m ³)	1178
	載荷実験時の圧縮強度(N/mm ²)	60.2
PC鋼より線 (SWPR7AN)	0.2%永久伸び強度 (N/mm ²)	1759
スターラップ、組立筋 D6鉄筋(SD295A)	降伏強度 (N/mm ²)	388



(a) 形状寸法



(b) 断面寸法

図-1 実験供試体

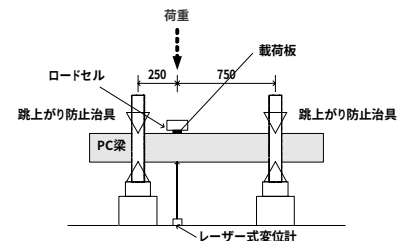


図-2 衝撃もしくは静的載荷実験の要領

表-2 実験ケースおよび結果の一覧

シリーズ	番号	供試体名	衝 撃 実 験							静 的 実 験						
			H (m)	E _D (kJ・m)	Σ E _D (kJ・m)	E _D *Σ E _D (kJ・m)	δ _R (mm)	Σ δ _R (mm)	δ _R *Σ δ _R (mm)	E _S (kJ・m)	δ _S (mm)	E _D *E _S (kJ・m)	δ _R *δ _S (mm)			
NC	b1	75T-1.1H	1.1	1.41				5.2					0.01	0.9	1.42	6.1
												0.3	3.4	1.71	8.6	
												0.47	4.4	1.88	9.6	
	b2	75T-1.4H	1.4	1.92				0					1.45	9.9	3.37	9.9
												2.29	15.5	4.21	15.5	
NC/rep.	c1	75R-1.1H(a)	1.1	0.9				3.4								
	c2	75R-1.1H(b)				0.48	0.48		1.38	2.7	2.7	6.1				
	c3	75R-1.1H(c)			0.35		0.52		1.00	1.90	2.5	5.2	8.6			
	c4	75R-1.1H(d)		0.06		1.06	1.96	1	6.2	9.6						
	c5	75R-1.4H(a)	1.4	1.31				4.7								
	c6	75R-1.4H(b)				0.52	0.52		1.83	5.2	5.2	9.9				
	c7	75R-1.4H(c)			0.35		0.53		1.05	2.36	5.6	10.8	15.5			
	c8	75R-1.4H(d)		0.57		1.62	2.93	10.7	21.5	26.2						

H: 重錘の落下高さ, E₀: 衝撃載荷時の吸収エネルギー, ΣE₀: 繰返し載荷時の累積吸収エネルギー
 δ_R: 衝撃載荷時の残留変位, Σδ_R: 繰返し載荷時の累積残留変位, E_S: 静的載荷時の吸収エネルギー, δ_S: 静的載荷時の変位
 E₀*E_S: 衝撃載荷時と静的載荷時の合計吸収エネルギー, δ_R*δ_S: 衝撃載荷時と静的載荷時の合計残留変位

キーワード：衝撃，PC 梁，せん断破壊，繰返し載荷実験，静的載荷実験，吸収エネルギー，残留変位，残存耐力
 連絡先：〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 TEL:046-841-3810(Ex.3517) FAX:046-844-5913

(ΣE_D) - ΣH の関係を示す。記号の意味は次のとおりである。■, ■, : 当初の落下高さ $H_0=1.1\text{m}$ 。●, ●: $H_0=1.4\text{m}$ 。灰網掛けはせん断ひび割れ発生, 黒塗りは完全にせん断破壊, を示している。 H_0 は NC シリーズを参考にし, ある程度のせん断ひび割れが発生するであろうとして設定し, 2 撃目以降の落下高さは, 他の実験ケースの結果から, 4 撃程度までには終局にいたるであろうという見通しで 0.35m とした。 载荷停止は, 梁の状態を目視で判断して決めた。

図-3 より, 载荷回数を重ねるごとに $\Sigma \delta_R$ が増大していき, 3~4 撃目で終局状態に至った。 図-4 は, 繰返し衝撃载荷時の荷重-変位曲線で囲まれた面積を E_D (吸収エネルギー) として, その累積値を示した。 H_0 の違いを受けて 1 撃目の E_{D0} には差があるが, 各ケースとも 2 撃目以降は概ね $E_{D1} \approx 0.5\text{kN}\cdot\text{m}$ であるため, 線形で伸びている。

3.2 衝撃後の静的载荷実験と繰返し衝撃载荷実験の比較

両手法を共通土俵で比較するために, 吸収エネルギーを比較する。 静的载荷では, せん断ひび割れが成長して行っても PC 鋼材とその付着があって抵抗を続けるため, 吸収エネルギーを求める際の積分範囲を決めるのが問題になる。

そこでまず, NC の変位 ($\delta_R+\delta_S$) と NC/rep. の変位 ($\delta_R+\Sigma \delta_R$) が今までの研究を通じてせん断破壊の終局状態であるとわかった合計値約 10mm に達するまでの, 累積エネルギー (E_D+E_S) と ($E_D+\Sigma E_D$) とを比較した。 $H_0=1.1\text{m}$ では (供試体番号 b1 と c1~c4), 表-2 から作り直した表-3 に示すとおり, 同一変位に対応する合計エネルギーはほぼ一致していて, 2 段階载荷実験の妥当性が言えそうである。 $H_0=1.4\text{m}$ では (供試体番号 b2 と c5~c8), 表-3 にあるとおり, $H_0=1.1\text{m}$ の場合よりも合計エネルギーの値の一致は悪いが, NC/rep. シリーズの 2 撃目以降の結果 (供試体番号 c6 と c7) の変位の差と, それに対応する NC シリーズの吸収エネルギーの差を実験のばらつき範囲と判断すれば, 落下高さ 1.4m のケースでも 2 段階载荷実験の妥当性が言えそうである。

次に, NC における静的载荷時の最大耐力 (P_R) までの E_S (δ_S はその時の変位) で比較する。 落下高さ 1.1m (供試体番号 b1) では, $\delta_R+\delta_S=8.6\text{mm}$ この時の $E_D+E_S=1.71\text{kN}\cdot\text{m}$, これは c3 の $\delta_R+\Sigma \delta_R=8.6\text{mm}$ の時の $E_D+\Sigma E_D=1.90\text{kN}\cdot\text{m}$ とほぼ等しい。 これから落下高さ 1.1m では, P_R 発現変位までのエネルギー評価においても 2 段階载荷実験の妥当性がありそうである。 落下高さ 1.4m では, b2 は衝撃载荷で δ_R が 0mm , 引き続く静的载荷の $\delta_S=9.9\text{mm}$ であって, これは c6 の $\delta_R+\Sigma \delta_R=9.9\text{mm}$ と一致しているが, b2 の $E_D+E_S=3.37\text{kN}\cdot\text{m}$ (うち E_S は $1.45\text{kN}\cdot\text{m}$), c6 の $E_D+\Sigma E_D=1.83\text{kN}\cdot\text{m}$ であることから, 大きな開き (約 1.8 倍) になった。 この理由は, まだ定かになっていない。

3.3 2 段階载荷実験手法の妥当性

以上考察してきたとおり, 衝撃およびその後の静的载荷実験における合計吸収エネルギーと繰返し衝撃载荷における累積吸収エネルギーとで, かなり良好な一致が見られたことから, 衝撃を受けた PC 梁がどれだけの動的残存耐力 (エネルギー評価による) を残しているかを明らかにするためには, 2 段階载荷実験 (衝撃载荷+静的载荷) が有用であると思われる。 2 段階载荷実験は, 繰返し衝撃载荷実験より簡便であり, また安全に実施できるという利点がある。

4 結 論

本研究では, 衝撃によってせん断損傷を受けた PC 梁部材がどれだけの動的残存耐力を有しているかを, PC 梁の種々の変位に対応する吸収エネルギーに着目して, 繰返し衝撃载荷実験と 2 段階载荷実験 (衝撃载荷+静的载荷実験) の結果を比較した。 得られた知見は以下の通りである。

- (1) 繰返し载荷実験において累積変位までの吸収エネルギーと, 2 段階载荷実験における合計変位 (累積変位と同じ値) までの吸収エネルギーが, 概ね一致していた。
- (2) 衝撃後の静的载荷時に観察された最大耐力発現までの吸収エネルギーと, その変位に対応する繰返し衝撃载荷実験の吸収エネルギーが, ほぼ等しかった。
- (3) これらのことから, エネルギーの観点から評価すれば, 2 段階载荷実験法は妥当であると思われる。

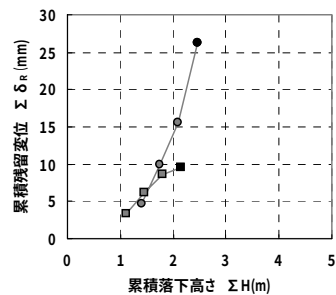


図-3 $\Sigma \delta_R - \Sigma H$ 関係

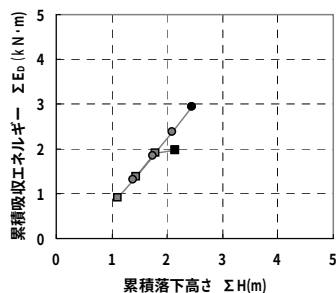


図-4 $\Sigma E_D - \Sigma H$ 関係

表-3 累積変位と累積エネルギーの比較

初期落下高さ H_0 (m)	$\delta_R + \delta_S$ (mm) もしくは $\delta_R + \Sigma \delta_R$ (mm)	NCシリーズ		NC/rep.シリーズ	
		番号	$E_D + E_S$ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	番号	$E_D + \Sigma E_D$ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)
1.1	6.1	b1	1.42	c2	1.38
	8.6		1.71	c3	1.90
	9.6		1.88	c4	1.96
	9.9		3.37	c6	1.83
1.4	15.5	b2	4.21	c7	2.36
	26.2			c8	2.93