

(12) 支点近傍に緩衝材を介した衝撃力を受けたPC梁の 残存耐力と破壊限界落下高さ

REMAINING BEARING CAPACITY AND DESTRUCTION LIMIT FALLING HEIGHT OF PC BEAM
SUBJECTED TO CUSSIONED IMPACT NEAR SUPPORT

塩野谷昇*, 畑野真吾**, 山本佳士***, 黒田一郎†, 古屋信明††, 中村佐智夫†††
Noboru Shionoya, Shingo Hatano, Yoshihito Yamamoto, Ichiro Kuroda, Nobuaki Furuya and Sachio Nakamura

* 防衛大学校理工学研究科前期課程学生 (〒239-8686神奈川県横須賀市走水1-10-20)

** 陸上自衛隊, 北部方面隊第11施設大隊 (〒005-0008北海道札幌市南区真駒内17)

*** 工修, 防衛大学校助手, システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686神奈川県横須賀市走水1-10-20)

† 博士(工学), 防衛大学校助教授, システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686神奈川県横須賀市走水1-10-20)

†† 博士(工学), 防衛大学校教授, システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686神奈川県横須賀市走水1-10-20)

††† 日本サミコン株式会社, 技術部 (〒950-0925新潟県新潟市弁天橋通1-8-23)

キーワード: 衝撃, PC梁, せん断, 緩衝材, 残存耐力性能
(Impact, PC beam, Shear, Cussion, Remaining bearing capacity)

1. はじめに

PC製ロックシェッドは, 曲げ破壊がせん断破壊に先行するように設計^{1,2)}されているが, 衝撃荷重の載荷位置が支点近傍であった場合には, 破壊モードが曲げからせん断に移行して脆性的に破壊する可能性を有している³⁾. このような支点近傍に衝撃荷重を受けるPC梁のせん断破壊挙動についての既往の研究は著者らの研究^{4), 5), 6)}が挙げられるが, そこでは緩衝材を介さずに鋼製重錘を衝突させた場合や, 高速載荷を受けた場合についての実験的検討がなされている.

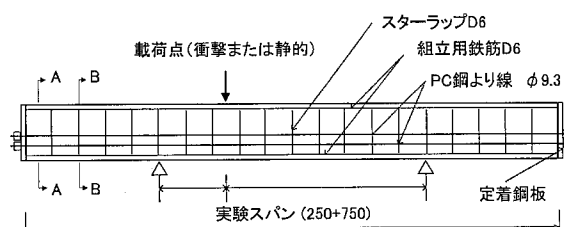
しかし, 実在のロックシェッドの上面には敷砂等の緩衝材によって衝撃荷重をある程度緩和する処置がとられている^{1), 7)}が, せん断破壊に対する緩衝材の効果については余り研究がなされていない状況にある⁸⁾.

そこで, 本研究は, 緩衝材を介して支点付近に衝撃荷重を受けてせん断損傷を生じたPC梁の残存耐力と破壊限界落下高さ, ならびにそれらに及ぼす緩衝材の影響を把握することを目的として実験的検討を行なった. 実験においては, まず, 緩衝材を入れた鋼製の容器を上面に設置したPC梁に対して重錘落下衝撃実験を行ない, 緩衝材を介した衝撃荷重によってPC梁のせん断損傷を生じさせた. 続いて, そのPC梁を静的載荷実験に供して, 静的な残存耐力を計測し, 得られた結果に基づいて考察した.

2. 実験概要

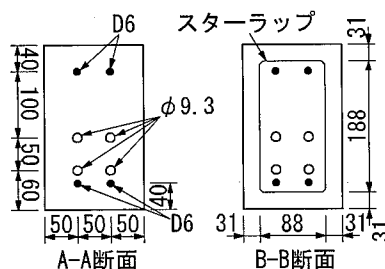
2.1 供試体および緩衝材

図-1(a), (b)にPC梁供試体の形状寸法および断面寸法を示す. 表-1に材料諸元を示す. 梁末端の定着鋼板(厚さ12mm)は, PC鋼より線(導入プレストレス力66.6kN/



スターラップ間隔 20@100=2000

(a) 形状寸法



(b) 断面寸法

図-1 実験供試体

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
緩衝砂	名称	珪砂7号
	平均粒径(D ₅₀)(mm)	0.22
	均等係数(D ₆₀ /D ₁₀)	1.5
	曲率係数 (D ₃₀) ² /D ₁₀ × D ₆₀	0.84
	単位体積質量(kg/m ³)	2600
	産地	岐阜県土岐
緩衝碎石	平均粒径(D ₅₀)(mm)	10.5
	均等係数(D ₆₀ /D ₁₀)	17.3
	曲率係数 (D ₃₀) ² /D ₁₀ × D ₆₀	0.74
	単位体積質量(kg/m ³)	2500

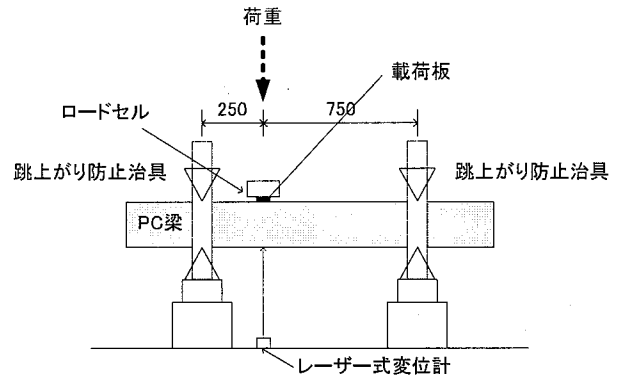


図-2 衝撃および静的載荷実験の要領

表-2 計測項目及び計測器の性能・諸元

計測項目	計測器	性能・諸元
重錘加速度	加速度計	測定範囲: 500G, 1000G 応答周波数: 1000kHz
載荷点荷重	ロードセル	容量: 1000kN
変位	レーザー式 変位計	測定範囲: 300±100mm 応答周波数: 915kHz

本)の定着を確保するために設けたものであり、PC鋼より線はボンド状態、すなわちコンクリートとの付着有りの状態としている。スターラップは梁の全長にわたってD6鉄筋を100mm間隔で配置しており、この量は、通常設計されるロックシェッド梁部においてせん断補強筋が少ない部類に相当する。土木学会コンクリート標準示方書⁹⁾による曲げ終局耐力算定値は55kN・m、せん断耐力算定値は94kNであり(いずれも静的な条件)、これに占めるスターラップの寄与分は約55%である。なお、せん断余裕度は約0.43である。

PC梁の上に鋼製の砂箱(梁300mm、長さ400mm、深さ300mm、いずれも内寸)を設置し、緩衝材として中に珪砂7号または碎石(表-1 参照)を約240mmまたは約120mmの厚さで入れた。砂箱の底面と梁上面の間に荷重計測用のロードセルを設置したが、梁上面における衝撃力の分布面積をすべての供試体で同一とするために、ロードセル下端と梁上面の間には載荷板として梁幅方向長さ150mm、梁軸方向長さ75mm、厚さ25mmの鋼板を挟んだ。

2.2 単一重錘落下衝撃実験

図-2に重錘落下衝撃実験の要領を示す。重錘落下衝撃実験は、質量0.3tonの鋼製重錘を所定の高さから砂箱の中に一回だけ落下させる単一重錘落下方式であり、衝突による衝撃力は砂箱、ロードセルさらには前述の載荷板を介してPC梁上面に到達することになる。重錘先端形状は半径100mmの円柱状で、その下面は平坦である。載荷スパンは、250mm+750mmの左右非対称とし、せん断による損傷が発生する側、即ちせん断スパンが短い側のせん断スパン比 a/d はおよそ1.52である。支点部においては、

跳ね上がり防止治具でPC梁供試体の上面が上方へ変位しないよう拘束しているが、ヒンジ支点としての回転は許す支承構造となっている。

表-2に計測項目を示す。載荷点の衝撃力は砂箱とPC梁上面の間に設置したロードセルにより、載荷点位置のPC梁下縁の鉛直変位はレーザー式変位計により計測している。これらのデータは動ひずみ測定装置で収集した後に、文献^{7), 10)}を参考に1000Hzのローパスフィルタによるノイズカットを行なった。

2.3 単一重錘落下衝撃実験後の静的載荷実験

静的載荷実験は、単一重錘落下衝撃実験によって損傷を受けたPC梁の衝撃後の残存耐力を把握することを目的として、油圧式の静的載荷試験装置を用いて行なった。支承条件や載荷板は単一重錘落下衝撃実験と同一であるが、載荷点の砂箱は設置せずに荷重を与えた。

2.4 実験ケース

表-3に示す実験ケースにおいて、供試体名は先頭から緩衝材厚さとその種類、次に落下高さを表わす。緩衝材厚さはmm単位であり、その種類は記号Sで珪砂7号、Gは碎石を表わし、緩衝材を設けずにロードセルに直接衝突させた場合は記号NCで表記している。落下高さはm単位であり、緩衝材表面から計測したものである。以降、直接衝突をNCシリーズ、緩衝砂厚240mmを240Sシリーズ、緩衝砂厚120mmを120Sシリーズ、緩衝碎石厚240Gを240Gシリーズと呼ぶことにする。ここで、NCは"No Cussion", Sは"Sand", Gは"Gravel"の意である。

なお、単一重錘落下衝撃実験を経ずに全く無損傷の状

表-3 供試体と結果の一覧

シリーズ	供試体名	単一重錘落下衝撃実験(衝撃載荷)					静的載荷	
		落下高さ (m)	最大衝撃力 P_{max} (kN)	残留変位 δ_R (mm)	力積 I_T (kN·s)	載荷後の 状態	残存耐力 P_R (kN)	載荷後の 状態
Static	Static						365.0	×
NC	NC-1.4H	1.4	488.5	1.3	1.84	△	291.1	×
	NC-2.3H	2.3	698.8	12.9	1.44	×	(0.0)	
240S	240S-4.0H	4.0	194.8	0.2	1.98	◇		
	240S-8.0H	8.0	343.7	0.5	3.18	◇	380.3	●
	240S-11.0H	11.0	431.4	1.9	3.86	○	371.3	×
	240S-13.0H	13.0	432.3	3.6	4.26	○	341.9	●
	240S-15.0H	15.0	494.6	5.1	4.75	△	310.3	●
	240S-16.0H	16.0	536.9	5.4	4.98	△	204.5	×
	240S-17.0H	17.0	552.7	72.6	3.83	×	(0.0)	
120S	120S-4.0H	4.0	264.8	0.0	2.74	◇	401.6	×
	120S-8.0H	8.0	457.7	1.1	3.53	△	273.0	×
	120S-8.2H	8.2	577.6	8.7	2.82	△	154.8	×
	120S-8.5H	8.5	509.3	37.7	3.04	×	(0.0)	
	120S-9.5H	9.5	533.8	12.8	3.59	×	(0.0)	
240G	240G-11.0H	11.0	395.2	0.0	4.61	○	381.1	×
	240G-13.0H	13.0	442.0	0.0	5.09	△	388.3	×
	240G-16.0H	16.0	555.3	64.3	3.86	×	(0.0)	

- ・ 衝撃載荷後の状態 ◇：無傷，○：曲げひび割れ発生，△：せん断ひび割れ発生，×：完全にせん断破壊
- ・ 静的載荷後の状態 ●：曲げひび割れが大となったため載荷を中止，×完全にせん断破壊
- ・ 最大衝撃力 P_{max} ：衝撃載荷においてロードセルによる衝撃力最大値
- ・ 残存耐力 P_R ：静的載荷における最大荷重

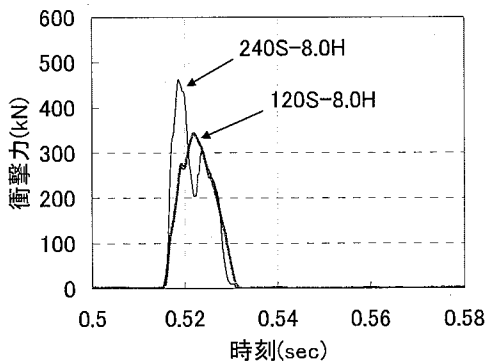


図-3 衝撃力の時刻歴応答の例

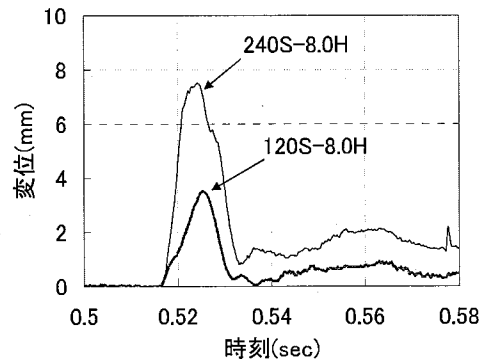


図-4 変位の時刻歴応答の例

態で静的載荷実験を行なった供試体(供試体名Static)も表-3に併せて示す。

3. 単一重錘落下衝撃実験結果

衝撃力と変位の時刻歴応答の例を図-3および図-4にそれぞれ示す。ここで示す時刻歴応答は240Sシリーズと120Sシリーズの重錘落下高さが同一(8.0m)の供試体のものである。同じ落下高さであっても、衝撃力や変位の最大値は、緩衝砂厚が大きい方が小さく抑えられていることがわかる。衝撃力の時刻歴応答(図-3)の最大値を最大衝撃力 P_{max} として、衝撃力の時間積分を力積 I_T として表-3に示している。また、変位の時刻歴応答(図-4)は最大変位を示した後波打った値を示しているが、時間

が経過して値が一定に落ち着いた後の値を残留変位として表-3に併せて示している。ただし、変位の時刻歴応答の例として示した図-4では、表示している時刻範囲が狭いため変位が落ち着く時刻は表示外である。

図-5(a)~(c)に、単一重錘落下衝撃実験後の240Sシリーズ供試体の破壊・損傷形態の例を示す。これらの写真に写っているグリッドの寸法は100mm×100mmである。図-5(a)は落下高さ13mの240S-13.0H供試体であり、曲げひび割れが生じたもののせん断ひび割れは認められない。図-5(b)の落下高さ15mの240S-15.0H供試体では、曲げひび割れだけでなく、支承と載荷点をほぼ直線的に結ぶせん断ひび割れが生じている。さらに落下高さが大きくなった240S-17.0H供試体(図-5(c))、落下高さ17.0m)ではせん断ひび割れが大きく開口してスターラ

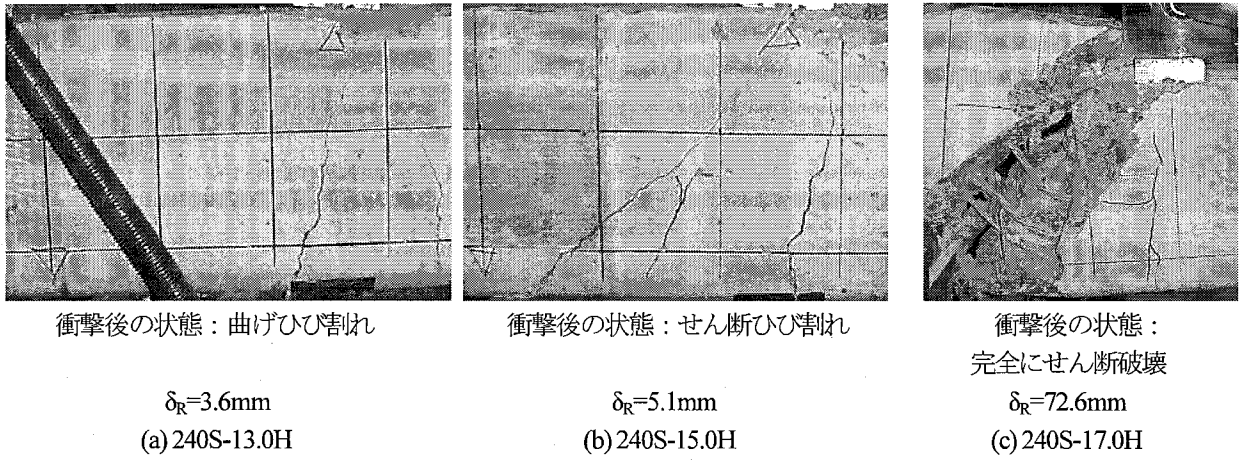


図-5 単一重錘落下衝撃実験後の損傷・破壊形態

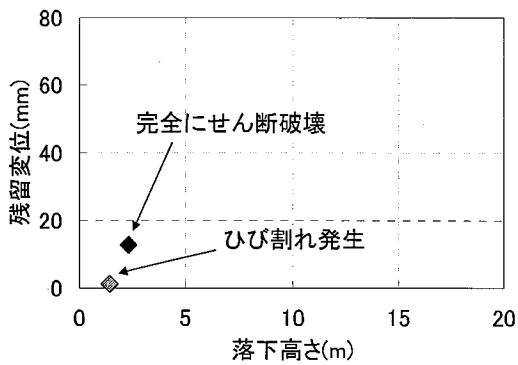


図-6(a) 残留変位-落下高さ関係
NCシリーズ

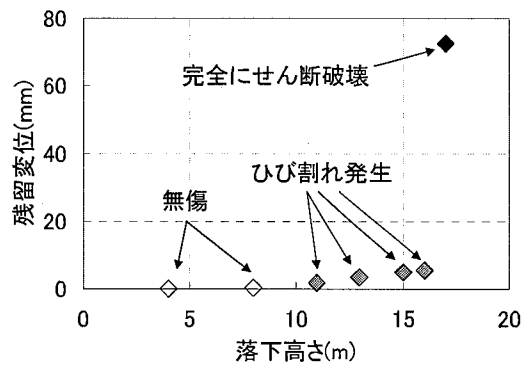


図-6(b) 残留変位-落下高さ関係
240Sシリーズ

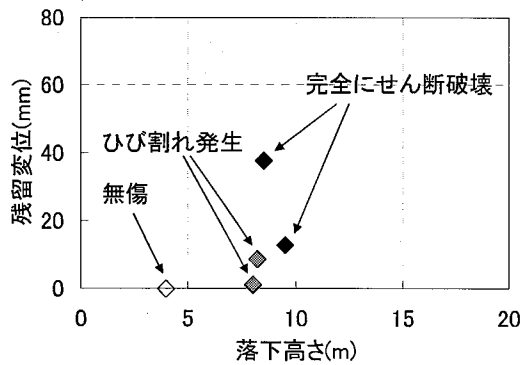


図-6(c) 残留変位-落下高さ関係
120Sシリーズ

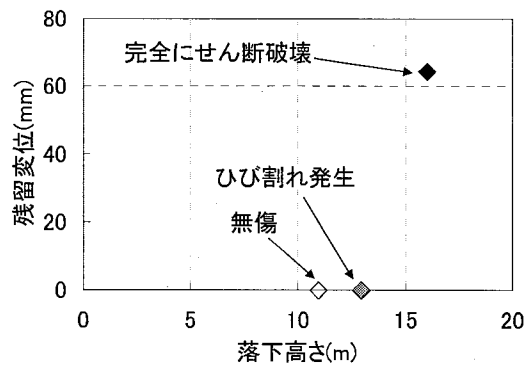
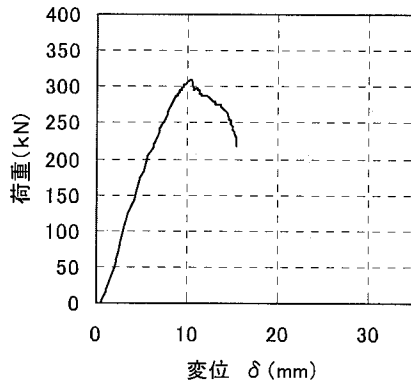


図-6(d) 残留変位-落下高さ関係
240Gシリーズ

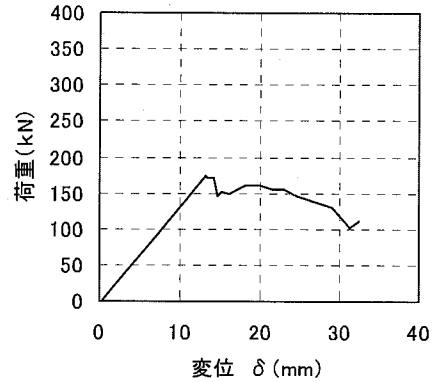
ップが破断し、完全にせん断破壊している。これらの写真に示された供試体は落下高さが13m~17mの範囲で2mずつしか大きくないが、破壊・損傷の程度には大きな差異が生じた。すべての供試体シリーズにおいて、おおむね、衝撃後の残留変位が10mmを越えるPC梁は、載荷点と支承を結ぶ面に沿ったコンクリートがある幅で完全に破壊してずれ量も大きく、既にせん断破壊の終局状態に至っていると認められた。

次に、図-6(a)~(d)に各供試体シリーズの残留変位-

落下高さ関係を示す。図中のマーカーの色は損傷程度を表わし、白抜きが無傷、灰色が曲げまたはせん断ひび割れ発生、黒塗りがせん断破壊(せん断ひび割れが開口)を表わしている。多くのシリーズでは、落下高さが大きくなるに従って残留変位が次第に大きくなる傾向を示しているが、ある落下高さを超えると残留変位が急激に大きくなっており、その落下高さがちょうどせん断ひび割れが開口してせん断破壊に至る落下高さ(黒塗りのマーカー)に相当している。その落下高さは、NCシリーズで2.3m、



載荷時に曲げひび割れ幅大
(a) 240S-15.0H



載荷後の状態：完全にせん断破壊
(b) 120S-8.0H

図-7 荷重-変位関係の例 (静的載荷)

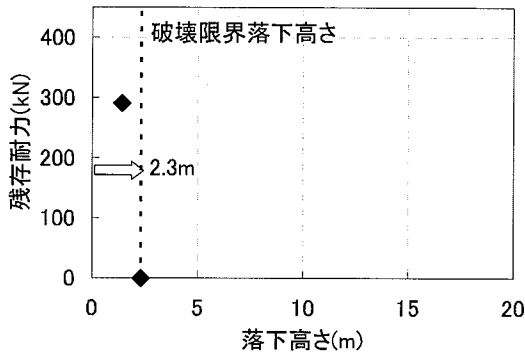


図-8(a) 残存耐力-落下高さ関係
NCシリーズ

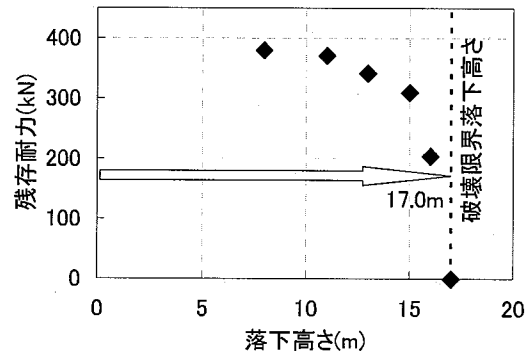


図-8(b) 残存耐力-落下高さ関係
240Sシリーズ

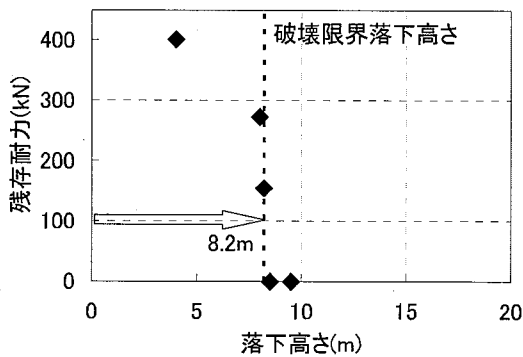


図-8(c) 残存耐力-落下高さ関係
120Sシリーズ

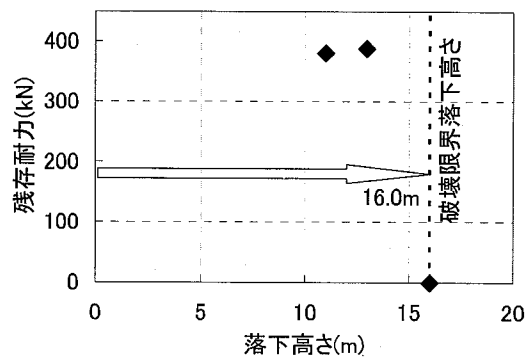


図-8(d) 残存耐力-落下高さ関係
240Gシリーズ

240Sシリーズで17m, 120Sシリーズで8.5m, 240Gシリーズで16mである。

4. 静的載荷実験結果

単一重錘落下衝撃実験によって損傷を受けたPC梁供試体に対して静的載荷を行なった。荷重-変位関係の例を図-7(a), (b)に示す。また、最大荷重値を残存耐力 P_R

として表-3中に示す。単一重錘落下衝撃実験において梁の損傷が激しく、その後の静的載荷実験の際に支承に設置することすら困難な供試体は、残存する耐力はほぼゼロと判断できるため、表-3中の残存耐力の項は括弧付きの0.0と表記している。

各供試体シリーズの残存耐力-落下高さ関係を図-8(a)~(d)に示す。いずれの供試体シリーズにおいても、落下高さが比較的小さい際には、残存耐力は、単一重錘落

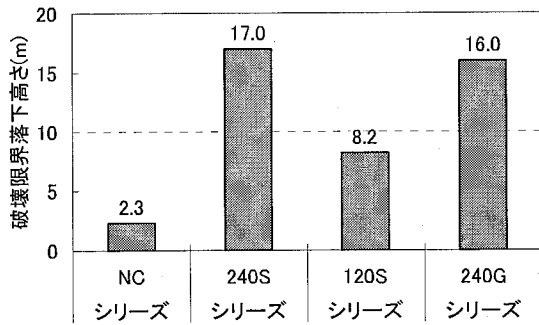


図-9 破壊限界落下高さ

下衝撃実験による損傷を全く受けていないStatic供試体の静的耐力365.0kN(表-3参照)にほぼ近い値を維持している。しかし、落下高さが大きくなると次第に最大耐力は低下し始め、急激な落ち込みを示す。

そこで、最大耐力がStatic供試体の静的耐力のおおむね半分を下回った落下高さを、その供試体シリーズの供試体を一撃の重錘落下衝撃のみで完全に破壊しうる落下高さであると考え、これを本実験における破壊限界落下高さとして定義した。このようにして定義した破壊限界落下高さを図-9にまとめて示す。緩衝材を用いなかったNCシリーズと比べて、珪砂7号を緩衝材として用いた240Sシリーズおよび120Sシリーズでは、破壊限界落下高さが著しく大きくなっており、その倍率は120Sシリーズで約3.5倍、240Sシリーズで7.5倍と、緩衝材厚が2倍になればほぼ2倍となっている。一方、同じ緩衝材厚で緩衝材の種類が異なる240Sシリーズ(珪砂7号)と240Gシリーズ(碎石)の比較では、破壊限界落下高さはほぼ同じレベルであり、本実験の条件では緩衝材の種類による違いは小さかった。さらに、破壊限界落下高さを、前述の単一重錘落下衝撃実験にて残留変位が急激に大きくなりせん断ひび割れが開口する落下高さと比較すると、ほぼ同じ落下高さであることがわかり、残留変位-落下高さ関係と残存耐力-落下高さとの間に密接な関係があることが示唆されている。

5. まとめ

本研究によって得られた知見を以下にまとめる。

1) 同じ落下高さであっても、衝撃力や変位の最大値は、緩衝砂厚が大きい方が小さく抑えられている

2) 落下高さが大きくなるに従って、残留変位は次第に大きくなる傾向を示しているが、ある落下高さを超えると残留変位は急増し、その落下高さはせん断ひび割れが開口してせん断破壊に至る落下高さに相当している。

3) 落下高さが比較的小さい際には、残存耐力は、単一重錘落下衝撃実験による損傷を全く受けていない供試体の静的耐力にほぼ近い値を維持している。しかし、落下高さが大きくなると次第に最大耐力は低下し始め、急激な落ち込みを示す。

4) 最大耐力がStatic供試体の静的耐力のおおむね半分を下回った落下高さを、破壊限界落下高さとして定義した。緩衝材として用いた供試体シリーズでは、緩衝材厚に応じて破壊限界落下高さは著しく増大した。

参考文献

- 1) 土木学会：ロックシェットの耐衝撃設計，構造工学シリーズ8，1998
- 2) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 3) 建設省土木研究所構造研究室，(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：PRCロックシェットの設計法に関する共同研究報告書，建設省土木研究所共同研究報告書，第148号，1996.3
- 4) 黒田一郎，下山一貴，古屋信明，中村佐智夫：PC梁部材の静的および高速せん断実験，構造工学論文集，Vol.47A，P.1299~1308，2001.3
- 5) 下山一貴，黒田一郎，古屋信明，中村佐智夫：重錘落下実験によるPC梁のせん断破壊挙動，コンクリート工学論文集，第13巻第1号，P.109~P.118，2002.1
- 6) 下山一貴：支点付近に荷重を受けるPC梁のせん断力学特性に関する研究，防衛大学校修士論文，2002.3
- 7) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用，構造工学シリーズ15，2004
- 8) 畑野真吾，黒田一郎，古屋信明，山本佳士，中村佐智夫：衝撃を受けるPC梁のせん断破壊挙動に及ぼす砂緩衝材の効果，第7回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，P.95~P.100，2004.11
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書，構造性能照査編，2002
- 10) 別府万寿博，小暮幹太，酒巻勝，大野友則：RCはり部材の衝撃実験における衝撃荷重の計測と波形処理法，土木学会論文集，No.724/I-62，P.141~P.156，2003.1