せん断補強筋を有する軽量コンクリートせん断破壊型 RC 梁の 衝撃せん断耐力に関する数値解析的評価

Numerical study on evaluation of impact resistant capacity of shear-failure type LW-RC beams with stirrup

室蘭工業大学	フェロー	岸	徳光	(Norimitsu Kishi)
ドーピー建設工業(株)	正員	竹本	伸一	(Shin-ichi Takemoto)
三井住友建設(株)	フェロー	三上	浩	(Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学	学生員	南波	宏介	(Kosuke Namba)

1. はじめに

近年,道路橋や鉄道橋等の上部構造の軽量化を図ること を目的として,粗骨材に焼成人工軽量骨材を用いたコンク リート(以後,軽量コンクリート)を適用する工法が一部 で実用化されている.この軽量コンクリートを用いた梁や 柱部材の静的な曲げおよびせん断耐荷性状に関する実験 的・解析的研究が既に実施されている一方で,耐衝撃用途 構造物への応用も考えられ,著者らは曲げ破壊型 RC 梁を 対象とした重錘落下衝撃実験を実施している.しかしなが ら,合理的な耐衝撃設計を実施するためには曲げ耐力のみ ならず, せん断耐力評価法も確立しなければならない. 著 者らはその試みとして,静的にせん断破壊に至るせん断補 強筋のない軽量コンクリート製 RC 梁に関する重錘落下衝 撃実験を実施してきた.RC梁のせん断耐力は主にコンク リート強度,主鉄筋やスターラップの鉄筋比,断面寸法の 影響を大きく受けるため,その評価法を確立するためには 静的耐力に関しても多くの実験を必要とする.従って,衝 撃荷重載荷時のせん断耐力評価法の確立に向けた検討を効 率的に行うためには,実験的研究は数値解析的研究の援用 の下に実施するべきものと判断される.これまでにも解析 的研究において, せん断補強筋を用いない軽量コンクリー トせん断破壊型 RC 梁の種々の検討を行ってはきたものの, せん断補強筋を用いた軽量コンクリートせん断破壊型 RC 梁に関する衝撃せん断耐力評価は未だ実施されていない.

このような観点より,本研究では,せん断補強筋を有す る場合のせん断破壊型軽量コンクリート RC 梁を対象に, 既往の研究¹⁾により提案された評価手法を用いて衝撃耐力 を数値解析的に検討することを目的として,せん断補強 筋量の異なる軽量コンクリート RC 梁に関する3次元有限 要素法による弾塑性衝撃応答解析を試み,一部実験結果 と比較することによって検討を行った.なお,本数値解析 には,陽解法に基づく非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA(ver.970)を用いている.



図 - 1 試験体の形状寸法(例:LW-S85 試験体)

2. 実験概要

図 - 1 には,本数値解析で対象とした軽量コンクリート RC梁の形状寸法および配筋状況の一例を測定項目と合わ せて示している.対象とした RC梁は断面の形状寸法,純 スパン長は同様であるが,せん断補強筋間隔が異なる3種 類の試験体である.試験体の断面寸法(梁幅×梁高)は全 て 240 × 390 mm であり,純スパン長は 2.4 m である.せ ん断補強筋はその間隔を3種類設定し,せん断補強筋を 用いない梁をLW-N 試験体,170 mm 間隔で配置した梁を LW-S170,85 mm 間隔で配置した梁をLW-S85 試験体とす る.なお,せん断補強筋には D6を用いている.軸方向鉄 筋には D25 を使用し,いずれも芯かぶり 50 mm の位置に 配筋して,端部を厚さ9 mm の定着鋼板に溶接し,その定 着長を節約している.

表 - 1 には,試験体の静的設計値の一覧を示している. 試験体名は,軽量コンクリートを表すLWにせん断補強筋の有無,間隔を合わせて示している.表中のせん断耐力 V_{usc} ,曲げ耐力 P_{usc} はいずれもコンクリート標準示方書(以後,示方書)に準拠して算出している.特に V_{usc} の値は示方書に則して計算値の70%に低減して評価している. また,せん断余裕度 α は, V_{usc} を P_{usc} で除した値である. いずれの梁も α < 1.0 であることから,本RC梁は,静載荷時には設計的にせん断破壊型で終局に至ることが想定される.なお,各耐力は表 - 2 および表 - 3 に示しているコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を用いて算出している.

表 - 1 コンクリートの力学的特性値

计段体力	せん断耐力	曲げ耐力	せん断余裕度	
武 崇 仲 右	V_{usd} (kN) P_{usd} (kN)		α	
LW-N	134.3		0.43	
LW-S170	216.5	311.56	0.69	
LW-S85	298.7		0.96	

表 - 2 コンクリートの力学的特性値

実験時材令	圧縮強度	引張強度	弾性係数	ポアソン比
(日)	f_c^\prime (MPa)	f_t (MPa)	$E_c\ (\ {\rm GPa}\)$	v_c
33	49.4	2.2	21.2	0.2

表 - 3 鉄筋の力学的特性値

off なな わ もわ	++ 65	降伏強度	引張強度	弾性係数	ポアソン比
	们員	σ_y (MPa)	σ_t (MPa)	E_s (GPa)	v_s
D25	SD345	402	619	200	0.2
D6	SD295A	440	508	206	0.5

表 - 4 実験および解析ケース

試験休夕	衝突速度 V(m/s)			
动歌作石	実験ケース	解析ケース		
LW-N	3.25, 4, 4.25, 4.5	1~5.5の15ケース		
LW-S170	5.5, 6, 6.25, 6.5, 6.75	2~8の16ケース		
LW-S85	6.5, 7.5, 8.5, 9.5, 10.5	2~12の16ケース		



図 - 2 有限要素モデル(例:LW-S85 試験体)

3. 数値解析および仮定

3.1 数値解析モデル

図 - 2 には, 一例として LW-S85 試験体に関する有限要 素モデルを示している.解析対象は,RC梁の対称性を考慮 してスパン方向および断面方向に2等分した1/4モデルで ある.適用した要素タイプは,せん断補強筋をはり要素で 再現し,その他を8節点あるいは6節点の3次元固体要素 でモデル化している.全節点数および全要素数は,LW-N試 験体でそれぞれ 9,952, 7,746 である.また, LW-S170 試験 体は 9,952, 7,944, LW-S85 試験体は 9,952, 8,120 である. RC 梁部は実験に用いた梁の形状寸法に基づき忠実にモデ ル化している.ただし,軸方向鉄筋は公称断面積と等価な 正方形要素として簡略化している.重錘部は,実形状に即 し, 全長 1.0 m で直径 230 mm の円柱状を基本としてロー ドセル部を実際の重錘と同様な直径 107 mm に絞り込んだ 形にモデル化し,底部形状を高さ2mmの球形状から扁平 状に簡略化してモデル化している.支点治具部は,ロード セルや跳ね上がり防止用治具も含め,実構造に即してモデ ル化することとした.なお,支点の底部には,実験時と同 様に治具全体の x 軸回りの回転のみを許容するように境界 条件を設定している.要素の積分点数は1点積分を基本と しているが,軸方向鉄筋に関しては断面方向に1要素でモ デル化しているため,解析精度を考慮して8点積分として いる.

コンクリートと重錘および支点治具の要素間には,面と 面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義して いる.また,コンクリートと軸方向鉄筋要素間には,完全 付着を仮定している.衝撃荷重は,重錘要素の全節点に設 定した衝突速度を付加することによりRC梁上に設置した 形で与えている.なお,数値解析は,重錘がRC梁に衝突 した時点から RC 梁がほぼ定常状態に至るまでの 160 ms 間について実施した.

3.2 材料物性モデル

材料物性モデルは,既往の研究¹⁾により提案されている 解析手法と同様である.圧縮側に対しては折線近似による 相当応力 - 相当歪関係,引張側に対しては破壊圧力に達し た段階で引張力を伝達しないとする弾塑性体モデルであ る.破壊圧力に関しては,本実験で用いている軽量コンク リートの場合には,予備解析結果を参考に圧縮強度の1/16 と仮定している.なお,降伏の判定には von Mises の降伏 条件式を採用している.軸方向鉄筋要素およびせん断補強 筋要素に用いた物性モデルは,降伏後の塑性硬化係数H' を考慮した等方弾塑性体モデルである.降伏応力 σ_ν,弾 性係数 E_s およびポアソン比 v_s には,表-3に示されてい る値を採用している.降伏の判定は,ここでも von Mises の降伏条件に従うこととした.また,塑性硬化係数H'は, 弾性係数 Es の1% と仮定している.また, 重錘, 支点治 具および定着鋼板の要素に関しては弾性体モデルを適用し ている.これらの要素の弾性係数E,ポアソン比vには公 称値を用いることとし, それぞれ E = 206 GPa, v = 0.3 と 仮定している.

本研究では,市販の汎用コードに組み込まれている程度 の単純な構成則を用いた RC 梁の弾塑性衝撃応答解析手法 の確立を目的としていることより,コンクリートおよび鉄 筋のひずみ速度効果やコンクリートのひずみ軟化現象は考 慮していない.また,質量に比例する粘性減衰定数は,予 備解析を行い RC 梁の最低次固有振動数に対して 0.5%と 仮定している.

4. 数値解析結果と実験結果の比較

4.1 各応答波形の比較

図 - 3 には, LW-N, LW-S170 および LW-S85 試験体の重 錘衝撃力 P, 支点反力 R および載荷点変位 D の各種応答 波形に関する数値解析結果を,実験結果と比較して示して いる.これらの応答波形に関する検討は,紙面の都合によ り,各試験体1体ずつに着目して行うこととする.

最初に,図-3(a)の重錘衝撃力波形Pについて見ると, 数値解析結果と実験結果は,いずれの試験体に関しても波 形の立ち上がりから減衰に至るまで両者で非常に良く対応 していることが分かる.すなわち,両波形は衝撃初期にお ける振幅が大きく継続時間の短い波形成分と,その後励起 される振幅が小さく継続時間の比較的長い波形成分の2波 から成る分布性状を示している.

次に,図-3(b)の支点反力波形 R について見ると,重 錘衝撃力波形と同様に,数値解析結果と実験結果は負反力 成分を除き両者で比較的よく対応していることが分かる. すなわち,数値解析結果は波動の立ち上がりから5~10 ms 経過程度までは負反力が励起される波形成分を除き高 周波成分も含め実験結果とよく対応している.一方,数値 解析結果は高周波成分の波頭が鈍化している点を除き,大 略実験結果と類似している.

最後に,図-3(c)の載荷点変位波形Dを見ると,全ての試験体においてその立ち上がりから最大応答値程度までの波動は,両者で比較的良く対応している.しかしながら,最大応答値以降から残留変位に至る波動に関しては,特に



LW-S85 試験体における V9.5 では実験結果と数値解析結果 で大きく異なっている.これは,後述の実験終了後のひび 割れ分布より,実験ではコンクリートの側面から塊状のコ ンクリートの剥離がみられ,鉄筋のみで荷重を分担してい るのに対して,数値解析ではこのような状況を再現できな かったためと推測される.

4.2 衝突速度毎の最大支点反力値とひび割れ分布

図 - 4 には,各試験体の衝突速度毎の解析結果および実 験結果における最大支点反力値を比較して示している.ま た,図 - 5 には実験終了後のひび割れ分布性状と数値解 析により得られた最大変位時における最大主応力分布を 用いたひび割れ分布予測図を併せて示している.ここで, 図 - 5 のひび割れ分布予測図はコンクリートの構成則によ り破壊圧力に達した領域が明瞭になるように等色レベル を設定しており,白色領域がひび割れ発生が予測される領 域であることを示している.まず図-4の解析結果を見る と,いずれの試験体においても衝突速度を低速度から増加 させるにしたがい,あるレベルまでは最大支点反力値もほ ぼ増加している.しかしながらその後最大支点反力値は衝突速度の増加に関わらず大略一定値に収束する傾向を見て 取ることが出来る.また,実験結果では,いずれも解析結 果と同程度の応答値を示している.なお,応答値が低下し ている場合には,梁底面のかぶり部の剥落等が生じてい ることを確認している.次に図-5を見ると,数値解析に よって得られたひび割れ分布予測図は実験結果と同様に載 荷点から45°の角度で進展する斜めひび割れからアーチ 状に進展するひび割れまで非常に良くその分布性状を再現 していが,上端筋に沿って進展する割裂ひび割れまで再現 するには至っていない.

4.3 衝撃せん断耐力評価

衝撃せん断耐力評価に関して,既往の研究¹⁾において, 最大重錘衝撃力は衝突速度の増加に対応して増加する傾向 を示すことが明らかになっている.しかしながら,最大支 点反力値は前述の通り実験結果,解析結果ともに最大値あ るいは一定値を示す傾向にあることから,本研究でもこれ ら過去に提案されてきた手法と同様に支点反力値を用いて



(c) LW-S85試験体



(b) LW-S170試験体



衝撃せん断耐力を評価することとする.

(a) LW-N試験体

実験における衝撃せん断耐力は実験終了後のひび割れ 分布性状と最大支点反力値によって評価される.図-4お よび 図 - 5より, LW-N 試験体では衝突速度が 4.5 m/s に達 した段階で,試験体底部のかぶり部が著しく剥落してお り,この時の最大支点反力値はそれ以前の場合に比べ低 下していることが分かる.これよりLW-N 試験体では4.25 m/s時に発生した最大支点反力値を衝撃せん断耐力とした. LW-S170 試験体では衝突速度が6m/s以上となった段階で 極端な剥落は起きていないものの,ひび割れ分布におい ても載荷点からの斜めひび割れやアーチ状のひび割れお よび下端鉄筋に沿った割裂ひび割れがより明瞭に発生して いる.最大支点反力も6m/s時で最大となっている.また, LW-S85 試験体では, V9.5 では既にコンクリート上面に大 きな塊状の剥落が認められ,支点反力も V8.5 時に最大と なっている.以上より,実験結果の限界せん断耐力は,そ れぞれ V4.25, V6, V8.5 で発生し, それぞれ 533.1, 781.2, 999.1 kN として評価される.

一方,解析結果では,図-5のひび割れ分布予測図を見 ると,LW-N 試験体では V4.25 において載荷点から支点部 に伸びるアーチ状のひび割れが発生し広域に広がってい る.また,V4.25 の最大支点反力も低下しており V4 にお いて限界せん断耐力が発生しているものと推察される.同 様にLW-S170,LW-S85 試験体に関しても V6.5,V10.5 に てひび割れ分布が広域にかつより密に分布していること から,V6.25,V9.5 にて限界せん断耐力が発生しているも のと推察される.図-6 には,LW-N 試験体に関して,そ の破壊状態を判定するために断面各点における変位波形 を示している.変位着目点は重錘落下によって直接衝撃荷 重を受けるスパン中央部対称軸上の各点とした.図より, V3.75,V4では梁高中心点と下端鉄筋の位置の波形は両者 同程度の分布性状を示しており,一体となって挙動してい ることが分かる.しかしながら,V4.25の場合には,両者 で差違が生じている.これは梁高中心と下端鉄筋間にお いてひび割れの開口によって破壊が生じ始めていることを 意味している.これらのことよりLW-N 試験体は衝突速度 4.25 m/s 時に破壊に至っていることが推察される.この結 果は前述の第1主応力分布図を用いて判断した破壊に至る 衝突速度と一致している.

以上より,解析的検討において LW-N 試験体の衝撃せん 断耐力は V4 時の 605.7 kN となった.また同様に LW-S170 および LW-S85 においてそれぞれ 702.8,862.3 kN となり, これらを実験結果より得られた衝撃せん断耐力と比較す ると 15% 程度の誤差幅で評価可能であることが明らかと なった.

5. まとめ

以下,本研究で得られた結果を要約すると,

本数値解析評価手法を適用することで衝撃せん断耐力は 評価可能である.最大支点反力を用いることにより,各試 験体の衝撃せん断耐力を大略15%程度の誤差幅で評価可能 であることが明らかとなった.

参考文献

 岸 徳光,三上 浩,松岡健一,竹本伸一:軽量コンクリートを用いたせん断補強筋のないせん断破壊型RC梁の重錘落下衝撃挙動解析,構造工学論文集, Vol.50A, pp.1361-1372,2004.3