

3次元RBSMによるPC梁の衝撃せん断破壊解析

防衛大学校 学生会員 ○吉村 太郎 防衛大学校 正会員 山本 佳士
防衛大学校 正会員 黒田 一郎 防衛大学校 正会員 古屋 信明

1. はじめに

我が国では山地で生じる落石に対する道路や鉄道の防護構造物として、ロックシェッドが全国に設置されており、その多くは構造面、施工面、管理面、そして経済性に優れた特性をもつPC梁構造によって作られている。PCロックシェッドの設計は、一般的な梁部材と同様に、脆性的でなく、十分に変形させた後に破壊させるべく、曲げ破壊がせん断破壊に先行するように設計されている。ところで、衝撃荷重を受けて、コンクリート部材が高速で変形する場合、コンクリートおよび補強材のひずみ速度効果の影響が無視できなくなるため、静的荷重下の応答と比較して衝撃荷重下におけるPC梁のせん断耐荷性状は変化すると考えられる。しかしながら、高速荷重下におけるPC梁のせん断耐荷特性に関しては十分に解明されていないのが現状である。

PC梁の耐力および変形性能を、数値解析手法を用いて精度良く予測するためには、コンクリートのひび割れの発生・進展、ひび割れ面におけるせん断伝達特性、鉄筋コンクリート間の付着劣化、コンクリートの圧壊などの不連続な力学挙動を適切にモデル化する必要がある。さらに、衝撃荷重下においては、材料のひずみ速度効果の影響が顕著になるため、力学モデルはさらに複雑になる。

剛体バネモデル(RBSM)は、対象を剛体要素と要素間の変形バネで離散化する手法であり、バネに破壊やすべり等の非線形特性を導入することにより、FEMに代表される連続体解析手法と比較して、容易に上記のコンクリート部材の不連続挙動を表現することができる。したがって、RBSMはPC梁の衝撃破壊解析手法として有用であると考えられる。

本研究では、まず、PC梁の衝撃せん断破壊性状の把握のために、PC梁の重錘落下衝突実験を行った。さらに、RBSMを用いたPC梁の衝撃載荷解析手法を開発し、同手法を用いて実施した実験を対象に解析を行うことにより手法の妥当性を検証した。

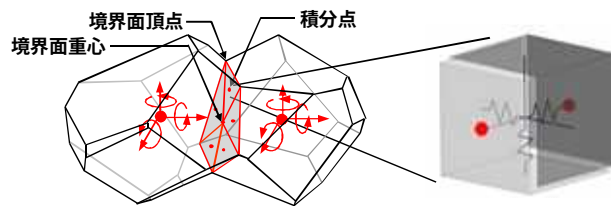


図-1 剛体要素の自由度と要素境界上の積分点

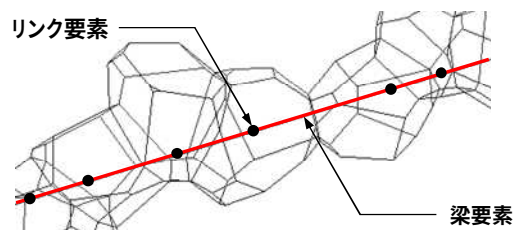


図-2 離散補強鋼材モデル

2. 解析手法

本研究では、著者ら¹⁾が提案している準微視的な力学挙動を仮定しモデル化した、Voronoi分割を用いたランダムな要素形状を有する3次元RBSMを適用した。図-1に示すように、各要素内の任意点(本研究では要素重心)に6自由度の3次元剛体変位を設定し、要素境界面上には、表面力の評価点としての積分点を設定する。積分点には、境界面法線方向および接線方向に、垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系を配置する。コンクリートの力学挙動は、垂直バネに圧縮・引張挙動、せん断バネにせん断すべり挙動をモデル化することで表現する。構成モデルおよび材料パラメータの詳細は参考文献1)を参照されたい。本解析モデルは、1軸圧縮軟化・局所化挙動、非線形体積膨張挙動、拘束圧依存性挙動等、コンクリートの複雑な非線形力学応答を定量的に再現できるところに特徴がある。また、衝撃荷重下においては、コンクリートのひずみ速度効果の影響が大きくなる。本研究では、既往の高速1軸引張、高速1軸圧縮、高速3軸圧縮実験を対象として解析を行い、解析により得られる応答値と、既往の実験で得られている応答を比較することによりキャリブレーションして決定したひずみ速度依存性モデルを各

キーワード 3次元RBSM, PC梁, 衝撃, せん断破壊

連絡先 〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 TEL046-841-3810 E-mail: yyama@nda.ac.jp

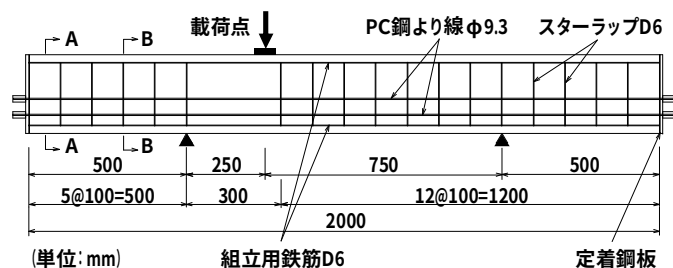


図-3 供試体形状寸法(a/d=1.5)

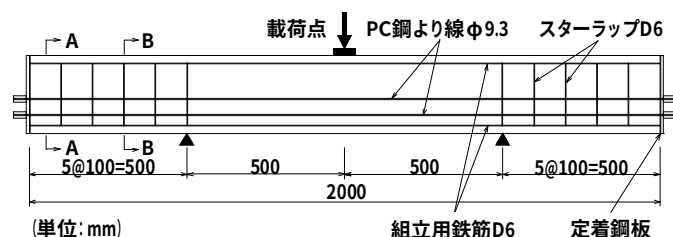


図-4 供試体形状寸法(a/d=3.0)

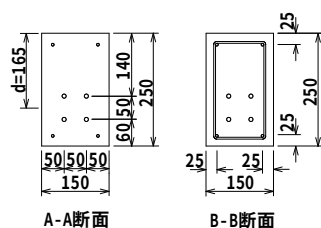


図-5 供試体断面寸法

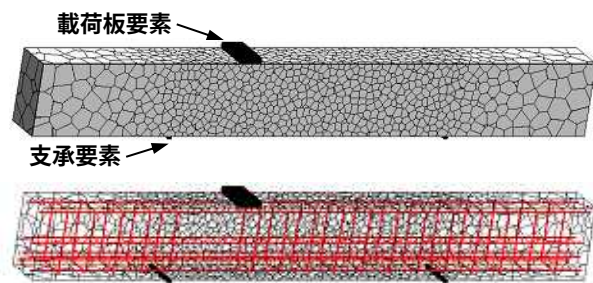
パネの構成モデルに導入した。

PC鋼より線および鉄筋は、梁要素としてモデル化した²⁾。梁要素は、リンク要素を介してコンクリート剛体要素に結合される(図-2)。リンク要素に非線形特性を導入することにより、補強鋼材-コンクリート間の付着特性を表現することができる。PC鋼より線の構成モデルにはトリリニア型を、鉄筋の構成モデルにはバイリニア型を用い、補強鋼材-コンクリート間の付着応力-すべり関係には、澤部ら³⁾によって提案されRC部材解析への適用性が確認されているモデルを用いた。

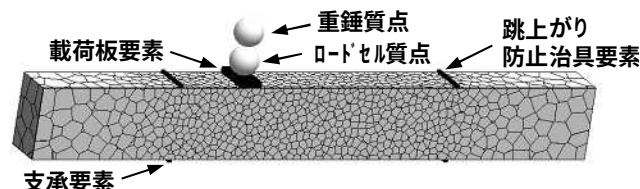
本研究では、衝撃解析に加えて、静的荷重下におけるPC梁の荷重性状に対する提案手法の再現性を検証するために、静的解析も行う。静的解析については、RBSMにより離散化された剛性方程式を解き、材料の構成モデルに従って非線形解析を行う手法を用いた。一方、衝撃解析については、RBSMにより空間的に離散化した上で、運動方程式を中心差分法を用いて解いた。

3. PC梁の静的荷重・重錘落下衝撃実験の概要

図-3,4に実験供試体の形状寸法、図-5に断面寸法およ



(a) 静的荷重, a/d=1.5, 荷重幅75mm



(b) 衝撃荷重, a/d=1.5, 荷重幅75mm

図-6 解析モデル

び表-1に材料諸元を示す。実験パラメータとして、静的荷重下における既往の実験でせん断破壊に与える影響が大きいことが明らかにされている、せん断スパン比(a/d)を設定した。a/dは1.5と3.0の2ケースである。重錘落下衝撃実験は、質量0.3tの鋼製重錘を所定の高さから1回だけ落下させる単一落下方式とした。また、PC梁供試体の静的耐荷性状を把握するために、衝撃による損傷のないPC梁の静的荷重実験も行った。荷重実験では、荷重点での荷重をロードセルにより、荷重位置における鉛直方向変位を変位計により計測した。

4. 静的荷重解析

4.1 解析概要

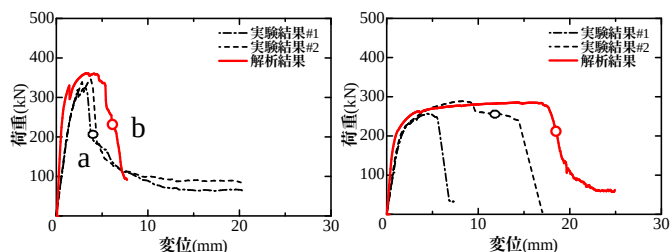
静的荷重下におけるPC梁のせん断破壊性状に対する再現性を検証するために、上記の静的荷重実験を対象として解析を行った。図-6(a)に解析モデルを示す。計算負荷を軽くするために、せん断スパンの外側では、要素寸法が大きくなるように設定した。供試体上面および支承部には荷重版要素を配置し、上面の荷重版要素を変位制御することにより荷重解析を行った。

4.2 解析結果と実験結果の比較

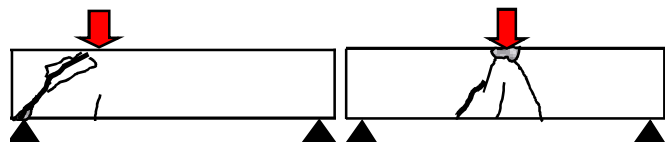
図-7に解析により得られた荷重-変位関係の一例を示す。同図には実験結果も併せて示している。図より、解析は、実験の最大荷重および変形性能を概ね再現できていることが分かる。図-8に、図-7中のa,b点において観察

表-1 材料諸元

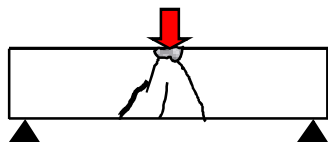
材料名	項目	数値
コンクリート	荷重実験時の圧縮強度(N/mm ²)	74.9
PC鋼より線(SWPR7AN)	0.2%永久伸び強度(N/mm ²)	1337
スターラップ組立用鉄筋(D6鉄筋(SD295))	降伏強度(N/mm ²)	355



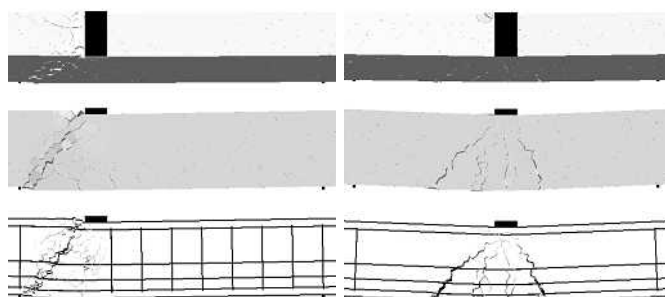
(a) $a/d=1.5$ (b) $a/d=3.0$
 載荷幅75mm 載荷幅75mm
 図-7 静的載荷における荷重—変位関係
 (実験と解析)



(a) 実験 (a点)



(c) 実験 (c点)

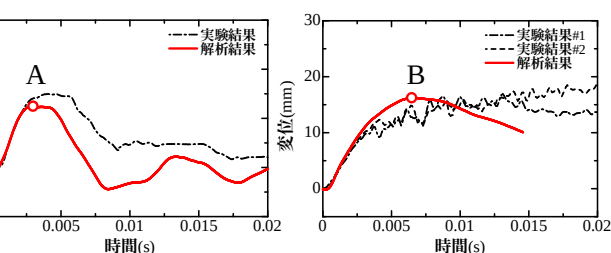
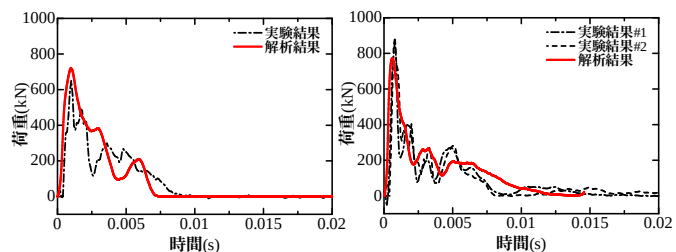


(b) 解析 (b点)

(d) 解析 (d点)

図-8 静的載荷における供試体の破壊性状
 (実験と解析)

されたPC梁の損傷状況のスケッチ、および同図中のc,d点における変形図・供試体内部のひび割れ図の一例を示す。実験は、同条件で2体ずつ行った。その結果、 $a/d=1.5$ のケースでは、2体とも斜めひび割れ発生後に載荷板近傍が圧壊して終局に至るせん断圧縮破壊挙動を示した。一方、 $a/d=3.0$ のケースでは、1つは、曲げひび割れの進展およびPC鋼線の降伏を経て圧縮縁の圧壊により破壊に至る曲げ破壊型の挙動を、もう1つは、斜めひび割れ発生後、急激に荷重が低下して終局に至る斜め引張破壊型の挙動を示した。図より、解析は離散的に生じるひび割れ性状を再現しており、さらに破壊モードは、 $a/d=1.5$ がせん断圧縮破壊型を、 $a/d=3.0$ が2通りの実験結果の内、曲げ破壊型を再現しており、実験で観察されたせん断スパン比により変化する破壊モードを良好に再現できていることが確認できる。



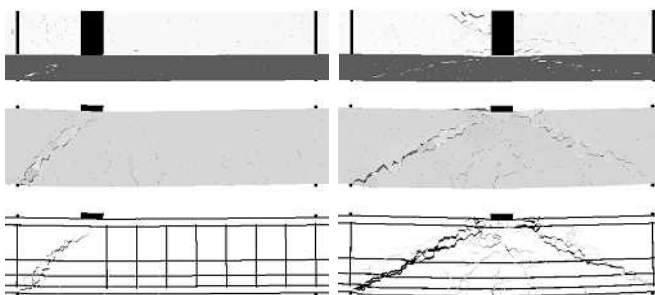
(a) $a/d=1.5$ (b) $a/d=3.0$
 載荷幅75mm 載荷幅75mm
 落下高さ1.0m 落下高さ1.8m

図-9 衝撃載荷における荷重—時間、
 変位—時間関係 (実験と解析)



(a) 実験 (終了時)

(c) 実験 (終了時)



(b) 解析 (A点)

(d) 解析 (B点)

図-10 衝撃載荷における供試体の破壊性状
 (実験と解析)

5. 重錘落下衝撃解析

5.1 解析概要

図-6(b)に解析モデルを示す。実験では重錘による衝撃力の計測のため、衝突点に載荷板に加えてロードセルを挿入している。よって解析では、重錘とロードセルを2質点バネモデルによりモデル化したものを追加した。重錘要素とロードセル要素の間は、Hertzの接触理論に基づく非線形バネを、ロードセル要素と載荷板要素の間は、ロードセルと載荷板の剛性を導入したバネを設定した。

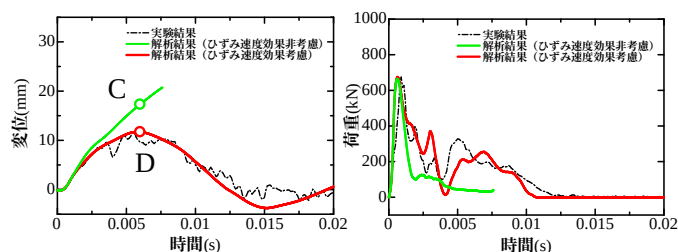


図-11 ひずみ速度効果の影響

(a/d=3.0, 載荷幅75mm, 落下高さ1.4m)

衝撃解析は、重錘落下高さに応じた衝突速度を重錘要素に初期速度として与えることで解析を行った。

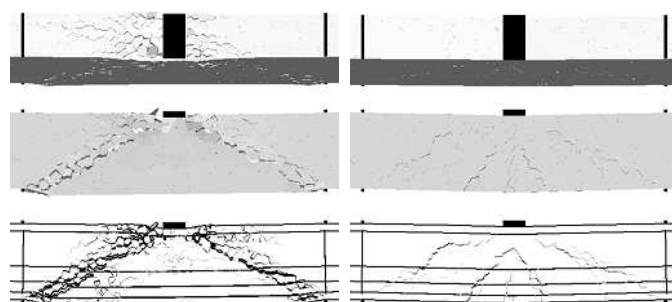
5.2 解析結果と実験結果の比較

図-9に、衝撃実験および解析によって得られた荷重—時間関係および変位—時間関係の一例を示す。解析は、実験の荷重および変位の時刻歴応答を概ね再現できていることが確認できる。図-10に、同実験後の供試体損傷状況および図-9中のA,B点における変形図・ひび割れ図の一例を示す。解析は、実験で観察されたひび割れ性状を概ね再現できている。また、実験では、 $a/d=3.0$ のケースにおいて、静的実験では曲げ破壊型の挙動を示していたのに対し、衝撃実験では破壊モードがせん断破壊型に変化した。解析はこの性状も再現できている。

5.3 破壊性状に及ぼすひずみ速度効果の影響

ひずみ速度効果を無視した時のPC梁の耐衝撃性状に及ぼす影響について検証した。解析対象は、実験において損傷は生じるものの完全には破壊に至っていない、 $a/d=3.0$ ・載荷幅75mm・落下高さ1.4mのケースである。

図-11に変位—時間関係および荷重—時間関係を示す。同図中には、実験結果と、ひずみ速度効果を考慮していない解析結果、およびひずみ速度効果を考慮した解析結果を示している。変位—時間関係に着目すると、ひずみ速度効果を考慮したケースでは、PC梁は復元力を有していることが確認できるが、ひずみ速度効果を考慮しないケースでは、変位が増大し続けていることが確認できる。荷重—時間関係では、最大荷重までの時刻歴応答は両ケースともほぼ同じであるが、その後、ひずみ速度効果を考慮したケースでは、最大荷重を迎えた後もPC梁が復元力を有しているため、荷重が再び上昇しているのに対し、ひずみ速度効果を考慮しないケースでは、最大荷重を迎えた後にPC梁が復元力を消失したため、荷重が急激に低下していることがわかる。



(a) 解析 (C点時)

(b) 解析 (D点時)

図-12 衝撃载荷における供試体の破壊性状

図-12に、図-11中のC,D点における変形図・ひび割れ図を示す。図より、ひずみ速度効果を考慮していないケースでは、実験およびひずみ速度効果を考慮したケースにおいて観察されなかった載荷板近傍部における圧壊が、確認された。以上のことより、対象実験の範囲内においては、ひずみ速度効果の影響が大きいことが分かる。

6. まとめ

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) RBSMを用いたPC梁の衝撃破壊解析手法を開発した。本手法は、静的荷重下および衝撃荷重下において実験から得られたPC梁の耐荷性状、ひび割れ進展性状および破壊モードを概ね再現することができる。
- (2) 対象実験の範囲内においては、コンクリートのひずみ速度効果の影響が大きく、PC梁の衝撃せん断破壊挙動を定量的に評価するためには、ひずみ速度効果を適切に評価する必要がある。

参考文献

- 1) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明: 3次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp. 612-630, 2008.
- 2) Saito, S. and Hikosaka, H.: Numerical analysis of reinforced concrete structures using spring network model, *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements*, Japan Society of Civil Engineers, No.627 V-44, pp. 289-303, 1999.
- 3) 澤部純浩, 上田尚史, 中村光, 国枝稔: せん断補強筋に鉄筋不良が生じた RC はりのせん断破壊挙動解析, 土木学会論文集, Vol.62, No.2, pp. 444-461, 2006.