

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289139

研究課題名(和文) コンクリート構造の衝撃的脆性破壊に対する性能照査

研究課題名(英文) Performance assessment study on the brittle impact failure of concrete structural members

研究代表者

園田 佳巨 (SONODA, YOSHIMI)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40304737

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、コンクリート構造部材の衝撃的な脆性破壊を防止するため、衝撃実験と数値解析で基礎的な検討を行ったもので、衝突物の貫通を例に挙げると、衝突速度が臨界値を超えると破壊モードの遷移が生じ、貫通時に消費する運動量(力積)は、それ以前の速度の衝突物が有する運動量を大きく下回ることなどが認められた。

また、衝撃的な脆性破壊の評価手法として粒子法による数値解析が有効であることを実験の再現解析で確認した。

研究成果の概要(英文)：This study presents a fundamental investigation on the brittle failure of concrete structural member under the impact load using impact test and numerical analysis. It is found that energy requirements of brittle impact failure is lower than that of quasi static failure due to the transition of failure mode. In addition, this phenomenon regarding the failure mode transition is very sensitive to the variations of impact velocity. Thus, it is needed to apply accurate analysis with adequate dynamic constitutive law of concrete and predict the failure behavior. In this research, we used SPH method and orthotropic constitutive equation based on damage theory with Drucker-Prager model. According to the analysis results, the above method could simulate various brittle impact failure such as pull-out failure of anchor bolt, penetration and spall failure. Furthermore, the effect of several strengthening method for impact failure are evaluated by experimental approach and numerical simulation.

研究分野：構造工学

キーワード：コンクリート部材 衝撃実験 衝撃解析 脆性破壊 貫通 粒子法

## 1. 研究開始当初の背景

(1)自然災害が多い我が国においては、ハード・ソフト両面の防災計画が不可欠であり、重要公共構造物には災害時に人命を確実に守れる十分な耐荷性能が必要とされる。本研究は、自然災害で起こりうる衝撃的な荷重に対して、コンクリート構造物の安全性を確保するためには知見が不足している。具体的には、直下型地震のパルス的な荷重に対する構造物の脆性的な破壊だけでなく、竜巻や高層建物からの落下物、あるいは危険物貯蔵施設の爆発事故などで生じる飛散物の衝突・貫通破壊などへの耐荷性能も把握しておくことが期待されるが、これらに対する検討は殆どなされていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、上記の背景を踏まえて、特に知見が不足している部材接合部の破壊、版構造の貫通破壊に着目し、実験・解析の両面から基礎的な考察を行った。具体的には、材料のひずみ速度効果、動的破壊靱性、ひび割れ進展経路を調査し、それらを考慮した解析手法を開発し、その定量的な精度を検証した上で構造物が致命的な破壊に至らないための耐衝撃性能設計を提案する。

## 3. 研究の方法

### (1)コンクリート版の貫通阻止性能

自然災害で想定される衝突物（最大速度 10～50m/s 程度）に対するコンクリート版の貫入抵抗について飛翔体の衝突実験により定量的に調査した。具体的には、板厚 18cm のプレーンコンクリート板と RC 版に質量 8.3kg の鋼製飛翔体を衝突させて、コンクリート版の貫通阻止能力を調査した。また、SPH を用いた数値計算により、コンクリート版の衝撃的脆性破壊の再現解析を行った。

### (2)部材接合部の耐荷性能

代表的な接合形式として、ボルト接合と孔あき鋼板ジベル接合を対象に載荷速度やボルト・ジベルの埋め込み深さ等の条件が破壊モードや限界耐力に与える影響を検討した。

#### a)アンカーボルトの引抜き耐力

アンカーボルトの引抜き解析および実験を行い、埋め込み深さ ( $h/d = 2 \sim 10$ ,  $h$ : 埋め込み深さ,  $d$ : ボルト直径) が破壊モードや最大耐力に与える影響を考察し、以下の結果が得られた。

#### b)孔あき鋼板ジベルの耐荷力

弾塑性有限要素法を用いた孔あき鋼板ジベル (PBL) の押抜きせん断解析を実施し、PBL の耐荷力に対する孔の配置条件に関する影響について検討した。既往の研究では、孔の配置条件が PBL の耐荷性能に与える影響に関する検討は十分に行われていない。そこで、PBL 内部の応力状態を把握可能な数値解析を用いて、載荷方向に対する孔の配列角度や孔間距離、コンクリート自由端からの孔までの縁端距離の 3 つの孔に関する配置条件が与える影響について検討を行った。

## 4. 研究成果

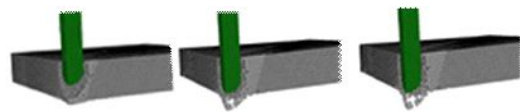
### (1)コンクリート版の貫通阻止性能

無筋コンクリート板に対する衝撃実験で衝突速度 40m/s～43m/s で裏面剥離および貫通が生じることが確認された。また、裏面剥離および貫通限界の差は小さく、両者のどちらかが発生するか事前に予測することは困難であることがわかった。

RC 版と無筋コンクリート板を比較した結果、RC 版では破壊が抑制されるが鉄筋比 0.7%～1.4%においては、ほぼ同等の破壊性状を示すことがわかった。

飛翔体の衝突荷重、コンクリート版の支点反力およびひずみ応答の時刻歴の比較から、中速度衝突を受けるコンクリート板は局所的な損傷が進行した後に全体的な破壊の一つである押し抜きせん断に類似した破壊性状を示すことがわかった。

SPH 法を用いた衝撃解析に、コンクリートの圧潰基準と引張破壊による異方性構成則を取り入れることで、飛来物の衝突によるコンクリート版への貫入・貫通現象が再現できることを確認した。

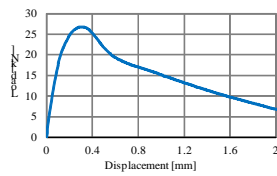
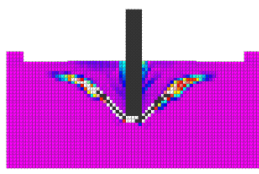


SPH 法による飛来物の貫入・貫通解析

### (2) 部材接合部の耐荷性能

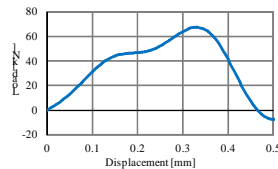
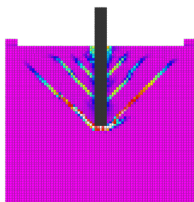
#### a)アンカーボルトの引抜き耐力

$h/d = 2 \sim 4$  程度の埋め込み深さが浅い場合には、コンクリート母材にコーン破壊が生じ、引抜き耐力は、ずれ変位が 0.3mm 程度の載荷初期に最大の耐力を示した後に単調に減少することが認められた。



破壊モード 引抜き荷重 - ずれ変位関係  
浅い埋め込みの場合

$h/d = 5 \sim 7$  の埋め込み深さが中程度の場合には、引抜き耐力は浅い埋め込み深さの場合には見られない増減を繰り返す挙動が確認された。これは、埋め込み深さの中間を起点とした複数の引張破壊面が生じ、個々の破壊前後の負荷と除荷が生じる時期に相違があるためと考えられる。破壊モードに関しては、荷重初期にはコーン破壊が先行するが、ずれ変位の増加とともに破壊モードが変化し、複数のコーン破壊面の形成・進展によって引抜き耐力にも複数のピークを示す複雑な挙動が生じることが認められた。



破壊モード 引抜き荷重 - ずれ変位関係  
中程度の埋め込み深さの場合

$h/d = 8 \sim 10$  の埋め込み深さが深い場合には、コンクリート母材に生じる変位が小さくなりボルト破断が生じる。そのため、最大引抜き耐力はボルトの引張強さに断面積を乗じた値と概ね同じであることが確認された。

なお、荷重速度の影響として引抜き速度を大きくするにつれて、上記の埋め込み深さの区分がより大きい（深い）方向にシフトすることが確認された。

#### b) 孔あき鋼板ジベルの耐荷力

PBLの押抜きせん断挙動に関しては、ずれ変位が5mm程度までは有限要素解析でも再現可能で、降伏せん断耐力を定量的に評価でき

ることが確認できた。

荷重方向にジベル孔数を変えた場合には、孔数の増加とともに母材コンクリートが破壊する可能性が高くなることが分かった。

孔の配列角度が耐荷性に与える影響について検討した結果、荷重方向に直交してジベル孔を配置させた場合に最も大きな耐荷力が得られることを確認した。

孔の配列角度を変えた解析で、各孔のせん断力の分担割合を比較すると、 $\theta = 0$  と  $\theta = 45$  のケースでは荷重初期は上段、中段、下段の順に高いことが確認できた。一方、 $\theta = 90$  のケースでは各孔のせん断力の分担割合はほぼ等しい結果が得られた。

コンクリートのかぶり（鋼板幅方向）の影響については、孔径と同程度までかぶり厚を小さく設定するとせん断剛性が顕著に低下することが認められた。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

宗本 理・園田佳巨・輿石正巳：3次元弾塑性FEMを用いた孔あき鋼板ジベルの耐力評価に関する一考察，第35回コンクリート工学年次大会論文集，Vol.35A，pp.1243-1248，2013

S. Cheon, M. Beppu, Y. Sonoda: Numerical study on the dynamic behavior of ultra high strength fiber reinforced concrete under rapid loading, 土木構造・材料論文集，第29巻，pp.83-90, 2013

合屋智史, 玉井宏樹, 園田佳巨: 大型車両の衝突を受けたPC桁の損傷度評価に関する解析的考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.709-714, 2013

清成康平, 宗本 理, ハリヤディ, 園田佳巨: SPH 法を用いた動的引抜き荷重を受けるアンカーボルトの耐荷性能に関する研究, 第 11 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 2014

宗本理, 園田佳巨: PBL 接合部の耐荷性能評価法に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.838-847, 2014

別府万寿博, 小川敦久, 高橋順: 剛飛翔体の高速衝突を受ける繊維補強セメント系複合材料板の耐衝撃性能, 土木学会論文集 EX (材料・コンクリート構造) Vol.70, No.2, pp.180 ~ 193, 2014

Hiroki Tamai and Yoshimi Sonoda: Evaluation of cumulative damage of RC members under repeated impact loading, Applied Mechanics and Materials, Vol. 784, pp.500-507, 2015

Yoshimi Sonoda: Impact Failure Analysis of RC Beam Using ASPH Method Based on Damage Theory, Applied Mechanics and Materials, Vol.784, pp.258-265, 2015

上野裕稔, 別府万寿博, 小川敦久: 高速衝突を受ける PVA 短繊維補強セメント複合材料板の局部破壊に短繊維混入量が及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.899-911, 2015

片岡新之介, 上野裕稔, 別府万寿博, 市野宏嘉: 剛飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート版の衝撃応答に関する基礎的研究, 構造工学論文集, 62A, pp.1084 ~ 1096, 2016.3

柴田大希, 別府万寿博, 高橋順, 市野宏嘉: 高速衝突を受ける鉄筋モルタル梁の裏面剥離メカニズム, 構造工学論文集, 62A, pp.1111 ~ 1123, 2016.3

〔学会発表〕(計7件)

清成康平, 宗本理, ハリヤディ, 園田佳巨: SPH 法を用いた動的引抜き荷重を受けるアンカーボルトの耐荷性能に関する研究, 第11回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム, 2014.10(土木学会)

Yoshimi Sonoda: A fundamental study on the ultimate pull-out strength of an anchor bolt in concrete structures using SPH, The 5<sup>th</sup> International Workshop on Performance, Protection and Strengthening of Structures under Extreme Loadings, 2015.6 Michigan State University, USA

Yoshimi Sonoda: Impact failure analysis of RC beam using ASPH method based on damage theory, The 2nd International Conference on Damage Mechanics, 2015.7 University of Technology of Troyes, France

柴田大希, 別府万寿博: 高速衝突を受ける鉄筋モルタル梁の局部破壊メカニズムに関する一考察, 土木学会第70回年次学術講演会概要集, 2015.9(岡山大学)

武者浩透, 別府万寿博, 柴田大希, 岡本修一: 中速度衝突を受ける UFC パネルの耐衝撃性に関する実験的研究, 土木学会第70回年次学術講演会概要集, 2015.9(岡山大学)

片岡新之介, 上野裕稔, 別府万寿博: 剛飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート版の衝撃応答に関する実験的研究, 土木学会第70回年次学術講演会概要集, 2015.9(岡山大学)

後藤航, 園田佳巨, 玉井宏樹: 飛来物の高速衝突を受けるコンクリート版の局所破壊の解析的研究, 土木学会西部支部研究発表会, 2016.3(九州産業大学)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

園田佳巨(SONODA YOSHIMI)  
九州大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 40304737

(2) 研究分担者

別府万寿博(BEPPU MASUHIRO)  
防衛大学校・建設環境工学科・教授  
研究者番号: 90532797

(3) 研究分担者

玉井宏樹(TAMAI HIROKI)  
九州大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号: 20509632