

粒子法を用いたアンカーボルト定着部の耐衝撃挙動に関する解析的研究

Analytical study on impact resistance behavior anchor bolts using particle method

藤本耕輔*, 路馳**, 園田佳巨***

Kosuke Fujimoto, Chi Lu, Yoshimi Sonoda

*九州大学, 土木工学専攻(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

**工博, 九州大学, 土木工学専攻(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

***工博, 九州大学教授, 社会基盤部門(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

キーワード: 衝撃解析, アンカーボルト, SPH 法

Keywords: impact analysis, anchor bolts, SPH method

1. 緒言

1.1 本研究の背景

コンクリート躯体に他部材を接合する方法として、アンカーボルトが挙げられる。アンカーボルトは、落橋防止装置や耐震補強部材などをコンクリート構造物に接合する方法として広く用いられている。アンカーボルトで接合された構造物に対し、竜巻や火山噴石などの飛来物の衝突が発生した際、アンカーボルト定着部に大きな損傷が発生し、アンカーボルトの耐力が減少することが考えられる。そのため、アンカーボルトの耐衝撃性能を正確に評価する必要があると考えた。

1.2 本研究の目的

本研究では、コンクリートブロックにアンカーボルトで接合された構造物に対して、アンカーボルトの埋め込み方向に物体が作用した場合を想定し、アンカーボルト定着部の耐衝撃挙動を、粒子法を用いてシミュレーションを行うことを目的としている。具体的には、衝撃作用によるアンカー定着部の破壊形態およびボルトの耐力について、衝突物の衝突速度および衝突箇所による影響について検討を行うこととした。衝撃によるコンクリートブロックの破壊形態について詳細な検討を行うため、本研究では代表的なメッシュフリー法である SPH 法を用いて解析を行い、衝突物の衝撃速度や衝突市がアンカーボルトの耐力及びコンクリートブロックの破壊形態に与える影響について考察を行う。

2. 解析手法

2.1 SPH 法

本研究では、衝撃に対してアンカーボルト定着部の比較的大きな破壊現象を解析するため、隣接する要素間で変位の連続性を仮定する FEM では、取り扱いが困難な

ことが想定される。そのため、本研究では大変形時でも解析精度の低下が少ないメッシュフリー法である SPH 法を採用した。

SPH 法は、図-1に示すように固体を粒子の集合体として離散化し、各粒子の影響範囲内に存在する他の粒子の物理量を用いて、kernel 関数による重み付き平均によって応答を求める手法である。

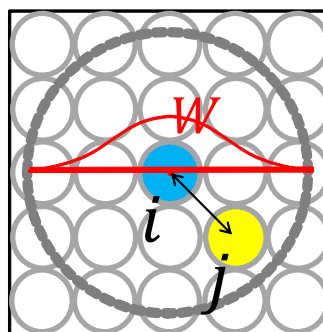


図-1 SPH 粒子による固体の離散化

SPH 法の基礎式を式(1)に示す。ここで、 W : kernel 関数、 h : 影響半径、 $\langle \rangle$: SPH 近似された関数、 Ω : 影響半径内の積分領域、 $x_{i,j}$: ある粒子 i の位置および i の影響半径内の粒子 j の位置である。

$$\langle f(x_i) \rangle = \int_{\Omega} f(x_j) W(x_i - x_j, h) dx_j \quad (1)$$

2.2 付着特性の導入

アンカーボルトとコンクリートブロックの境界面の、コンクリートおよびボルトの付着力を再現するために、隣接するコンクリート粒子とボルト粒子間で付着特性を導入した。

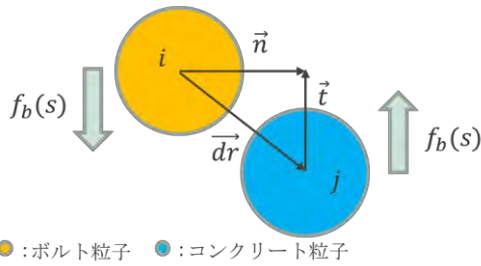


図-2 隣接するコンクリート粒子とボルト粒子

具体的には、図-2に示すように、まず隣接するコンクリート粒子とボルト粒子間の初期位置の方向ベクトル \vec{n} をそれぞれ設定する。次に載荷後のそれぞれの座標から、その時刻の粒子間のベクトル \vec{dr} を求め、式(2)から \vec{n} に対する法線方向のベクトル \vec{t} を求める。

$$\vec{t} = -\vec{dr} + \vec{n} \quad (2)$$

このとき、 \vec{t} 方向の変位を s すると、 $s = |\vec{t}|$ となる。ここで図-3に示す変位-付着応力を用いて、隣接する粒子 i, j 間の付着応力を $\tau_{i,j} = f_b(s)$ とすることで、隣接する粒子間の付着応力を求める。ここで、 τ_{max} ：最大付着応力、 s_{ela} ：は弾性限界における変位、 s_{ult} ：破壊エネルギーと粒子径の関係から決定する付着破壊時の変位である。

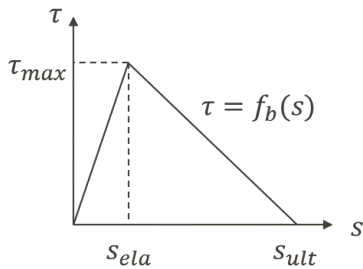


図-3 変位-付着応力関係

(1) 粒子間の付着破壊の判定は、次に示す式(3)を用いて行う。

$$\begin{cases} s \geq s_{ult} & \text{付着破壊} \\ s < s_{ult} & \text{健全} \end{cases} \quad (3)$$

3. 鋼材の力学モデル

本研究では、ボルト材料である鋼材の弾塑性挙動を解析するために、力学モデルとして一般的に用いられている von-Mises の降伏条件を適用し、条件式を式(4)に示す。ここで、 J_2 ：偏差応力の2次不変量、 k ：降伏応力から決まる定数である。

$$f(J_2) = J_2 - k^2 = 0 \quad (4)$$

4. コンクリート材料の力学モデル

一般にコンクリート材料の弾塑性挙動を解析するには、降伏条件として圧縮依存性を考慮できる Drucker-Prager の降伏条件を用いることが多い。しかし、アンカーボルトの挙動によりアンカー定着部のコンクリートに非常に大きな圧縮力が作用することが想定される場合には、コンクリートの圧縮強度を過大評価する可能性が高いことが指摘されている。そこで、本研究では通常の Drucker-Prager の線形の降伏曲面($\sqrt{J_2} - I_1$ 平面包絡線)を非線形に変えた降伏条件式をコンクリートの力学モデルとして適用した。線形および非線形 Drucker-Prager の降伏条件式をそれぞれ以下の式(5)、(6)に示す。

$$f(I_1, J_2) = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - k = 0 \quad (5)$$

$$f(I_1, J_2) = \sqrt{J_2} - \sqrt{\frac{\gamma^2 - \beta I_1}{3}} = 0 \quad (6)$$

ここで、 I_1 ：応力の1次不変量、 J_2 ：偏差応力の2次不変量、 α, k ：材料によって決まる定数、 β, γ ：以下に示す式(7)から求められる定数である。なお式(6)において、 σ_c ：一軸圧縮強度、 σ_t ：一軸引張強度である。

$$\beta = \sigma_c - \sigma_t, \quad \gamma = \sqrt{\sigma_c \sigma_t} \quad (7)$$

図-3に $\sqrt{J_2} - I_1$ 平面における非線形 Drucker-Prager の降伏曲面を示す。この図より、特に高圧縮領域において降伏曲面が緩やかなカーブを描くことから、静水圧が大きくなるにつれて非線形 Drucker-Prager による解析の方がせん断破壊しやすい特徴を有していることが分かる。

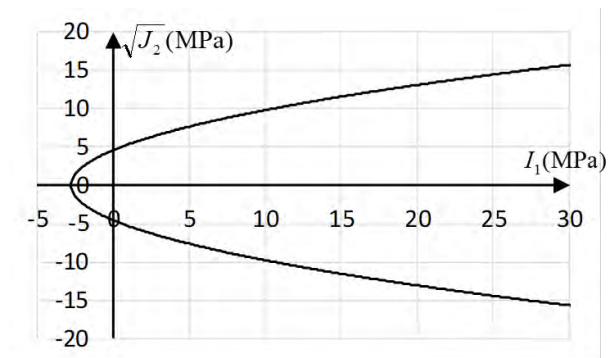


図-4 非線形 Drucker-Prager の降伏曲面

4.1 引張軟化挙動と引張破壊の表現

一般的に、コンクリートの引張側においては、引張強度以降にひずみの増加とともに応力が減少する特性(引張軟化挙動)がある。この特性は、引張強度近傍において微細ひび割れが発生し、その中で最も弱い部分に損傷が

集中して微細ひび割れ領域が形成される。最終的には、大きなひび割れが生じることで、断面が減少し伝達する応力も減少することで発生すると考えられている。

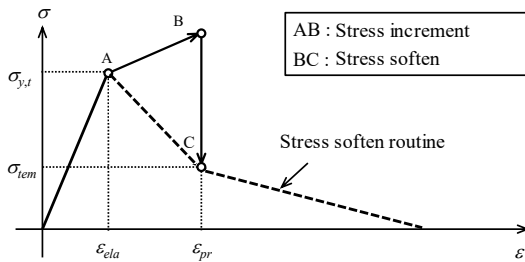


図-5 応力低減の処理

この引張軟化挙動をコンクリートの力学モデルに用いることで、本研究で対象とするアンカーボルトの定着部の破壊を評価することとした。図-5に示すように、引張強度以降の応力-ひずみ関係に関して、増分応力による経路(AB)が想定した引張軟化による経路から外れた場合に応力の低減(BC)を行い、引張軟化を表現した。い、引張軟化を表現した。

5. SPH法によるアンカーボルトの衝撃解析

5.1 解析モデルおよび解析概要

本研究で用いた SPH 法における解析モデルを、図-6に示す。図-6に示す解析モデルは、高さが 100mm、底面積が 300mm×240mm の直方体のコンクリートブロックに対し、上縁に高さ 10mm、幅 10mm のコンクリートブロックを設け、全方向の変位を拘束し、固定支持を設定した。このコンクリートブロックに対し、100mmの間隔で2本のアンカーボルトを、深さ 50mm で埋め込み、丈夫に簡易的な構造物を設置した。図-7に示す解析モデルは、図-6の解析モデルに直径 100mm の鉄球を配置した。本研究の解析モデルでは、鉄球、アンカーボルト、上部構造物は全て鋼材として扱い、鋼材の力学モデルを適用している。本研究では、コンクリートと鋼材は全て直径 3mm の粒子として離散化し、解析を行った。

本研究ではまず、鉄球の設置していない解析モデルに

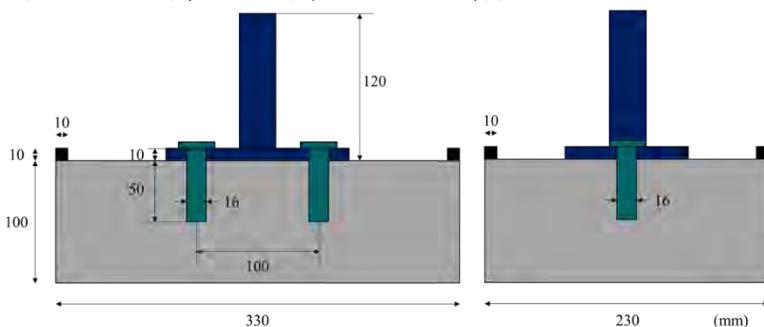


図-6 鉄球なしの解析モデルとアンカー埋め込み状況

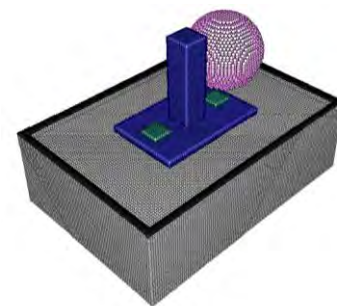


図-7 鉄球を配置した解析モデル(斜視図)

において、上部構造物の上端の粒子に強制的に変位を与え、衝突なしによるアンカーボルトの引き抜き解析を行った。具体的には、上端の粒子に 1.0m/s の速度を与え、モデルの主ひずみ分布からひび割れ状況と、コンクリートブロックがひび割れのない状態でのアンカーボルトの耐力についてまとめる。

さらに、鉄球の衝突後、上部構造物の上端粒子に 1.0m/s の速度で鉛直上向きに強制変位を与えた。引き抜き载荷解析を行い、コンクリートブロックが健全な状態と比較を行い、鉄球の衝突によるアンカーボルトの引き抜き耐力の変化について考察した。

解析に用いた鋼材とコンクリート材料の材料特性を表-1に示す。

表-1 鋼材とコンクリート材料の材料特性

材料名	鋼材	コンクリート
密度(kg/m ³)	7900	2350
ヤング率(kN/mm ²)	209	20.9
圧縮, 降伏強度 (N/mm ²)	400	24.5
引張強度(N/mm ²)	—	2.4
ポアソン比	0.30	0.20

5.2 解析結果

(1) 衝撃荷重を受ける以前の引き抜き耐力・考察

図-8に衝撃荷重が作用しない場合の、引き抜き载荷による主ひずみ分布を示す。一般にコンクリートは 1000μ程度で視認できるひび割れを生じることから、アンカーボルト下端部からコンクリート上部にかけて斜

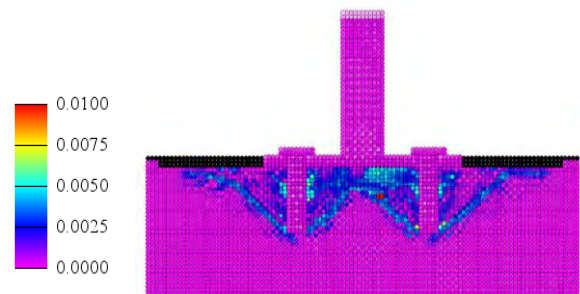


図-8 引き抜き载荷解析結果(主ひずみ分布)

め方向にコーン破壊が発生していることが分かる。この解析により、本来の引き抜き耐力は 53.3kN であることが認められた。

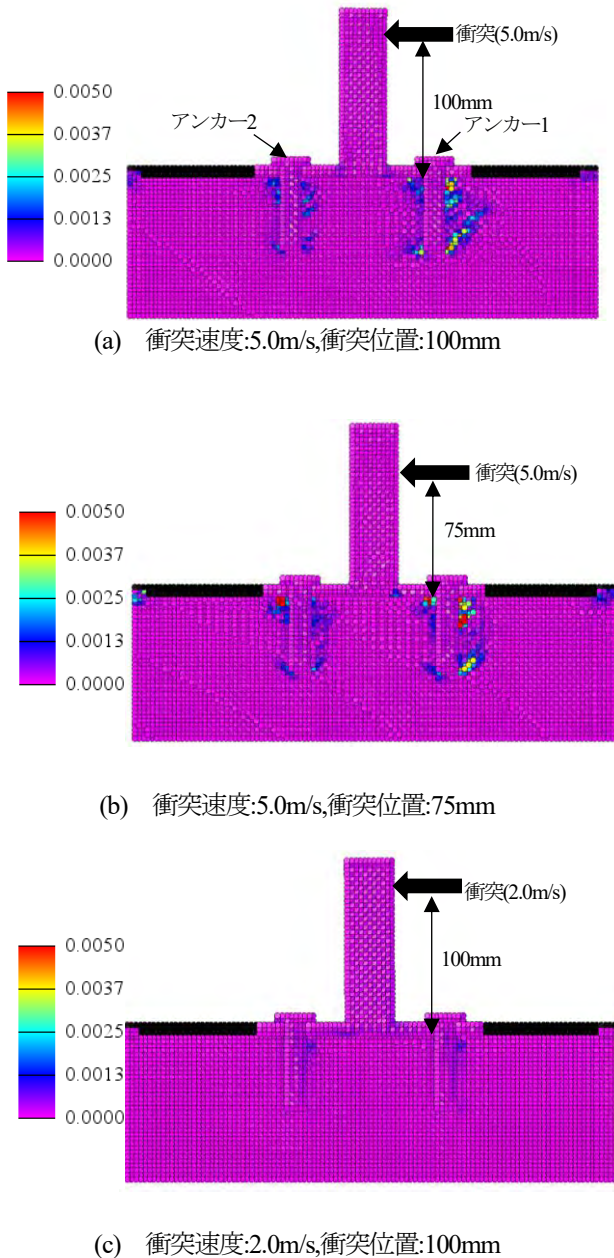


図-9 鉄球の衝突解析における主ひずみ分布

鉄球の衝突速度が 2.0m/s, 5.0m/s, 衝突位置が 100mm, 75mm 計 4 ケースにおいて主ひずみ分布図を図-9 にまとめた。なお図中において鉄球は表示していないが、鉄球の衝突方向は、右から左方向とした。また表-2, 3 にそれぞれのケースにおいて上部構造物からアンカーボルトが受ける鉛直方向と垂直方向の最大荷重についてまとめた。なお、鉛直方向については上向きを、水平方向については左向き(鉄球の衝突方向)を正としている。ここで鉄球側のアンカーボルトをアンカー-1、もう一方をアンカー-2 とした。

主ひずみ分布から、衝突速度が 5.0m/s の 2 ケースに

おいては、鉄球側のアンカー-1 の右側部分にボルト端部から斜め方向に大きなひび割れが見られたが、衝突位置によるひび割れの大きな違いについては見られなかった。衝突速度が 2.0m/s のケースに関しては大きなひび割れは見られなかった。また、鉛直方向の荷重に関しては、衝突位置が高いほど大きな荷重がかかる結果となった。水平方向の荷重に関しては、アンカー-2 の方がアンカー-1 に比べ、20~40%程度大きな荷重がかかったことが確認できた。また、図-10 に衝突位置が 100mm, 鉄球の衝突速度が 5.0m/s のケースにおいて、衝突後の時間と、それぞれのアンカーに作用する水平方向と鉛直方向の荷重関係をまとめた。

表-2 ボルトに作用する鉛直方向最大荷重

衝突速度 (m/s)	衝突位置 (mm)	最大荷重(kN)	
		アンカー-1 (上向き正)	アンカー-2 (下向き正)
5.0	100	22.5	0.683
5.0	75	18.8	0.001
2.0	100	6.8	0.007

表-3 ボルトに作用する水平方向最大荷重

衝突速度 (m/s)	衝突位置 (mm)	最大荷重(kN)	
		アンカー-1	アンカー-2
5.0	100	10.8	15.4
5.0	75	13.0	16.3
2.0	100	4.8	5.9

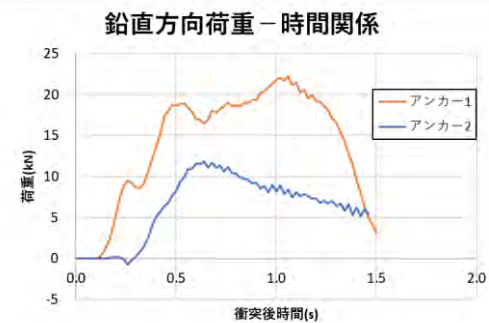
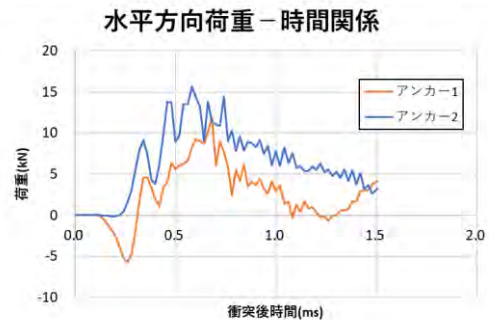


図-10 衝突後時間-荷重関係

(3) 衝突後の引き抜き解析

鉄球の衝突速度を 5.0m/s、衝突位置を 100mm とした解析モデルにおいて、鉄球の衝突後、上部構造物の上端粒子において、強制変位による引き抜き载荷解析を行い、衝突無しの場合との比較を行った。図-11 に引き抜き载荷後の解析モデルの主ひずみ分布図を示す。また、この载荷解析において上部構造物の上端には最大 41.6kN の荷重が発生し、衝突無しの解析結果に比べ、最大荷重が 10kN 程度減少した。

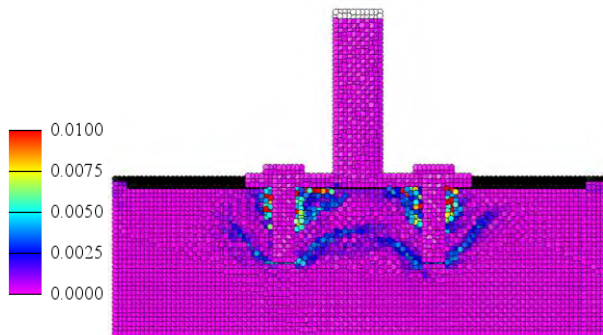


図-11 鉄球衝突後の引き抜き解析結果
主ひずみ分布

6. 結論

本研究は、アンカーボルトでコンクリートブロックに接合された構造物において、衝撃によるアンカーボルトの定着部の破壊現象を表現するための解析手法を提示し、解析で得られた挙動について示した。本研究の成果を以下に要約する。

- (1) SPH 法を用いて、アンカーボルトの耐衝撃挙動のシミュレーションを行い、解析の手法を提示した。
- (2) 衝撃に対するアンカーボルト定着部のコンクリート破壊現象についてまとめ、衝突側のアンカーボルトがより大きな鉛直方向の荷重を受け、引き抜き载荷のようなコーン破壊のひび割れに近い破壊を起こすことが確認された。

- (3) 鉄球の衝突位置により、衝突側のアンカーボルトがモーメントの影響で鉛直方向の荷重に相違が生じた。
- (4) 全ケースにおいて、衝突側のアンカーボルトより、もう一方のアンカーボルトに 20~40%程度大きな水平荷重が発生した。
- (5) 鉄球の衝突により、本研究の解析モデルにおいては、アンカーボルトの引き抜き耐力が 10kN 程度減少した。

参考文献

- 1) 園田佳巨，後藤航：SPH 法を用いたコンクリート版の衝撃貫通破壊に関する基礎的研究，構造工学論文集 Vol.63A，pp.1141-1148，2017
- 2) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用，土木学会構造工学シリーズ 15，pp.73-93，2004.
- 3) 三輪幸治，別府万寿博，大野友則，片山雅英：剛飛翔体の高速衝突を受けて生じるコンクリート板の局部破壊に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.2140，2006.7
- 4) 三輪幸治：剛飛翔体の高速衝突を受けて生じるコンクリート板の裏面剥離の発生メカニズムと耐衝撃補強に関する研究，防衛大学校博士論文，2010
- 5) 三上敬司：衝撃荷重を受けるコンクリート床板の降伏条件における影響，第 8 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp.93-96，2006
- 6) 別府万寿博，園田佳巨，玉井宏樹：粒子法による鋼および RC はりの弾塑性衝撃応答解析に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.52A，pp.1179-1188，2006
- 7) 別府万寿博，園田佳巨，玉井宏樹：粒子法によるコンクリートおよび RC はりの非線形解析に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.2010，2006
- 8) 藤掛一典：高ひずみ速度下におけるコンクリートの引張・圧縮特性に関する研究，筑波大学博士学位論文，1999