

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

A study on the bearing capacity of anchor bolt system under dynamic pull-out loading by SPH method

清成康平*, 宗本理**, ハリヤディ***, 園田佳巨****
Kohei Kiyonari, Satoru Munemoto, Hariyadi, Yoshimi Sonoda


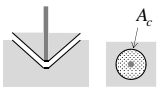

- * 九州大学大学院修士課程学生, 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)
- ** 博(工), 九州大学学術研究員, 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)
- *** 九州大学大学院博士課程学生, 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)
- **** 工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

Key Words: dynamic load, anchor bolt system, SPH method
キーワード: 動的荷重, アンカーボルト, SPH 法

1. 緒言

コンクリート躯体に落橋防止装置などの部材を取り付ける手段として、アンカーボルトが土木、建築分野においては広く用いられている。引抜き荷重を受けるアンカーボルトの破壊形態は、ボルトの破断と母材側のコンクリート本体の破壊に分類される。図-1 にアンカーボルトを設計する際に想定される破壊モードと、それぞれの破壊モードにおける引抜き耐力の算定式を示す。設計においては、図-1 に示す各破壊モードの引抜き耐力を比較し、最も小さい耐力の破壊モードが先行して破壊に至ると想定しているが、一般に脆性的な破壊が懸念されるコーン破壊を防ぎ、ボルトが破断するまでの耐荷力を保証できるような埋め込み深さで設計が行われている。しかし、現状の設計では、図-2 に示すような複合破壊の可能性や材料強度の速度依存性について考慮されおらず、実際の引抜き荷重を受けるアンカーボルトに発生する破壊性状²⁾に関して十分に検証されていない。したがって、これらの要因を考慮し、現状の設計手法に替わる新しいアンカーボルトの終局引抜き耐力の評価手法は重要であると考えられる。

著者らは、アンカーボルトの耐荷性能へ影響を与える要因として、ボルトの幾何学的な条件やコンクリートおよびボルトの材料特性、載荷速度など数多く存在することから、解析的なアプローチで基礎的な考察を行うこととし、そのための解析手法として固体材料の破壊・分離を容易にモデル化できる SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を適用した。

ボルト破断 T_{a1}	コーン破壊 T_{a2}	付着破壊 T_{a3}
		
$T_{a1} = \sigma_y a_0$	$T_{a2} = 0.23 \sqrt{\sigma_B} A_c$	$T_{a3} = \tau_a \pi d_a l_e$ $\tau_a = 10 \sqrt{\sigma_B / 21}$

σ_y : ボルトの降伏強度 a_0 : ボルトの公称断面積 σ_B : コンクリートの圧縮強度
 A_c : 有効水平投影面積 d_a : ボルトの直径 l_e : ボルトの有効埋め込み長さ

図-1 設計で想定する破壊モードと耐力算定式¹⁾



図-2 コーン破壊と付着破壊の複合破壊

具体的には、SPH 法にコンクリートの破壊やボルト破断を表現した力学モデルを導入し、コンクリート母材のコーン破壊やアンカーボルトの破断などの異なる破壊モードに対する耐荷力について、解析結果と設計荷重を比較することで、本手法の妥当性や適用性について検討した。また、ひずみ速度効果を導入した材料モデルを用いて載荷速度をパラメータとした引抜き解析を行い、載荷速度がアンカーボルトの引抜き耐力や破壊モードへ与える影響について考察した。

2. SPH 法によるアンカーボルトの引抜き解析

2.1 SPH 法の概要

SPH 法は、図-3 に示すように解析対象を有限個の粒子で離散化し、運動量保存則やエネルギー保存則などの偏微分方程式を次式に示す Kernel 積分式に基づいて近似する手法である。

$$f(x) \approx \int_{\Omega} f(x') W(x-x', h) dx' \quad (1)$$

ここで、式中の x は評価対象の粒子座標、 x' は影響領域内の他粒子の座標である。また、 $f(x)$ は評価対象粒子の物理量、 h は smoothing length であり、kernel 関数 $W(x-x', h)$ の影響領域 Ω を定義している。

SPH 法において kernel 関数として使用する関数には、Unity 条件やデルタ関数的な特徴などの幾つかの条件³⁾が課される。本研究では、これらを満たす次式の 3 次のスプライン関数を kernel 関数として用いた (図-4)。

$$W(R, h) = a_d \begin{cases} 2/3 - R^2 + (1/2)R^3 & 0 \leq R < 1 \\ (1/6)(2-R)^3 & 1 \leq R < 2 \\ 0 & R \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 R は smoothing length を基準とした評価対象粒子と他の粒子間距離を用いて、 $|x-x'|/h$ で表される。また、 a_d は 3 次 spline 関数を kernel 関数として使用するための係数であり、解析モデルの次元によって次式のように表される。

$$a_d = \begin{cases} 1/h & 1-D \\ 15/7\pi h^2 & 2-D \\ 3/2\pi h^3 & 3-D \end{cases} \quad (3)$$

2.2 アンカーボルトの引抜き解析の概要

ここでは、コンクリート母材の破壊やボルト破断を表現するために導入した力学モデルやアンカーボルトの引抜き解析で用いた解析モデルについて述べる。

(1) コンクリートの力学モデル

コンクリートの材料特性には、拘束圧による材料強度の変化を表現するために Drucker-Prager の降伏条件を用いた。なお、Drucker-Prager の降伏曲面の引張側領域においては、コンクリートの引張強度を下限とする平面キャップを設けることにした。コンクリートのコーン破壊は、基本的に主応力面上の引張破壊によって生じることを想定した上で、過度な局所破壊を防止するためにコンクリートの引張軟化モデルを導入することで表現した。

本研究では、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。以下にコンクリートの引張軟化に基づく応力低減の計算フローを示す。

a) 各粒子の応力およびひずみテンソルの主値と主方向

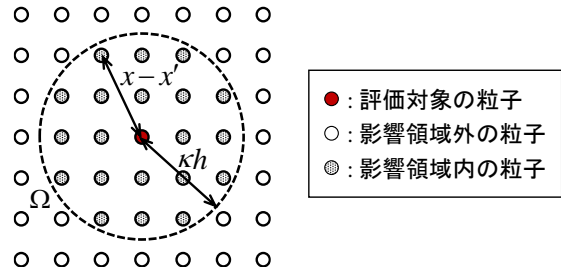


図-3 SPH 法における粒子による離散化

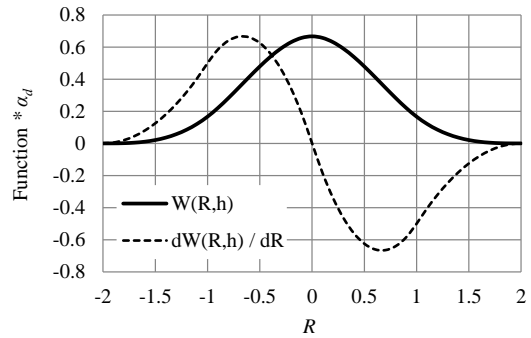


図-4 3 次 spline 関数

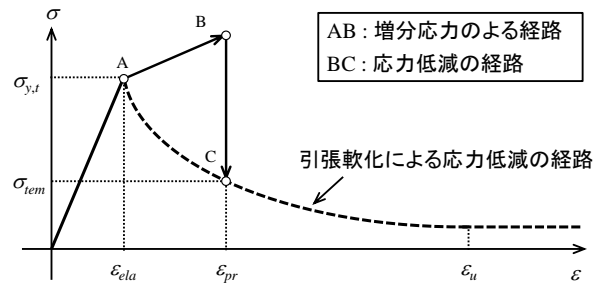


図-5 応力低減の処理

を計算する。

b) 想定した引張軟化の応力-ひずみ関係を超える主応力 (引張強度時のひずみと主ひずみの比較で判定) が生じた場合には、式(4)を用いて引張軟化を考慮した仮の主応力値 σ_{tem} を求め、代入することで想定した経路上に修正する。

$$\begin{cases} \sigma_{tem} = \sigma_{y,t} \times (1 - \sqrt{(\epsilon_{pr} - \epsilon_{ela}) / \epsilon_u}) & (\epsilon_{pr} - \epsilon_{ela}) < \epsilon_u \\ \sigma_{tem} = \sigma_{y,t} \times 0.0001 & (\epsilon_{pr} - \epsilon_{ela}) \geq \epsilon_u \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_{y,t}$ はコンクリートの引張強度、 ϵ_{ela} は引張強度に達した時のひずみ、 ϵ_u は引張限界ひずみでコンクリートの破壊エネルギーと粒子直径から決定した。式(4)中の $\sigma_{y,t}$ に乗じる項は引張応力の低減勾配を表している。

c) 修正した主応力を全体座標系の応力成分に変換する。
現実のコンクリートでは、ひび割れを跨いだ力の伝達は殆どないと考えられるが、SPH 法の計算においては影響範囲内では、ひび割れ相当のひずみを有する粒子も健全な粒子との間で力の伝達を行うため、残存強度を

過大評価する可能性がある。そこで、本研究では最大主ひずみに閾値 ϵ_{max} を設け、閾値以上のひずみが生じた粒子は全応力成分をゼロにするカットオフ処理を行った。

(2) ボルトの力学モデル

ボルトの材料特性として、鋼材に一般的に用いられる von Mises の降伏条件を適用し、バイリニア形の等方硬化モデルを用いた。ボルトの破断に関する取り扱いには、コンクリートのカットオフ処理と同様の考えを適用した。具体的には、ボルトの破断面を跨いで粒子同士が力の伝達を行うことを防ぐために、ボルトの相当塑性ひずみに閾値を設け、閾値に達した粒子にカットオフ処理を行った。

(3) 解析モデル

図-6 に解析モデルを示す。解析モデルは、コンクリートブロックの中央に直径 d が12 [mm] のボルトを所定の埋め込み深さ h で設置したものを用いた。また、図中の k はコンクリート表面上で、部材中央（ボルト位置）からコンクリート母材に鉛直固定の境界条件を与えた領域までの距離を決めるパラメータである。解析モデルは直径3 [mm] の粒子を用いて離散化した。引抜き荷重に関しては、ボルトの上端から3層までの粒子に強制変位（一定速度）を与え続けることで間接的な荷重を行った。なお、強制変位として与えた速度は0.5 [m/s] である。変位拘束の境界条件には、図-6 に示すコンクリート表面の四隅に鉛直方向に固定する領域を設けた。したがって、計算で得られる引抜き耐力は、鉛直固定した粒子に生じる鉛直方向の応力に粒子自体の断面積を乗じた値を総和することで求めた。なお、引抜き耐力の計算に用いるコンクリート粒子に関しては、解析領域の境界に位置し、影響範囲に欠損が生じるために、重み付けの不足が想定される。この問題を解決するために、本解析では図-7 のように変位を完全拘束されたダミー粒子を追加した。なお、コンクリートとボルト間の付着特性については、完全付着を仮定している。図-8 に本研究で用いたコンクリートおよびボルトの単軸応力換算の応力-ひずみ関係を示している。

3. 解析結果および考察

3.1 埋め込み深さに着目した引抜き解析

ここでは、埋め込み深さの異なるアンカーボルトの引抜き解析を行い、埋め込み深さが破壊モードや最大耐力に与える影響を考察した。すなわち、SPH 解析により求められた埋め込み深さがアンカーボルトの引抜き耐力に与える影響について、設計式から得られる傾向と比較することで、本手法の有用性に関して考察した。検討するボルトの埋め込み深さは、 $h/d=2, 4, 6, 8, 10$ の5種類である。

図-9 および図-10 に埋め込み深さが浅い場合の計算例として、 $h/d=4$ の解析結果を示す。ここで、本解析

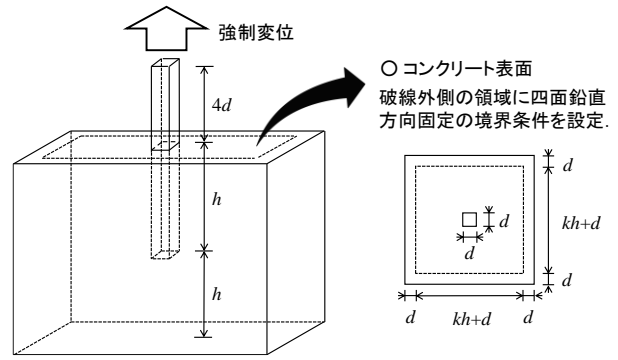


図-6 解析モデル

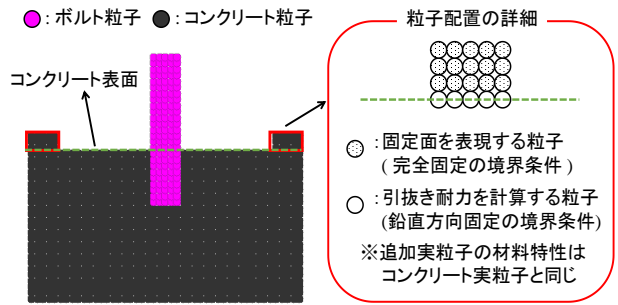
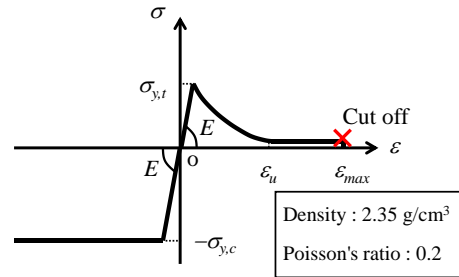


図-7 引抜き耐力計算領域における粒子配置の詳細

$$\sigma_{y,c} = 24.5 \text{ [Mpa]} \quad E = 21000 \text{ [Mpa]}$$

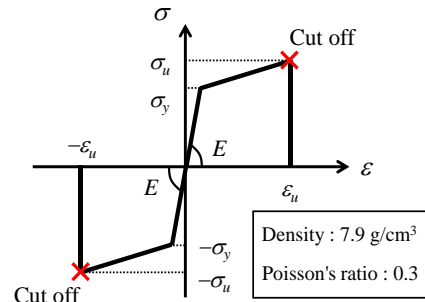
$$\sigma_{y,t} = 3.1 \text{ [Mpa]} \quad \epsilon_u = 15000 \text{ [\mu]} \quad \epsilon_{max} = 30000 \text{ [\mu]}$$



(a) コンクリート

$$\sigma_y = 400 \text{ [Mpa]} \quad E = 210000 \text{ [Mpa]}$$

$$\epsilon_u = 130000 \text{ [\mu]} \quad \sigma_u = 540 \text{ [Mpa]}$$



(b) ボルト

図-8 単軸換算した応力-ひずみ関係および材料定数

では一定の荷重速度でボルトを強制的に引抜いた時の動的挙動を計算しているため、図-9 に示す引抜き耐力

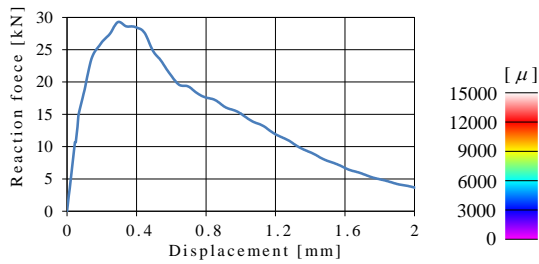


図-9 引抜き耐力-引抜き量関係 : $h/d=4$

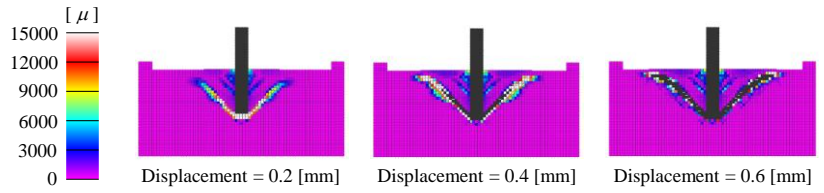


図-10 コンクリートの最大主ひずみ分布 : $h/d=4$

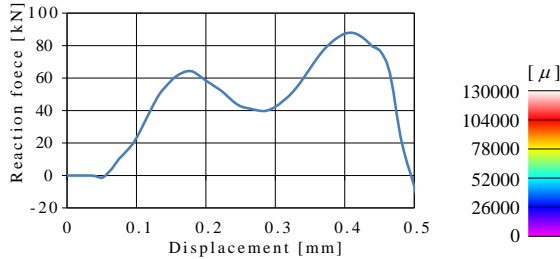


図-11 引抜き耐力-引抜き量関係 : $h/d=8$

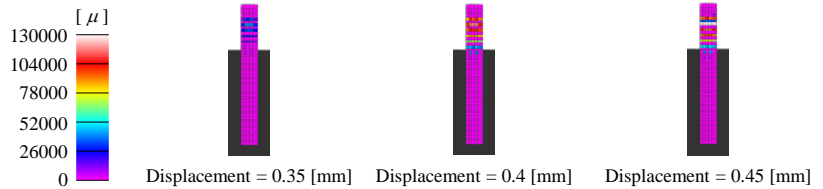


図-12 ボルトの相当塑性ひずみ分布 : $h/d=8$

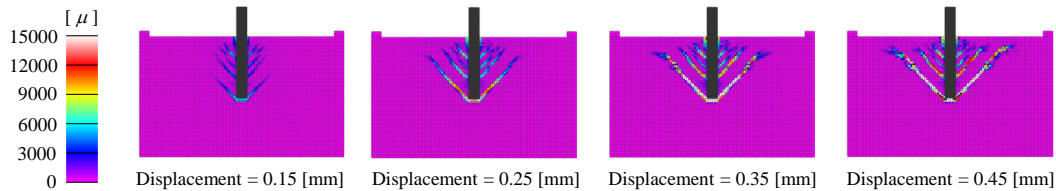


図-13 コンクリートの最大主ひずみ分布 : $h/d=8$

引抜き変位のグラフには数値解の振動が確認された。そこで、本論文には1波長のデータ数を基準とした移動平均法を用いて、元波形の特性を失わないように配慮をしながら平滑処理を行った結果を示している。また、図-10のコンクリートの最大主ひずみ分布図で黒色表示のコンクリート粒子は、引張破壊が生じてカットオフ処理が行われた粒子を示している。なお、 $h/d=4$ の条件では、ボルト粒子には塑性変形は確認されなかった。図-9および図-10の解析結果から、最大引抜き耐力に達したとき、コンクリートの最大主ひずみ分布から、コーン破壊に対応する破壊領域が概ね形成されていることが確認できる。また、最大引抜き耐力以降は、引抜き変位の増加にともない、耐力がなだらかに低下する傾向が認められる。この原因としては、コンクリート粒子の引張軟化（カットオフ処理を含む）にともない、コーン状の引張破壊面がコンクリート母材に形成されることで鉛直方向支持力が低下したためと考えられる。したがって、埋め込み深さが浅い $h/d=4$ のケースでは、コンクリート母材にコーン破壊が生じて破壊に至ったと判断した。

次に、図-11および図-12、図-13に埋め込み深さが深い場合の解析結果例として、 $h/d=8$ の解析結果を示す。まず、図-11の引抜き耐力-引抜き量関係に着目すると、最大引抜き耐力に達する前に、引抜き量0.15 [mm]付近において一時的な引抜き耐力の減少が生じて

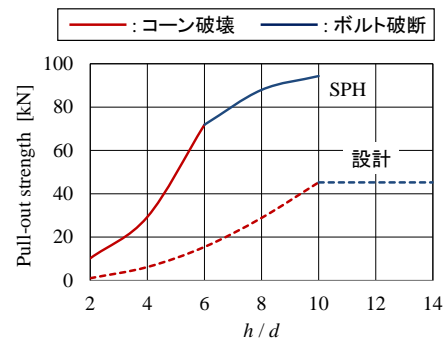


図-14 埋め込み深さが与える耐荷性能への影響

いることが確認できる。この原因としては、図-13の引抜き量0.15, 0.25 [mm]時点のコンクリートの最大主ひずみ分布から確認できるように、ボルト底面からだけでなく、複数の埋め込み深さを起点としたコーン破壊に相当する分布が進展しており、これら複数のコーン破壊の生成過程で負荷と除荷が生じたためであると考えられる。また、最大引抜き耐力前後のコンクリートの最大主ひずみ（図-13の引抜き量0.35, 0.45 [mm]）およびボルトの相当塑性ひずみ分布（図-12）に着目すると、コンクリートの最大主ひずみ分布は、最大引抜き耐力前後で顕著な相違が見られないのに対し、ボルトの相当塑性ひずみ分布を見ると、破断ひずみに達してカットオフ処理が行われている層が確認できる。以上の解析結果から、埋め込み深さが深い $h/d=8$ のケースでは、コーン破壊

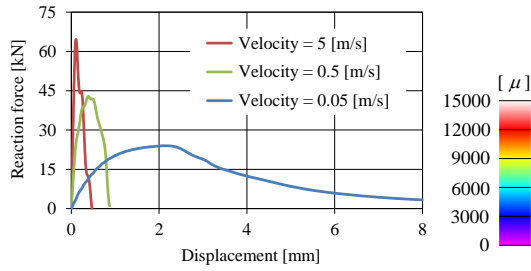


図-15 荷重速度が与える引抜き耐力への影響

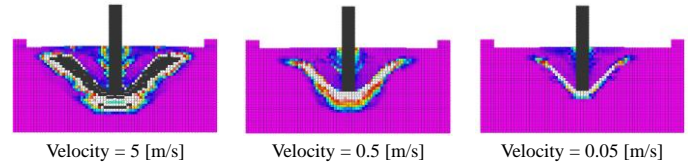


図-16 最大引抜き耐力時のコンクリートの最大主ひずみ分布

からボルト破断へ破壊モードが推移する状況が確認でき、最終的な破壊モードとしてボルト破断が生じることが推察される。

図-14 にボルトの埋め込み深さが与えるアンカーボルトの耐荷性能への影響を示す。ここで、実線は SPH 解析の結果、破線は文献 1) の設計式に基づいた試算結果である。なお、本研究では、解析において完全付着の仮定を設けていることから、設計式に基づく試算においても付着破壊の可能性は考慮していない。図中の赤線はコーン破壊、青線はボルト破断の破壊モードをそれぞれ示す。この図より、SPH 解析と設計式のいずれにおいても、埋め込み深さが深くなると引抜き耐力は増加し、破壊モードはコーン破壊からボルト破断へと変化する傾向が得られているが、引抜き耐力や破壊モードの推移点に相違が生じていることがわかる。この原因としては、SPH 解析が材料の降伏後の硬化特性を考慮していること、複数のコーン破壊面が生じる可能性が反映されていることなどによるもので、本手法の方がアンカーボルトの耐荷性能の妥当な解を与えているものと思われる。

3.2 ひずみ速度効果が与える耐荷性能への影響

ここでは、3.1 節で有用性を検討した本手法を用いて材料の速度依存性（ひずみ速度効果）の影響を考慮し、荷重速度が与えるアンカーボルトの破壊性状や引抜き耐力への影響を検討する。

(1) ひずみ速度効果の導入

一般にコンクリートや鋼材の材料特性は、荷重速度によって増加する傾向にある。コンクリートのひずみ速度による材料強度の影響に関しては、CEB-FIP MODEL CODE 1990 を参考にした⁴⁾。CEB-FIP MODEL CODE 1990 では、圧縮側と引張側では異なるひずみ速度効果の式を用いており、ひずみ速度依存性は単調増加の圧縮ひずみで $30 \times 10^{-6} [\text{s}^{-1}] < |\dot{\epsilon}| < 3 \times 10^2 [\text{s}^{-1}]$ の範囲で、また、引張ひずみで $3 \times 10^{-6} [\text{s}^{-1}] < \dot{\epsilon} < 3 \times 10^2 [\text{s}^{-1}]$ の範囲で有効とされている。本解析で用いたコンクリートの圧縮強度に対するひずみ速度効果の式を以下に示す。

$$\begin{aligned} f_{c,imp}/f_c &= (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^{1.02\alpha_s} & (|\dot{\epsilon}| \leq 30\text{s}^{-1}) \\ f_{c,imp}/f_c &= \gamma_s(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^{1/3} & (|\dot{\epsilon}| > 30\text{s}^{-1}) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $f_{c,imp}$ ひずみ速度効果を考慮した圧縮強度[MPa]、

f_c は静的圧縮強度[MPa]である。また、 $\dot{\epsilon}, \dot{\epsilon}_0$ はそれぞれひずみ速度および静的荷重時におけるひずみ速度であり、 $\dot{\epsilon}_0 = -30 \times 10^{-6} [\text{s}^{-1}]$ である。なお、式(5)におけるパラメータ α_s および γ_s は次式で求められる。

$$\alpha_s = 1/(5 + 0.9f_c), \quad \log_{10} \gamma_s = 6.156\alpha_s - 2 \quad (6)$$

次に、引張強度に対するひずみ速度の式を以下に示す。

$$\begin{aligned} f_{t,imp}/f_t &= (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^{1.016\delta_s} & (\dot{\epsilon} \leq 30\text{s}^{-1}) \\ f_{t,imp}/f_t &= \beta_s(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^{1/3} & (\dot{\epsilon} > 30\text{s}^{-1}) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $f_{t,imp}$ はひずみ速度効果を考慮した引張強度[MPa]、 f_t は静的引張強度[MPa]である。また、 $\dot{\epsilon}, \dot{\epsilon}_0$ はそれぞれひずみ速度および静的荷重時におけるひずみ速度であり、 $\dot{\epsilon}_0 = 3 \times 10^{-6} [\text{s}^{-1}]$ である。なお、式(7)におけるパラメータ δ_s および β_s は次式で求められる。

$$\delta_s = 1/(10 + 0.6f_c), \quad \log_{10} \beta_s = 7.112\delta_s - 2.33 \quad (8)$$

また、ボルトのひずみ速度効果に関しては、以下に示す高橋の式を適用した⁵⁾。

$$f_{y,d}/f_{y,s} = 10^m + C_1 \quad (9)$$

ここで、 $f_{y,d}, f_{y,s}$ はそれぞれひずみ速度効果を考慮した降伏応力[MPa]、静的降伏応力[MPa]である。また式中のパラメータ m および C_1 は次式で求められる。

$$m = 0.3796 \log_{10} \dot{\epsilon} - 0.2579, \quad C_1 = 0.993 \quad (10)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度である。なお、高橋らの式の適応範囲は、 $1 \times 10^{-5} [\text{s}^{-1}] < |\dot{\epsilon}| < 1 [\text{s}^{-1}]$ である。

(2) 引抜き耐力および破壊モード

ここでは、荷重速度が与えるアンカーボルトの破壊性状や引抜き耐力への影響を検討する。検討する荷重速度は、5, 0.5, 0.05 [m/s] の 3 種類を用いた。なお、ボルトの埋め込み深さは、 $h/d = 4$ を用いた。

図-15 に荷重速度が与える引抜き耐力-引抜き量関係への影響を示す。これより、荷重速度が大きくなると最大引抜き耐力は増加し、小さい変位で破壊に至る傾向が示されている。また、図-16 に各荷重速度における最大引抜き耐力時のコンクリートの最大主ひずみ分布を示す。ここで、黒色で示したコンクリート粒子は、引張破壊が生じてカットオフ処理が行われたことを意味し

ている。これより、載荷速度に関わらず破壊モードとしてコーン破壊が示されている。また、載荷速度が速くなると、ひび割れ幅が大きくなり、ボルト底部からコンクリート母材下面に破壊領域が広がる傾向にある結果が得られている。この原因は、載荷速度が速くなり、短時間で大きな外力エネルギーが与えられたことで、ボルト底面から 45 度の破壊面に進展する純粋なコーン破壊だけで入力エネルギーを消費できなくなり、ひび割れ幅の拡大やコンクリート母材下面に広がる破壊領域となって現れたと想定される。図-15 および図-16 の結果から、載荷速度が大きくなると、コンクリート母材に生じる破壊領域が拡大することによって引抜き耐力は増加するが、破壊に要する引抜き変位は小さく脆性的な破壊形態に移行する傾向がある結果が得られていることが認められた。

4. 結論

本研究では、SPH 法にコンクリートの破壊やボルト破断を表現するための力学モデルを導入し、アンカーボルトの引抜き解析を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

1) ボルト埋め込み深さをパラメータとしたアンカーボルトの引抜き解析から、ボルトの埋め込み深さによる破壊形態の推移や耐荷性能の変化を定性的に示しうることが確認できた。

2) ひずみ速度効果を導入し、載荷速度をパラメータとしたアンカーボルトの動的引抜き解析から、載荷速度が大きくなると引抜き耐力は増加するとともに、コーン破壊面が拡大する傾向が得られた。今回の結果は、ボルトとコンクリートに完全付着を仮定していることから、現実の破壊メカニズムと異なる可能性もあるので、今後、適切な付着特性を考慮した解析を行い、再考する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課：2001 年改訂版既存コンクリート造建築物の耐震改修設計指針同解説，日本建築防災協会，pp.266-269, 2001
- 2) 中山淳，藤掛一典，佐藤紘志，石橋猛，神保隆弘：接着系あと施工アンカーの動的引抜き耐力に関する研究，土木学会第 56 回年次学術講演会，pp.168-169, 2001.10
- 3) G.R.Liu, M.B.Liu：particle Hydrodynamics, pp.60-61, 2003
- 4) CEB：CEB - FIP MODEL CODE 1990, pp.48-50, 1993
- 5) 高橋芳彦：高速載荷試験による鉄筋コンクリートはりおよび鋼板・コンクリート合成はりの耐衝撃性評価に関する基礎的研究，九州大学博士論文，pp.32-38, 1990.12