

# 論文 損傷と変形を抑制するあと施工アンカーの特性

高田 康平\*1・椿 龍哉\*2

**要旨:** コンクリート構造物に用いられるあと施工アンカーの目的に合わせた最適界面特性を求めため、2次元構造モデルを作成しモンテカルロ法により最適化を行った。本研究におけるモデルではアンカー筋の直径、アンカーとコンクリートの間を埋める充填層の強度、ばね定数をパラメータとしている。最適化を行うに当たって使用する目的関数はコンクリート部における破壊面積、アンカー筋の引張変位、充填層の付着破壊面積を用いており、その値が最小となるものを最適界面特性とする。使用目的に合わせ、目的関数内の重みを調整することで用途に合わせた最適解を求めることができる。

**キーワード:** あと施工アンカー、2次元構造モデル、モンテカルロ法

## 1. はじめに

あと施工アンカーはコンクリート構造物の耐震補強、トンネルの天井板固定などに広く用いられており、その工法の一つにコンクリートに穴をあけ、アンカー筋を差し込み、アンカー筋とコンクリートの間を充填材で固定する工法がある。この工法における破壊形式にはアンカー筋が引き抜ける際に周囲のコンクリートも付随して引き抜けるコーン破壊や、充填部における付着が剥離してしまい引き抜けるといったものが考えられる。あと施工アンカーに求められる性能として、一定の荷重に対して耐えることができるということ、また既設部に与える損傷を抑えることで、復旧が容易になるものが望ましい。そこで、本研究ではアンカー筋、充填層、既設部コンクリートから成る最適化の計算に適した2次元構造モデルを作成し、アンカーの引張挙動を数式で表現した。この2次元構造モデルはRC巻立て工法のように複数本のアンカー筋を1列に配置した場合に対応する。実際の設計などに適用する際には、そのアンカー筋を軸とした破壊面や充填層の表面積に対応する補正を加える必要がある。

調整するパラメータは充填層のせん断強度、ばね定数としている。目的関数としてコンクリートの破壊面積、充填層の付着剥離面積、アンカー筋の引き抜け変位を各最大値で正規化したものに重みづけを行ったものを使用し、パラメータを調整した際に目的関数が最小となるパラメータをその条件下における最適界面特性とする。モデルは充填層が1層のものと2層のもの合わせて6種類作成した。また、充填層が1層のモデルについては既往の実験結果と同じ破壊様式を表現しており、充填層が2層のモデルは既往のRBSMにおける解析結果と同様の破壊形式を表現している<sup>1)</sup>。充填層を2層構造にすることで

エネルギーの吸収量が増加することが既往の研究<sup>2) 3) 4)</sup>より明らかになっている。この6種類のモデルにおける各最適界面特性を比較し、その中で目的関数の取り得る値が全体における最適界面特性となる。

## 2. 2次元構造モデル

### 2.1 2次元構造モデルを用いた計算フロー

本研究における計算フローを図-1に示す。

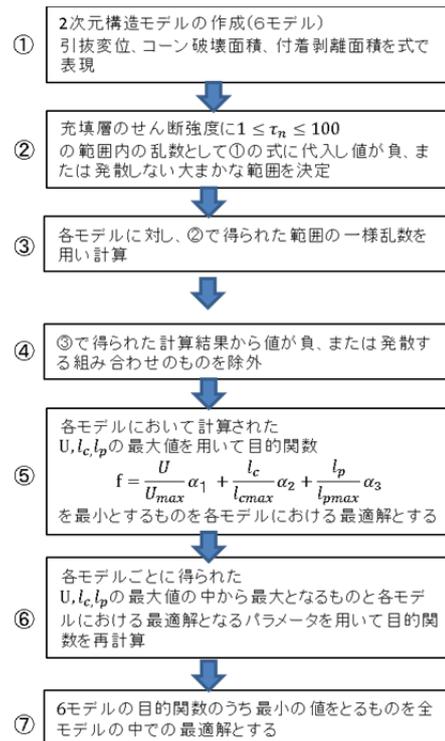


図-1 2次元構造モデルによる計算フロー

本研究ではアンカー引き抜きの際、コンクリート構造

\*1 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府都市地域社会専攻 (学生会員)

\*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 教授 (正会員)

物の損傷と変形を制御するための充填層の最適な材料特性を導くために、アンカー・充填層・コンクリートから成る2次元構造モデルを作成した。本研究で作製したモデルは、コンクリートと弾性状態にある充填層をばねとして扱っている。周囲のコンクリートを含むアンカー全体を複数のばねの組み合わせとして考え、ばね定数、摩擦力、変位、せん断強度、コンクリートの引張強度を用いた式を作成し、コンクリートにおけるコーン破壊面積、充填層の付着剥離面積、アンカー筋の引き抜け変位を表現している。得られた引抜変位  $U$ 、コーン破壊面積  $l_c$ 、付着剥離面積  $l_p$  (または  $l_p + l'_p$ ) から表される目的関数を作成し、その値がアンカー筋の降伏強度の95%となる引張荷重  $F$  の時に最小となる充填層の材料特性を導き出す。ここで、 $U$  は変形の抑制に対し重要な要因であり、 $l_c$ 、 $l_p$  はアンカー、母材コンクリートが受ける主な損傷であり、それらを抑えることが破壊の抑制となり復旧を容易にする際重要であると考え目的関数に用いた。それぞれのモデルではコンクリート、アンカー筋の材料特性には一般的なものを使用し、充填層の材料特性を操作することで最適な界面特性を導く手法をとる。本研究では目的別のアンカーの最適界面特性を求めることを目的としているが主に普通強度のコンクリートを用いた構造物の耐震補強に用いるアンカーを想定している。

## 2.2 モデル1：1層モデル（コーン破壊直前）

充填層が1層で、コーン破壊直前のコンクリートで荷重を受け持つモードについて図-2に示す。またこのモデルをモデル1と呼ぶ。ここで想定されるコーン破壊面に作用する力は、アンカーに作用する引張力がアンカーの付着により伝達される力と等しいと仮定する。アンカー筋の変位分布は図中のピンクの線で表されるが、計算を簡単にするため図中水色のような  $w_1$ 、 $w_2$  から成る階段分布をとるものとした。このモデルで  $l_p$  は付着剥離が生じている充填層の面積、 $l_c$  はコーン破壊面積、 $U$  がアンカー筋上端の変位、 $l_e$  は弾性域にある充填層面積、 $\tau_e$  は充填層のせん断強度、 $\tau_p$  は付着剥離後の充填層の摩擦力を、 $k_c$  は単位長さ当たりのコンクリートのばね定数を表す。

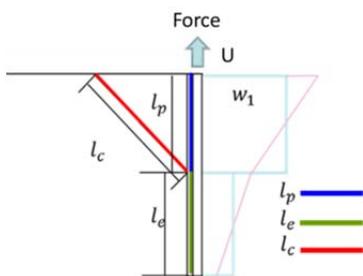


図-2 1層モデル（コーン破壊直前）

以下にこのモデルから単位厚さに対して数式化され

たパラメータについて示す。

$$F = K_c \frac{w_1}{\sqrt{2}} + 2\tau_p l_p \quad (1)$$

$$= K_e w_2 = 2\tau_p l_p + \sqrt{2}\sigma l_c + 2\tau_e l_e \quad (1)$$

$$l_e = l - l_p \quad (2)$$

$$l_p = \frac{F - 2\tau_e l}{2\tau_p + 2\sigma - 2\tau_e} \quad (3)$$

$$U = w_1 = \frac{F - 2\tau_p l_p}{K_c} \times \sqrt{2}, \quad w_1 = \gamma w_2 \quad (4)$$

$$l_c = \sqrt{2}l_p \quad (5)$$

$$K_c = 2k_c l_c \quad (6)$$

$$f = \frac{U}{U_{max}} \alpha_1 + \frac{l_c}{l_{cmax}} \alpha_2 + \frac{l_p}{l_{pmax}} \alpha_3 \quad (7)$$

ここで、式(1)はアンカー筋上端にかかる引張力、式(2)は付着剥離面積と弾性状態にある充填層面積の関係、式(3)は付着剥離面積、式(4)はアンカー筋上端の引き抜け変位と変位分布の関係、式(5)はコーン破壊面積と付着剥離面積の関係、式(6)はコーン破壊面におけるばね定数をそれぞれ表している。また目的関数としては式(7)を設定し、それを最小化する  $\tau_e$ 、 $\tau_p$  を最適な充填層の材料特性とする。

## 2.3 モデル2：1層モデル（コーン破壊後）

充填層が1層かつコーン破壊後コンクリート部で荷重を受け持つことができなくなった状態のモデルを図-3に示す。またこのモデルをモデル2と呼ぶ。このモデルで  $l_p$  はコーン破壊面より上部の付着剥離面積、 $l_c$  がコーン破壊面積、 $l'_p$  がコーン破壊面より下部の付着剥離面積、 $\Delta l$  がアンカー筋の伸びを表し、その他の変数は2.2と同様になっている。ここで変位分布として基本的な考えは2.2で述べたものと同様となっているが、今回の場合コーン破壊が発生しコンクリートの付着が壊れることでアンカー筋の伸びによる影響が大きく出ると考えている。

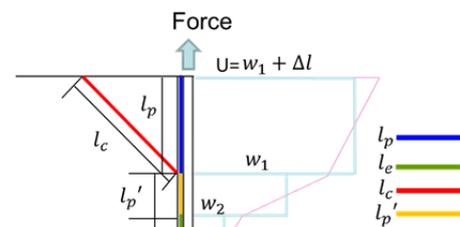


図-3 1層モデル（コーン破壊直後）

以下にこのモデルにより数式化されたパラメータを示す。

$$F = K_e w_2 - 2\tau_p l'_p \quad (8)$$

$$l_e = (l - l'_p - l_p) \quad (9)$$

$$l'_p = \frac{F-2\tau_e l + 2\tau_e l_p}{2\tau_p - 2\tau_e} \quad (10)$$

$$U = w_1 + \Delta l = \gamma \frac{F+2\tau_p l'_p}{K_e} + \frac{Fl}{EA}, \quad \Delta l = \frac{Fl}{EA}$$

$$w_1 = \gamma w_2, w_2 = \frac{F+2\tau_p l'_p}{K_e}, \quad w_1 = \gamma \frac{F+2\tau_p l'_p}{K_e} \quad (11)$$

$$l_c = \sqrt{2}l_p \quad (12)$$

$$K_e = 2k_e l_e \quad (13)$$

$$f = \frac{U}{U_{max}} \alpha_1 + \frac{l_c}{l_{cmax}} \alpha_2 + \frac{l_p + l'_p}{l_p + l'_{pmax}} \alpha_3 \quad (14)$$

ここで式(8)はアンカー筋上端にかかる引張力、式(9)は付着剥離面積と弾性状態にある充填層面積の関係、式(10)はコーン破壊面より下部の付着剥離面積、式(11)はアンカー筋の引き抜け変位と変位分布、アンカー筋の伸びの関係、式(12)はコーン破壊面積とコーン破壊面より上部の付着剥離面積の関係、式(13)は弾性域となる充填層のばね定数をそれぞれ表している。ここで変位分布の比率を表す係数 $\gamma$ は簡単のため2とした。また目的関数としては式(14)を設定し、それを最小化する $\tau_e, \tau_p, k_e, l_p$ を最適な充填層の材料特性とする。

#### 2.4 モデル3： 2層モデル(コーン破壊直前) $\tau_2 > \tau_1$

充填層が2層、コーン破壊直前でコンクリート部が荷重を受け持つモデルを図-4に示す。またこのモデルをモデル3と呼ぶ。充填層を2層構造にし、それぞれの材料特性に差をつけることでアンカー引き抜けの際のエネルギー吸収量を増やすことができるということが既往の研究<sup>2) 3) 4)</sup>より明らかになっている。今後アンカー筋側の充填層を充填層1、コンクリート側の充填層を充填層2と呼ぶ。このモデルでは充填層1の強度が充填層2の強度より小さい場合を表現している。このモデルで $l_p$ はアンカー筋まわりの付着剥離が生じている充填層1の面積、 $l_{e1}$ は充填層1における弾性域にある充填層面積、 $l_{e2}$ は充填層2における弾性域にある充填層面積、 $k_{e1}, k_{e2}$ は充填層1, 2の単位長さ当たりのばね定数、 $\tau_{e1}, \tau_{e2}$ は充填層1, 2のせん断強度を表しその他の変数は2.2と同様である。アンカー筋の変位分布は図中のピンクの線で表されるが、計算を簡単にするため図中水色のような $w_1, w_2$ から成る階段分布をとるものとした。

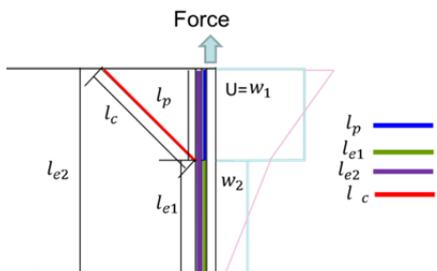


図-4 2層モデル(コーン破壊直前)  $\tau_2 > \tau_1$

以下にこのモデルにより数式化されたパラメータを示す。

$$\begin{aligned} F &= K_c \frac{w_1}{\sqrt{2}} + K_{e21} w_1 + 2\tau_p l_p \\ &= K_{e1} w_2 + K_{e22} w_2 \\ &= 2\tau_p l_p + 2\tau_{e1} l_{e1} + 2\tau_{e2} l + \sqrt{2} \sigma l_c \\ &= \left( K_c \frac{1}{\sqrt{2}} + K_{e21} \right) w_1 + 2\tau_p l_p \end{aligned} \quad (15)$$

$$l_{e1} = l - l_p \quad (16)$$

$$l_p = \frac{F-2\tau_{e1} l - 2\tau_{e2} l}{2(\tau_p + \sigma - \tau_{e1})} \quad (17)$$

$$U = w_1 = \frac{F-2\tau_p l_p}{K_c \frac{1}{\sqrt{2}} + K_{e21}}, \quad w_1 = \gamma w_2 \quad (18)$$

$$l_c = \sqrt{2}l_p \quad (19)$$

$$K_c = 2k_c l_c, \quad K_{e1} = 2k_{e1} l_{e1}, \quad K_{e21} = 2k_{e2} l_p \quad (20)$$

$$f = \frac{U}{U_{max}} \alpha_1 + \frac{l_c}{l_{cmax}} \alpha_2 + \frac{l_p}{l_{pmax}} \alpha_3 \quad (21)$$

ここで、式(15)はアンカー筋上端にかかる引張力、式(16)は付着剥離面積と弾性状態にある充填層面積の関係、式(17)は充填層1における付着剥離面積、式(18)はアンカー筋上端の引き抜け変位と変位分布の関係、式(19)はコーン破壊面積と付着剥離面積の関係、式(20)はコーン破壊面におけるばね定数、充填層1の弾性域となる部分のばね定数、充填層2のコーン破壊面より上部のばね定数、をそれぞれ表している。また目的関数としては式(21)を設定し、それを最小化する $\tau_{e1}, \tau_{e2}, \tau_p, k_{e1}, k_{e2}$ を最適な充填層の材料特性とする。

#### 2.5 モデル4： 2層モデル(コーン破壊後) $\tau_2 > \tau_1$

充填層が2層かつコーン破壊後コンクリート部で荷重が受け持つことが出来なくなった状態のモデルを図-5に示す。ここで2.4同様充填層1の強度は充填層2の強度より小さい値をとる。このモデルをモデル4と呼ぶ。

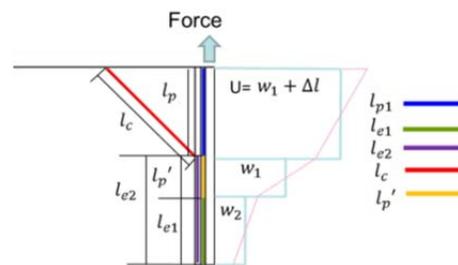


図-5 2層モデル(コーン破壊直後)  $\tau_2 > \tau_1$

このモデルで $l_p$ はコーン破壊面より上部の充填層1の付着剥離面積、 $l'_p$ がコーン破壊面より下部の充填層1の付着剥離面積、 $\Delta l$ がアンカー筋の伸び、 $U$ がアンカー筋上端の引き抜け変位を表し、その他の変数は2.4と同様

となっている。今回の場合 2.3 同様コーン破壊が発生しコンクリートの付着が壊れることでアンカー筋の伸びによる影響が大きく出ると考えている。

以下にこのモデルにより数式化されたパラメータを示す。

$$\begin{aligned} F &= 2\tau_p l'_p + K_{e21} w_1 \\ &= K_{e1} w_2 + K_{e22} w_2 \\ &= 2\tau_p l'_p + 2\tau_{e1} l_{e1} + 2\tau_{e2} l_{e2} \end{aligned} \quad (22)$$

$$l_{e1} = (l - l'_p - l_p) \quad (23)$$

$$l_{e2} = l - l_p \quad (24)$$

$$l'_p = \frac{F - 2\tau_{e1} l + 2\tau_{e1} l_p - 2\tau_{e2} l + 2\tau_{e2} l_p}{2\tau_p - 2\tau_{e1}} \quad (25)$$

$$U = w_1 + \Delta l = \frac{F - 2\tau_{p1} l'_p}{K_{e21}} + \frac{Fl}{EA}$$

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA}, \quad w_1 = \gamma w_2 \quad (26)$$

$$l_c = \sqrt{2} l_p \quad (27)$$

$$K_{e21} = 2k_{e2} l'_p \quad (28)$$

$$f = \frac{U}{U_{max}} \alpha_1 + \frac{l_c}{l_{cmax}} \alpha_2 + \frac{l_p + l'_p}{l_{pmax}} \alpha_3 \quad (29)$$

ここで、式 (22) はアンカー筋上端にかかる引張力、式(23)は弾性状態にある充填層 1 の面積の関係、式(24)弾性状態にある充填層 2 の面積の関係式、式 (25) はコーン破壊面より下部の付着剥離面積、式 (26) はアンカー筋の引き抜けと変位分布、アンカー筋の伸びの関係、式 (27) はコーン破壊面積とコーン破壊面より上部の付着剥離面積の関係、式 (28) は弾性域となる充填層 2 のばね定数をそれぞれ表している。また目的関数としては式(29)を設定し、それを最小化する $\tau_{e1}, \tau_{e2}, \tau_p, k_{e2}, l_p$ を最適な充填層の材料特性とする。

## 2.6 モデル 5 : 2層モデル(コーン破壊直前) $\tau_1 > \tau_2$

充填層が2層、コーン破壊直前でコンクリート部が荷重を受け持つモデルを図 - 6 に示す。またこのモデルをモデル 5 と呼ぶ。

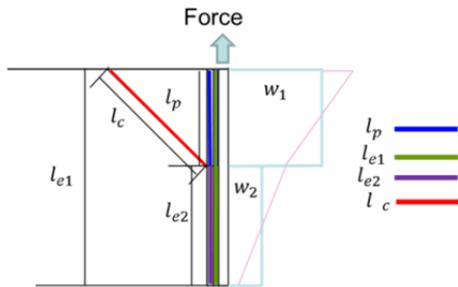


図 - 6 2層モデル (コーン破壊直前)  $\tau_1 > \tau_2$

このモデルでは 2.4 と違い、アンカー筋側にある充填層 1 の強度がコンクリート側にある充填層 2 の強度より

大きいモデルとなっている。このモデルで $l_p$ は付着剥離が生じているコンクリート側の充填層 2 の面積を表しその他の変数は 2.4 と同様となる。アンカー筋の変位分布は図中のピンクの線で表されるが、計算を簡単にするため図中水色のような $w_1, w_2$ から成る階段分布をとるものとした。

以下にこのモデルにより数式化されたパラメータを示す。

$$\begin{aligned} F &= K_c \frac{w_1}{\sqrt{2}} + K_{e11} w_1 + 2\tau_p l_p \\ &= K_{e2} w_2 + K_{e12} w_2 \\ &= 2\tau_p l_p + 2\tau_{e1} l + 2\tau_{e2} l_{e2} + \sqrt{2} \sigma l_c \end{aligned} \quad (30)$$

$$l_{e2} = l - l_p \quad (31)$$

$$l_p = \frac{F - 2\tau_{e1} l - 2\tau_{e2} l}{2(\tau_p + \sigma - \tau_{e2})} \quad (32)$$

$$U = w_1 = \frac{F - 2\tau_p l_p}{K_c \frac{1}{\sqrt{2}} + K_{e11}}, \quad w_1 = \gamma w_2 \quad (33)$$

$$l_c = \sqrt{2} l_p \quad (34)$$

$$K_c = 2k_c l_c, \quad K_{e11} = 2k_{e1} l_p, \quad K_{e2} = 2k_{e2} l_{e2} \quad (35)$$

$$f = \frac{U}{U_{max}} \alpha_1 + \frac{l_c}{l_{cmax}} \alpha_2 + \frac{l_p}{l_{pmax}} \alpha_3 \quad (36)$$

ここで、式 (30) はアンカー筋上端にかかる引張力、式 (31) は充填層 2 における付着剥離面積と弾性状態にある充填層 2 の面積の関係、式 (32) は充填層 2 の付着剥離面積、式 (33) はアンカー筋上端の引き抜け変位と変位分布の関係、式 (34) はコーン破壊面積と充填層 2 の付着剥離面積の関係、式(35)はコーン破壊面におけるばね定数、充填層 2 のコーン破壊面より上部のばね定数、充填層 2 の弾性域となる部分のばね定数をそれぞれ表している。また目的関数としては式 (36) を設定し、それを最小化する $\tau_{e1}, \tau_{e2}, \tau_p, k_{e1}, k_{e2}$ を最適な充填層の材料特性とする。

## 2.7 モデル 6 : 2層モデル (コーン破壊後) $\tau_1 > \tau_2$

充填層が2層かつコーン破壊後コンクリート部で荷重を受け持つことができなくなった状態のモデルを図 - 7 に示す。ここで 2.6 同様充填層 1 の強度は充填層 2 の強度より大きい値をとる。またこのモデルをモデル 6 と呼ぶ。このモデルで $l_p$ はコーン破壊面より上部の充填層 2 における付着剥離面積、 $l'_p$ がコーン破壊面より下部の充填層 2 における付着剥離面積、 $\Delta l$ がアンカー筋の伸びを表し、その他の変数は 2.6 と同様となっている。今回の場合 2.3, 2.5 同様コーン破壊が発生しコンクリートの付着が壊れることでアンカー筋の伸びによる影響が大きく出ると考えている。

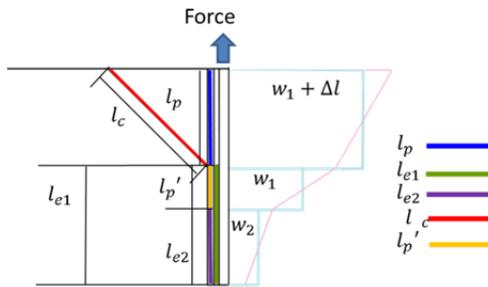


図 - 7 2層モデル（コーン破壊直後） $\tau_1 > \tau_2$

以下にこのモデルにより数式化されたパラメータを示す。

$$\begin{aligned}
 F &= 2\tau_p l'_p + K_{e1} w_1 \\
 &= K_{e12} w_2 + K_{e2} w_2 \\
 &= 2\tau_p l'_p + 2\tau_{e1} l_{e1} + 2\tau_{e2} l_{e2} \quad (37)
 \end{aligned}$$

$$l_{e2} = (l - l'_p - l_p) \quad (38)$$

$$l_{e1} = l - l_p \quad (39)$$

$$l'_p = \frac{F - 2\tau_{e1} l + 2\tau_{e1} l_p - 2\tau_{e2} l + 2\tau_{e2} l_p}{2\tau_p - 2\tau_{e2}} \quad (40)$$

$$U = w_1 + \Delta l = \gamma \frac{F - 2\tau_p l'_p}{K_{e12}} + \frac{Fl}{EA}$$

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA}, \quad w_1 = \gamma w_2 \quad (41)$$

$$l_c = \sqrt{2} l_p \quad (42)$$

$$K_{e21} = 2k_{e2} l'_p \quad (43)$$

$$f = \frac{U}{U_{max}} \alpha_1 + \frac{l_c}{l_{cmax}} \alpha_2 + \frac{l_p + l'_p}{l_{pmax}} \alpha_3 \quad (44)$$

ここで、式(37)はアンカー筋上端にかかる引張力、式(38)は弾性状態にある充填層2の面積の関係、式(39)は弾性状態にある充填層1の面積の関係式(40)はコーン破壊面より下部の付着剥離面積、式(41)はアンカー筋上端の引き抜け変位と変位分布、アンカー筋の伸びの関係、式(42)はコーン破壊面積とコーン破壊面より上部の付着剥離面積の関係、式(43)は弾性域となる充填層1のばね定数をそれぞれ表している。また目的関数としては(44)を設定し、それを最小化する $\tau_{e1}, \tau_{e2}, \tau_p, k_{e2}, l_p$ を最適な充填層の材料特性とする。これらの6つのモデルで、最適な破壊形式として起こり得るすべてのケースを網羅している。

### 3 2次元構造モデルを用いた計算

#### 3.1 モデルに用いる各パラメータの設定

本モデルのアンカー筋とコンクリートの材料特性には一般的な数値を用いており、アンカー筋の材料特性を表-1に、コンクリートの材料特性を表-2に示す。

表 - 1 コンクリートの材料特性

材料特性	値
ばね定数 $K_c$	20000 (MPa)
引張強度 $\sigma$	3 (MPa)

表 - 2 アンカー筋の材料特性

材料特性	値
ヤング率 $E$	200000 (MPa)
降伏強度 $f_y$	300 (MPa)

#### 3.2 充填層のパラメータ

充填層のパラメータには主に充填層剥離前のせん断強度、充填層剥離後の摩擦強度、充填層のばね定数を式に入れることになる。ここで、1層モデルであるモデル1, 2の場合には、まず、せん断強度を $1 \leq \tau_e \leq 100$ (MPa),  $1 \leq \tau_p \leq \tau_e$ という条件のもとで、一様に分布する乱数8万通りを2.2, 2.3における数式に代入し計算を行った。そこで、コーン破壊面の面積や付着剥離破壊面、引き抜け変位が正の値を取り得るせん断強度の範囲は $55 \leq \tau_e \leq 100$ (MPa)となったため、1層モデルにおける充填層のせん断強度の範囲は $55 \leq \tau_e \leq 100$ (MPa),  $1 \leq \tau_p \leq \tau_e$ と設定した。また、2層モデルに関しても同様に計算を行い、 $30 \leq \tau_{e2} \leq 55$ (MPa),  $1 \leq \tau_p \leq \tau_{e1} \leq \tau_{e2}$  または、 $30 \leq \tau_{e1} \leq 55$ (MPa),  $1 \leq \tau_p \leq \tau_{e2} \leq \tau_{e1}$ となるように設定した。充填層の単位面積当たりのばね定数 $k_e$ はアンカー筋に用いる鋼材よりも剛性が大きい充填材を用いることは難しいと考え、 $10000 \leq k_e \leq 200000$  (MPa)の範囲で、1000(MPa)刻みの一様乱数となるように設定した。また2.3, 2.5, 2.7における $l_p$ は2.2, 2.4, 2.6と違い直接入力する形となる。そこで、付着破壊面積、コーン破壊面積が小さくなる方が求めるべき最適な界面特性となり得ると考え0から20の整数を一様乱数として代入した。

#### 3.3 2次元構造モデルによる計算

3.2の設定でモンテカルロ法により計算を行い、コーン破壊面、付着剥離面積、引抜変位が負の値、または発散しない数値の中から目的関数を最小の値とするパラメータを最適解とする。目的関数における重み係数 $\alpha$ に関しては表-3に示す。

表 - 3 目的関数の重み係数

目的関数	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
$f_1$	1/3	1/3	1/3
$f_2$	1/2	1/4	1/4
$f_3$	1/4	1/2	1/4
$f_4$	1/4	1/4	1/2

目的関数  $f_1$  は全ての重みが同じもの、目的関数  $f_2$  は引抜変位に対する重みを重視したもの、目的関数  $f_3$  は付着剥離に対する重みを重視したもの、目的関数  $f_4$  はコーン破壊に対する重みを重視したものとなっている。各モデルについて計算を行い各モデルで得られた  $U, l_c, l_p$  の最大値を用いて正規化し、引張力がアンカー筋の降伏強度 95%時に目的関数を最小の値とするパラメータを導き、各モデルにおける最適解を導く。その後すべてのモデルの計算結果の中から得られた  $U, l_c, l_p$  の最大値を各モデルにおける最適解が得られた目的関数に代入し、得られた各最適解を比較し全体の中での最適解を導くこととした。引張力がアンカー筋の降伏強度 95%となる値は、アンカー筋のパラメータと式 (45) より算出された値を用いており、鉄筋径である  $D$  を調整することでアンカー筋の径に対する最適解の導出が可能となる。

$$F_{95} = 0.95f_y \frac{\pi D^2}{4} \quad (45)$$

### 3.4 計算結果

表 - 4 に各モデルにおける引き抜け変位、コーン破壊面積、付着剥離面積の最大値と、3.3 に従って計算した各モデルにおける目的関数の値を示す。

表 - 4 各モデルにおける損傷の最大値と計算結果

	$U_{max}$	$l_{pmax}$	$l_{cmax}$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
モデル1	2.12	195.77	276.99	0.021	0.023	0.022	0.022
モデル2	7.12	199.67	28.28	0.014	0.020	0.010	0.011
モデル3	0.48	195.86	277.24	0.012	0.012	0.011	0.011
モデル4	1.39	199.70	6.48	0.033	0.034	0.026	0.036
モデル5	0.54	196.04	277.24	0.010	0.012	0.009	0.009
モデル6	2.59	199.72	6.48	0.018	0.025	0.014	0.015

注：長さの単位 mm

計算の結果から、充填層が2層でコーン破壊直前の状態かつコンクリート側の充填層のせん断強度がアンカー筋側のせん断強度に比べて小さいモデル5がすべての目的関数における最小の値となった。この結果は既往の離散的解析モデル<sup>1)</sup>と同じである。表 - 5 に各目的関数を最小とする際に、モデル5が取り得る充填層のパラメータを示す。図-8 にモデル5における  $U/U_{max}$  と  $l_c/l_{cmax}$ 、 $l_p/l_{pmax}$  の関係を示す。この図は重みを変えた時の目的式が最小となる界面を示しており、この界面線上の目的式の値に対応するパラメータが最適解となる。

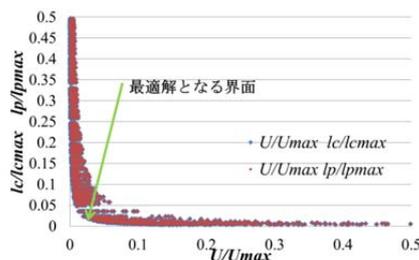


図 - 8  $U/U_{max}$  と  $l_c/l_{cmax}$ 、 $l_p/l_{pmax}$  の関係

表 - 5 各目的関数を最小とする充填層のパラメータ

	$k_{e1}$ (MPa)	$k_{e2}$ (MPa)	$\tau_p$ (MPa)	$\tau_{e1}$ (MPa)	$\tau_{e2}$ (MPa)
$f_1$	197000	3318	9	39	17
$f_2$	200000	5671	10	40	16
$f_3$	200000	2794	12	35	21
$f_4$	200000	2794	12	35	21

ここで  $k_{e2}$  に関しては、式 (30), (33), (35) より以下のように計算している。また、簡単のためここで用いられる変位分布の比率を表す係数  $\gamma$  は 2 としている。

$$k_{e2} = \frac{F - k_{e1} l_p w_1}{l_{e2} w_1} \quad (46)$$

このようなアンカーとして、アンカー筋の埋め込み部分に2層の高強度プラスチック層等の材料が巻き付けられたような状態のアンカーを作成し、それを接着剤でアンカーの埋め込み孔と固定するという方法等が考えられる。

### 4. まとめ

以下に本研究によって得られた結論をまとめる

- (1) 周囲のコンクリートに与える損傷を考慮したアンカー引抜けを表す2次元構造モデルを導いた。これらのモデルから既往の解析モデルと同じ傾向の最適解が得られた。
- (2) アンカー筋引き抜けの際の損傷を抑えるためには、充填層が2層構造であるもの、さらにコンクリート側の充填層の強度、剛性がアンカー側の充填層のものよりも小さいものが望ましい。
- (3) アンカーの用途に応じた重み係数ごとの最適界面特性を求めた。

### 参考文献

- 1) 椿龍哉・我彦聡志：アンカー引抜け挙動に及ぼす界面特性の影響に関する感度解析，セメント・コンクリート論文集，No.62, pp.514-521, 2009.02
- 2) Tsubaki, T. and Saleem, M.: Interface properties for optimum pullout behavior of steel reinforcement, Proc. of the 4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, Nagoya, pp.191-196, 2009.08
- 3) Saleem, M. and Tsubaki, T.: Two-layer model for pull-out behavior of post-installed anchor, J. of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E2(Materials and Concrete Structures), V. 68, No.1, pp.49-62, 2012.03
- 4) Saleem, M. and Tsubaki, T.: Two-layer simultaneous crack extension model for pull-out behavior of post-installed anchor, J. of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E2(Materials and Concrete Structures), V. 68, No.2, pp.106-120, 2012.04