

静水圧下における鉄筋とコンクリートの付着性状に関する研究

A study on bond stress behavior between reinforcing bar and concrete under hydrostatic pressure

20N3100028H 友添 圭吾 (コンクリート研究室)
Keigo TOMOZOE/ Concrete Lab.

Key Words :bond stress,slip,separation pressure

1. はじめ

近年、様々な用途のRC構造物が注目されており、基礎構造物、水中構造物、地下構造物等のコンクリート外表面に静水圧が作用する土木構造物が多く存在する。RC構造物は鉄筋とコンクリートの一体性により、外力に抵抗するため、両者の付着性状が非常に需要となってくる。したがって今日まで、鉄筋とコンクリートの付着性状に及ぼす種々の要因を考慮した鉄筋の実験的、解析的研究が盛んに行われてきた。

島ら¹⁾はひび割れの影響がないマシッパなコンクリートに埋め込まれた鉄筋の付着性状に関して、付着応力-すべり関係を鉄筋径およびコンクリート強度の影響を考慮して導き、定式化させている(以降、島式と称す)。しかしながら、コンクリート構造物表面には常時MPaオーダーの静水圧が作用する大深度海洋下あるいは大深度地下コンクリート構造物の変形挙動の予測に際しては、大気中でのコンクリートの力学的特性がそのままのかたちで適用はできず、コンクリート特有の多孔質透水性状を加味しなければならない。島式は内部の空隙に水分を含んでいない、または内部空隙の水分に圧力が生じていない状態における構造物を対象としたものであるため、上述のような構造物においては新たな付着応力-すべり関係の構築を行うか、あるいは島式を適切に修正する必要がある。

コンクリート外表面に静水圧が作用した場合、鉄筋にはコンクリートによる圧力(拘束圧)が作用する。これと同様のものがコンクリート内部に水が浸入せずに鉄筋が腐食した状態である。鈴木ら²⁾は、腐食時において、島式は付着応力を過大評価しており、鉄筋の腐食による腐食ひび割れ幅や腐食の不均一性を考慮しなければならないと報告している。また鉄筋腐食を生じたRC梁部材の付着応力性状は、腐食程度によって最大付着応力が相違すると報告している。しかし、コンクリート内部に水が浸入すると、相違する。

そこで本研究では、大深度地下あるいは大深度海洋下を模擬することのできる浸透劣化装置を用いること

により、静水圧環境下における鉄筋とコンクリートの界面に存在する水分が付着性状に及ぼす影響に関する評価を目的として、RC部材の片引き試験を実施した。

2. 実験概要

(1) 試験体

試験体の形状寸法および配筋は図-1に示すように、15×15×33cmの角柱形状であり、その中央にD16(SD295A)異形鉄筋が配筋されている。ブリーディングの影響を低減させるためにコンクリートの打設は縦方向に実施した。また、鉄筋をコンクリート片から上部9cm、下部6cm出るように打設し、鉄筋上部2cmはねじ切り加工を施してある。なお、定着長は18cmである。

(2) 実験パラメータ

実験パラメータを表-1に示す。静水圧は0.0MPa、1.0MPaであり、1.0MPaに関しては作用時間を各所定の時間とした。

試験体名称は、Pは静水圧値、hは静水圧作用時間を表している。

(3) 引抜試験方法

引抜試験方法の概要を図-2に示す。使用する引抜治具は、円盤と鉄柱で構成されている。試験体から出ている鉄筋に中央部分に約3cmの穴がある円盤を2枚通す。コンクリート片上面には載荷盤と固定させている円盤を、その上面に土台と固定させた円盤を通し、ねじ切り加工を施した箇所を六角ナットで固定する。以上より、載荷盤に荷重を加えると鉄筋を固定したままコンクリート片上面を押すことで、鉄筋の引き抜きが可能となる。

(4) 試験体処理方法

試験体の処理方法を図-3に示す。試験体は打設後24時間の時点で脱型し2日間水中養生を行った。その後、所定の静水圧を作用させ、引抜試験を行った。試験体P0.0-h24.0は静水圧を作用させない状態で、3日間の水中養生を行った後、引抜試験を行った。

(5) 測定項目

測定項目は、水槽内の圧力、自由端の変位および鉄

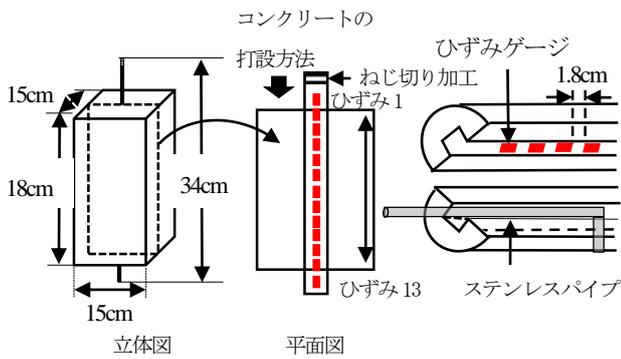


図-1 試験体概要

表-1 実験パラメータ

試験体名称	静水圧 (MPa)	作用時間 (hour)	圧縮強度 (N/mm ²)
P0.0-h24.0	0.0	24.0	18.4
P0.5-h3.5	0.5	3.5	15.8
P1.0-h3.5	1.0	3.5	15.4
P1.0-h46.0	1.0	46.0	18.5

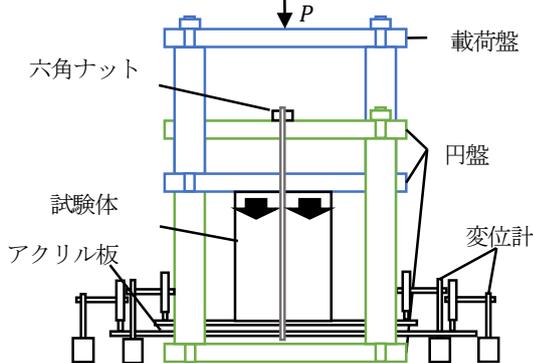


図-2 引抜治具概要

筋の軸方向ひずみ、鉄筋とコンクリート界面における間隙水圧である。

鉄筋の軸方向ひずみ測定方法であるが、使用した鉄筋は図-1に示すように鉄筋を軸方向に切断した2対の鉄筋片断面に2×4mmの溝を掘ったものであり、その溝に所定の間隔で貼付したひずみゲージを使用して計測する。

鉄筋とコンクリート界面における間隙水圧の測定は、上述した鉄筋の溝に内部を水で充填したステンレスパイプの先端を鉄筋表面（鉄筋とコンクリート界面）に設置することで実施した。

自由端の変位の測定は、図-2の引抜試験概要に示すようにアクリル板と変位計を用いて実施した。本試験では、自由端におけるコンクリート片と鉄筋の相対変位を自由端変位とした。また、引抜治具の設計上、自由端部分に変位計を直接設置することができないため、コンクリート片下部と鉄筋にアクリル板をエポキシ樹

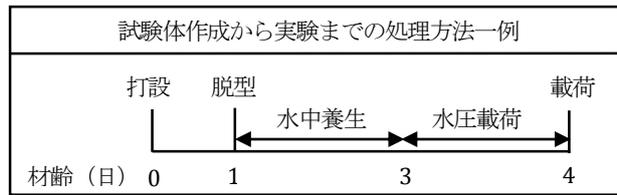


図-3 試験体処理方法

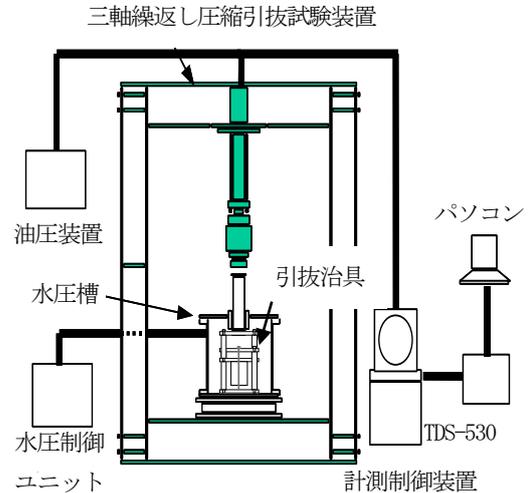


図-4 浸透劣化装置

脂接着剤で固定し、その表面に変位計を設置した。なお、自由端変位はコンクリート片、鉄筋両者のアクリル板の表面に各2箇所ずつ設置した変位の平均値とした。

(6) 実験装置

静水圧環境を模擬するために用いた浸透劣化装置の概要を図-4に示す。本装置は定吐出型水源により水槽内に1MPaの水圧を持続的に作用させた状態において、荷重試験が可能である。水槽は内径800mm、高さ600mmのステンレス製であり、その中央部に図-2の試験体および引抜治具を設置する。本装置を三軸試験機内に設置してピストンに荷重を載荷することにより水槽内の試験体に荷重を載荷することが可能となる。

3. 静水圧作用による変形挙動

(1) 静水圧荷重による鉄筋ひずみと間隙水圧性状

本節では、水中養生を行った後、所定の静水圧を作用させた状態における鉄筋ひずみと間隙水圧性状を議論する。それぞれのパラメータにおける水圧荷重中の間隙水圧性状、ひずみ性状を図-5に示す。図中に示すひずみの順番（例：ひずみ1、ひずみ2）は図-1の断面図に示す鉄筋上部からひずみゲージを貼り付けた位置の順である。つまり、ひずみ1と13はコンクリート片の外側に位置するひずみであり、ひずみ2～12はコンクリート片内部のひずみである。試験体P0.5-h3.5のひずみと間隙水圧性状を図-5(a)に示す。静水圧が荷重された後から

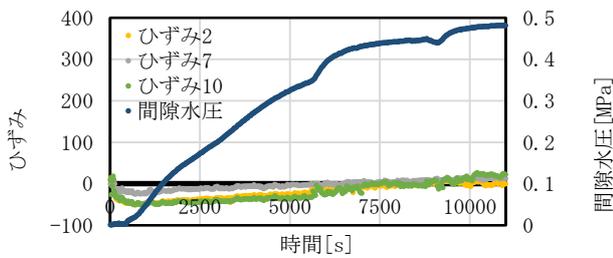


図-5(a) 試験体 P0.5-h3.5

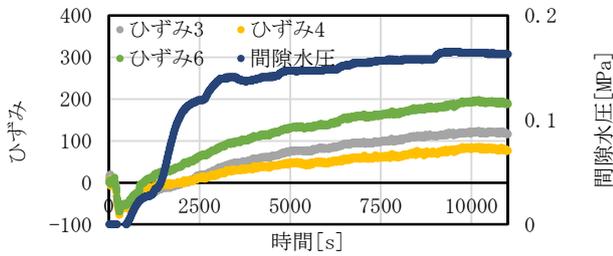


図-5(b) 試験体 P1.0-h3.5

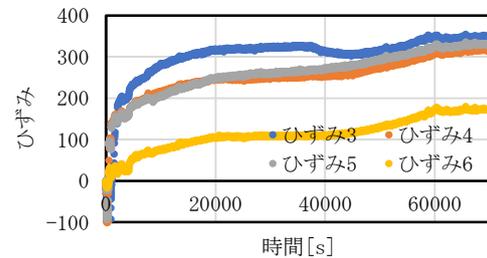
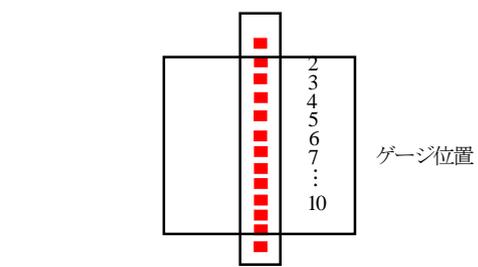


図-5(c) 試験体 P1.0-h46.0

図-5 静水圧作用におけるひずみ性状と間隙水圧性状

約500秒の時点においては、いずれも圧縮ひずみが急激に増加し、約500秒の時点から引張ひずみ増分が生じて緩やかに上昇した。これは、静水圧の影響で試験体全体が圧縮され、その後、コンクリート内部に浸水した水が膨張圧として作用することによるものである。

試験体P1.0-h3.5のひずみと間隙水圧性状を図-5(b)に示す。静水圧載荷から約500秒まではいずれも圧縮ひずみが急激に増加し、その後引張ひずみ増分が急激に上昇した。これは試験体P0.5-h3.5と同様である。しかし、引張ひずみ増分が生じた後の以降の増加割合は、本試験体の方が大きい。また、静水圧を作用した場合、静水圧の値が大きい方がひずみの値が大きくなることが分かった。

試験体P1.0-h48.0のひずみ性状を図-5(c)に示す。他の試験体と同様に静水圧作用して直後、圧縮ひずみが急激に上昇し、約250秒から引張ひずみ増分が生じ、約10000秒付近まで急激に上昇した。それ以降は緩やかに上昇していった。なお、間隙水圧は機材の不具合で計測できていない。ひずみ性状が約60000秒以降、ほぼ一定になったこと、また作用水圧を変化させると、それに応じてひずみ性状も瞬時に反応するため、鉄筋界面に所定の水圧(1MPa)が作用しているものとする。

4. 静水圧作用による変形挙動

(1) 引抜時の荷重-変位関係

各試験体における荷重-変位関係を図-6に示す。試験体P0.5-h3.5は静水圧を作用させていない試験体P0.0-h24.0と比較すると、最大荷重が大きい。これは、コンクリートによる鉄筋への拘束効果が働いたためであると考えられる。また、試験体P1.0-h3.5は鉄筋界面に所定の水圧が作用しなかったため、試験体P0.5-h3.5に比べ最大荷重が

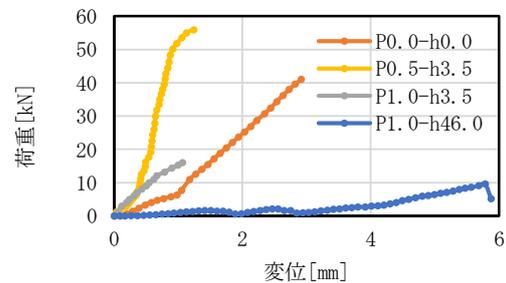


図-6 荷重-変位関係

小さくなったと考えられる。試験体P1.0-h46.0は他の3体と比べ、最大荷重は小さくなっており、これは静水圧を長期間作用させたため、鉄筋界面に十分な水分が存在し、抜けやすくなったと考えられる。

(2) ひずみ分布

各試験体における、任意の荷重下におけるひずみ分布を図-7に示す。荷重の増加とともに載荷端から自由端に向かって荷重が伝達している。試験体P0.0-h24.0と同図(b)試験体P0.5-h3.5を比較すると、試験体P0.5-h3.5の方が、ひずみの絶対値かつ勾配が大きい。これは静水圧による鉄筋とコンクリートの拘束効果により、鉄筋が抜けにくくなったと考えられる。また、同図(d)P1.0-h46.0は同図(a)試験体P0.0-h24.0と同図(c)試験体P1.0-h3.5と比べ、勾配が緩やかになっている。静水圧を長期間作用させた場合、鉄筋とコンクリート界面に存在する水分が分離圧とし挙動するからである。

(3) 付着応力-すべり関係

各試験体における付着応力-すべり関係を図-8に示す。各ひずみゲージ測定位置のすべり量は、式(1)示すように自由端から任意の測定点までの積分したものにより算出する。

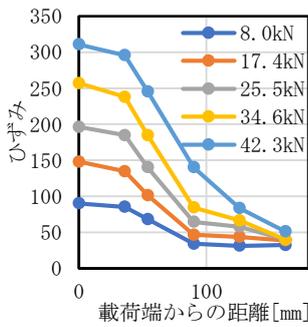


図-7(a) 試験体 P0.0-h24.0

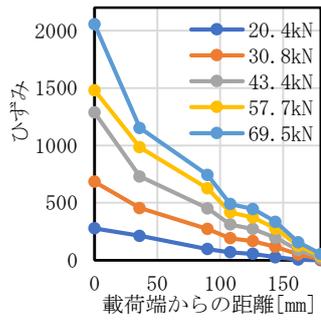


図-7(b) 試験体 P0.5-h3.5

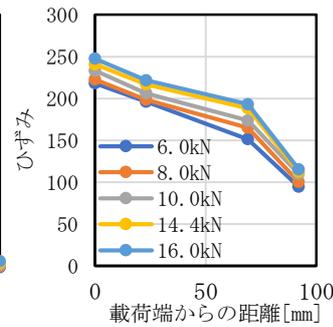


図-7(c) 試験体 P1.0-h3.5

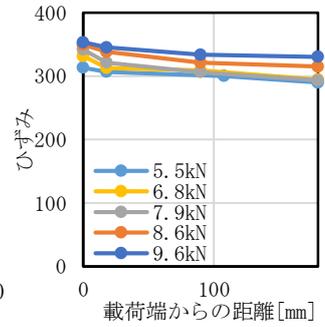


図-7(d) 試験体 P1.0-h46.0

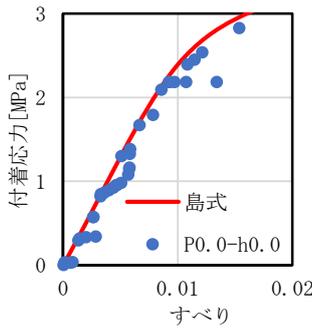


図-8(a) 試験体 P0.0-h24.0

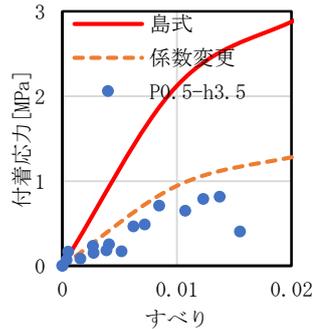


図-8(b) 試験体 P0.5-h3.5

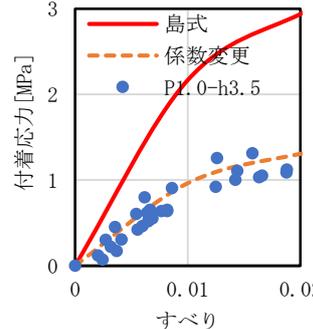


図-8(c) 試験体 P1.0-h3.5

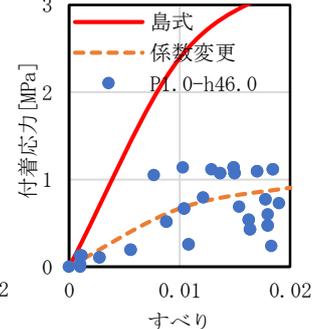


図-8(d) 試験体 P1.0-h46.0

$$S_{xi} = \int_{xi}^l \epsilon_x dx \quad (1)$$

ここで、 S_{xi} : 位置xiにおける局所すべり(mm)

ϵ_x : 鉄筋軸に沿った鉄筋のひずみ分布

x_i : 載荷端から各ひずみゲージまでの距離(mm)

l : 定着長(180mm)

である。

鉄筋軸に沿った鉄筋のひずみ分布は、着目するひずみ計測点および、その両側のひずみ計測点の計3点を通るひずみの2次曲線を用いた。

なお、図中の赤色の実線は島式¹⁾(2)であり、青色の点線は実測値である。

$$\tau = 0.9f_c'^{2/3}(1 - e^{-40(S/D)^{0.6}}) \quad (2)$$

ここで、 τ : 局所付着応力(MPa)

f_c' : コンクリートの圧縮強度(MPa)

S : 鉄筋とコンクリートの相対変位(mm)

ϕ : 鉄筋の直径(mm)

である。

図-8(b)に試験体P0.5-h3.5, 同図(c)に試験体P1.0-h3.5, および同図(d)に試験体P1.0-h46.0の付着応力-すべり関係を示しており、各試験体ともに実測値は島式と大きな差異があり、これは静水圧による影響である。

静水圧下における付着応力-すべり関係を新たに構築すべく同図(b)試験体P0.5-h3.5と同図(c)試験体P1.0-h3.5の島式の係数を0.9→0.4 (オレンジ色点線)に変更した

ところ、同様の傾向となった。しかし、試験体P0.5-h3.5は鉄筋へ拘束効果が働いているため、係数変更線より小さくなっている。また、同図(d)試験体P1.0-h46.0の島式の係数を0.9→0.25 (オレンジ色点線)へ変更したところ、こちらも同様の傾向が確認できた。つまり、鉄筋界面の水分が多い、または水分が有する圧力が高くいくにしたがって、付着応力-すべり関係は島式の係数を減少させていく必要があることが分かる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に述べる。

- (1) 鉄筋ひずみは鉄筋界面に水圧が作用し始めると、圧縮され、その後引張に転じる。
- (2) 引抜荷重は静水圧の作用時間に依存する。
- (3) 静水圧環境下の長期間静置した試験体の引抜時のひずみ分布はコンクリート内部の空隙に水分がないものとは比べると、勾配が緩やかになる。
- (4) 静水圧環境下における付着応力-すべり関係は鉄筋界面に水分が多く有しているほど、島式の係数を減少させていく必要がある。

参考文献

- 1) 島弘, 山本恭史: 腐食した鉄筋の局所応力-局所すべり関係, コンクリート工学年次論文集, vol.13, No.1, pp.663-668, 1991.
- 2) 鈴木綾, 高田翔太, 大下英吉: 鉄筋とコンクリートの付着性状に及ぼす鉄筋腐食の影響に関する研究, 土木学会第67回年次講演会, 2012.