

# 論文 塩分を含むコンクリート中のPC鋼より線の腐食評価に関する研究

松塚 忠政\*1・渡辺 博志\*2・古賀 裕久\*3・中村 英佑\*4

**要旨：**塩害を受けたPC構造物の的確な腐食状況の診断手法の確立を目的として、非破壊試験の一つである自然電位法を用い、PC鋼より線の腐食状況を適切に評価できるか検討した。また鋼材に与える引張力の違いで、PC鋼より線の腐食状況に違いが生じるか検討した。その結果、鋼材に与える引張力の大きいPC鋼より線ほど、腐食の程度が著しいこと、腐食の程度の違いを自然電位の測定結果で概ね良く評価できることなどがわかった。

**キーワード：**塩害、腐食、引張力、PC鋼より線、自然電位、分極抵抗

## 1. はじめに

コンクリート構造物の塩害への対策は土木構造物の維持管理の上で大きな課題となっている。中でも、日本海沿岸部では道路橋の多数を占めるプレストレストコンクリート橋の塩害劣化が深刻であり、既に補修・補強工事が実施されている。

塩害による鋼材の腐食を早期に発見する非破壊試験手法には自然電位法があり、コンクリート内に配置された鋼材の腐食診断への適用について多数の研究<sup>1)2)</sup>がなされている。しかし、これらの診断及び研究は主に鉄筋を対象にしたものが殆どであり、PC鋼より線を対象とした研究事例は多くない。またPC鋼材の腐食性状に関する研究としては、高応力下のPC鋼棒の水素脆化及び遅れ破壊に関する研究<sup>3)</sup>や、PC鋼より線を対象とした腐食疲労強度に関する研究<sup>4)</sup>がされているが、鋼材に与える引張力が腐食性状に与える影響についての報告はほとんどない。そこで本研究では、塩分を含んだプレテンション方式プレストレストコンクリート供試体を作成し、PC鋼より線の自然電位の測定結果と腐食程度の関係及び鋼材に与える引張力による腐食度合いの違いについて検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

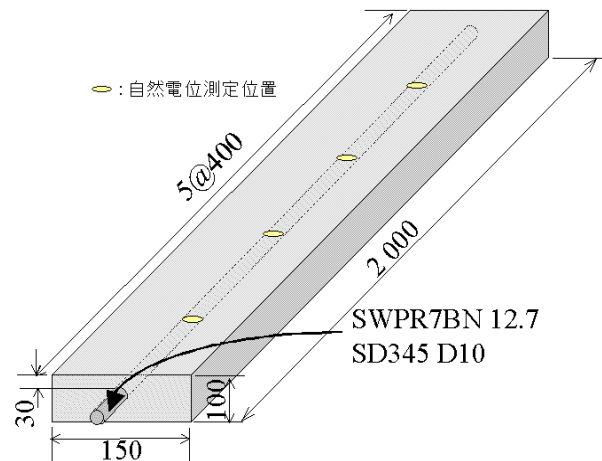


図-1 供試体概要

供試体はプレテンション方式プレストレストコンクリート供試体とし、練混ぜ時にコンクリートに塩化ナトリウムを混入して、塩害環境を模した供試体を作成した。コンクリートの配合を表-1に示す。鋼材に与える引張応力は、PC鋼より線の引張強度の約65%(1274N/mm<sup>2</sup>)、約30%(637N/mm<sup>2</sup>)及び0%(0 N/mm<sup>2</sup>)の3種類とした。供試体寸法の詳細は図-1のとおりである。使用したPC鋼より線はSWPR7BN 12.7を用

\*1(独)土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 交流研究員 工修 (正会員)

\*2(独)土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 主席研究員 工修 (正会員)

\*3(独)土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 主任研究員 工修 (正会員)

\*4(独)土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 研究員 工修 (正会員)

表－1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメ ント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	混和剤 <i>A</i>
20	12	40	3	45	160	400	811	1002	1%C

い、比較用として異形棒鋼 SD345 D10も使用した。作成した供試体の呼称及び諸元を一覧とし表－2に示す。供試体は作成後室内に保管した。

## 2.2 自然電位の測定

作成後4, 8, 12週後及び1年, 3年8ヶ月(材齢約1,300日), 3年11ヶ月(材齢約1,400日)の計6回にわたり、自然電位、コンクリート抵抗及び分極抵抗を測定し、供試体は室内での長期の保管によって非常に乾燥している事が予想されたため、特に材齢約1,300日及び1,400日の測定では、コンクリート表面の湿潤時間を10分刻みで変化させて測定を行い、吸水時間と自然電位、コンクリート抵抗及び分極抵抗の関係を調べた。同時に高周波容量式コンクリート・モルタル水分計を用いて、表面の含水率を記録した。測定箇所は図－1に示すとおり、鋼材の直上に等間隔で4箇所設けその平均値を求めた。

自然電位、コンクリート抵抗及び分極抵抗の測定には市販の鉄筋腐食診断器(照合電極：銀・塩化銀電極)を使用した。コンクリート抵抗及び分極抵抗の測定は交流インピーダンス法により測定した。測定には高周波数(10Hz)と低周波数(0.1Hz)の二種類の周波数の電流を使用した。鋼材端部に銅線をハンダ付し防水処理を施した。測定の際、銅線と測定器とを接続した。

## 2.3 解体調査

材齢約1,400日の測定後、供試体を解体して内部のPC鋼より線及び鉄筋を取り出し、鋼材の腐食状況を観察した。さらに供試体から取り出したPC鋼より線及び鉄筋をおよそ二等分して、一方で引張試験をもう一方で腐食減量試験を行った。鋼材の引張試験はJIS G2241, JIS G3112, JIS G3536に従い実施した。PC鋼線の引張試験では試験機の変位をダイヤルゲージで

測定することにより、試験片の伸びを計測した。引張試験は7本より線のうち1本でも破断した時点までとした。

腐食減量試験はJCI-SC1に従い実施した。PC鋼より線は心線と側線とに分離し、PC鋼より線内部の発錆部分も除錆した。

表－2 供試体一覧

番号	Cl量	鋼材	鋼材の引張応力
P9H	9.0kg/m <sup>3</sup>	SWPR7B	1 274N/mm <sup>2</sup>
P9M			637N/mm <sup>2</sup>
P9N			0N/mm <sup>2</sup>
R9N		SD345	0N/mm <sup>2</sup>
P3H	3.0kg/m <sup>3</sup>	SWPR7B	1 274N/mm <sup>2</sup>
P3M			637N/mm <sup>2</sup>
P3N			0N/mm <sup>2</sup>
R3N		SD345	0N/mm <sup>2</sup>

## 3. 実験結果

### 3.1 自然電位

材齢約1,400日経過時の測定結果を図－2～図－5に示す。ただし、自然電位は全て25℃飽和硫酸銅電極に換算<sup>5)</sup>して示した。

自然電位の測定結果は、湿潤時間に伴って変化し次第に一定値に漸近した。湿潤開始から30分が経過しても、自然電位の値は徐々に変化しており、P3Hの供試体等はおおよそ一定の自然電位を示すまでに約80分の湿潤時間を要している。塩化物イオン量9kg/m<sup>3</sup>の供試体の自然電位は30～40分の比較的短い湿潤時間で一定値になるのに比べ、塩化物イオン量3kg/m<sup>3</sup>の供試体では、一定の自然電位を示すまでに80～90分のより多くの湿潤時間を要している。

また、自然電位は鋼材に与えた引張力の大きい順に卑な値を示しており、緊張されていない

鋼材はP C鋼より線と鉄筋の区別無く比較的貴な値を示した。鋼材に与えた引張力の違いによる差は塩化物イオン量 $9\text{kg/m}^3$ の供試体で顕著であった。自然電位の測定結果からP9HとP9Mの供試体は腐食しやすさが大きく、P3Nの供試体では軽微、その他の供試体ではやや大きな腐食しやすさとなっていると判定<sup>9)</sup>された。

見かけの分極抵抗も供試体により多少ばらつきは有るものの湿潤時間30~50分を経過すると一定値に漸近している。また鋼材に与えた引張力が大きい程、分極抵抗の値が小さくなる(腐食速度が大きくなる)傾向が塩化物イオン量 $3\text{kg/m}^3$ の供試体で確認できたが、塩化物イオン量 $9\text{kg/m}^3$ の供試体ではほぼ同じ値を示した。

コンクリート抵抗は、湿潤開始から30分を経過すると $3\sim 5\text{k}\Omega$ の一定の値を示した。

湿潤時間と測定値の関係から、かぶりコンクリートが非常に乾燥している場合においては、湿潤時間が30分までの間の測定電位の変動は大きく、安定した値が得られない事が分かった。

本実験では、コンクリート抵抗の湿潤時間の経過に伴う変動が少ないにも関わらず、自然電位が変動しているが、自然電位測定機器の内部抵抗は非常に大きく、かぶりコンクリートの抵抗による影響を受けないため、コンクリート抵抗以外に要因があるものと考えられる。水分計による測定結果は、ばらつきが大きいものの、乾燥時の含水率は4.5%前後であったが、20分で約5.0%程度まで上昇した後、湿潤時間が長くなるとともに、徐々に増加し約5.5%程度まで上昇した。本実験では、水分計の測定値のばらつきが大きい為、自然電位の測定値との間には明確な関係を見出す事はできなかった。

次に材齢約28日から1,400日までの自然電位の推移を図-6に示す。ここで図-6の材齢約28日から450日までの測定値は湿潤時間30分の自然電位の値を、材齢約1,300日及び材齢約1,400日の測定値は前述のとおり、ほぼ一定を示す湿潤時間90分から120分の値の平均値を示した。

材齢28日では一部の供試体を除き塩化物イオ

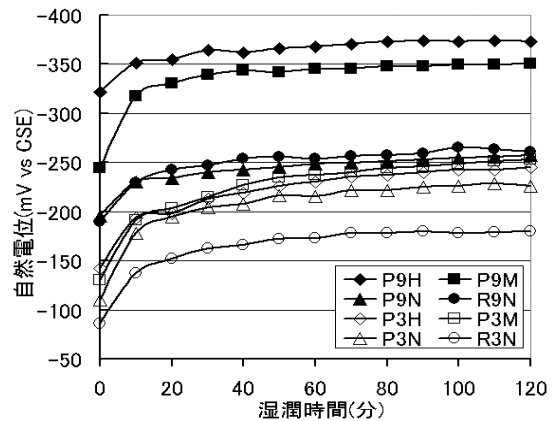


図-2 湿潤時間と自然電位測定結果

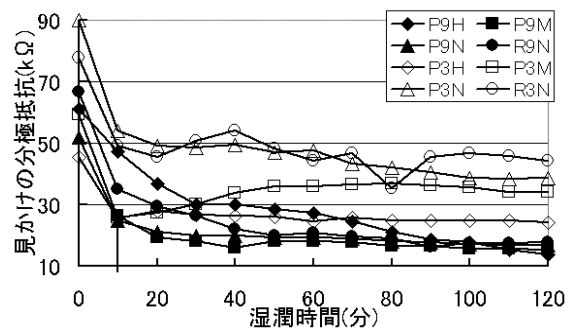


図-3 湿潤時間と分極抵抗測定結果

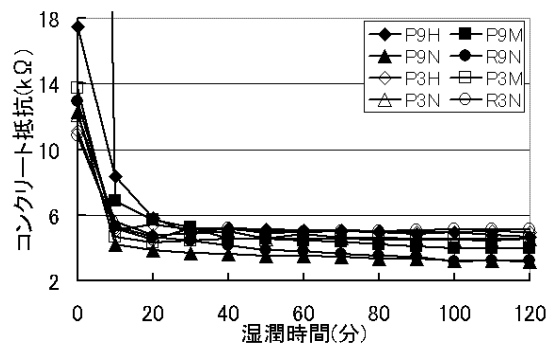


図-4 湿潤時間とコンクリート抵抗測定結果

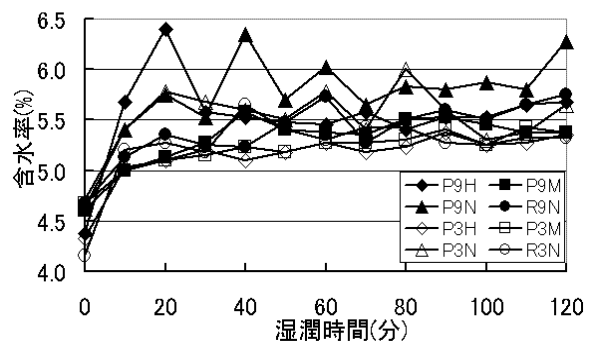


図-5 湿潤時間と水分計測定結果

ン量 $9\text{kg/m}^3$ の供試体の自然電位は約 $-360\sim-400\text{mV}$ と卑であり，塩化物イオン量 $3\text{kg/m}^3$ の供試体の自然電位は約 $-180\sim-270\text{mV}$ と比較的貴であった。材齢の経過と共に，一旦電位は貴へ移行していたが，材齢約1,300日の測定において，鋼材に与えた引張力の大きい順に卑な自然電位を示した。材齢約1,400日に再度測定したが，ほぼ全ての供試体で電位が約 $50\text{mV}$ 程貴に移行していた。材齢約1,300日の測定は夏季であり，測定時の気温は約 $30^\circ\text{C}$ ，材齢約1,400日の測定は秋季であり，測定時の気温は約 $18^\circ\text{C}$ であった。気温による腐食環境の変化があるものと考えられるが，鋼材に与えた引張力の大きい順に自然電位が卑から貴に推移している傾向は両測定においても認められた。

材齢と見かけの分極抵抗の変化を図-7に示す。分極抵抗においても材齢約1,300日の夏季の測定時から材齢約1,400日の秋季の測定時の方が大きい値(腐食速度が小さい)を示しており腐食環境の変化による影響であると思われる。

### 3.2 腐食状況確認

供試体内のP C鋼より線及び鉄筋を取り出し，腐食状況を観察した。その結果を表-3及び写真-1~2に示す。鋼材について錆の発生している箇所としていない箇所がある程度明確であったため，発錆している区間の区間長を計測した。表面に大きな発錆区間が認められなかったP3H, P3M及びP3NのP C鋼より線でも，一部の鋼より線の内部に発錆が見られた。

表-3 腐食状況

番号	腐食状況	腐食区間長
P9H	殆どの表面で赤錆が発錆	1,865mm
P9M	表面で赤錆が発錆	1,565mm
P9N	表面で赤錆が発錆	1,440mm
R9N	表面全体に点錆が発錆	—
P3H	部分的な赤錆の発錆	—
P3M	部分的な赤錆の発錆	—
P3N	部分的な赤錆の発錆	—
R3N	点錆の発錆	—

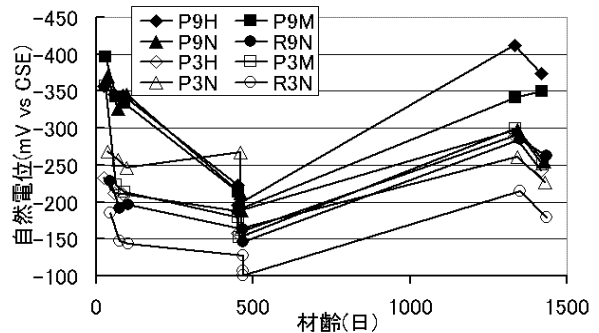


図-6 材齢と自然電位の変化

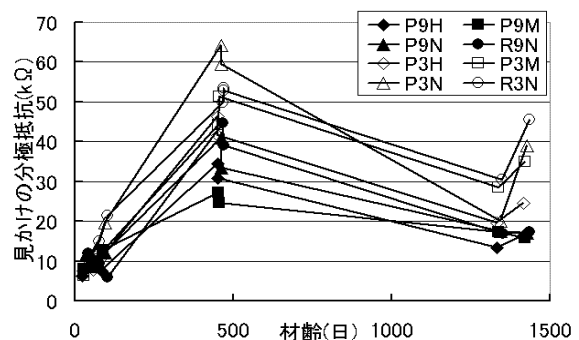


図-7 材齢と分極抵抗の変化



写真-1 鋼材の腐食状況 ( $\text{Cl}^- = 9\text{kg/m}^3$ )  
(上からP9H, P9M, P9N, R9N)

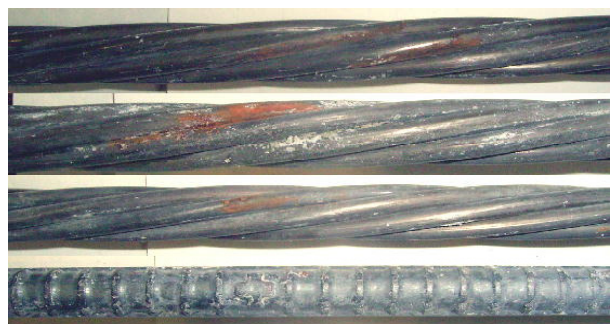


写真-2 鋼材の腐食状況 ( $\text{Cl}^- = 3\text{kg/m}^3$ )  
(上からP3H, P3M, P3N, R3N)

### 3.3 腐食減量試験

目視で認められた腐食状況の差をより定量的に評価するため、腐食減量試験を行った。その結果を図-8~10に示す。自然電位が材齢約1,400日の測定において約-370mVと最も卑となっていた供試体P9Hから取り出した鋼材が最も質量減少率が大きくなった。また、自然電位が卑になるとともに、質量減少率が大きくなる傾向が確認できた。-350mVよりも貴な電位を示していた供試体については、その電位の差による質量減少率の違いは顕著ではなかった。分極抵抗と質量減少率との関係には図-9に示すように明確な相関が確認できなかった。図-10に示すように鋼材に与えた引張力により腐食の度合いに差が見られた。

塩化物イオン量9kg/m<sup>3</sup>の供試体は引張力の違いによる自然電位の差と質量減少率とが対応しているが、塩化物イオン量3kg/m<sup>3</sup>の供試体は、自然電位と質量減少率との間に一部逆転しているものが見られる。これは、塩化物イオン量9kg/m<sup>3</sup>の供試体では、鋼材の不動態皮膜を破壊し、発錆に十分な塩分量であったが、塩化物イオン量3kg/m<sup>3</sup>の供試体は、鋼材の発錆が僅かであり各供試体間の個体差が、自然電位の測定誤差と質量減少率の測定誤差の範囲内に収まったものと思われる。

### 3.4 引張試験

試験結果を表-4に、荷重が作用し始めた変位を0とし作成した荷重-変位曲線を図-11及び図-12に示す。引張試験結果において、腐食度合いによる大きな違いは見られなかった。発錆していた錆は表面上のもので、孔食等の耐力に影響を与える断面欠損を伴う腐食には至っていなかったためと考えられる。腐食減量試験の結果からも、質量減少率0.2%は試験による減量(黒皮等)によるものと考え、最も質量減少率の大きいP9Hでも、0.4%程度で軽微であり、引張強度には影響がなかったものと思われる。破断箇所は定着金具部における破断が殆どであった。

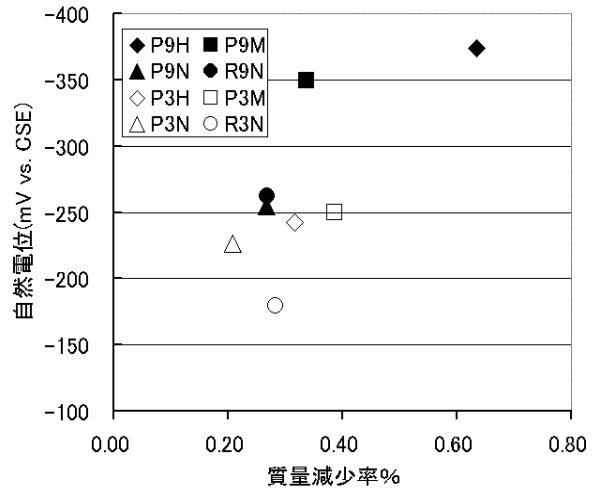


図-8 鋼材の自然電位と質量減少率の関係

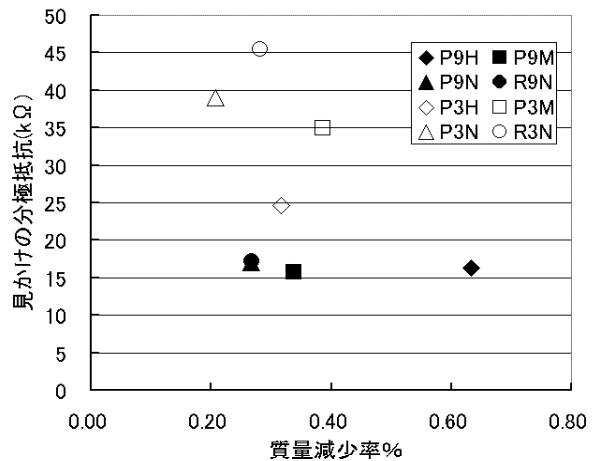


図-9 見かけの分極抵抗と質量減少率の関係

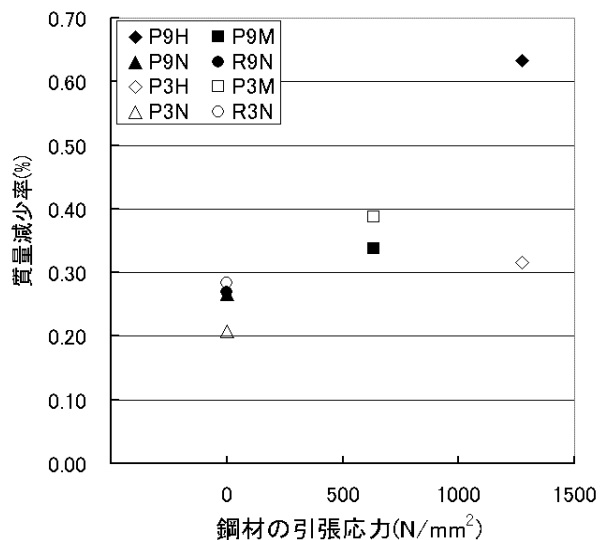


図-10 鋼材の引張応力と質量減少率の関係

#### 4. 結論

本研究の結論は以下のとおりである。

##### (1) 自然電位について

鉄筋の腐食状況の把握と同様にP C鋼より線においても、自然電位の測定は有効であり、その測定結果と腐食状況は電位が卑な場合はよく対応した。ただし、測定の対象となるコンクリートが非常に乾燥している場合には、湿潤時間を長く設定する必要があると思われる。

##### (2) P C鋼より線の腐食状況について

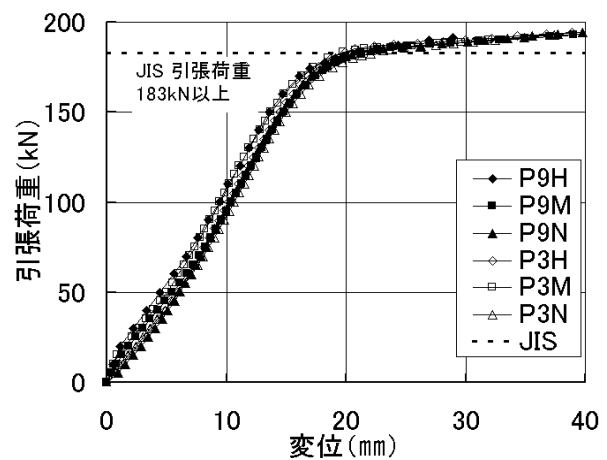
P C鋼より線に与える引張力が大きいほど、鋼材は腐食しやすい傾向であった。またその傾向は塩分量が多い供試体ほど顕著に現れた。

#### 参考文献

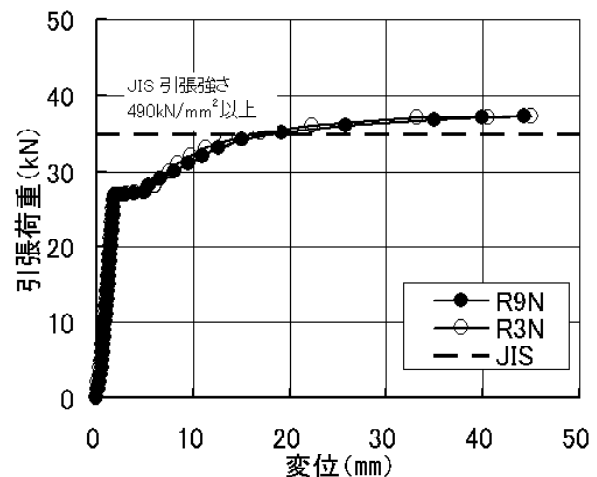
- 1) 井川一弘ほか：コンクリート中鋼材の自然電位の測定方法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.1769-1774, 2003
- 2) 堀口健一ほか：自然電位を用いた鉄筋腐食の定量的評価手法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.1065-1070, 2004
- 3) 上田隆雄ほか：塩水を噴霧したP C鋼材の応力腐食挙動，コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 22, No.1, pp.109-114, 2000.7
- 4) 小林佑規ほか：7本よりプレストレスングストランドの空气中疲労強度および3%NaCl中腐食疲労強度，プレレストコンクリート, Vol. 31, No.2, pp.7-15, 1989.3
- 5) (独)土木研究所，日本構造物診断技術協会：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル，技報堂出版, 2003

表－4 鋼材の引張試験結果一覧

番号	鋼種	引張強さ	破断箇所
P9H	SWPR7B	1953.2N/mm <sup>2</sup>	中央部
P9M	SWPR7B	1959.3N/mm <sup>2</sup>	定着部
P9N	SWPR7B	1969.4N/mm <sup>2</sup>	定着部
R9N	SD345	523.6N/mm <sup>2</sup>	中央部
P3H	SWPR7B	1967.4N/mm <sup>2</sup>	定着部
P3M	SWPR7B	1926.9N/mm <sup>2</sup>	定着部
P3N	SWPR7B	1959.3N/mm <sup>2</sup>	定着部
R3N	SD345	522.0N/mm <sup>2</sup>	中央部



図－11 P C鋼より線の引張試験結果



図－12 鉄筋の引張試験結果