

## ある4種PC鋼棒の破断事故から

久 富 洋  
藤 盛 紀 明

## § 1. はじめに

ここに報告するのは、あるプレストレスト・コンクリート構造を持つ建物が竣工引渡し後にPC鋼棒破断という事故を起こし、その事故の原因調査と対策を講ずる過程において、使用した4種PC鋼棒に関する性状が明らかにされる経過を物語るものである。今回の事故が一応グラウト不備という施工ミスによって生じたものとされながら、その実4種PC鋼棒を使用したこと自体にも問題があったことを探り出したものである。

最近構造断面を小さくする目的から、特に建築物のプレストレスト・コンクリート構造にはより高張力な鋼棒を使用する傾向があり、この材料の一面の高性能にとらわれて副作用ともいべき欠陥に気付かぬ危険がある。またこのような事故は報告されることが少なく、よってなかなか広く認識され難い。本報告をひとつの警告として、プレストレスト・コンクリート構法にたずさわる設計者、施工者の方々が同じ危険を繰返さぬように希望するものである。

## § 2. 事故発生状況

当社施工のプレストレスト・コンクリート構造を持つ建築物の構造部材であるPC鋼棒が破断するという事故が発生した。この建物はA設計事務所・B構造研究室の設計によるもので、柱・はり等をすべてプレストレスト・コンクリート部材で構成し、相互をPC鋼棒で締付けるといった特異な構造計画を持っている。事故はこの柱とはり(スラブ共)を締付けているPC鋼棒に生じた。もし引続いてこの事故が進行すれば、はりスラブは柱と構造的なつながりを失い落下するといった重大災害になる。

事故は建物の竣工引渡し後8か月目に発見されたが調査の結果、これまでにすでに数本の鋼棒が破断したまま

見過がれていることが判明した。柱とはりの締付け鋼棒は1か所に4～8本あり、1建物に約200本の鋼棒を数える。事故を発見した時点で1か所1～2本の破断、全数で5本の破断が認められた。図-1に柱とはりの締付け部を模型的に示す。

事故調査は、はりの下に仮サポートを入れ、最悪の事態に備えながら実施された。

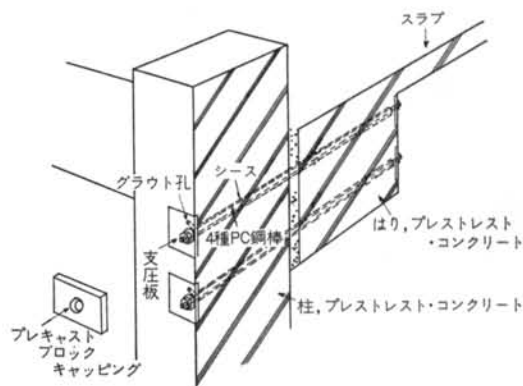


図-1 事故を起こした柱とはりの締付け部

## § 3. 事故部の調査

鋼棒破断のあった部分のプレキャスト・キャップを取外した外観、ならびに建物天井裏側から見た状況では、支圧板は表面的にかなり発錆をみている。鋼棒の抜け出した孔を観察すると、充填してあるべきグラウトがほとんど認められず、発錆したシースが直接見られる。シースは必ずしも直線状になく、途中で曲っておりしたがって一方の孔から他方の孔が三か月形に見られるもの、あるいは孔の形としては認められず、わずかに前方に明りが感じられるものなどさまざまである。

破断した鋼棒は5か所のうち3か所を回収してある。破断部分は、鋼棒の中央に近いもの、建物内側の定着ナ

ット近くのものといろいろである。建物の施工時には、建物内側に定着ナットを取付け、建物外部からプレストレスをかけているため比較的建物内側、すなわち定着側の破断が多く、緊張側の破断は認められない。

破断面はいずれも鋼棒に直角な平面状で、これに特有なヘリングボーン模様のある脆性破壊の様相を呈している。図-2にこれを模型的に示す。鋼棒の表面は一様に発錆をしているが著しいものではない。ただし破断部分を中央にして1側に黒ずんだ錆が認められる。図-3にその様子を示す。この側が建物に取付けられていた場合のいずれの側(上または下)であったかは不明である。

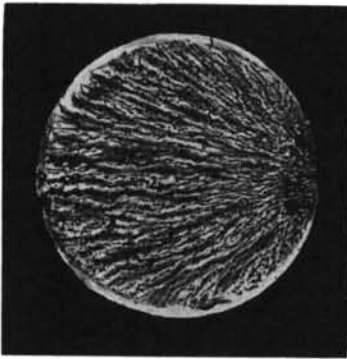


図-2 PC鋼の脆性破断面



図-3 破断部分表面の発錆状況

#### § 4. 事故原因の検討

設計者を中心とする事故打合わせ会では、破断面の状況ならびに現場の状況から、破断の原因をグラウト不備による応力腐食としてその対策を行なうこととした。しかしここで4種PC鋼棒自体に関する疑惑が提出され、その応力腐食(実は水素脆性破壊によるものとされる。——後述する)に対する抵抗性の低さが、一部の識者の間から問題とされていることが語られた。ここに参考までに応力腐食および水素脆性破壊に関する解説を文献1), 2), 3), 4), 5), 6)を要約して述べる。

##### (1) 応力腐食割れ

応力腐食割れの特徴は応力、腐食ともに各単独ではまったく金属材料を破壊しない程度に小さく弱いものであっても両者が同時に重畳することによって異常な脆性破壊類似の大破

壊を発生させることである。

応力腐食割れの過程は割れの核の発生と割れの伝播にわけて考えられる。

割れの核の発生は腐食によるものであるが、その要因は次にのべるような事柄が複雑にからみあっている。

- (a) 応力による金属の電位変化
- (b) 粒界折出
- (c) 表面皮膜
- (d) メカノケミカル反応

割れの伝播機構には電気化学腐食説と腐食—脆性割れ交番説の2つがある。

##### (2) 水素脆性割れ

腐食に基づく水素脆性割れは広義の応力腐食割れの一種である。水素の存在によって鋼材が脆化することは以前から知られているが、その機構については Troiano, Grarafolo, Petch, Azou, Bastien 等の諸説がある。それは鋼の表面エネルギーの低下、水素の集積による高圧の発生、偏析による鋼自体の脆化等である。

水素脆性割れは粒界割れが多く、割れの伝播は不連続的である。現在のところ高張力鋼の水素脆性割れを防止する確実な方法は皮肉な方法—機械的強さを低くする方法しかない。

以上の打合わせによって、事故は当面グラウト等の施工不備によるものとされながらも、4種PC鋼棒の脆性破壊という、われわれ一般の建築技術者にとって耳なれない言葉が現われ、この分野の知識を必要とするに至った。

大築研究所長の示唆により、金属工学の専門家にこの件に関して助言を得るために、東京工業大学金属学田中研究室に事故報告と、破断鋼棒のサンプル提出を行なった。

田中研究室の意見は、破断は水素脆性破壊によるものと思われること、現場の状況は水素脆性破壊を発生するのに理想的なふんい気にあること(すなわち大きな応力下において湿度、水分、外気流通等)を示された。

打合わせの結果、従来広く一般に用いられ、しかも事故例をきかない2種PC鋼棒と問題の4種鋼棒の水素脆性ならびに応力腐食に関する比較実験を依頼し、4種鋼棒の特性に関する認識を得ることとした。その実験結果報告は§6ならびに§8に述べている。

#### § 5. 事故部以外の現場鋼棒の調査と対策の検討

当面事故原因をグラウト不備としたことにより、同建

物に対し、全鋼棒部のグラウトの在否確認調査を行なった。調査方法はグラウト孔(図-1参照)からピアノ線を挿入するもの、および一方のグラウト孔から空気入れてエアを圧入し、他方のグラウト孔からこれが漏れ出す状況を調べるものである。定量的にはほとんど根拠とはならない方法ではあるが、現場の条件から適当と判断されたものである。

調査の結果を検討し、多少ともピアノ線が挿入できるもの、またエア漏れがあるものをグラウト不備として対策の対象とすることにした。グラウト不備とされなかったものは200本中の86本である。ピアノ線による調査とエアによる調査の間には余り相関関係が認められない。エアが漏れるもの必ずしもピアノ線が入らず、その逆もあり調査方法自体の信頼性にも多少疑問があり、またグラウト不備といってもいろいろな状況があることが考えられた。

対策の対象としたもののうち、破断した5本を含む34本に関しては、グラウトがほとんど認められず鋼棒を交換する方針とした。残りの1部にグラウトの存在がありしかも不十分と認められたものに関しては、再グラウトによる他に処置がないものと考えられた。いずれの場合もグラウトの材質と施工法に関し検討を必要とした。

## § 6. グラウトに関する検討

この間、文献調査により、高張力鋼の水道水中およびモルタル中における脆性破壊に関する資料<sup>10)</sup>を得、モルタルグラウトに対する危ぐの念を生じ、モルタルに代えてエポキシ樹脂によるグラウトを用いる案が提出された。この施工性ならびに付着力等の資料を得るため「プレストレスト・コンクリートにおけるエポキシグラウトとその付着効果について」(実験の要約を付録-1に示す)実験を行なった。

その結果、エポキシグラウトは鋼棒破断の際の飛来防止には有効であり、また水素脆性破壊に対処するものとしては有効と推定されるが、耐熱性の問題、破断の検知、交換不能、クリープによるプリストレス保持不可能等の性能を加案すると必ずしも有利とは考えられず、さらにエポキシ樹脂そのものの試験方法の未確立、その組成等に関する未知な範囲もあり、これを以て長期の保証をするには至らぬものと判断された。

以上から、グラウトに関してはモルタルを使用してもエポキシ樹脂を使用しても、長期的な保証に対して不安を生ずるものとなった。

次で東京工大に依頼してあった2種および4種鋼棒の比較試験の中間報告がなされ、4種鋼棒が水素脆性に対して抵抗力が極めて低いこと、ならびに現在実施しているようなグラウト方法によっては水素脆性破壊を生じ易い条件にあることが確認された。

これらのことから問題は4種鋼棒そのものに重点が置かれることになり、したがってグラウトは比較的その性状が知られており、かつコスト的にも有利なモルタルを使用することにし、事故発生に対してはリストラブの落下を防止すべく添え柱を設けることを検討する段階に至った。この場合、グラウト中には通常用いられるアルミ粉末の混入を控え、積極的な水素発生を防止することにした。(ただしこの処置は後の報告で誤りであることが分る。)1部にモルタルグラウトが残り、しかもピアノ線やエアによる調査の結果不備が認められるものに関しては、エポキシグラウトによって再グラウトをし、ポイドを除くことにした。エポキシ樹脂の充填性を有効に利用するものである。

## § 7. 対策

問題点として4種PC鋼棒に関するものを残したまま現場の対策を講ずることになった。もはや鋼棒を他種のものに交換することは不可能であり、またグラウトの材質に関しても、その主成分たるセメントに危険性が大きいと考えられれば添加物の加減によって調整することもできない。したがって工法としては従来のグラウトを実施すること、また再グラウトにはエポキシ樹脂を使用することとし、抜本的に添え柱によって重大事故を防ぐことを方針として決定した。

柱とはりの締付け鋼棒の先端部は外壁に露出し、たとえ原設計に示されるプレキャスト・コンクリートのキャップをかぶせたとしても、ここから雨水の浸入を止めることは難かしいと考えられる。そこで鋼棒先端とナット部をガラスクロスを入れたエポキシ樹脂でシールする対策を提案した。この部分は原設計があまり雨水に対して考慮されていないものをそのまま施工した結果、ここから浸入した雨水が今回の事故の直接原因となったものと考えられる。

## § 8. 4種PC鋼棒の問題点

前項までにおおよそ4種PC鋼棒の問題点が明らかに

なったが、これを施工と関連づけてその使用に対する危険性を述べたいと思う。

東京工大の実験報告(付録-2に示す)中に4種鋼棒が水素脆性破壊を起こし易い性質を持つことが示されている。その因子となる水素はグラウト中に含まれるアルミ粉末とアルカリの反応による水素ガス  $H_2$  ではなくグラウトを溶解した水分中のHであるとされている。グラウトの成分は報告書中に示される。その成分中のアルミ粉末の存在は直接影響を与えないことを実験が示している。またポゾリスおよびフライアッシュは量的にも少なくこれも影響を与える性質のものではないと考えられる。したがって本実験および文献から水素脆性破壊の要因として働くのはグラウト中のセメントに最も危険性があると推定される。特に水分があつてグラウトを溶解しているものに鋼材を接した場合が甚しいとされているが水分の存在しないグラウトは考えられないから、現在の材料と施工法を採用している限り4種鋼棒は常に水素脆性破壊を発生する危険をはらんでいることになる。

前述した通り一般に応力腐食もしくは水素脆性破壊をきたす条件は次の3要素である。

- 1) 鋼材に対する応力の存在
- 2) 鋼材の材質
- 3) 周辺のふんい気

プレストレスト・コンクリート構造に鋼棒を使用するからには1)の応力を除去することはできないはずである。また3)のふんい気は前に述べた通り好ましいものではない。したがってこの種の破壊を回避するには2)の材質を改良するより方法がない。すなわち結果的には4種鋼棒は使えないのではないかとわざるを得ない。

あるいは必要によっては、グラウトの材質を変える、もしくは鋼材の表面にコーティングを施すなどして3)のふんい気と絶縁することが1つの方法であろう。ただしこの場合、コーティング等の材質は鋼材および周囲のコンクリート、モルタル等との付着力に秀れ、強い耐水性の皮膜を形成するもので、それ自身が鋼材に水素脆性破

壊を発生させる成分を持たぬものであることが必要である。施工中に、曲がったシースに鋼棒を叩き込むこともあり皮膜は強靱であるべきである。現在可能性のあるものとしてエポキシコーティングが考えられるが、その鋼棒に対する脆性破壊を来す性質の存否は推定の域を出ていない。またこれをごく薄いコーティングとした場合の機械的な弱さ、逆にかなり厚い層とした場合にはすでに実験結果に示されるような危ういことがあることが考えられる。したがって現在直ぐに指摘できるような解決策は持ち合わせていない。

## § 9. おわりに

はじめに述べた通り、建築の分野にも次第に高張力鋼が使われ出してきており、さらに金属メーカー達の『もはや4種の時代ではなく5種鋼棒の時代です』などというあおりに乗って一面的にこれを良しとしてしまう危険がある。特にメーカーサイドはこういった危険を承知していながら施工指針にも示さずなんら注意をしていない。今回の調査中も、遅れ破壊に関する文献の幾つかはメーカーから入手したものであり、また実験も自主的に行なっている。確かに実験と現場とでは状況が違い、特に耐用年限などに関しては予想がつかないことは事実であろう。しかしこういった重大な性質を何等示さずにいることはほめられたことではあるまい。

高張力鋼の脆性破壊は他分野(造船、圧力器等)の技術者にとっては周知のことである。建設の分野においても、すでにこの種の事故が散見され、著者は以前文献(8)、(9)において警告を発している。

使用中の構造体についての今回のような事故は恐らく珍しいものであろう。しかし世の中が高張力鋼化している現状から、今後もこれに類似した事故が発生する可能性は大であると考えられる。よってその取扱いについての警告として事の次第を報告したものである。

## <参考文献>

- 1) 川田雄一他：“材料強度工学ハンドブック”
- 2) 長谷川正義：“ステンレス鋼便覧”
- 3) 日本工業連盟：“新しい構造設計と強度材料”
- 4) Hall, Kihara, Soete, and Wells：“Brittle Fracture of Welded Plate”
- 5) ASTM Special Technical Publication No. 425：“Stress Corrosion Testing”
- 6) L. L. Iffe：“Toughness and Brittleness in Metals”
- 7) L. L. Shreir：“Corrosion”
- 8) 藤盛紀明：“鉄筋の切欠きぜい性破壊” 清水建設株式会社研究所，研究情報第5号
- 9) 藤盛紀明：“仮設に使われる鉄筋の破断と対策” 施工 1967年12月号
- 10) 辻村昂，今村弘：“高張力鋼の遅れ破壊現象について” 第12回橋梁構造工学研究発表会 昭和40年11月26日

付録一. プレストレストコンクリートにおけるエポキシグラウトとその付着効果についての実験報告

§ 1. 目的

プレストレストコンクリートにおけるPC鋼棒の水素脆性破壊あるいは応力腐食破壊の防止、およびPC鋼棒破断時の飛来防止のために、セメントペーストの代りにエポキシ樹脂によってグラウティングし、その付着効果を検討した。

エポキシ樹脂は現場の状況を考慮し水硬性のもの3種類を使用した。なお比較のためセメントペーストについての実験も行なった。

§ 2. 実験項目

次の3項目について実験を行なった。

- (1) 両端のナット弛緩後のコンクリート表面の歪変化
- (2) 両端のナット弛緩後のPC鋼棒の引き抜き試験
- (3) 充填の度合の調査

§ 3. 試験体

3.1 形状および種類

試験体の形状および種類を図一、表一に示す。

3.2 PC鋼棒および引張力

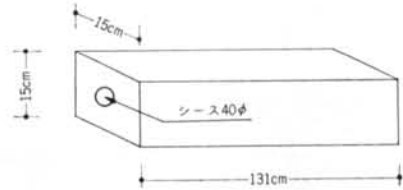
使用したPC鋼棒は第2種PC鋼棒、公称径24φ、(実質径23.2φ)その機械的性質を表二に示す。

試験体の引張力、26.7ton、PC鋼棒の応力に換算し63kg/mm<sup>2</sup>、試験体の導入応力は125kg/cm<sup>2</sup>である。

引張力の確認は、予めキャリブレーションしたジャッキのマノメーターによる。

3.3 コンクリート強度

試験体に使用したコンクリートの強度および応力歪



図一 試験体形状

番号	充填材
EP-1	エポキシ(東都化成TW1405)水硬性
EP-2	エポキシ(〃 TW2405)〃
EP-3, 4	エポキシ(〃 TW2205)〃
MO-1	セメントペースト(セメント:ボゾリス:水 =111kg:345g:45%)

表一 試験体番号および充填材

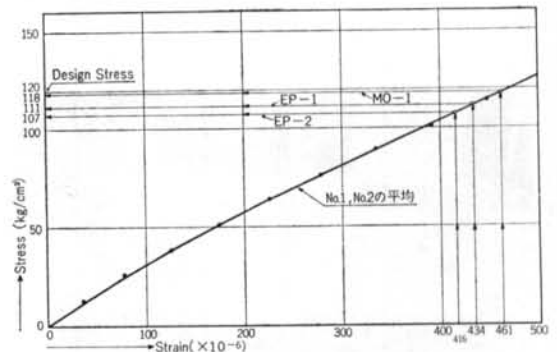
引張強さ	46.75ton	110.1kg/mm <sup>2</sup>
弾性限	36.00ton	85 kg/mm <sup>2</sup>
0.2%降伏点	38.40ton	90.5kg/mm <sup>2</sup>

表二 PC鋼棒の機械的性質

材令	No.	1	2	3	平均
3日		423	429	432	428
21日		472	510	475	486
28日		520	520	485	470

ただし打設後1日蒸気、以後空中放置。

表三 コンクリート強度 (kg/cm<sup>2</sup>)



図二 材令3日のコンクリートの Stress-strain Curve

曲線を表-3, 図-2, 図-3, 図-4に示す。

### 3. 4 充填材の強度

使用した充填材の各強度を表-4に示す。

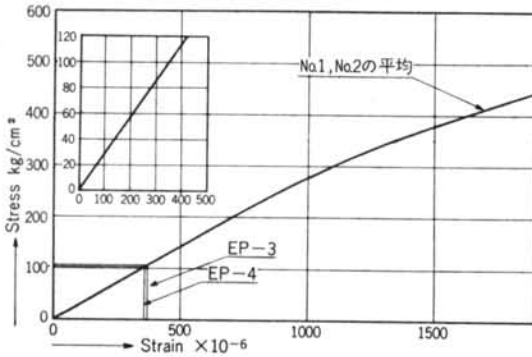


図-3 材令24日のコンクリートの Stress-strain Curve

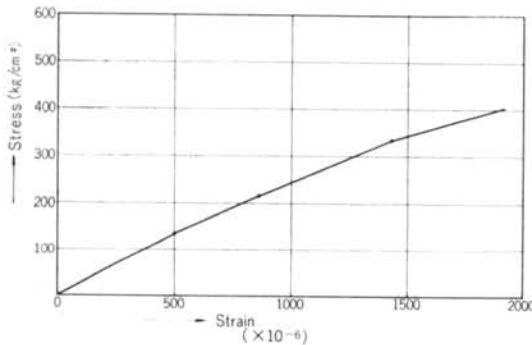


図-4 材令31日のコンクリートの Stress-strain Curve  
(No.① No.② No.③ の平均)

### § 4. 測定方法

コンクリート表面の歪変化の測定はワイヤーストレンゲージおよびコンタクトゲージによる。(写真-1)

引き抜き試験時の鋼棒端部の動きは1/100mmダイヤルゲージによる。(写真-2)

載荷は30 tおよび50 t センターホールジャッキによる

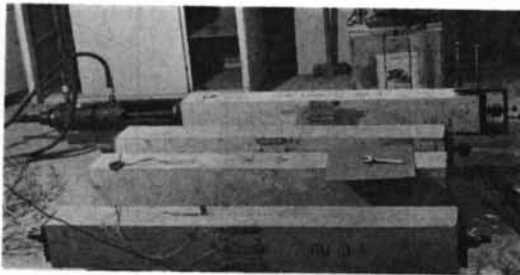


写真-1 試験体形状

試験体NO	充填材		材 令				
			3日	1W	2W	3W	4W
EP-1	TW1405	圧縮	*	*	*	—	517
		曲げ	*	*	281	—	496
		引張	*	*	*	—	215
EP-2	TW2405	圧縮	*	*	*	—	553
		曲げ	*	*	351	—	605
		引張	*	*	*	—	198
EP-3,4	TW2205	圧縮	699	932	919	—	—
		曲げ	535	512	481	—	—
		引張	161	181	112	—	—
MO-1	セメントベ-ースト	圧縮	136	249	—	—	370
		曲げ	31	51	—	—	87
		引張	—	—	—	—	—

○\* クリープのため測定値なし

○— 試験値なし

○セメントベーストは水中養生

○エポキシは室中放置(促進養生のものはさらに強度が増進している)。

○エポキシの試験はJIS R5201によった。材令の増大に伴って強度の減少しているものがあるが、これは試験方法の不備に起因するところもあり、現在この点について検討中である。

実際に材令の増大に伴って強度の減少のみられるものについては、図に示すように、その減少の割合は現在のデータの範囲では10%以内である。

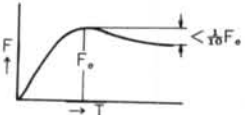


表-4 充填材の強度

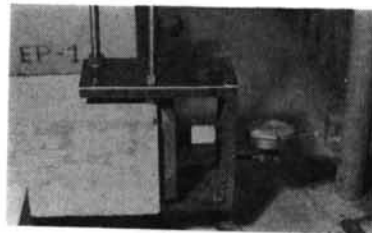


写真-2 引き抜き試験のダイヤルゲージ取付状況

### § 5. 緊張後および応力解放後のコンクリート表面の歪変化による有効プレストレスカの算定方法

コンクリート表面の圧縮歪は応力導入後クリープ等によって増大しそのためPC鋼棒の引張力は低下する。したがって有効プレストレスカは(1)式によって算定される。

$$P = A_s E_s (\epsilon_{s0} - \epsilon_{cr}) \quad \dots (1)$$

$$\epsilon_{cr} = \epsilon_c - \epsilon_0 \quad \dots (2)$$

ここで P: 有効プレストレスカ



$A_s$  : PC鋼棒の断面積  
 $E_s$  : PC鋼棒のヤング係数  
 $\epsilon_{s0}$  : 応力導入時のPC鋼棒の引張歪  
 $\epsilon_{cr}$  : クリープ等によるコンクリートの圧縮歪  
 $\epsilon_c$  : 応力導入前を起点としたコンクリートの圧縮歪  
 $\epsilon_{e0}$  : 応力導入直後のコンクリートの圧縮歪

すなわちコンクリートのクリープ等によって減少するプレストレス力  $P'$  は(3)式で与えられる。

$$P' = A_s E_s \epsilon_{er} \quad \dots (3)$$

これをコンクリートの圧縮歪に換算すれば(4)式となる。

$$\epsilon_c' = \frac{E_s}{E_c} - \frac{A_s}{A_c} \cdot \epsilon_{er} \quad \dots (4)$$

ここで  $\epsilon_c'$  : クリープ等によるプレストレス力として有効なコンクリートの圧縮歪の減少分

$E_c$ ,  $A_c$  : コンクリートのヤング係数および断面積

すなわち有効プレストレス力を表示するコンクリートの圧縮歪  $\epsilon$  は(5)式で表わされる。

$$\epsilon = \epsilon_{e0} - \frac{E_s}{E_c} \cdot \frac{A_s}{A_c} \cdot \epsilon_{er} \quad \dots (5)$$

$$= \epsilon_c - \epsilon_{cr} - \frac{E_s}{E_c} \cdot \frac{A_s}{A_c} \cdot \epsilon_{er} \quad \dots (6)$$

応力解放後のコンクリートの圧縮歪の弛緩を  $\epsilon_e''$  とすれば、残留有効プレストレス力を表示するコンクリートの圧縮歪  $\epsilon'$  は(7)式で表示される。

$$\epsilon' = \epsilon - \epsilon_e'' \quad \dots (7)$$

この時残留有効プレストレス力  $P''$  は(8)式で表示される。

$$P'' = A_c \cdot E_c \cdot \epsilon' \quad \dots (8)$$

## § 6. 実験結果

6.1 両端のナット弛緩後のコンクリート表面の歪変化  
実験の結果を表-5, 図-5, 図-6, 図-7, 図-8, 図-9, 図-10, 図-11に示す。

6.2 両端のナット弛緩後のPC鋼棒の引き抜き試験  
結果を図-12に示す。

その概要を以下に示す。

(1) エポキシ樹脂はクリープ変形をおこし、低荷重でも

試験体	弛緩方法	30分後	30分以降
EP-1	両側J, S	60%	4日後に27%
EP-2	同上	80%	4日後に26%
EP-3	両側J, T	99%	測定値なし
EP-4	片側G	65%	60分後に64%
MO-1	片側J, T・片側G	49%	変化なし

J : ジャッキにて引張 S : スパナ  
T : タガネ G : アセチレンガス切断

表-5 両端のナット弛緩後のコンクリート表面の歪変化  
(弛緩直前の有効歪を100%とした場合の残留歪の割合)

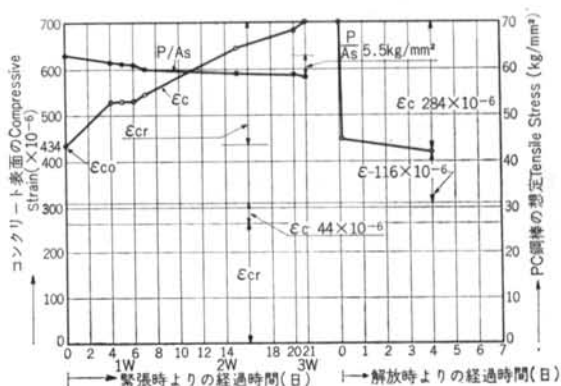


図-5-11の符号の説明

$P$  : 有効プレストレス力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )  
 $A_s$  : PC鋼棒の断面積 ( $\text{mm}^2$ )  
 $\epsilon_c$  : 応力導入前を起点としたコンクリートの圧縮歪  
 $\epsilon_{cr}$  : コンクリートのクリープ等による圧縮歪  
 $\epsilon_{e0}$  : 応力導入直後のコンクリートの圧縮歪  
 $P'$  : コンクリートのクリープ等によって減少するプレストレス力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )  
 $\epsilon_c'$  : プレストレスとして有効なコンクリートの圧縮歪の減少分  
 $\epsilon_e''$  : 残留想定有効歪  
 $\epsilon_e''$  : コンクリートの弛緩歪

図-5 EP-1 緊張および応力解放後のコンクリート表面の歪

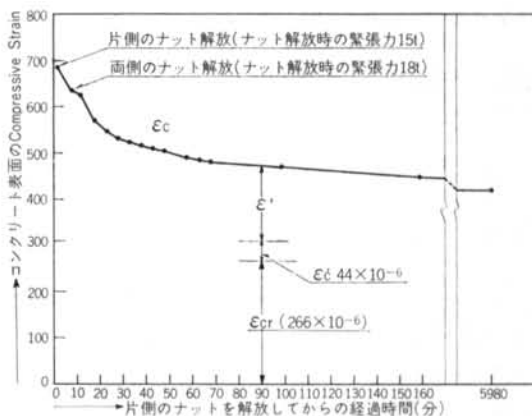


図-6 EP-1 応力解放後のコンクリート表面の歪

他端の変位がみられる。

- (2) エポキシ樹脂の見掛けの最大付着力は  $37\text{kg}/\text{cm}^2$  より大である。
- (3) モルタルの付着力は  $14.2\text{kg}/\text{cm}^2$  である。

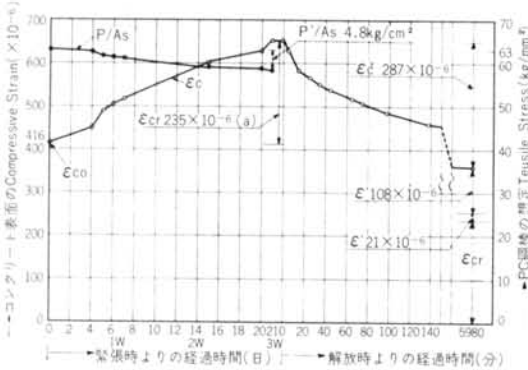


図-7 EP-2 緊張および応力解放後のコンクリート表面の歪

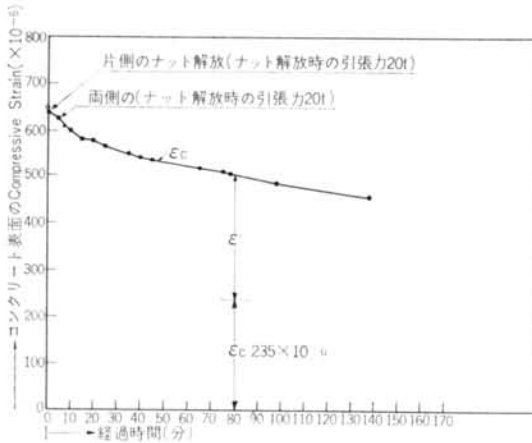


図-8 EP-2 応力解放後のコンクリート表面の歪

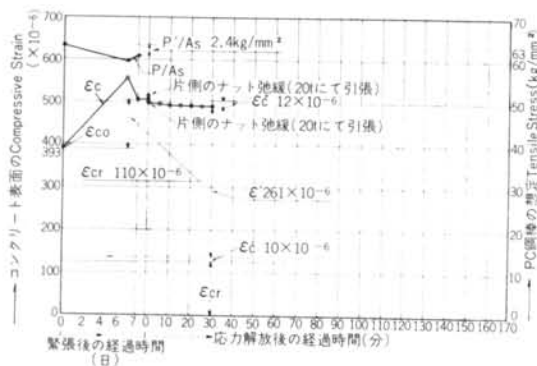


図-9 EP-3 緊張および応力解放後のコンクリート表面の歪

### 6.3 充填の度合

各試験体の切断面の写真を写真-3, 写真-4, 写真-5, 写真-6に示す。

EP-2, EP-3は完全に充填されているが, EP-1, MO-1は上部に空隙がみられる。

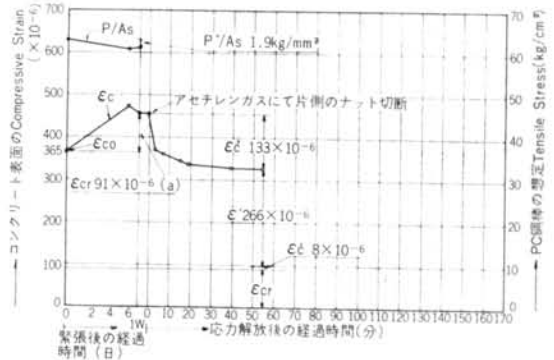


図-10 EP-4 緊張および応力解放後のコンクリート表面の歪

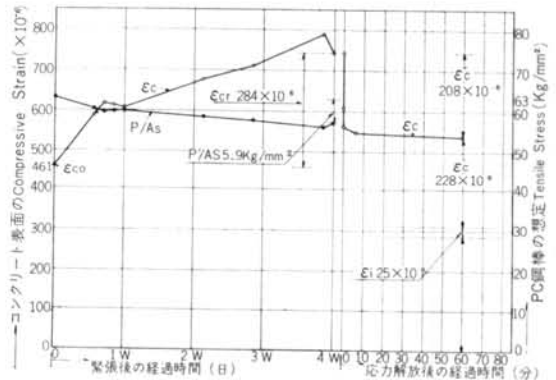


図-11 MO-1 緊張および応力解放後のコンクリート表面の歪

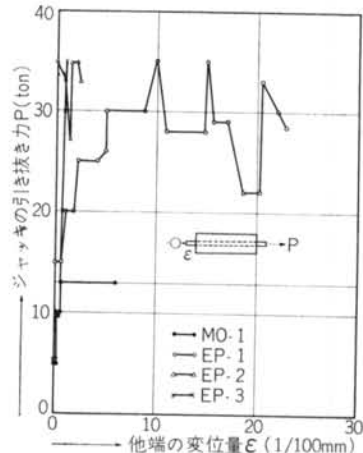


図-12 引き抜き試験結果





写真-3 MO-1の切断面

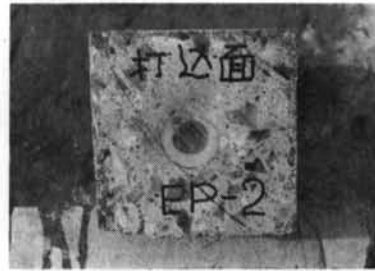


写真-5 EP-2の切断面



写真-4 EP-1の切断面



写真-6 EP-3の切断面

## § 7. 考 察

エポキシ樹脂の付着力はモルタルのそれに比してはるかに大きく、PC鋼棒破断時の飛来防止効果は十分保有するものと考えられる。

しかしながら樹脂それ自体に粘性があり、クリープ現象が生ずるため、薄層でない限りエポキシ樹脂にプレス

トレス力の保持を期待することは困難である。さらにこのクリープ現象は温度の上昇と共に増大すること、およびエポキシ樹脂の発火点が450℃程度と考えられることのため、火災時の問題がある。付着力の大きいことは、飛来防止効果に有利である反面、PC鋼棒の破断を検知するには不利である。仮りに検知しえたとしてもその鋼棒の交換は不可能に近いものと思われる。

東京工業大学教授 工博 田 中 良 平  
同 大学院 工修 許 延 珪

### 1. まえがき

清水建設の建築用 P C 鋼棒 (4 種) が破断事故を生じた件について、その原因を調査した結果を報告する。住友電工の調査では、1 年程度の大気中曝露試験によって、この種の鋼はいわゆる応力腐食割れを起こさないと<sup>1)</sup>しているが、この結論は妥当でないと考えられる。しかし、本事故品と同種類の事故品については全面腐食である発錆の進行によって<sup>2)</sup>応力腐食割れであると断定しているのもなづけない。筆者らは提供された破断事故品の硬度レベルおよび破断面の様相などから、この事故が応力腐食割れなしは水素に起因する遅れ破壊によるものであると推定し、その観点から破断事故品の顕微鏡組織検査、応力腐食試験、水素脆化試験および吸蔵水素量測定などを行ない、それらの結果にもとづいて事故原因を検討した。

### 2. 試料および試験方法

#### 2.1 試料

供試材は事故発生材料と同じ S B P C 4 種鋼棒 (M 型熱処理 4 種) で、その化学成分を第 1 表に、また機械的性質を第 2 表に示した。

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	V
0.65 ~0.75	0.60 ~1.00	1.00 ~1.40	0.030 以下	0.030 以下	0.20以下	—	—

第 1 表 S B P C 4 種の化学成分(%)

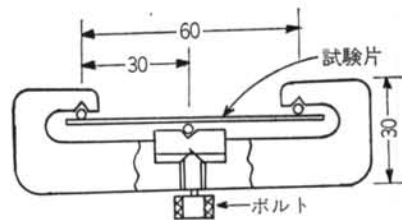
引張強さ(kg/mm <sup>2</sup> )	0.2%耐力(kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び(%)
125	110 以上	5.0 以上

第 2 表 S B P C 4 種の機械的性質

なお比較のために事故発生率の低い S B P C 2 種鋼棒 (M 型圧延 2 種) も実験に供した。その化学成分は第 1 表と同じであるが、引張強さは 95kg/mm<sup>2</sup>、0.2%耐力は 80kg/mm<sup>2</sup> である。検鏡および硬さ測定は受入れたままの 23mm φ 丸棒を長さ 20mm に切断してその断面について行ない、応力腐食試験、水素脆化試験および吸蔵水素量測定には 15×80×2mm<sup>3</sup> の試片を機械加工により調製して使用した。

#### 2.2 試験方法

応力腐食試験および水素脆化試験は定歪法によりピーム法応力腐食試験ホルダーを使用して行なった。第 1 図はホルダーの略図また写真—4 はホルダーに試片をとりつけた状態を示す。試片には静的曲げ荷重をかけるわけであるが、引張側の最大応力を正確に求めることは困難なので、データの表示は応力の代わりに中央部の撓み量によって整理した。試片は各応力レベルに保ったまま 0.5% 酢酸+H<sub>2</sub>S 飽和溶液、0.1~4% NaCl 溶液、水道水中等に浸漬し、割れ感受性あるいは水素量を調べた。



第 1 図 ボルトを締めて試験片に曲げ応力かける

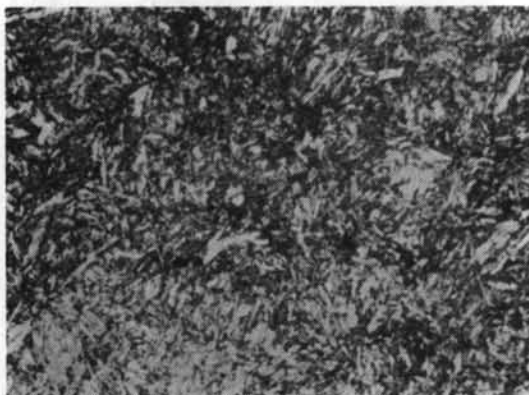
### 3. 試験結果

#### 3.1 破断事故品調査

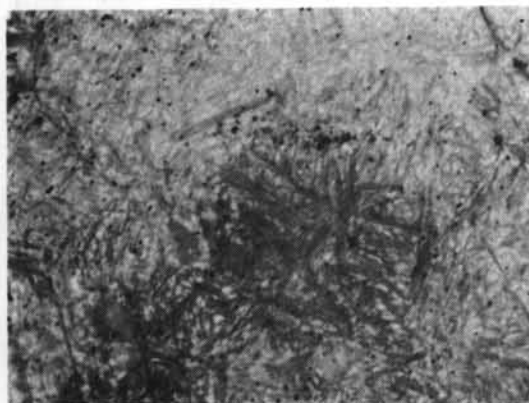
##### 3.1.1. 顕微鏡観察

破断部の近傍より検鏡用試片を採取し組織を調べたが

写真一1 に示すように正常な焼もどしソルバイト組織を呈している。水素脆性割れはマルテンサイト組織のみに限られると思われがちであるが、炭素鋼の遅れ破壊についてはソルバイト組織が一番敏感で粗大パーライトが最も鈍感であるとする報告もあるし、ベイナイト組織が同

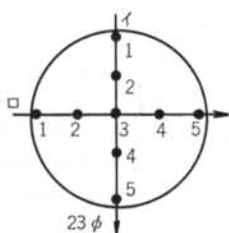


写真一1



写真一2

測定点	1	2	3	4	5
イ	409	407	409	407	415
ロ	415	388	409	412	401



第3表

じ強度レベルのマルテンサイト組織と同じ程度の感受性を持つとの報告もある<sup>4)</sup>。したがって試料によってC含有量や強度の差もあり、組織だけでは一概に論じることができない。

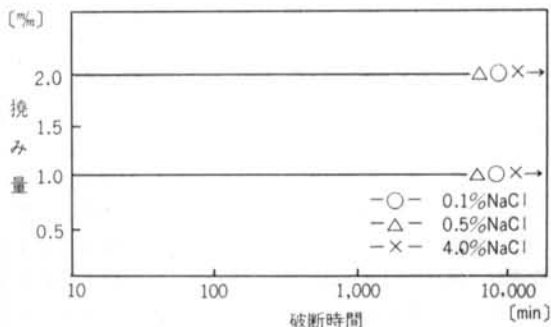
### 3.1.2. 硬さ測定

検鏡用試片の横断面のピッカース硬さを測定した結果は第3表に示した通りで、とくに異常は認められない。

また同試料を 900℃×0.5hr 加熱し水焼入れした試料の縦断面の硬さ測定結果も中心部までよく焼きが入っていることを示している(第4表 写真一2参照)。

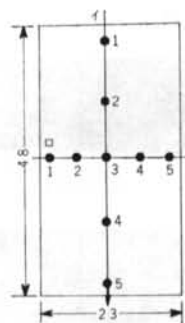
### 3.2 応力腐食試験

0.1~4%NaCl 溶液中におけるSBPC 4種試片の応力腐食割れ感受性を第2図に示した。腐食減量が非常に多く全面腐食の進行のみで、10,000minの浸漬後も応力腐食割れの様相は全く見られない。



第2図

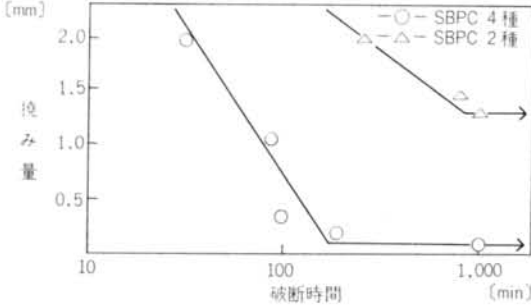
測定点	1	2	3	4	5
イ	766	818	802	639	628
ロ	746	683	802	875	818



第4表

### 3.3 水素脆化試験

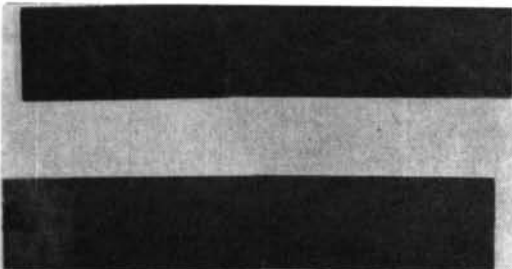
第3図に0.5%酢酸飽和 $H_2S$ 和溶液中におけるSBPC 4種とSBPC 2種の水素脆化感受性を示した。4種の感受性は非常に高く撓み量1m/mを越えると1hr以内に破断し、その限界応力は44kg/mm<sup>2</sup>付近にある。写真一3に4種(上)・2種(下)の水素脆化試片の脆性破断部を示した。このように4種が著しく水素脆化を生じやすいことから事故発生の主要な原因はこの水素による脆化であろうと推察される。



第3図

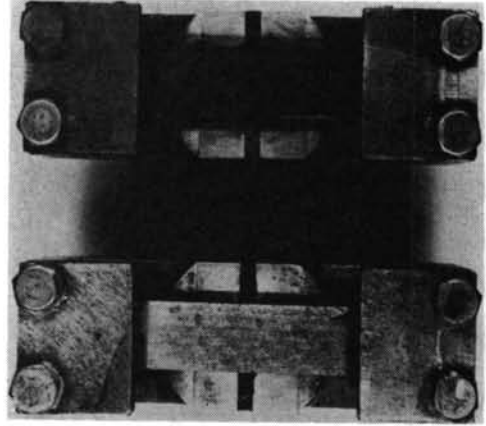
### 3.4 吸蔵水素量測定

事故原因が水素脆化であるとすればその水素が何故発生したかを明らかにすることは今後の事故防止対策上、きわめて重要なことである。そこでいろいろの環境に1日放置した試片の吸蔵水素量を計測した。その結果を第5表に示した。無応力で1日のみの浸漬なので、水素量の変化はごく微量であるが、第5表の結果からつぎのような傾向が認められる。すなわち(I)、(II)および(III)のいずれにおいてもグラウト中でのAlの添加は水素脆化に影響がなく、また(I)においてグラウトを試片表面にCoatingしたものも同様である。しかし(I)と(II)を比較すると、グラウトCoatingして水浸したものの(II)は水浸しない場合(I)より若干水素量が多く、さらに(III)のグラウト20g/800cc溶液中に浸漬した試片の水素量が著しく多い。この事実から水素発生の主要な原因としてグラウトを溶解した水分の存在が問題になると思われる。



写真一3

る。写真一4に水道水中(上)とグラウト添加溶液中(下)に3日間浸漬した試料の腐食様相を示したが、全面腐食(水道水の場合)と局部腐食(グラウト添加水溶液の場合)の違いがはっきり判別できる。



写真一4

処	理	水素量cc/100g
裸試片のまま	常温放置 1日	0.265
(I) Al 定置グラウト	Coating //	0.295
Al 2倍	// //	0.285
無 Al グラウト	Coating 水浸1日	0.370
(II) Al 定量	// //	0.340
Al 2倍	// //	0.300
裸試片のまま	水道水中1日浸漬	0.360
// , 無 Al グラウト溶液中	//	0.530
(III) // , Al 定量	// //	0.420
// , Al 2倍	// //	0.440

注：標準グラウト割合(グラウト100ℓに対し)

セメント	111kg
フライアッシュ	27.6kg
ボゾリス	345g
アルミ粉末	71g

第5表

## 4. 原因考察

- 住友の報告にあるように<sup>1)</sup>2種圧延鋼棒は1年間の大気曝露を行なってもその機械的性質はあまり劣化しないのに対し、4種熱処理鋼棒は絞りのみが低下する<sup>5)</sup>という現象は明らかに水素脆化特有の現象であるし、第3図からも事故原因が水素による遅れ破壊によるもの

であることはほぼ確実と考えられる。

- (2) グラウト中の Al は第 5 表から明らかに水素の吸蔵とは無関係であり同じ結果が Prestressed Concrete Development Group や German Federal Railways<sup>6)</sup> によって報告されている。また鋼棒表面に Coating されたグラウトは腐食電流の阻止に役立ち、水素脆化寿命を延長させる効果を持つように見える。

- (3) 同じように第 5 表から最悪の環境はグラウトのない空隙部分で、そのメカニズムについては実験的根拠がないので断言できないが、恐らく鋼材表面における含グラウト水滴の接触到に基因する局部電池の構成、あるいは炭酸化による PH の減少等<sup>7),8)</sup>の作用が考えられる。しかし含グラウト水滴中のどの成分が有害なのかは明らかでない。

#### 文 献

- (1) 住友電気工業株式会社東京支社特殊営業部技術課：P C 鋼棒の大気中曝露試験
- (2) 住友電気工業株式会社技術部品保証課：24m/mφP C 鋼棒(4 種)破断事故原因調査報告書 昭和42年6月12日
- (3) P.G. Bastien and P. Amiot : Compt. Rend., 241, (1955), 1760
- (4) E. Rnape : Corrosion, 23, (1967), 154
- (5) T. Toh and W.M. Baldwin : Stress Corrosion Cracking and Embrittlement, (1956), 176
- (6) Prestressed Concrete Development Group : London January, 1964
- (7) P.M. Losch : Rev. Constr. Mater. Constr., 18, 8, (1966), 406
- (8) V.I. Novgorodskii : Zh. Prikl. Khim., 40, 3(1967), 555