

プレストレストコンクリート原子炉格納容器の 設計・施工に関する諸問題

外 村 憲 太 郎*

1. はじめに

プレストレストコンクリート格納容器（以後 PCCV と略す）を世界で初めて採用した原子力発電所は、フランスの重水炉 EL-4 である。ここではテンドン（PC 鋼材の束）がセメントグラウトにより防錆される、いわゆるボンドテンドンが採用された。軽水炉に最初に PCCV を導入したのは、米国のギネー発電所である。この設計では PCCV の円筒部の縦方向にのみテンドンが配置されており、厳密には PCCV とは言えないかもしれない。しかしここではテンドンの防錆をグリースの充填により行うアンボンドテンドンを導入しており、以後の米国の PCCV のほとんどがそれを踏襲していることを考えると、アンボンドタイプの PCCV のパイオニアであると言える。これらの原発の建設時期は、EL-4 が 1962 年着工、ギネーが 1966 年着工であり、PCCV の歴史は約 20 年あると言える。PCCV の先駆者はフランスであったが、発展させたのは米国である。更に米国においては、ギネー発電所を設計したギルバート社は PCCV の先駆者であったが、それを発展させたのはベクテル社であった。PCCV の発展段階をベクテル社では第一世代から第三世代の三段階に分類して説明している¹⁾。第三世代と定義したのが、半球ドーム 3 バットレスと言われるものである。現在建設中の敦賀発電所 2 号機は、このタイプである。筆者らはそれを更に発展させた半球ドーム 2 バットレスを提案し、種々の実験を行ってその可能性を確認した²⁾。

一方、先駆者であるフランスは、その後ガス炉にも PCCV を採用したが、目覚ましく発展したのは 1969 年に米国から PWR 型の軽水炉を導入することに決定してからである。PWR 原発の設計・施工は EDF（フランス電力庁）の担当となり、EDF は経済性を考えて、PCCV を電気出力に応じて二種類に標準化した。最も進んだ PCCV と考えられるのは、130 万 kW_e に採用されたもので、気密維持のための鋼製ライナーを省き、図-1 に示すように PCCV の外側に外部しゃへい壁を設けている。この PCCV は 2 バットレスで、縦方向は鉛直テンドンと逆 J テンドンより構成されている。この形を採用

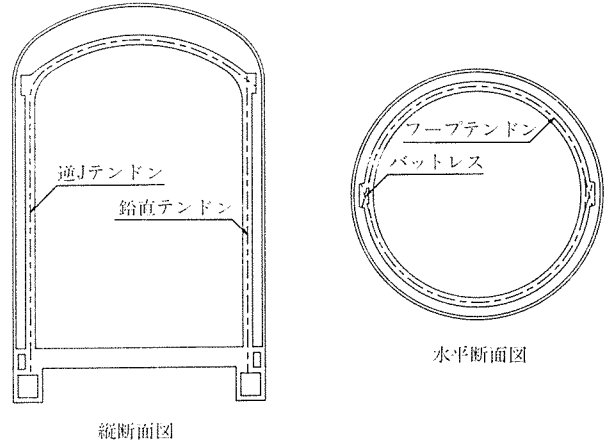


図-1 130 万 kW 標準 PCCV

した理由の推測は 3 章で行う。

PCCV はテンドンにより予めコンクリートに圧縮力を与えておき、事故時の内圧によってもコンクリートに引張力が生じないように設計されている。したがって、事故時内圧の小さいものは、それに応じたテンドンを配置すればよい。このように考えると、事故時に内圧の発生するすべてのタイプの原子炉格納容器に適用可能であるし、更に言えば、鉄筋コンクリート製の格納容器よりも、膜引張力を事故内圧に対しても発生させないという観点から、優れていると思われる。実際、米国やスウェーデン等では BWR 原発に、カナダでは重水炉の CANDU にという具合にあらゆるタイプの原発に採用されているが、やはり事故時内圧の高い PWR 原発に最も多く採用されている。

これまでに欧米の状況を概括してきたが、我が国の場合を考察してみる。我が国でも PCCV は早くから研究されており、米国最初の PCCV の設計に実習生という形ではあるが、筆者の上司である竹森達郎氏は参画しているのである。その後も多くの調査団が欧米に派遣されたり、試設計が行われたりしたが、現在やっと一基が建設中という状況で、韓国にも遅れを取っている。採用が遅れた理由について、筆者は昭和 50 年度原産会議原動研究報告書に述べているが、多少手を加えて再掲する。

- ① 輸入されたプラントが鋼製格納容器で、それによって国産された。
- ② 欧米に比較すると鋼材が安価で、容易に入手でき

* 大成建設(株)エンジニアリング本部原子力部設計計画室

る。

- ③ 格納容器の主契約者は、重工業、重電機等のメーカーであり、鋼製容器の製作を得意としていた。
- ④ 電気出力がそれほど大きくなく、鋼製で設計可能であった。

上記理由の中に経済性の比較がないが、そこが我が国と欧米の最も異なるところである。すなわち、我が国で PCCV が採用されるようになったのも、経済性が着目されたのではなく、電気出力が大きくなり（初期の 50 万 kW 級から現在は 110 万 kW 級へと）鋼製での設計が困難となってきたからである。これには少し説明がある。電気出力が大きくなるに従い、事故時の内圧が大きくなる。それに対して鋼製格納容器では、

- ① 圧力に耐えるだけ板厚を増すと、溶接後の応力除去が不要とされている板厚制限値の 38 mm を超えてしまい、現地で焼鈍しが必要となる（現在は特認で焼鈍し不要板厚 44 mm となっている）。
- ② 板厚制限を守るために高張力鋼を使用する方法は溶接性、脆性破壊等に問題があり、かなり研究化されているが、実用化にはまだ遠い。
- ③ 内圧を下げるために容器を大きくする方法があるが、このためには高さ方向に高くする必要がある。それにつれて、鋼製格納容器を含む鉄筋コンクリートの外部しゃへい壁も高くなり、両者の耐震設計が困難となる。

110 万 kWe を 38 mm 厚の鋼製格納容器で設計した場合と PCCV の場合を 図-2 に比較して示す。

PCCV に用いられている PC 工法には、PC 鋼より線（ストランド）をくさび（ウエッジ）で定着させるストランドウエッジ工法と PC 鋼線（ワイヤ）を用いるワイヤボタンヘッド工法の二つがある。ここでは、筆者が関係しているストランドウエッジ工法の代表である VSL 工法を中心として報告する。

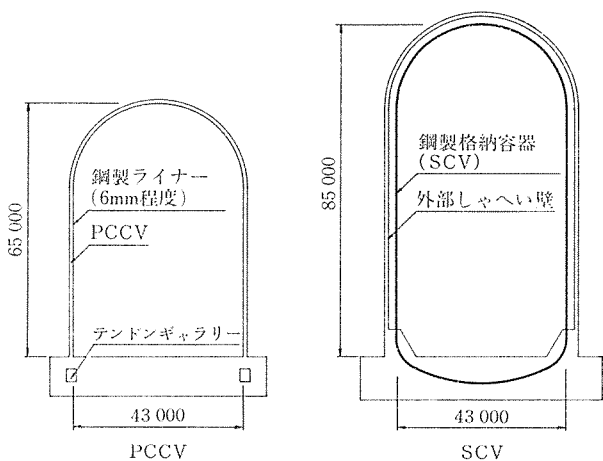


図-2 PCCV と SCV

2. 設計上の諸問題

2.1 材料上の諸問題

PCCV の材料としては、鉄筋およびコンクリートも含まれるが、ここでは PC 工法に特有な定着具および PC 鋼材に限定して、その品質等について述べる。

(1) PC 定着具

PC 定着具はアンカーヘッド、くさび、支圧板およびシムで構成される。定着具の強度はそれぞれの工法で規定されており、それに従っておれば問題がない。しかし PCCV は通産省の告示 501 で定義する「第 2 種容器」に相当する性格を有するものと考えられる。告示 501 では鋼製の容器に対して種々の規定を設けており、PCCV は対象とされていない。PCCV を直接規定しているのは、通産省資源エネルギー庁の「原子力発電用コンクリート格納容器技術基準（案）」（以降 CCV 技術基準という）がある。しかしここでは、材料強度等について各工法に規定するものでよいとして、特に規定を設けていないので、先行プラントでは告示 501 を準用しているようである。告示 501 の材料規定に該当するのは、アンカーヘッドと支圧板である。告示では次のように規定している。関係のある部分だけを要約すれば、厚さが 16 mm 以上の材料または断面積が 625 mm² 以上の棒材では、容器の最低使用温度より 17 度低い温度以下の温度で、表-1 に示す吸収エネルギー以上であること、である。この時の試験片はいわゆるシャルピー V ノッチであり、

表-1

耐力規定最小値 (kg/mm ²)	吸収エネルギー値 (kg-m)	
	3 個平均値	個々の最小値
24.6 未満	2.1 以上	1.4 以上
24.6 以上 31.6 未満	2.8 以上	2.1 以上
31.6 以上 52.7 未満	4.1 以上	3.5 以上
52.7 以上	4.8 以上	4.1 以上

注：耐力規定最小値は、降伏点を含む。

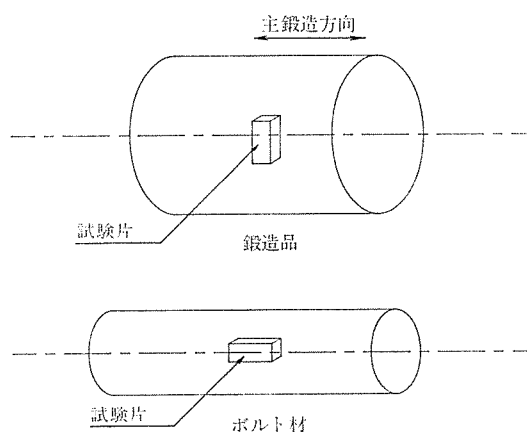


図-3 衝撃試験片採取方向

試験片の採取方法も図-3 に示すように、棒およびボルト材の場合は軸方向に平行であり、鍛造品の場合は主鍛造方向に直角となっている。アンカーヘッドの場合、普通は鍛造品となるので、主鍛造方向に直角の試験片を採用することになる。直角方向は平行方向に比して、吸収エネルギーはかなり落ちる。鋼材の種類によっても異なるが、 -30°C で平行方向に比して 60~80% の値となる。 -30°C というのは北陸地方で、最低気温を $-11\sim-13^{\circ}\text{C}$ と想定したものである。アンカーヘッドを棒材もしくはボルト材と見做して、軸方向に平行の試験で良いとする説もあるが、FIP の Report⁵⁾ に報告されているようなワイヤのアンカーヘッドの割れが、もし低温脆性にも起因しているとするれば、その説は本質を見落としているものと思われる。表-1 の値は高強度鋼材にとっては厳しい値であるが、VSL 工法の場合はシステム上それほどの高強度材でなくてもよいので、比較的容易に規定を満足する材料を製作できた。製作した材料の吸収エネルギーと温度の関係を図-4 に示す。このような材料を製作したとは言え、それは必ずコストアップに繋がる結果となる。筆者は PCCV に告示 501 を準用することに反対の見解を持っている。もし告示 501 を準用するならば、現在採用されている D 51 という太径鉄筋は使用不可能となるはずである。米国でのアンカーヘッドの割れという事故は、低温脆性のためではなく、材料の品質そのものが悪かったのではないだろうか。

(2) PC 鋼材

PC 鋼材の引張強度や伸びは次項で述べるとし、ここでは応力腐食割れ、遅れ破壊について報告する。

PC 鋼材の製作方法には、冷間で行う伸線加工と熱処理の二つがある。応力腐食割れや遅れ破壊の問題が生じ

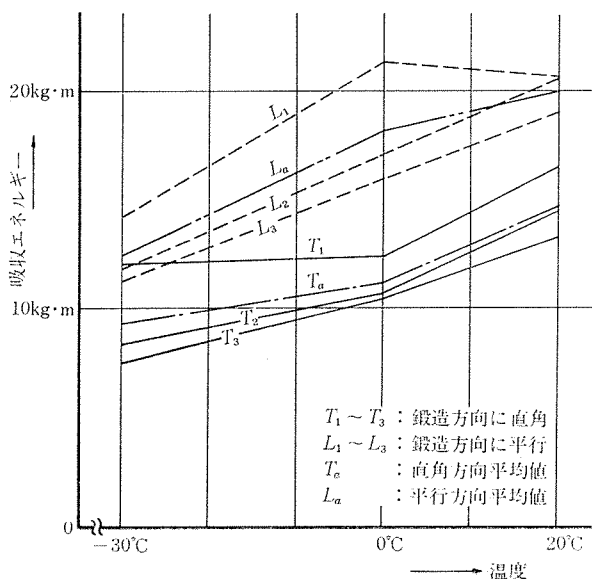


図-4 アンカーヘッドの吸収エネルギーと温度

たのは熱処理材であり、伸線加工材ではほとんど起こっていないといわれている¹⁹⁾。我が国の2大鋼線メーカーである神鋼鋼線工業(株)も住友電気工業(株)も伸線加工により鋼線を造っている。したがって今これらを問題にする必要はないと思われるが、米国でワイヤの破断がかなり多く発見されていることを考えると⁹⁾、一通りの検討をしておく必要がある。初めに遅れ破壊(水素脆性)であるが、FIP ではチオシアン酸アンモニウム(NH_4SCN)水溶液を用いて試験を行うことが提案されている⁹⁾。しかしながら評価基準は示されていないので、筆者らは定着部を含む試験体を作製して試験を行い、定着部で破断しなければ良いと定めた。次に応力腐食割れについても同様の試験体を、硝酸アンモニウム(NH_4NO_3)水溶液に入れて試験を行った。試験体の大きさおよび試験装置は、試験を担当した神鋼鋼線および住友電工、それぞれ独自の方法によった。十数個の試験の結果いずれも母材で破断し、定着部で破断をしなかったということで VSL 工法としての健全性確認は終わった。しかしこれらの一連の試験を行ってみて、以下の問題があるように思った。

- ① ワイヤと異なり、ストランドの場合は引張強度が高いため、大がかりな試験装置が必要となる。
- ② 応力腐食割れの試験は破断までの時間がかかり過ぎて(200~350 時間)、実用的でない。
- ③ 試験体と試験溶液との比により、破断時間はかなりバラつく。
- ④ 実際には起こり得ないような厳しい状態(例えば実際の鋼線はグリースで保護されているが、試験では鋼線のまま)での腐食促進試験の結果の評価方法がない。

(3) システム全体

システム全体としては、CCV 技術基準でも、静的引張試験、低サイクル疲労試験および高サイクル疲労試験の3種類による検査が要求されている。試験の方法はすべて ASME Sec. III Div. 2 に準拠している。

a) 静的試験 試験体は実際に使用するものと同じ定着具および緊張材とする必要があり、緊張材の伸びを測定するための標点距離は 2.5 m 以上となっているので、試験体の長さは 4 m 程度となる。規定では、降伏強度、終局引張強度、伸びおよび破断したストランドまたはワイヤの数を記録することになっている。判定基準は試験体が PC 鋼材の規格引張強さに緊張材の公称断面積を乗じて求めた保証引張荷重以上を有すること、およびその定着具等が過度の変形を起こさないこと、更に破断荷重時伸びが 2% 以上あることになっている。この試験の目的は、PC 鋼材が規格引張強度を有していても、

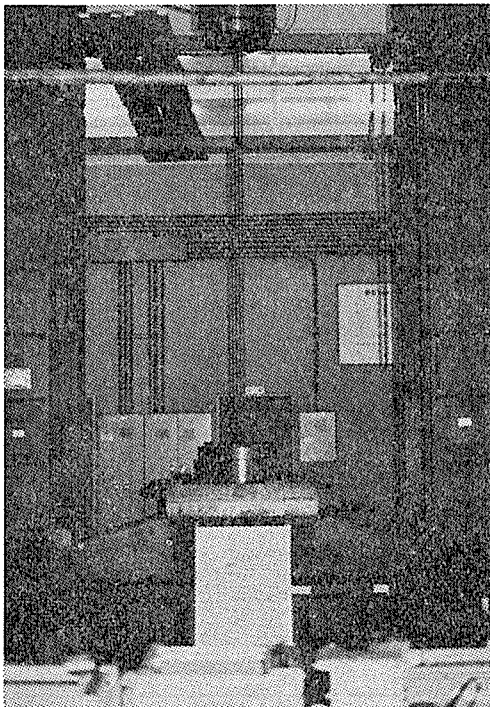
緊張材として束にして用いた場合、個々の PC 鋼材の応力がバラつき、PC 鋼材の強度の単純和とはならないために、チェックとして行うものと理解される。しかしこの規定も PC 鋼材が実際には必ず規格引張強度以上を有していることを前提としていると考えられ、事実そうになっているため、筆者らの試験でもこの規定を容易に満足できた。ただし、この試験も 1000t 級テンドンになるとかなり大がかりなものとなる。したがって、一度認定されたシステムについては、同じ材料および方法を採用する限りは試験を行わなくても良いのではないかと思う。

b) 低サイクル疲労試験 規定では、実際に施工する緊張材の全断面積の 10% 以上の断面積を有する緊張材、およびそれに相当する定着具で構成される試験体で、緊張材の保証引張荷重の 40% から 80% の荷重範囲で 50 回の繰返し載荷を行い、テンドンシステムが破断しないことを確かめるとなっている。このような試験を行う目的はどれもはっきりしない。例えば、なぜ緊張材の全断面積の 10% 以上で良いのか。これは後述の高サイクル疲労テストとも関係があるようで、緊張材の全断面積で試験を行える機械がないというためと想像される。10% という数値は 1000t 級の場合、試験の上限荷重が 80t 程度となり、その程度なら試験ができると判断されたのではなからうか。繰返しの上限荷重が緊張材の保証荷重の 80% というのは、緊張時の最大引張荷重で 75%、通常は 50~60% 程度しか緊張力が存在してい

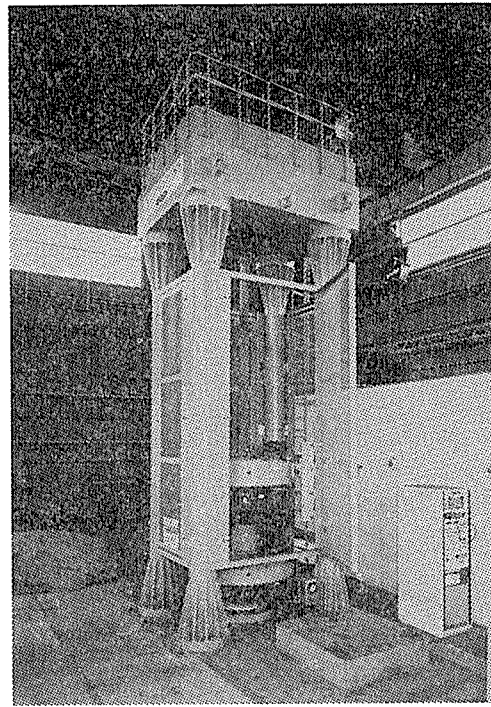
ないことを考えると、ありえない値と思われるし、下限の 40% の意味も理解できない。更に 50 回の繰返しというのは、PCCV のどのような状況を想定しているのかも不明である。仮に定期検査 (ISI) 毎に設計内圧を与えたとしても、緊張材の荷重変動幅は保証荷重の 3% 程度である。筆者らは実際に施工する緊張材の全断面で、規定どおりの方法で試験を行ったが、100 回以上の繰返しを行っても何の変化も見られなかったため、繰返し試験に合格したと判定し、その試験体の静的引張試験を行った。厳しい疲労試験を受けたにもかかわらず、緊張材は保証引張荷重を超えることが確認された。

c) 高サイクル疲労試験 緊張材の断面積は低サイクルと同じように規定されているが、荷重の範囲が緊張材の保証引張荷重の 60% から 66% となっており、繰返し回数も 50 万回となっている。この場合、荷重範囲は一般の PC 構造物の高サイクル疲労試験で規定しているものと似ている。しかし繰返し回数は FIP、英国、ドイツ等では 200 万回となっており、ACI/ASME では 50 万回となっているが、いずれにしても学術的根拠はないようである。

実際、どういう状況の時にこのような高サイクル荷重が発生するのか、全く不明である。しかし規定があるので試験は行ってみた。VSL 工法の 1000t 級テndon は 12.7mm 径のストランドを 55 本束ねた E5-55 というものである。10% 以上となると 6 本以上のストランドとなる。そこで E5-7 と E5-19 の二種類のテndon



E 5-7



E 5-19

写真—1 高サイクル疲労試験状況

ンを作製して試験を行った。E 5-7 については神鋼鋼線(株)の 200t 引張疲労試験機により、上限荷重を 86.4t 上限荷重を 78.5t と少し安全側に考えて振幅幅を大きくし、載荷速度は 126 cpm で試験を行った。E 5-19 は住友電工(株)の 250t 引張疲労試験機により、上限荷重は 234.5t、下限荷重は 213.1t、載荷速度は 240 cpm で試験を行った。両方の試験状況を写真-1 に示す。試験は両方とも 200 万回になったところで終了し、ウェッジや PC 鋼線の状況を目視で検査した。

2.2 テンドン設計

テンドンを設計する条件としては、設計内圧、地震荷重、温度荷重等があるが、ここではそれらの荷重の問題については割愛することにし、テンドンそのものの設計に重要な各種の緊張力損失について考えてみる。

(1) 摩擦損失

摩擦損失によるテンドンの引張力は、日本建築学会「プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説」(以降建築学会 PC 規準と略す)、土木学会「プレストレストコンクリート標準示方書」(以降土木学会 PC 示方書と略す)に次式で計算されるとしている。

$$P_x = P_0 e^{-(\mu \alpha x + \lambda x)} \dots \dots \dots (1)$$

上式の記号の説明は行う必要がないと思われるので省略する。

アンボンドテンダンの場合、(1) 式中の μ, λ はそれぞれ $\mu=0.14, \lambda=0.001$ として良いことが文献 8) に報告されているし、米国でもその値を採用している。設計上は上述に従って行えば問題はないが、Mogami らが文献 7) で報告したように、実際には摩擦係数 μ は一定

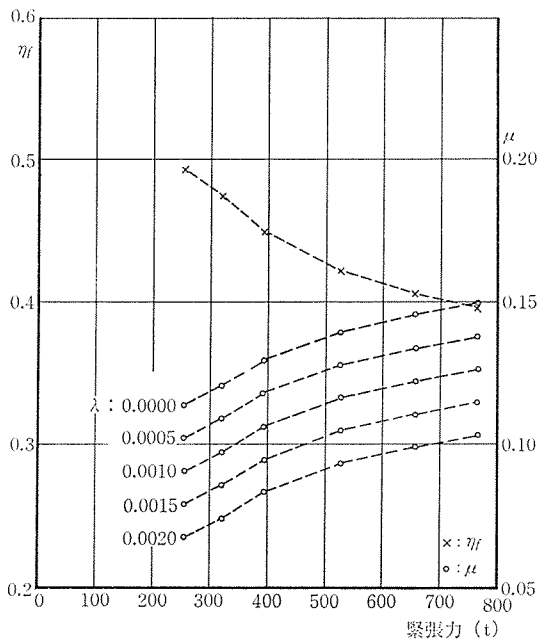


図-5 有効率と摩擦係数

でなく、テンドンとシースの間の支圧力により異なる。図-5 は緊張力と摩擦係数の関係の一例を示したものである。この傾向はストランドでもワイヤでも同じであることが確かめられている。したがって実際には緊張力分布は(1)式で表わされるほど単純ではないが、設計上は安全側であるので、単純明快な(1)式が良い。ただし緊張管理上は図-5 は重要な意味をもっており、それについては後述する。

(2) 定着部のセット

テンドンは緊張後定着するまでにわずかに滑り込む量をセット量という。またセットにより生ずる緊張力の損失をセットロスとっている。セット量は工法毎により異なるが、VSL 工法の場合、平均値で 5mm となることが確かめられている。PCCV の場合、セット量はあまり少ないと設計上不利である。すなわち CCV 技術基準ではテンドンは緊張時は $0.75 F_u$ または $0.85 F_y$ の小さい方の値を許容応力度とし、定着完了後は $0.7 F_u$ または $0.8 F_y$ の小さい方の値を許容応力度とすることを決めている。ここで F_u は PC 鋼材の規格引張強度であり、 F_y は PC 鋼材の規格降伏点強度である。定着完了後の緊張力分布を図-6 に示したが、同図に示すように、もしセット量が 0 ならば緊張力の分布は全体的に少なくなる。一般的にセットロスという言葉の響きから、セット量の少ない方が良い工法だと誤解する向きがあるが、セット量はその量の大小よりもむしろバラつきが少ないという方が設計上も緊張管理上も重要である。

(3) コンクリートの弾性縮み

逆 U テンドンを有する PCCV では、緊張順序によりコンクリートの弾性変形によるテンドンの緊張力損失は大きく異なる。緊張順序はまず逆 U テンダンの半数を緊張することから始める。これはフープテンドンを先に緊張することによって、円筒基部に曲げモーメントによるひび割れが発生することを防ぐためである。次にフープ

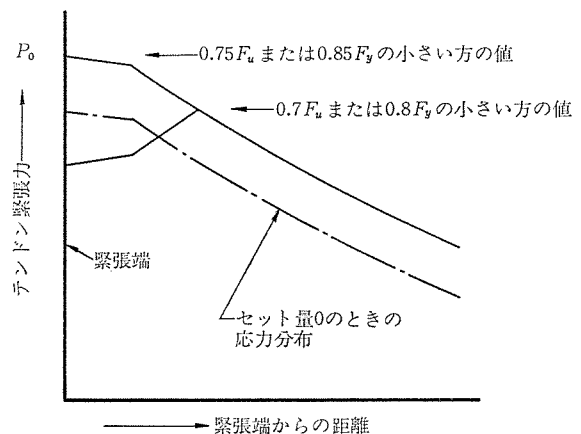


図-6 緊張力分布

tendonの半数を下から緊張していくが、ドームと円筒部の接点（スプリングラインと言う）から下に10m程度までの範囲は、ドーム部 tendonを緊張してから緊張するのがよい。PCCVのような構造物では、先に緊張した tendonが後から緊張する tendonによって必ずしも緊張力の損失が生じるわけではなく、緊張力が増加する場合もある。したがって一般のPC構造物で行われているように、コンクリートの初期平均圧縮応力度の1/2を用いて平均緊張力損失を計算する方法は、後述のISIも考えると、採用しない方がよいように思われる。

(4) コンクリートのクリープ・乾燥収縮

クリープと乾燥収縮とは別個のものであるが、どちらもよく分からないということで一つにまとめた。クリープ・乾燥収縮はほとんど永久に続くものであろうが、原発の寿命は40年を想定しているのだから、40年後の各々の値を最終値として設計することになっている。米国では設計上割り切って、クリープの最終ひずみ量を 400×10^{-6} 、乾燥収縮を 100×10^{-6} としている例もある。ISIにより、クリープの設計値が追跡されるので、そのような割り切りも設計上大切かもしれない。実際、クリープ・乾燥収縮を算定する式は種々提案されており、それらの式によるバラつきは相当のものである。図-7に一例としてプレストレスの導入時コンクリート材令を横軸にとり、2バットレスPCCVのフープ tendonのクリープによる緊張力の損失量を各式を用いて示している。乾燥

収縮も同じようなものである。実際のPCCVでは、次の点が一般のPC構造物と異なり、式の選択を難しくしている。

- ① 部材断面が大きく、鉄筋量もはるかに多い。しかも部材の内側は鋼製ライナーによりシールされている。
- ② 載荷時におけるコンクリートの材令も早い部分（ドーム部）で打設後120日以上であるが、遅い部分（円筒部）では540日以上とバラつきが大きい。
- ③ 年平均にするとコンクリート温度は25~30°C程度と、常温より高い。

以上を総括すると、土木学会PC示方書を用いておくのが無難なところかとも思われる。

(5) PC鋼材のレラクセーション

PCCVでは、普通には低レラクセーション鋼材を用いる。設計においては、PC鋼材の純レラクセーション率よりも見掛けのレラクセーション率を用いるのが便利である。見掛けのレラクセーション率は、普通のストランドに対し、建築学会PC規準と土木学会PC示方書の両者とも5%を与えているが、低レラクセーションストランドに対してはそれよりも低い値としてよいとなっているだけである。見掛けのレラクセーション率を定めるには純レラクセーション率(γ_0)を求める必要がある。筆者らが行ったストランドの1000時間試験では、荷重を $0.8 F_u$ にすると、 γ_0 は1.32%が得られた。レラクセーションの最終値は1000時間の値を2倍にして良いと土木学会PC示方書では定めているが、CEB-FIPの鋼材の委員会レポート¹⁴⁾では3倍とするようになっている。純レラクセーション率は、初期引張応力度によっても加わる温度によっても異なる。土木学会PC示方書によると、初期引張応力度と純レラクセーション率の関係は、2次放物線で表わせる。実機における tendonの初期平均緊張力を $0.6 \sim 0.65 F_u$ とすると、純レラクセーション値は $0.8 F_u$ の1/3ほどになり、0.44%が得られる。この値を3倍すると1.32%になるので、 $0.8 F_u$ で求めた1000時間のレラクセーション率は $0.6 \sim 0.65 F_u$ の荷重のレラクセーション率となる。 tendonに加わる温度は通常運転時で25°C程度であり、常温を20°Cと考えると、あまり温度による影響は大きくないと考えてよさそうである。見掛けのレラクセーション率は文献15)で純レラクセーション率の40~60%と報告されている。以上を考え合わせると、低レラクセーション材を用いる場合には、設計に用いる見掛けのレラクセーション率は2%としてもよいと思われる。

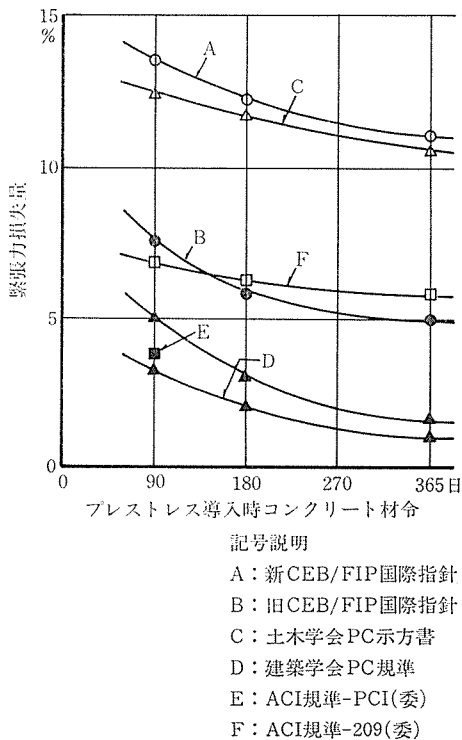


図-7 クリープによる緊張力損失量の算定式による比較

3. 施工上の諸問題

施工上の諸問題ということでは、コンクリートの打設計画、仮枠、配筋等々無数にある。ここでは tendon にかわるものに限定し、思いつく二、三の事項についてのみ報告する。

3.1 tendon の製作・挿入

打設したコンクリートに埋め込まれたシースの中に tendon を挿入する方法は二種類ある。すなわち、プルスルー方式とプッシュスルー方式である。両方式の説明図は文献 8) に報告されているので詳細な説明は省略するが、簡単に両者の相違を以下にまとめる。

[プルスルー]

- ① スtrand を必要な本数だけ (1000t 級 tendon では $\phi 12.7$ を 55 本) 束にして tendon を作製する。
- ② このためにはコイラーを有する tendon 製作工場が必要となる。
- ③ コイラーにより巻き取られた tendon (5~7t) をサイトまで運送する。
- ④ シースの中に引き込むためには、tendon を巻き戻すためのアンコイラーが必要となる。
- ⑤ フープ tendon の場合、tendon をセットしたアンコイラー (重量約 9t) を昇降作業台に載せるが、積載重量の大きい昇降作業台が必要となり、高価なものとなる。

[プッシュスルー]

- ① スtrand を一本ずつシースの中に押し込むための軽備なプッシュスルー機があればよい。
- ② スtrand は鋼線メーカーからコイル状になって運送されてきたものをそのまま昇降作業台に載せる。

上記の比較からプッシュスルー方式の方がはるかに経済的であることが容易に判断できる。フランスの PCCV を図-1 に示し、縦方向の tendon は鉛直と逆 J 型の組合せになっていることを述べたが、それを採用した理由の一つは、プッシュスルーのみで tendon の挿入を行うこととしたためであろう。もう一つの理由は、逆 U tendon ではセメントグラウトが困難であるからと思われる。我が国では耐震上、半球ドーム型 PCCV となり、鉛直方向は逆 U tendon の採用になるが、その場合は逆 U tendon をプッシュスルーにより挿入することは不可能で、逆 U tendon はプルスルー、フープ tendon はプッシュスルーとするのが経済的と思われる。フープ tendon は 2 バットレスにて定着させるのが最も経済的であるが、2 バットレスでプッシュスルーを採用している

のは、すべてセメントグラウトによるボンド方式 tendon である。そこで大成建設 (株) では経済性の向上を目指して、一次防錆材を塗布しながらプッシュスルーにより tendon 挿入を行うという方法を開発し、文献 8) で発表した実験でその実用性を確認した。

3.2 緊張管理

PC 構造物の設計・施工において、最も重要な一つが緊張管理である。緊張管理は各緊張荷重段階ごとに、緊張管理、受圧端荷重 (緊張する側と反対側の tendon 端) を測定するとともに tendon の伸びを測定し、緊張荷重との関係をグラフ上にプロットする。これらの測定結果より、その tendon の摩擦係数 μ を (2) 式により求める。

$$\eta_f = \frac{P_l}{P_0} = e^{-\mu \cdot \alpha(l) - \lambda(l)} \dots\dots\dots(2)$$

tendon の伸び Δl は、(3) 式で求められる

$$\Delta l = -P_0 \int_0^l \frac{e^{-\mu \alpha(x) - \lambda(x)}}{AE} \cdot dx \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 η_f : 受圧端有効率

P_0 : 緊張端荷重 (ton)

P_l : 受圧端荷重

A : tendon 断面積

E : tendon のヤング係数

λ : tendon の長さ に比例する摩擦係数、アンボンド方式の PCCV では 0.001/m とするのが普通

x : 緊張端からの距離 (m)

摩擦係数の決定は、次の手順で行う。まず (2) 式で μ は求められるが、この時に注意しなければならないのは、最終緊張段階の値を採用することである。図-5 に示したように、緊張の初期の段階では、摩擦係数は小さく現われる。物理的には、摩擦係数 μ は外力に無関係に定まるものであるが、tendon とシースの間では、支圧力の増大によるシースの変形や tendon が移動することによるシースのこすり傷等が生じ、 μ が大きくなると推定される。これが最終段階の緊張荷重時における μ を採用しなければならない理由である。このように最終段階の緊張荷重で μ を測定するためには、どうしても片引きをせざるをえなくなる。次に (3) 式によっても μ が求められる。この時には、測定された緊張荷重-tendon 伸び関係が直線と見做せる範囲の勾配を用いる必要がある。荷重の初期の段階では、tendon の弛みがあり、見掛け上 tendon の伸びが大きく現われ、荷重と伸びの関係が直線となるのは少し荷重が増大してからとなる。(2) 式より求めた μ と (3) 式から求めた μ が多少異なる時がある。その場合は (2) 式による μ を選択するが、両者の結果に大きな差異が生じる時は、その原因を

調査する必要がある。また PCCV のような重要構造物で、かつ、ほとんどすべての tendon の角度変化が異なるものでは、すべての tendon の摩擦係数の測定を前述の方法で行うのが望ましい。

3.3 その他の問題

tendon にかかわる問題に限定しても、シースの配置およびその接続、グリース材料の選定とグリース注入作業、品質管理等々あるが、紙数の関係上ここでは割愛する。

4. 定期検査 (ISI) 上の諸問題

PC 構造物で ISI が義務付けられているのは、おそらく PCCV だけではないだろうか。これは PCCV が一種の機器と見做されているからと推定される。ISI の問題としては、リフトオフ荷重と tendon の腐食について報告する。

4.1 リフトオフ荷重の測定

リフトオフ荷重とは、緊張された tendon を再緊張し、アンカーヘッドが支圧板から離間する瞬間の緊張荷重を言う。離間した瞬間を判定するには、アンカーヘッドと支圧板の間にあるシムをハンマーでたたき、人間の感覚で判断する方法や、アンカーヘッドにマイクロスイッチを取り付けて電気的に行う方法、あるいはアンカーヘッドと支圧板の変形と荷重の関係を XY レコーダーで記録し、折れ曲がり点を離間とする方法、または、加力中のジャッキのマノメーターの針の動きが急激に変化する点とする方法等々があるが、いずれも煩雑であったり、信頼性が十分確認できなかつたりする。そこで VSL 工法の場合、アンカーヘッドと支圧板の間にシムがない(標準タイプ)、あるいは2枚(ディテンションタイプ)しかないという特色を生かし、アンカーヘッドと支圧板もしくはシムの間にステンレスの薄い測定板を対称となるような2か所にはさみ込み、それが人力で引き抜ける時をリストオフと定義し、その時の荷重をリストオフ荷重とした。この方法によれば、誤差が1%以下になることが実験で確かめられている。しかしこの方法はシムが数段にも積み重ねる場合は、シムとシムのなじみやそれらの弾性変形といったものが影響してくるので精度は悪くなると思われる。

リフトオフ荷重測定の目的は、tendon の緊張力分布の経時変化を緊張端の緊張力変化で判定しようとするものである。tendon の緊張力分布は、コンクリートのクリープ・乾

燥収縮や PC 鋼材のレラクセーションにより、時間とともに低下していく。これらの要因による低下の量を正確に把握することは不可能である。しかし設計では安全側に割り切って、何らかの計算式を用いて設計する。その設計が正しかったか、あるいは許容範囲に入っているかをチェックするのが ISI におけるリフトオフ荷重の測定である。測定結果は当然最初に緊張して定着した時の緊張力と比較する。したがって最初の定着完了時の緊張力の正確な把握が重要となる。そのためには、すべての tendon に対し、定着完了後リフトオフ荷重を測定して記録し、更に tendon 一本一本の緊張順序も記録しておく必要がある。最も理想的なことを言えば、全 tendon 緊張完了後にリフトオフ荷重の測定を行っておけば、少なくともコンクリートの弾性変形による緊張力の損失や短期間に生じる緊張力の再配分といった不確定要素は消去できる。しかし反対にこのことのためにグリース注入が遅れてしまうので、tendon の防錆上問題であるし、何よりもコストアップになるので非現実的であろう。

4.2 ディテンション

米国 NRC の Regulatory Guide 1.35, Rev. 3 によると、ISI は1年、3年、5年、以下5年ごとに行い、その時には必ず任意の tendon のディテンション(緊張力解除)を行い、更に任意のストランドを1本引き抜いて腐食などを調査することになっている。最初に任意の tendon のディテンションに対しては、VSL 工法では tendon の一端は従来どおりの定着部、他端は図-8に示すようなディテンションタイプの定着部を組み合わせることにより、従来のように tendon 端部の余長を長くする必要がなくなっている。実機にこれを採用した例としては、米国の Alvin W. Vogtle 1号、2号があるが、我が国でも文献 8) の実験で実証済みである。次に、1年、3年の ISI でこのような試験が必要かどうか考えてみる。神鋼鋼線では、米国で用いられている Visconorust 2090-4 を塗布したストランドの屋内暴露試験を行った

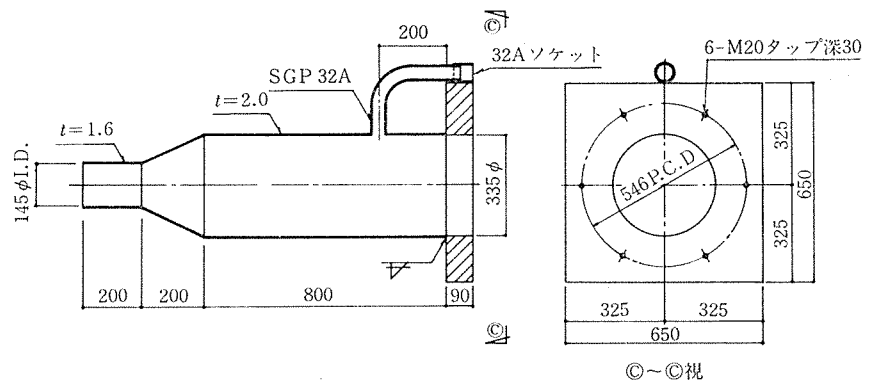


図-8 ディテンションタイプ定着部

が、3年経過してもストランドには何の変化も見られなかった。実機の場合、ストランドには1次防錆が塗布され、更に緊張後グリースが充填されることを考えると、これよりもはるかに条件が良いと考えられる。したがって最初の5年ぐらいは上述の検査は不要と思われる。筆者は欧米でのPCCVを数回にわたり見学したが、品質管理が良いとは感じられなかった。したがって厳しいISIが必要となるのだろうが、我が国では少なくともPCCVに関しては、かなり厳しい品質管理が行われると思われるので、すべてを米国に倣うのではなく、省くべき所は省いてコストダウンを図るべきと思う。

次にストランドの場合、55本のうち1本引き抜くと耐力が低下するのではないかとの意見がある。この問題については、このように回答できる。55本のうち1本は1.8%である。テンドンのクリープ等の経時緊張力損失は1年目でも3%程度あり、残りの54本のストランドを再緊張することによって、むしろ1,2%程度緊張力は増加することになる。終局荷重時においても許容値としては有効プレストレス力までしか考えられないので、耐力上は全く問題とはならない。問題があるとすれば、むしろグリースの充填であろう。ストランドにしるワイヤにしる、引き抜いた後には空隙ができる。この空隙の中に再緊張後充填するグリースが入っていくのか疑問である。この場合は、引き抜いた後にできるだけ穴は大きい方がグリースが入っていきやすいかもしれないが、確認の方法はない。完璧を期するならば、引き抜くPC鋼材の引張側と反対側に新しいPC鋼材を溶接し、引き抜くと同時に挿入するという方法もある。いずれにしてもコストアップの要因となる。鉄筋コンクリート製の格納容器(PCCV)に比して、PCCVはISIといった面で厳しい要求がされているように思う。施工時に厳しい品質管理を行って、ISIの間隔を長くし、検査項目も減らすという方向に持っていくことがPCCVの経済性向上につながるのではなからうか。

5. あとがき

本報告は紙数の関係上、図表をあまり載せることができず、総括的な評論になったことをおわびします。本報告をまとめるにあたり大成建設(株)の佐竹幹弘氏、最上達雄氏の研究結果を利用させて頂きました。

また、ストランドの応力腐食、遅れ破壊試験および高サイクル疲労試験に関しましては、全面的協力して頂いた神鋼鋼線工業(株)および住友電気工業(株)の多数の関係者に誌面を借りて深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 中嶋一史：フランスの原子力発電とプレストレストコンクリート格納容器，電源開発調査資料 No. 57
- 2) 昭和56年度定例研究会 年会報告書，日本原子力産業会議，原子動力研究会，1976年9月，pp. VIII 51~59
- 3) Model code for concrete structures CEB-FIP 1978
- 4) コンクリート構造物設計施工国際指針(CEB-FIP 1970)，日本コンクリート会議，プレストレストコンクリート技術協会
- 5) An international survey of in-service inspection experience with prestressed concrete pressure vessels and containments for nuclear reactors, FIP TECHNICAL REPORT : April 1982
- 6) Report on Prestressing Steel : 5. Stress corrosion cracking resistance test for prestressing tendons, FIP TECHNICAL REPORT : September 1980
- 7) Mogami et al : FRICTION PROBLEMS WITH MULTISTRAND TENDONS, The Ninth International Congress of the FIP, June 6-10, 1982, pp. 163~170
- 8) 井垣 力, 近藤 茂, 只野直典：PCCV用テンドンの摩擦損失等測定試験，プレストレストコンクリート，1981年1月，Vol. 23, No. 1, pp. 116~125
- 9) 原子力発電用コンクリート格納容器技術基準(案)，通産省資源エネルギー庁，原子力発電技術顧問会，コンクリート格納容器基準検討会，昭和56年11月
- 10) 昭和53年度制定「プレストレストコンクリート標準示方書」土木学会，昭和54年1月
- 11) プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説，日本建築学会，昭和50年7月
- 12) ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE SECTION III, DIVISION Z, concrete reactor vessels and containments
- 13) US NRC Regulatory Guide 1. 35. 1, Rev. 3
- 14) Report on Prestressing Steel 1. Types and properties, FIP/5/3, August 1976
- 15) PC鋼材のリラクセーション特性，技術資料 No. DRY 8001，神鋼鋼線工業(株)，昭和55年9月
- 16) VSL : PRESTRESSING IN NUCLEAR REACTOR CONSTRUCTION, October 1975
- 17) 佐藤正信ほか：プレストレストコンクリート製原子炉格納容器におけるPSシステム定着金物の開発，三菱重工技報，Vol. 19, No. 4
- 18) 富岡敬之：高張力鋼線の加工性の改善とその特性に関する研究，1972年12月，大阪大学学位論文
- 19) D.W. Halligan : Prestressed Concrete Nuclear Plant Containment Structures, PCI Journal, Sept.-Oct., 1976
- 20) PCCV 定着具の検討，大成建設(株)技術研究所，昭和58年3月
- 21) VSL E5-55 規格破断耐力試験，低サイクル疲労試験報告書，大成建設(株)，昭和57年3月
- 22) PC鋼より線 12.7mm 応力腐食試験結果報告書，神鋼鋼線工業(株)，1983年6月
- 23) PCCV用VSL工法φ12.7mm PC鋼より線の遅れ破壊試験，住友電気工業(株)，1983年6月
- 24) PCCV用VSLテンドン(E5-7)疲労試験結果報告書，神鋼鋼線工業(株)，1983年9月
- 25) PCCV用VSLテンドン(E5-19)疲労試験結果報告書，住友電気工業(株)，1983年9月