

PC鋼材の緊張力を再現した新たな解析手法の適用～低温PCタンクを例に

(株) 安部日鋼工業	正会員	○河野 雅弘
名城大学	正会員	博士 (工学) 石川 靖晃
(株) 安部日鋼工業	正会員	堅田 茂昌
(株) 安部日鋼工業	正会員	工修 伊藤 朋紀

Abstract : In order to analyze the temperature when using concrete structures for containment of refrigerated gases, a pre-stressed concrete model was constructed and the stress state was compared with the result of conventional temperature analysis. In addition, recently the analysis method of three-dimensional FEM has been developed, which the influence of friction at the time of introducing tension can be objectively considered, by approximating tensioned PC steel materials with multiple straight lines and numerically determining the fixed points of PC steel materials. In this paper, we compared the result of introducing pre-stress into a low temperature PC tank using this analysis method with the result of introducing pre-stress by conventional loading.

Key words : LECOM , PC tank , Crack equivalent strain

1. はじめに

PC外槽方式低温タンク（以下、低温PCタンク）は、運用時に液を貯蔵する内槽と、RC製基礎版およびPC防液堤で構成され、PC防液堤は内槽から低温液化ガスが漏洩したときに外部への流出を防止するとともに、内槽を保冷するための魔法瓶の役割を果たす。PC壁の内側とRC製基礎版上面に断熱材を配置するが、基礎地盤を凍結させないため基礎版内にベースヒーターを配置しており、設計時には、運転時の温度応力解析を行い、PC壁と基礎版の鋼材を決定している。

実際に建造する構造物の状態を解析に反映させることは、構造物を適切に設計するうえで重要であるが、従来の低温PCタンクのPC壁の設計では、熱伝導解析を行い算出された温度を線形FEM解析に与えて応力を算出している（以下、温度応力解析）。この場合、温度応力解析では、供用時におけるタンク内外の温度差の影響を考慮しているが、実際のPC壁には、貯蔵物の液圧に相当するプレストレスが外側から締め付けるように導入され、温度差による収縮に追従するように圧縮力が底版にも伝達するため、従来の温度応力解析による引張応力よりも小さくなると考えられる。この考えのもと、低温PCタンクの供用時の温度解析にプレストレスを与えたモデルを作成し、PC壁の応力状態について解析し検討した。なお、使用した解析プログラムはLECOMとした。本プログラムはコンクリートの応力-ひずみ関係の非線形性を検討でき、ひび割れの発生を容易に評価することが可能である。

また、本プログラムでは、PC鋼材を多直線で構成された線群として解析モデル内に反映し、緊張時特有のセットロスや摩擦の影響を解析上で考慮する手法¹⁾が導入されている。本稿では本提案手法に基づいたプレストレスと温度応力の影響を組み合わせた解析事例についても報告する。

2. 低温PCタンクのPC壁の解析事例

2.1 解析の概要

(1) 格子等価連続体化法 (LECOM) の概要

格子等価連続体化法のコンセプトは、RC要素が有する異方性とその耐荷機構を、コンクリート（ひ

び割れが進行する軸) および補強材の格子成分を想定することにより表現しようというものである。格子等価連続体化法の特徴は、格子成分応力と全体の応力場の関連にkneematics型のmicro-planeを用いることにより、RC要素の耐荷機構を形成するコンクリート、および鉄筋の局所座標方向を破壊の進行に応じて自由に与えることが可能な点である²⁾。

コンクリート内の鉄筋の具体的な評価は、鉄筋コンクリートの応力と応力依存性ひずみを関連付ける方法として、直交異方性³⁾モデルを用いて、鉄筋コンクリートはひび割れが生じるまでは弾性連続体、ひび割れ発生後はコンクリート応力依存性主ひずみ方向に配置されたせん断格子および鉄筋を表す格子にてモデル化をしている。そのため、新たに節点を設けることなく鉄筋比のみで鉄筋の影響を考慮することができ簡便である⁴⁾。

(2) PC外槽方式低温タンクの概要

低温PCタンクはPC壁の内側に鋼製タンクを格納した2重構造となっており、PC壁は万が一内部の鋼製タンクから貯蔵物が漏れ出たときに、外部へ流出しないよう防液堤の役割を果たす。PC壁は内径D=48.4m、側壁高さH=30.5mで、鋼製タンク内の貯蔵物は常に-27.7℃以下で貯蔵されるようにコントロールされる(図-1)。内部の鋼製タンクとPC壁の底版の間には断熱材が設置されるとともに、底版内には地盤が凍結しないようにベースヒーターが配置され、常に5℃となるように制御される。

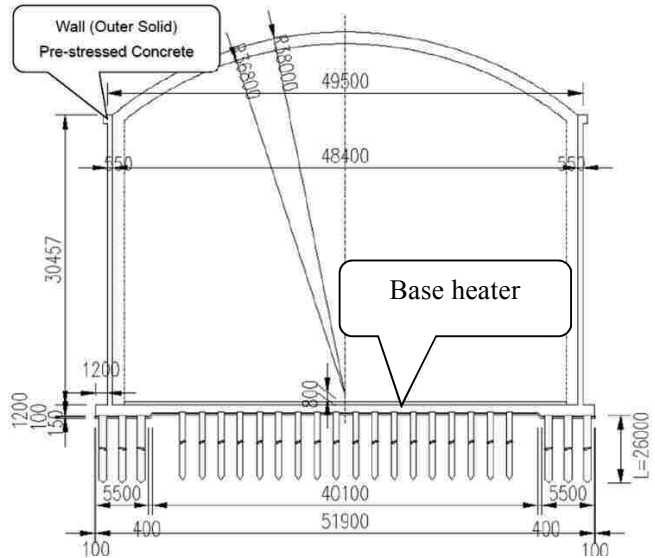


図-1 低温 PC タンク概要図

2.2 温度応力解析

(1) 温度応力解析条件

鋼製タンク内に低温の内容物が貯蔵される際にPC壁が低温下に晒され、外部との温度差により、温度応力が生じる。この影響を考慮するために、温度応力解析を実施した。初めに、内容物貯

表-1 温度応力解析物性値

項目	地盤	底版	側壁	歩廊
設計温度	℃	内側21.75℃ 外側25℃	内側21.75℃ 外側5℃	
初期温度	℃	25		25
熱伝導率	W/m℃	3.45	2.7	2.7
密度	kg/m ³	2650	2400	2400
比熱	kJ/kg℃	0.795	1.155	1.155
圧縮強度	N/mm ²	-	30	24
引張強度	N/mm ²	-	0.44 × f _c × 0.5 = 2.41	0.44 × f _c × 0.5 = 2.64
ヤング係数	N/mm ²	25900	28400	23200
線膨張係数	μ /℃	10	10	10
ポアソン比	-	0.35	0.2	0.2

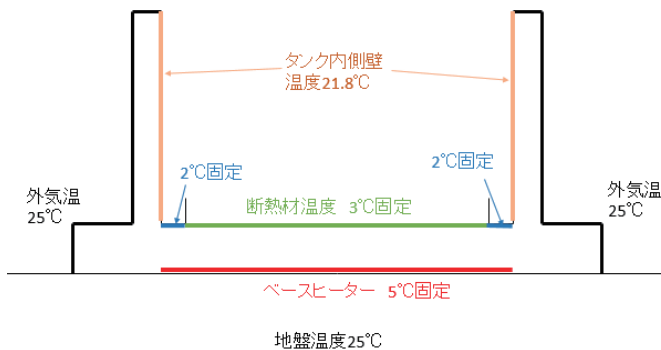


図-2 温度境界条件概要図

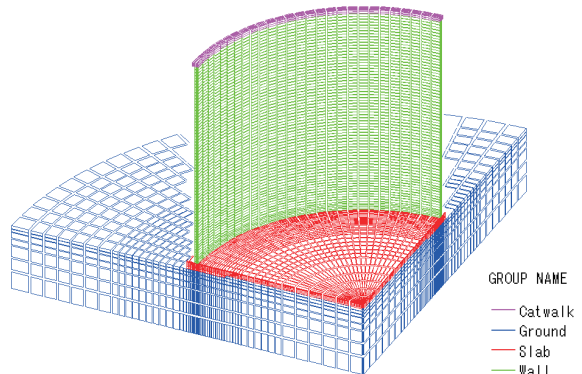


図-3 解析モデル概要図

蔵直後のコンクリート表面の温度を得るための温度解析を実施した。解析はPCタンクと断熱材をモデル化し、断熱材の表面は -27.7°C 、底版外側はベースヒーターの影響を考慮して 5°C 、外気温は建設地点の年平均気温である 25°C の温度を与え、温度が定常状態になるまで実施した。その結果、図-2に示す境界温度が得られた。

次に、コンクリートの応力を得るための温度応力解析を実施した。表-1に解析に用いた物性値、図-3に解析モデルを示す。図-2に示す温度を与え、コンクリート温度が一定になるまで解析を実施した。

(2) 温度応力解析結果

コンクリートが定常の温度になった状態のPC壁の温度分布図、変位図、主応力図を図-4~6に示す。温度分布図より、ベースヒーターが配置されるタンク内部底版と外気温の影響を受けるタンク外側底版の間に温度差が生じていることが分かる。また変位図から、温度の影響により底版全体がタンクの内側に向かって収縮していることが分かる。さらに側壁下端部および底版の接合部の変位が複雑な挙動を示している。側壁下端部には最大 $3.36\text{N}/\text{mm}^2$ の引張応力が生じており、コンクリートが損傷していると考えられる。また、側壁下端部と底版の際に 0.012 のクラック相当ひずみが生じる(図-7)。このクラック相当ひずみとは、本解析プログラム特有の指標で、単位幅あたりのひび割れ濃度を示す⁵⁾。今回の事例にあてはめると1mの区間に1.2mm相当のひび割れが生じることを示す。

(3) 鉄筋の導入による解析

本解析プログラムの1つの特徴として、任意の鉄筋量を各構成要素内に導入することができる。

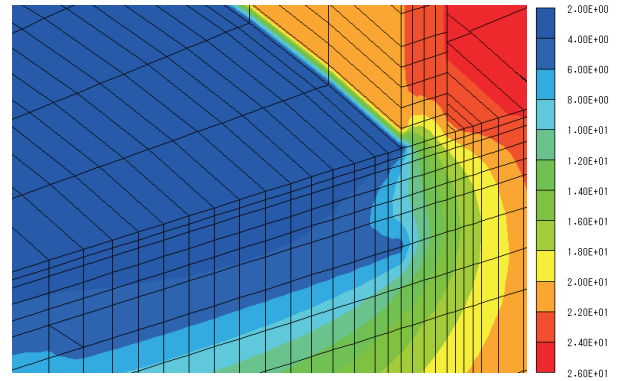


図-4 温度分布図

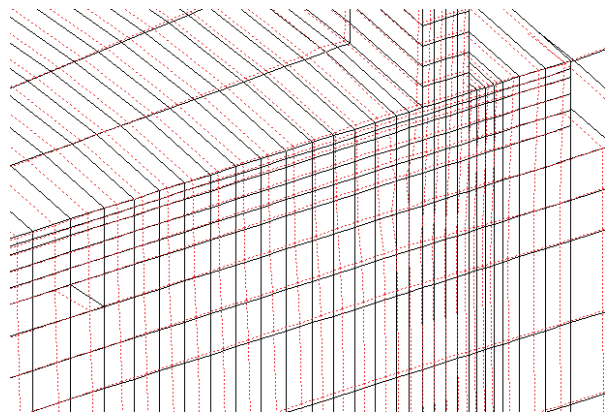


図-5 変位図

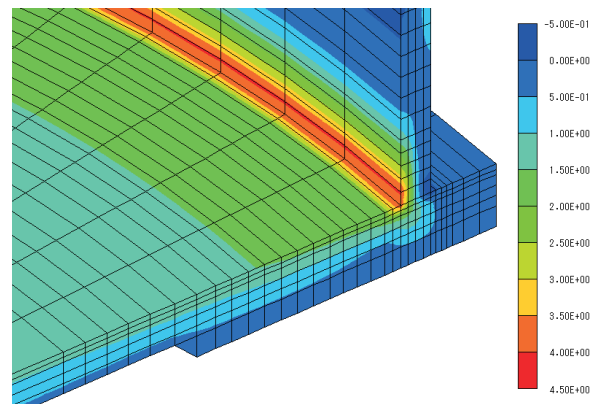


図-6 主応力図

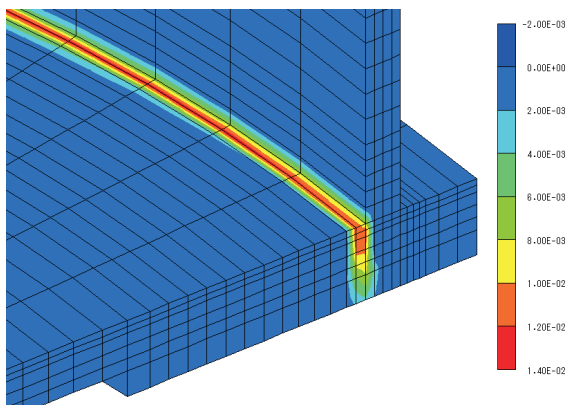


図-7 鉄筋なしのクラック相当ひずみ

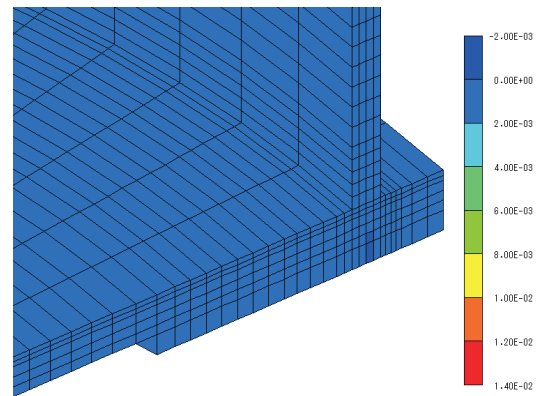


図-8 鉄筋量 0.56%導入時クラック相当ひずみ

これを用いて、底版内に鉄筋を配置した場合の解析を実施した。なお導入した鉄筋量は設計で決められた鉄筋量(0.56%)を底版の要素全体に導入した。クラック相当ひずみの解析結果を図-8に示す。所定の鉄筋量0.56%を導入した場合、大きなクラック相当ひずみは生じず、ひび割れ幅の抑制に効果があることが示された。

2.3 温度応力解析にプレストレスを導入した解析

(1) プレストレスの影響

温度応力解析結果により、所定の鉄筋量を導入することでひび割れの発生を抑制できることを解析的に明らかにした。前述の解析ではプレストレスを無視した状態であるが、実際には側壁からのプレストレスの影響が底版に伝達されており、底版の収縮に追随するような圧縮力が加わっていると考えられる。そこで、プレストレスの緊張力を荷重として与え、ひび割れの抑制に効果があるか検討した。

(2) 荷重の概要

一般的にPCタンクでは、プレストレスが鉛直方向と円周方向に導入される(図-9)。PCタンクでは貯蔵物の液圧に相当するプレストレスを円周方向に導入するが、側壁と底版が一体化している構造では側壁下端に大きな曲げモーメントが作用する。この曲げモーメントにより側壁の外部には引張応力が生じることから、これを補うために鉛直方向プレストレスを導入し、発生する引張応力を許容引張応力以内に抑える、あるいはひび割れ幅のコントロールをしている。実際の施工ステップとしては鉛直方向プレストレスを導入し、円周方向プレストレスの導入、そして供用開始時の温度が作用する。この時系列を踏まえ、各荷重の導入を解析モデル上で再現した。鉛直・円周方向プレストレスを再現する荷重は、実際のPC鋼材配置に近くなるように側壁の中心部に節点荷重として作用させた。

(3) 解析結果

温度応力解析にプレストレスを導入した場合の解析結果を示す。本解析上でも鉄筋量の有無をモデル上で再現した結果を比較する。鉄筋なしの解析の結果、側壁と底版の接合部に生じるクラック相当ひずみの値は0.003程度となった(図-10)。これは1mあたり0.3mm相当のひび割れが生じることを表す。前述の温度の影響のみのクラック相当ひずみは0.012であったことから、プレストレス

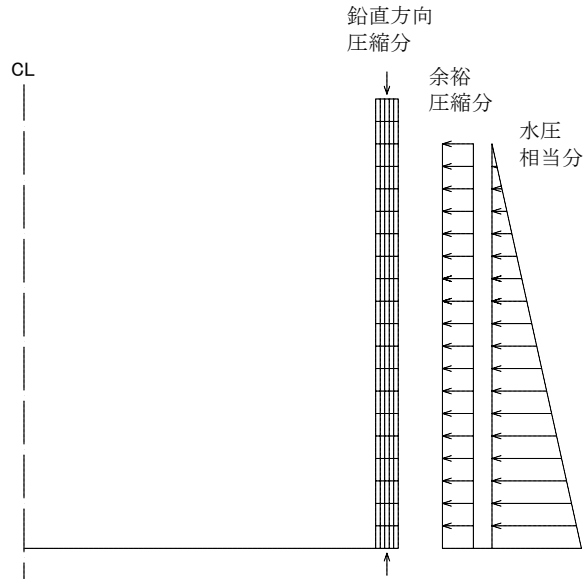


図-9 PCタンクのプレストレス概要図

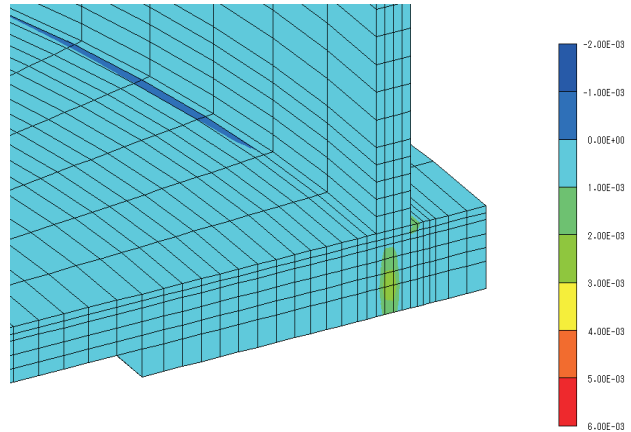


図-10 鉄筋なしのクラック相当ひずみ

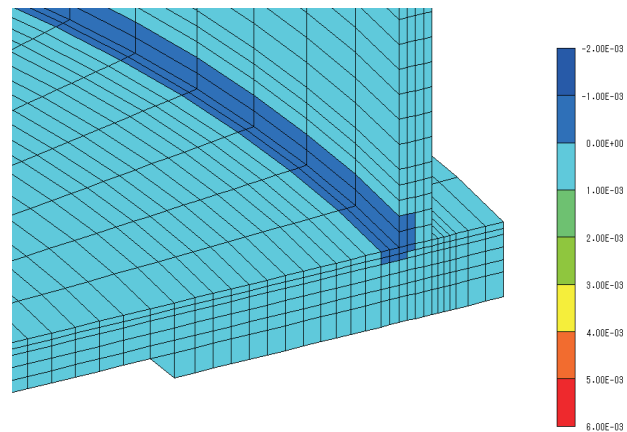


図-11 鉄筋量0.56%導入クラック相当ひずみ

を導入することで大幅に低減していることが明らかになった。一方、設計で決定された鉄筋量0.56%を導入した解析結果を図-11に示す。鉄筋の効果を導入することでクラック相当ひずみは非常に小さくなっており、ひび割れが生じないレベルまで抑えられると考えられる。以上から実際の構造物の状態を適切に再現した解析モデルとなるように、プレストレスを導入することで、ひび割れの発生を抑制でき、PC壁の底版に必要となる鉄筋量を低減できる可能性が示された。

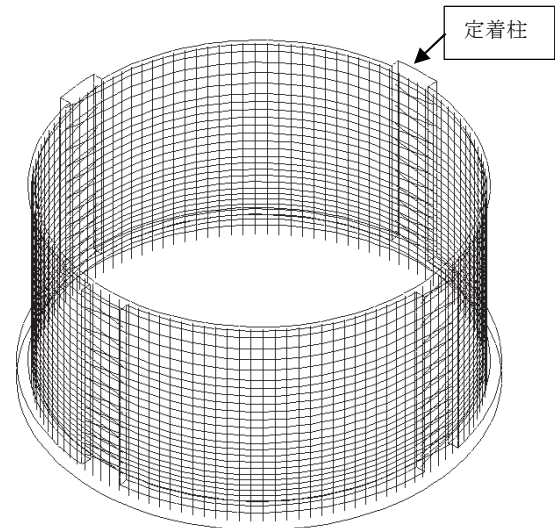


図-12 PCタンクのPC鋼材再現モデル例

3. PC鋼材の摩擦を考慮した解析手法との比較

3.1 PC鋼材要素を再現した解析手法の概要

従来より、PC鋼材による緊張力は解析モデル上では、有効緊張力で平均化した荷重として作用させたり、一様な分布荷重として作用させることで再現していた。本節では、従来の手法とLECOMに新たに導入された提案手法と比較を行った。本解析手法は新たにPC鋼材の持つ摩擦や各PC鋼材の緊張力などの諸元をモデル内に組み込み、PC鋼材そのものを1つの要素として再現している。これにより、PC鋼材特有のセットロスや摩擦による鋼材緊張力の低減効果を評価でき、より現実に近いプレストレストコンクリート構造物が再現可能となる。本低温PCタンクの事例にこの新たな解析手法を導入し、荷重によるプレストレスの結果と比較した。なお、PC鋼材要素は線要素として再現され、円周部分については多直線にて近似される(図-12)。

3.2 プレストレス入力条件

プレストレスは実際のPC鋼材配置を再現してモデル化した。また、解析モデルに入力したPC鋼材の各諸元を、表-2に示す。なお、実際の鉛直方向PC鋼材は底版内でUターンケーブルの両引緊張で配置されているが、本解析ではモデルを簡便にするため、底版側固定で側壁上端緊張の片引緊張モデルに変更している。

表-2 PC鋼材物性値諸元

	鋼材種類	摩擦係数		セット量(mm)	初期緊張力(kN) Pi
		λ	μ		
鉛直方向PC鋼材	12S15.2B	0.004	0.3	5.0	2250
円周方向PC鋼材	12S15.2B	0.004	0.3	5.0	2250

3.3 解析結果比較

ここでは鉄筋量は0%とし、PCタンクにプレストレスのみを作用させた場合の解析結果を示す。定着柱付近は側壁の厚みがあるため、圧縮力が小さくなっている。従来の荷重によりプレストレスを再現した手法と、新しいPC鋼材要素によりプレストレスを再現した手法で解析を行い、その結果を比較した。このうち、鉛直方向応力の結果を図-13と14に示す。新しい手法では、現時点では、PC鋼材とコンクリートの摩擦、定着具のセット量、コンクリートの弾性変形の影響までを考慮できているが、乾燥収縮、クリープ、リラクセーションによるプレストレスの損失は考

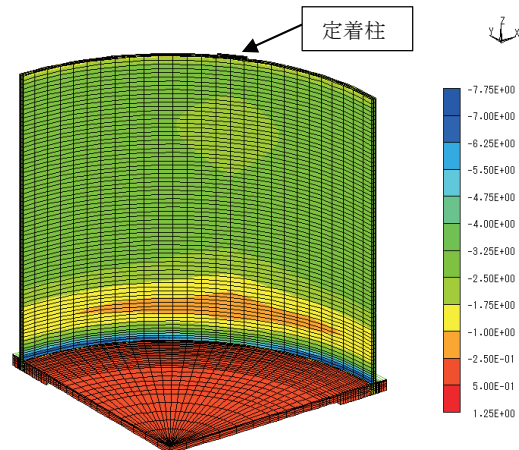


図-13 従来手法による鉛直方向応力度

慮できていない。そのため、図-13と14を比較すると、新しい手法の解析結果が若干大きな応力度を示しているが、概ね同様のコンター図が得られている。

4. まとめおよび今後の課題

低温PCタンクに対し、コンクリートの非線形性を検討でき、ひび割れの発生を容易に評価できるLECOMプログラムを使用し、温度応力解析にプレストレスの効果を考慮したモデルを作成し、PC壁の応力状態について解析し、従来の方法と比較検討した。また、PC鋼材要素を再現した新しい解析手法について検討した。これらの結果を以下にまとめる。

- ・LECOMプログラムを用いることで、所定の鉄筋量をコンクリート内に分散鉄筋として導入する機能により、ひび割れ幅を低減できることが解析的に明らかになった。
- ・温度応力解析にプレストレスの導入を組み込める解析手法を用いることで、供用時の構造物を適切に評価でき、底版の温度応力によるひび割れをプレストレスで抑制できることを確認した。
- ・PC鋼材の摩擦力を客観的に考慮できる新たな解析手法を用いることで、緊張力の分布の影響を再現でき、実構造物に即した解析を実施可能であることを示唆した。

今後の課題として、本モデルではUターンケーブルの再現までは至っていないため、これを検討する必要があると考える。加えて、PC鋼材を要素で再現した新たな解析手法について、乾燥収縮、クリープ、リラクセーションによるプレストレスの損失を盛り込む必要がある。また、この新手法を用いることでPC鋼材の定着後のコンクリートについて、より現実に近い応力状態を算出することが可能となると考えられる。さらに、この手法を発展させれば、解析と同時にPC鋼材の緊張計算も実施可能となる。その結果、現場での作業縮減や作業の効率化に貢献するものと考えられる。今後、実際のPC鋼材の緊張計算と本解析手法によって得られる結果を比較し、その有効性を明らかにしていく必要があると考えられる。本検討が低温PCタンクにおける供用開始時の温度による応力解析の参考になれば幸いである。

謝辞

ご指導賜りました田辺忠顕名古屋大学名誉教授はじめ、LECOM研究会メンバー、関係各位に厚く御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 石川靖晃, 松本一志: PCケーブル緊張時におけるFEM解析手法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 2, pp. 505-510, 2019
- 2) 野田智也, 伊藤睦, 石川靖晃, 田辺忠顕: 格子等価連続体モデル (LECOM) による初期応力を考慮したRC構造の解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, pp. 1129-1134, 2004
- 3) 田辺忠顕著: 初期応力を考慮したRC構造物の非線形解析法とプログラム, 技報堂出版, 2004, 3
- 4) 齊藤亮一, 荒畑智志, 石川靖晃: 格子等価連続体モデル (LECOM) を使用した壁高欄の初期ひび割れ解析, プレストレストコンクリート工学会, 第21回シンポジウム論文集, 2012, 10
- 5) 石川靖晃, 大橋裕成, 田辺忠顕: 分散ひび割れモデルによるひび割れ幅評価法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 1555-1560, 2009

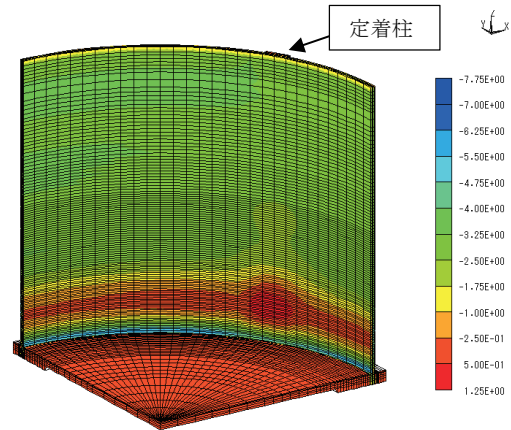


図-14 新手法による鉛直方向応力度