

報告 大規模 LNG 地下式貯槽工事における薄肉化した地中連続壁の構築

前田 敬一郎*1・桜井 邦昭*2・佐々木 高士*3・林 孝弥*4

要旨： LNG 地下式貯槽では、土留めおよび止水壁として円形の地中連続壁を構築する。本工事では、施工の合理化の観点から、内径約 80m、掘削深度約 48m の大空間を、壁厚 1.0m の地中連続壁で施工することとし、従来に対し壁厚を 20%低減した。構造安定性の確保に留意した設計・施工を実施し、内部掘削時の計測管理を行った。その結果、高品質な地中連続壁を構築することができた。

キーワード： LNG 地下式貯槽、地中連続壁、薄肉化、温度応力解析、計測管理

1. はじめに

LNG 地下式貯槽(以下、地下タンクという)は、LNG(液化天然ガス、-162℃)を効率よく安全に貯蔵できる円筒形の地下構造物である。東邦ガス(株)知多緑浜工場では、現在 3 基目の地下タンクを建設中である。本工事で構築する地下タンクの概要を図-1 に、基本形式および主要工事数量を表-1 に示す。

本タンクは、側壁内径 74.5m、液深 50.65m、容量 22 万 kL と世界最大級の地下タンクであり、その建設は、RC 地中連続壁(以下、連壁という)を円筒形土留めとして、内部掘削完了後、順巻き工法で躯体を構築する。

建設地点の地層は、旧海域を軟弱なシルトで埋め立てて造成されており、埋立層が層厚 12m 程度で分布している。埋立層の下位には新第三世紀・東海層群(常滑層群)の固結シルト層(Tm1 層~Tm3 層、Tf2m 層、Tsm2 層)と未固結の砂質土層(Ts1 層~Ts2 層、Tf2s 層)が互層をなしている。

本工事では、連壁の施工を合理化する観点から、掘削量およびコンクリート量の低減によるコストダウンを図ることを目的に壁厚の低減を行った。高強度コンクリート(60N/mm²)および高強度鉄筋(SD390)を採用した結果、連壁厚さは 1.0m となり、本工場における既往タンクの連壁厚さ(No.1 タンク 1.4m、No.2 タンク 1.2m)に対して 1.0m に薄肉化させることとした。

連壁の薄肉化を行った場合、不測の欠陥などが構造の安全性に与える影響が相対的に大きくなることから、設計上の強度増加だけでなくコンクリート壁体としての品質を確保し、また、出来形においても高い構築精度が要求されることとなる。

本報告では、連壁における壁厚の薄肉化を図った設計、壁体としての品質を確保するためのコンクリートの配合選定、温度ひび割れ抑制対策、施工概要、および内部掘削時の計測結果について報告する。

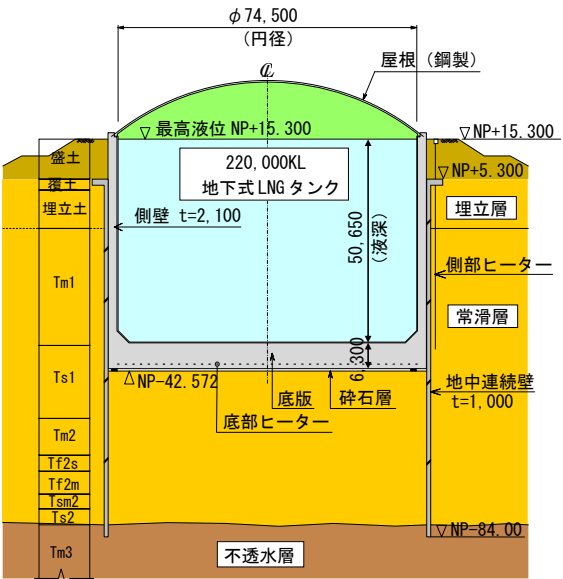


図-1 地下タンクの概要図

表-1 地下タンクの基本形式と主要工事数量

基本形式	屋根	鋼製、ドームルーフ型リングプレート形式
	底版・側壁	鉄筋コンクリート構造
主要工事数量	地中連続壁	鉄筋 2,000t、コンクリート 24,000m ³
	底版	鉄筋 5,500t、コンクリート 31,500m ³
	側壁	鉄筋 5,700t、コンクリート 28,900m ³

2. 地中連続壁の設計

2.1 要求される役割

地下タンクにおける連壁の施工時と完成後に要求される役割は以下の通りである。

(1) 施工時における円筒形土留め

内部掘削時に、内径約 80m、掘削深度約 48m の空間を無支保工での掘削を可能とする。

(2) 完成後における止水壁

底版下に水圧が作用した場合の浮き上がり抵抗重量の一部になるとともに、止水壁として底部地盤からの湧水量を低減する。

*1 (株)大林組 名古屋支店 東邦ガス緑浜工事事務所 工事長 修士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 副主任研究員 博士(工学) (正会員)

*3 東邦ガス(株) 技術部 緑浜増設プロジェクト 係長 修士(工学)

*4 東邦ガス(株) 供給管理部 幹線グループ 係長 修士(工学)

2.2 設計概要

(1) 根入れ長の検討

止水壁の機能を持たせるため、連壁の先端を不透水層へ根入れすることとし、連壁深さは、盤ぶくれの検討から89.3m(地表面NP+5.3m～先端平均NP-84.0m)とした。

(2) 円筒形の確保

無支保工の土留めとするため、円筒形状を確保するとともに、土圧および水圧により発生する円周方向圧縮軸力(Nθ)を連壁コンクリートが負担して安定していることが要求される。本工事で採用した連壁のエレメント割付けを図-2に示す。連壁形状は3ガット先行エレメント(長さ7.549m)24枚、1ガット後行エレメント(長さ3.2m)24枚の合計48エレメントで構成される96多角形とし、さらに円筒形に近づけるため、カッティング面を台形としたテーパカッティングジョイントを採用した。

(3) 強度検討

連壁は内部掘削時および床付時(躯体施工中)に予想される荷重に対して安全な構造であることが要求される。設計で考慮した荷重を表-2に示す。支配的な等圧荷重である水圧および施工時土圧に加えて、偏圧荷重として周辺地盤の不均一性を考慮した「施工時偏土圧」および既設タンクの盛土による影響を考慮した「盛土偏土圧」を考慮した。さらに、左右のエレメント間の誤差(ずれ)を考慮した「施工誤差による影響荷重」も見込んだ。

部材の設計では、限界状態設計法の終局耐力による照査を行った。また、座屈に対する評価を実施し、構造安定性が確保できることを確認した。

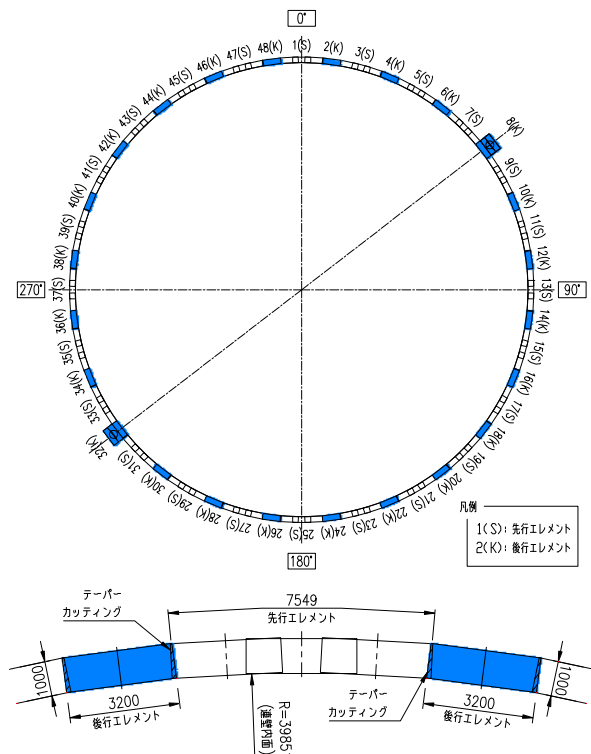


図-2 エレメント割付け図

2.3 壁厚の薄肉化

連壁の薄肉化を図るため、Nθが大きくなる床付け位置付近のコンクリートの設計基準強度を既設タンクの50N/mm²から60N/mm²に増加させるとともに、その上部および下部は30N/mm²とした。この結果、設計荷重に対する余裕度を確保した上で、連壁の壁厚を既設タンクの1.2mから1.0mへ低減できた。連壁コンクリートの設計基準強度の割付けを図-3に示す。

2.4 品質および安全性を確保するための対策

連壁施工の品質管理は慎重に実施するものの、地中作業であるため、不測の欠陥が発生する確率は常に存在する。一方、壁厚が薄くなると、コンクリートの充填不良やエレメント間ジョイント部の誤差(ずれ)等の不具合が連壁の圧縮負担に与える影響が相対的に大きくなる。その対策として、①使用する鉄筋の強度を既設のSD345からSD390へ変更して鉄筋量を低減する(鉄筋のあきの確保による充填性向上)、②エレメント構築の鉛直精度を1/2000以下で管理する(圧縮負担断面の減少の防止)こととした。さらに、土層構成、背面土圧、地下水の状態等は、事前の調査では網羅できない不確定要素を含んでいるため、施工中は内部掘削時の発生応力の大きい位置に鉄筋計等の計測計器を重点的に配置し、監視体制を強化することとした。

表-2 設計で考慮した荷重の種類

分類		荷重の種類	
		常時	地震時
施工時荷重	連壁自重	●	●
	水圧	●	●
	施工時土圧	●	●
	施工時偏土圧	●	●
	盛土偏土圧	●	●
	施工誤差による影響荷重	●	●
	温度荷重	●	●
地震時荷重	地震時偏土圧		●
	躯体慣性力		●
	応答変位法		●

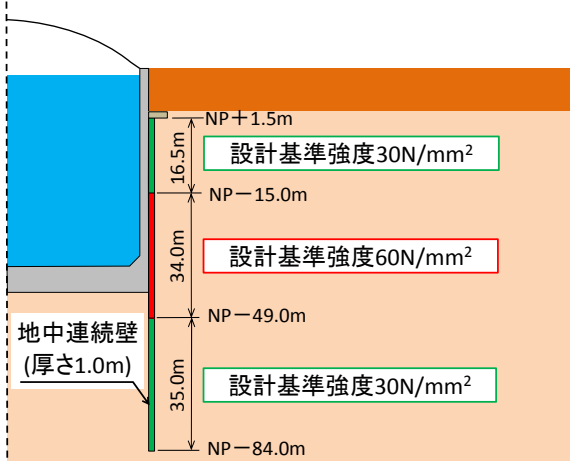


図-3 連壁コンクリートの設計基準強度割付け図

3. 配合選定

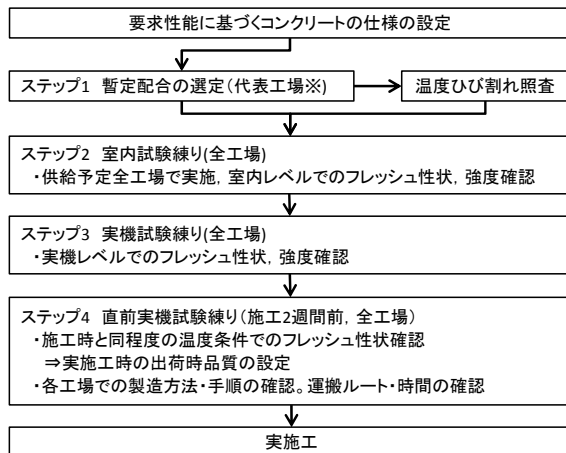
3.1 コンクリート配合の仕様

連壁に用いたコンクリートの配合仕様を表-3に示す。既往の施工実績¹⁾から、安定液中への打込みに伴う圧縮強度の低減率10%を見込むとともに、製造時の変動係数を10%(割り増し係数1.2)として配合強度を設定した。また、施工に伴う温度ひび割れの発生を抑制するため、設計基準強度60N/mm²の部位には低熱ポルトランドセメントを、30N/mm²には高炉セメントB種を用いることとした。また、打込み過程における閉塞と充填不良の発生リスクを減少させるため、流動性のレベルは設計基準強度30N/mm²の配合はスランプ21cm、60N/mm²の配合はスランプフロー60cmに設定した。

なお、連壁コンクリートはトレミー工法によりコンクリートを連続的に打設するため、長時間にわたり所要のフレッシュコンクリート品質を満足するとともに、管内をスムーズに流下し、鉄筋籠の間隙を通過して確実に充填できる性能が要求される。そこで、コンクリートの配合選定に際しては、JSCE-F512に示されるO漏斗流下試験も参考として両配合で実施し、管内をスムーズに流動でき、閉塞しないコンクリートであることを確認した。

表-3 連壁コンクリートの配合仕様

項目	単位	配合種類	
		33-21-20BB	67-60-20L
設計基準強度	N/mm ²	30	60
安定液中への打込みに伴う強度低減率	%	10	10
呼び強度	—	33	67
割り増し係数	—	1.2	1.2
配合強度	N/mm ²	40	80
管理材齢	日	28	91
セメント種類	—	高炉セメントB種	低熱ポルトランドセメント
スランプ(フロー)	cm	21±1.5	60±7.5
空気量	%	4.5±1.5	4.0±1.0



※出荷工場のうち、①使用する骨材が代表的である(多くの工場で類似した骨材を用いている)、②出荷量が多い、かつ③運搬距離が比較的に長い工場を代表工場とした

図-4 連壁コンクリートの配合選定フロー

3.2 コンクリートの配合選定

連壁の1回の施工数量は、先行エレメントで約700m³、後行エレメントで約300m³となることから、レディーミクストコンクリート工場として現場近郊の4工場を選定した。施工に先立ち、工場ごとに室内および実機ミキサによる試験練りを行った。コンクリート配合の選定フローを図-4に、選定した配合を表-4に示す。

室内試験により、配合を選定した後に、実機ミキサによる実機試験を行った。結果の一例を図-5に示す。いずれの工場においても所要の流動性を長時間にわたり確保できること、O漏斗流下試験結果から、時間経過に伴う品質の変化は小さく、トレミー管内を容易に流動できるコンクリートであることを確認した。

表-4 選定したコンクリートの配合

配合種類	工場名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S1	S2	G
33-21-20BB	A	46.0	51.0	175	380	681(山)	192(砕)	953
	B		49.0			660(山)	175(ス)	898
	C		51.0			858(山)	—	953
	D		50.5			844(山)	—	962
67-60-20L	A	34.0	51.3	175	515	655(山)	184(砕)	906
	B		48.9			629(山)	166(ス)	861
	C		49.4			794(山)	—	941
	D		49.4			788(山)	—	941

*細骨材の表記: (山)は山砂、(砕)は砕砂、(ス)は高炉スラグ細骨材

*粗骨材は、いずれの工場も砕石2005を使用

*混和剤には、ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を使用

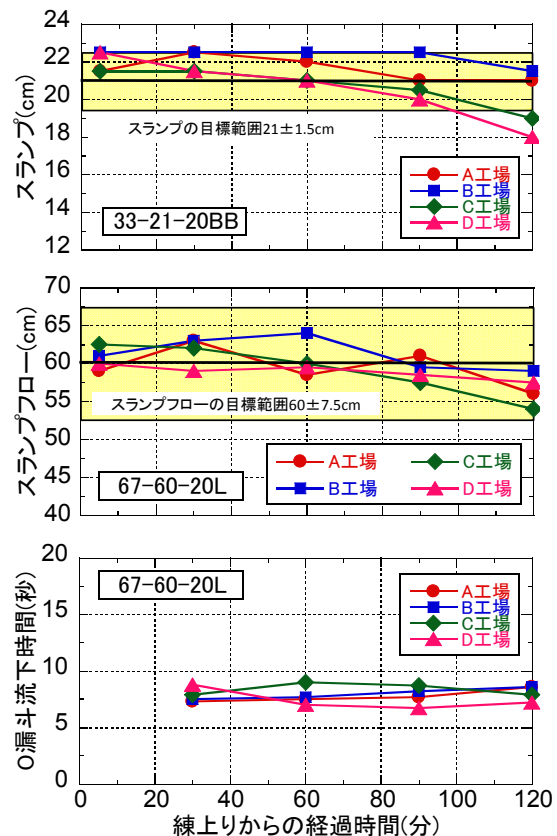


図-5 実機試験での品質試験結果の一例

4. 温度ひび割れに関する検討

連壁は、躯体厚さの厚いマスコンクリートであるとともに、背面を地盤に拘束されること、および後行エレメントは先行エレメントによっても拘束されることから、施工に伴う温度ひび割れの発生が懸念された。そこで、施工に先立ち、3次元 FEM モデルを用いた温度応力解析を行った。解析モデルは、1/4 断面とし、地盤・先行エレメントおよび後行エレメントをモデル化した。解析モデルを図-6 に示す。

4.1 目標ひび割れ指数

いずれも水密性を確保する観点から貫通ひび割れに対するひび割れ指数の目標値は、2007 年制定コンクリート標準示方書を参考に 1.0 以上とした。なお、解析に使用した定数も同書に従い設定した。

4.2 検討結果

解析結果の一覧を表-5 に示す。先行エレメントはひび割れ指数 1.75 以上でひび割れの発生を防止できること、後行エレメントでは、土水圧が直接作用する部分では 1.45 以上、その他の部分でも 1.0 以上を確保しており、施工に伴い過大なひび割れが生じる危険性がないことを確認した。

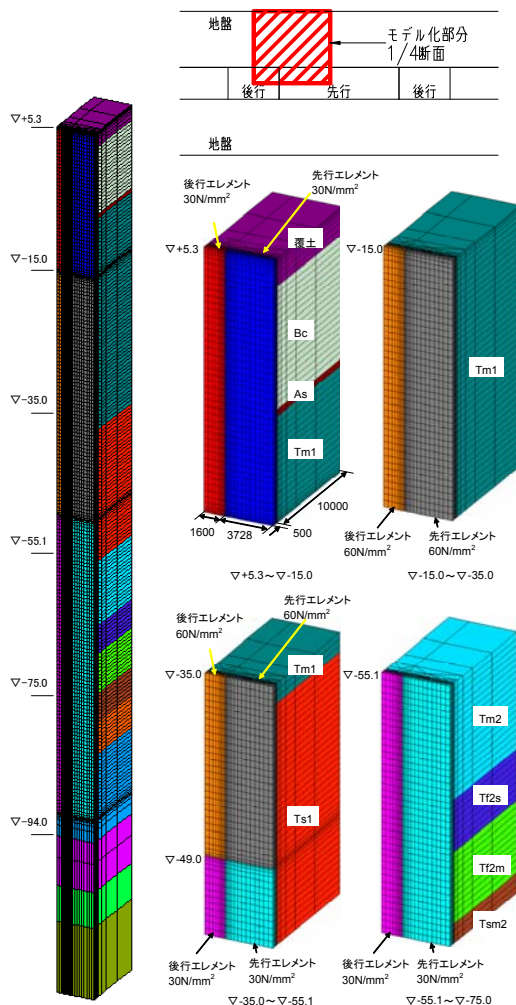


図-6 解析モデル概要

表-5 温度応力解析結果一覧

部位	配合種類	打込温度 (°C)	最高温度 (°C)	材齢 ^{※1} (日)	応力 ^{※2} (N/mm ²)	材齢 ^{※3} (日)	最小ひび割れ指数	目標ひび割れ指数
先行エレメント	上部 33-21-20BB	20.0	55.5	2.3	1.6	63.3	2.43	1.0以上
	中部 67-60-20L		48.7	3.3	1.9	64.8	2.97	
	下部 33-21-20BB		55.1	2.3	2.0	63.3	2.01	
後行エレメント	上部 33-21-20BB	20.0	55.6	2.3	3.5	192	1.16	
	中部 67-60-20L		48.8	3.0	3.8	256	1.50	
	下部 33-21-20BB		55.4	2.3	3.7	320	1.08	

※1 材齢:最高温度に達する材齢

※2 応力:最小ひび割れ指数時の応力

※3 材齢:最小ひび割れ指数時の材齢

5. 地中連続壁の施工

5.1 掘削

地中連続壁施工ステップ図を図-7、本工事における地中連続壁掘削状況全景を写真-1 に示す。

本工事では、N値 50 以上の非常に硬い粘性土層の掘削が必要であるとともに、実強度が 67N/mm² 以上の高強度コンクリートのカッティングが可能な掘削機が必要であった。そこで、これらの課題を解決できる高トルク型のカッターモーターを有し、掘り残し部を発生させない本工事専用の掘削機を導入した。

施工する地盤には、固結シルトが多く含まれており、これが掘削施工中に溶出すると掘削速度の低下、掘削時の精度管理への影響、コンクリートとの混合による品質低下、鉄筋の付着低下等が懸念された。そこで、本工事では対象土層に応じた新型の安定液を採用した。この安定液は分散性能が従来に比べて優れているため、粘性土掘削による粘性上昇を抑制させることができた。また、セメント成分の混入による粘性の増加や凝集の発生を抑制できるため、コンクリートカッティングやコンクリート打設による安定液の劣化が抑制され、安定液の転用率を向上させることができた。

掘削時には掘削機内に装備した傾斜計にて掘削精度を管理するとともに、大深度用超音波溝壁測定装置を使用し、出来形管理を行った。その結果、硬質粘性土においても掘削効率を確保しつつ、高い掘削精度を実現することができた。

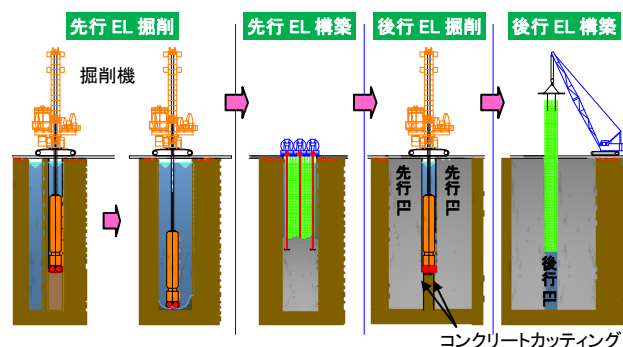


図-7 地中連続壁施工ステップ図



写真－１ 地中連続壁掘削状況全景



写真－２ 地中連続壁コンクリートの施工状況

5.2 コンクリート打設

連壁のコンクリート施工は 4 ヶ月間(2012 年 10 月～2013 年 1 月)にわたり実施した。施工期間中のコンクリート温度は 6～28℃の範囲であった。写真－２に地中連続壁コンクリートの施工状況を示す。

コンクリート打設に際して使用するトレミー管（φ200）は先行エレメントで 3 本、後行エレメントで 2 本とした。大深度の連壁のコンクリート打設では、打込み速度が速すぎると鉄筋籠の引き込まれ等の懸念がある一方、打設時間が長時間となると連壁天端付近でのスライムの増加につながる。そこで、本工事では総打設時間の計画を 10 時間以内に設定した。コンクリートの供給および打込計画を詳細に立案した結果、全 48 回の施工において不具合を生じることなく、計画通りにコンクリートの施工を行うことができた。

5.3 コンクリートの品質試験結果

連壁のコンクリートは、途中で品質を満足しないコンクリートがわずかでも打ち込まれると、トレミー管の閉塞や充填不良を生じる可能性があり、コンクリート打設時における品質管理がきわめて重要となる。

荷卸し時の品質試験は、工場ごとに 50m³/回の割合で実施し、安定した品質のコンクリートが供給できていることを継続的に監視した。施工時のコンクリートの品質試験結果の一覧を表－６に示す。スランプとスランプフロアの標準偏差は、それぞれ、0.3cm、2cm 程度以下と小さく、安定した品質であった。圧縮強度も全て呼び強度を満足していた。また、全 48 回エレメントの施工でトレミー管の閉塞等は生じなかった。

表－６ 施工時のコンクリート品質試験結果

配合種類	試験項目			レディーミクストコンクリート工場名			
				A工場	B工場	C工場	D工場
33-21-20BB	スランプ 21±1.5cm	試験回数	回	199	198	96	97
		平均値	cm	22.1	22.1	22.1	22.0
		標準偏差	cm	0.3	0.3	0.3	0.3
	空気量 4.5±1.5%	試験回数	回	199	198	96	97
		平均値	%	4.4	4.4	4.3	4.4
		標準偏差	%	0.3	0.3	0.2	0.3
	圧縮強度 (材齢28日)	試験回数	回	67	66	32	32
		平均値	N/mm ²	48.3	56.1	45.4	47.2
		標準偏差	N/mm ²	1.7	1.0	1.5	1.7
67-60-20L	スランプ フロー 60±7.5cm	試験回数	回	168	168	80	79
		平均値	cm	62.9	63.8	62.6	63.8
		標準偏差	cm	1.6	2.0	2.1	2.0
	空気量 4.0±1.0%	試験回数	回	168	168	80	79
		平均値	%	4.1	4.1	3.9	4.0
		標準偏差	%	0.2	0.2	0.1	0.2
	圧縮強度 (材齢91日)	試験回数	回	36	36	16	16
		平均値	N/mm ²	81.6	86.8	83.8	83.3
		標準偏差	N/mm ²	2.7	1.4	1.0	1.6

表－７ 計測項目・計測方法

計測項目		計測方法	計測手法
連壁応力	円周方向	鉄筋計	自動計測
	鉛直方向	コンクリート有効応力計	
作用水圧		間隙水圧計	手動計測
連壁変形	変形モード	挿入式傾斜計	
	頭部変位	光波測量	

6. 計測管理

6.1 管理方法

(1) 計測の目的

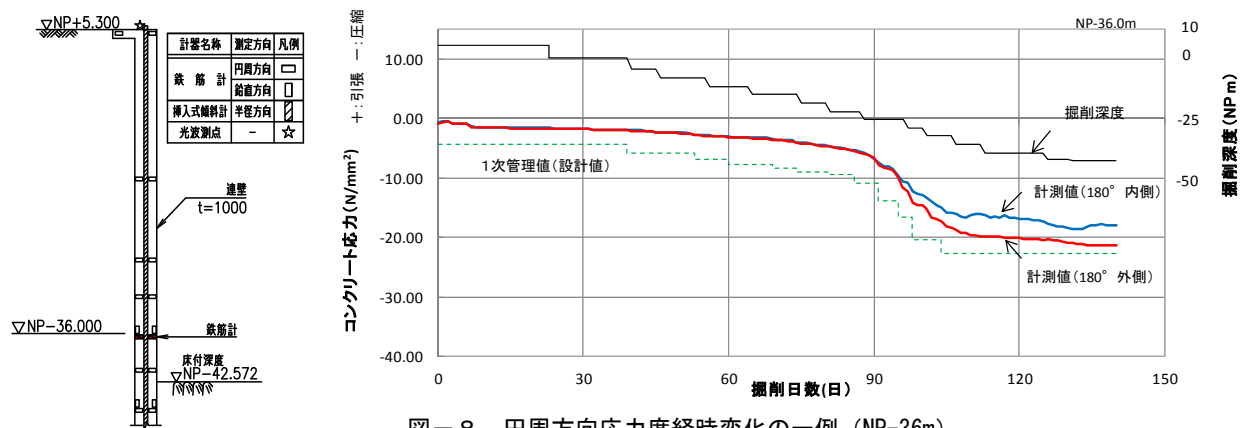
円筒形土留めは、軸対称な等圧荷重に対しては円周方向の軸力として負担する堅固な構造であるが、非軸対称な偏圧成分が卓越すると楕円形状の変形が進み、破壊に至る構造である。また、高強度コンクリートを用いて経済的な壁厚としていることから、連壁の施工精度によっては、壁体に非常に大きな応力が発生する可能性がある。このような設計上予測できない事態をいち早く察知し、確実に安全な施工の実施を目的として連壁の計測を実施した。

(2) 計測項目

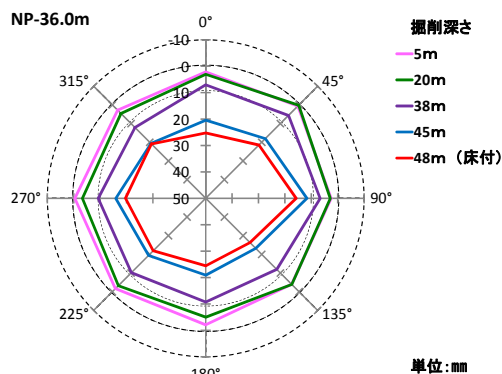
計測項目・計測方法を表－７に示す。計測管理は、円周方向における発生応力および半径方向における変位の計測を主体とした。計測箇所は、床付（NP-42.572m）付近を深度 5m ピッチとし、円周方向の変動を把握するため、各深度で 45° ピッチあるいは 90° ピッチとした。

(3) 計測管理方法

事前に計測管理基準値として 1 次管理基準値（設計値）、2 次管理基準値（警戒値）、3 次管理基準値（限界値）の 3 段階で設定した。1 次管理基準値を超える場合は、管理体制に則り経時的挙動、すなわち応力度の増加速度、変位の増加速度にも留意し、円筒形土留め壁の安全性を検証し、工事の継続・中断を判断することとした。



図－8 円周方向応力度経時変化の一例（NP-36m）



図－9 半径方向変位（NP-36m）



写真－3 地中連続壁全景

6.2 計測結果

(1) コンクリートに生じる応力の経時変化

事前検討において、発生応力度が最大になると予測されたレベル(NP-36.0m)における円周方向の応力度の計測結果の例を図－8に示す。計測値は、設計荷重作用時の逐次掘削解析結果である1次管理値以下で推移した。

(2) 半径方向変位

事前解析により変位が大きくなると予測された深さレベル(NP-36.0m)における半径方向の変位分布を図－9に示す。事前解析における設計荷重作用時の半径方向最大変位は26mmであった。計測の結果、設計で推定された変位値を下回った。なお、今回の計測では0°－180°方向（南北方向）に押された変形形状が観測されが、この傾向は既往の円筒形土留め掘削時にも確認された現象であり、地殻応力に由来する初期地圧の異方性が原因と考えられる²⁾。

7. 地中連続壁の構築結果

連壁の内部掘削完了後の外観を写真－3に示す。コンクリートの未充填箇所は認められず、先行エレメントと後行エレメントとの継手部分からも漏水はほとんど認められなかった。また、後行エレメントは、両端の先行エレメントの拘束によるひび割れが生じやすい箇所であるが、ほとんど発生していなかった。

また、底部地盤からの湧水量も少なく止水壁により抑制されていることを確認した。

8. まとめ

大規模なLNG地下式貯槽の建設に伴い、壁厚の薄肉化を図った連壁を用いた円筒形土留めを採用した。本工事で得られた結果を以下に示す。

- (1) 地中連続壁の壁厚を既設と比べて薄くすることにより、相対的に大きな力に対抗する必要があることから、構造安定性の確保に留意した設計・施工を実施し、内部掘削時の計測管理を強化した。その結果、内部掘削を計画通りに完了した。
- (2) 地中連続壁の施工は地中作業であるため、コンクリートの充填不良や過大な施工誤差等の不測の欠陥が発生する確率は常に存在する。施工時の様々な懸念する事項に対して設計・施工段階でリスク回避対策を行った結果、高品質な薄肉連壁が構築できた。

参考文献

- 1) 小林且典, 深田敦宏, 大隅充浩, 柳井修司: 大規模・大深度LNG地下タンクのコンクリートの施工, コンクリート工学, Vol.46, No.3, pp.38-45, 2008.3
- 2) 高木健次, 前田勉, 宮永誠, 西琢郎: 堆積軟岩地域の大規模円形山留め壁挙動に関する考察, 土木学会論文集 No.630/VI-44, 1-10, 1999.9