

長尺グラウンドアンカーを用いた耐震強化岸壁 における効率的な維持管理手法の確立に向けて

岩本 和樹

近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 技術開発課

(〒651-0082兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30)

神戸港ポートアイランド（第2期）地区岸壁（-16m）（PC-15E～17）は、グラウンドアンカー工法により耐震化を行っている。グラウンドアンカーの維持管理としてアンカーの残存張力を継続的に計測することで監視しており、あらかじめ設定した残存張力の閾値から外れているアンカーに対して張力調整を行っているところであるが、長年の計測結果により残存張力が年単位及び長期的に変動していることがわかった。本検討では、この残存張力の変動要因を特定しようとするものである。そして本検討により得られた変動要因から現在の維持管理手法を見直し、より効率的な維持管理手法の確立につなげていこうとするものである。

キーワード 長尺グラウンドアンカー，残存張力，季節変動，長期変動，圧密沈下，維持管理

1. はじめに

神戸港ポートアイランド（第2期）地区岸壁（-16m）（PC-15E～17）は、水深-16m、岸壁延長1,150mの施設であり、阪神港における中心的なコンテナターミナルである。本施設の位置図を図-1に示す。



図-1 本施設位置図

本施設は 1998 年に水深-15m として供用開始し、2010 年に水深-16m への増深化に併せてグラウンドアンカー補強工法による耐震化を行った。本施設の断面図を図-2に示す。グラウンドアンカー補強工法は、地中に造成するアンカー体と構造物を PC 鋼線等の引張材で連結し、構造物にプレストレスを与え抵抗力を補強する工法であ

る。本施設は、供用中の岸壁であるため、経済性、工期、岸壁利用への影響より本工法が用いられた。当該工法は、L1 地震動、L2 地震動作用時にケーソンの水平変位を抑えることを目的としており、アンカーには、地震時の衝撃力を回避するために初期緊張力 150kN を導入し、残存張力を継続的に監視している。定着層は N 値 50 以上の Dg1 層としている。

本検討は、効率的な維持管理手法の確立に向け、残存張力の変動要因、特に長期的な残存張力の減少要因を特定しようとするものである。

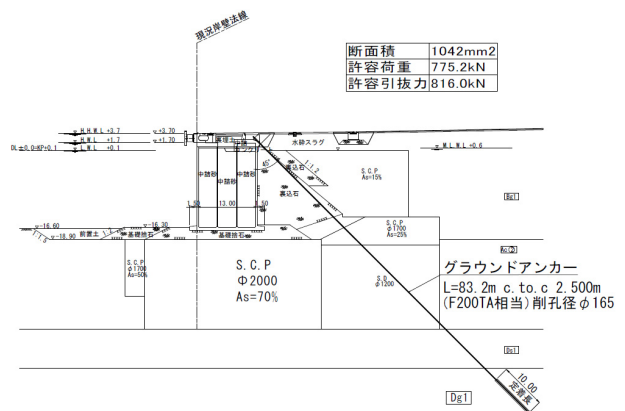


図-2 本施設断面図

2. 残存張力の計測方法および計測結果

(1) 残存張力の計測方法

本施設では、油圧ディスク式荷重計を採用している。計測方式は荷重（油圧）をその場で目視計測するブルドン管式と荷重を電気信号に変換し、データロガーに送信して読み取り自動的に計測する圧力変換方式がある。50m（4函）に1箇所は圧力変換方式の油圧ディスク式荷重計を設置し、自動計測をしている。手動計測は3ヶ月に1回程度行い、自動計測は月1回データ整理を行っている。全90函のケーソンに対し、自動計測は全24箇所、手動計測は全66箇所行っている。

表-2、表-3に示す健全性調査の必要性の評価は、初期緊張力（150kN）の80%～130%は健全と評価し、この範囲外となる場合に対策を検討することとしている。

表-2 残存張力に関する健全性調査の必要性の評価

内容	評価
初期緊張力の0%	I
初期緊張力の50%未満	II
初期緊張力の80%未満	III
初期緊張力の80%～130%	-
初期緊張力の130%～150%	III
初期緊張力の150%～160%	II
初期緊張力の160%以上	I

評価 I	アンカーの健全性に重大な問題があることは明らか、または可能性が高い
評価 II	近いうちに健全性に重大な問題が生じる可能性がある
評価 III	現時点では大きな問題ではないが、いずれ重大な問題に移行する可能性がある

表-3 点検概要

点検項目	点検時期	概要	
		目視点検	残存張力計測
日常点検	手動計測:3ヶ月に1回 自動計測:月1回 ケーソン位置測量:年1回	手動計測時に 外観目視	ロードセルによる 連続計測
定期点検	5年毎	外観目視	ロードセルによる 連続計測
臨時点検	偶発作用等の異常発生時	外観目視	リフトオフ試験
健全性調査	定期点検等にて施設異常確認時	外観目視	リフトオフ試験

(2) 残存張力の計測結果の一例

2013年～2018年の残存張力の計測結果の一例を、図-3に示す。図-3より残存張力の計測結果（以下残存張力）は、約1年の周期の短期間で増減を繰り返していることがわかる。また、長期間で残存張力が年々低下している傾向があることがわかる。本検討では、この1年周期の変動および長期的な減少の要因について分析を行った。

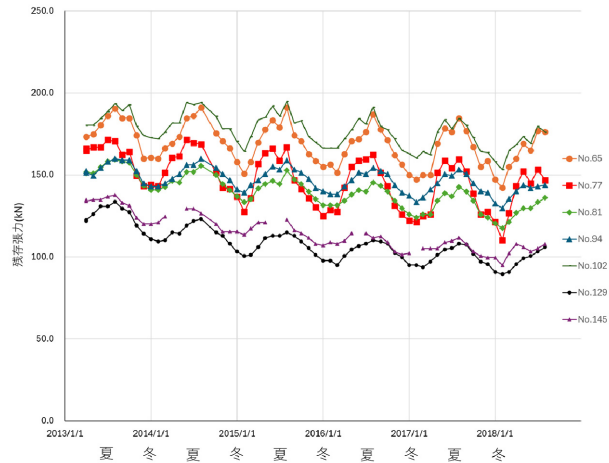


図-3 残存張力計測結果（2013年～2018年）

3. 計測結果の考察

(1) 残存張力の変動要因の抽出

残存張力の変化に影響を与えている可能性のある事象を抽出し、変動作用（気温、潮位、波高、地震、降水量変位（沈下））および偶発作用（L2地震、船舶衝突）に分類した。それぞれについて、抽出した理由を表-4に示す。

表-4 残存張力に影響を与えている可能性のある事象

作用状態	抽出した事象	抽出した理由
変動作用	気温	温度の影響を受けて、残存張力を計測するセンサーの計測値が変動する可能性
	潮位	ケーソンに作用する浮力や水圧、土圧が潮位によって変動することで、残存張力が変化する可能性
	波高	ケーソンに波力が作用することで、残存張力が変化する可能性
	地震	ケーソンに地震力が作用することで、残存張力が変化する可能性
	降水量	ケーソンに作用する浮力が降水量によって変動することで、残存張力が変化する可能性
	変位（沈下）	ケーソンが経年変位（沈下）することで、残存張力が変化する可能性
偶発作用	L2地震	ケーソンに地震力が作用することで、残存張力が変化する可能性
	船舶衝突	ケーソンに船舶が衝突することで、残存張力が変化する可能性

表-5 残存張力と各事象の相関

	No.145と気温の関係	No.145と潮位の関係	No.145と日平均有義波高の関係	No.145と日最大波高の関係	No.145と降水量の関係
時系列					
散布図					
相関係数	0.7571	0.5183	-0.05451	-0.0012	0.0763

(2) 残存張力の季節変動要因

残存張力の季節的な変化の要因を明確にするため、残存張力の経時変化と各要因（事象）との相関関係を分析した結果を表-5に示す。対象期間は2016年4月1日から2018年4月1日の2年間とした。なお、データの季節的な変動の特徴を正確に捉えるために、近似線形の式から近似値を求め元のデータから引くことで、長期的な変動傾向を控除した。表-5より、気温及び潮位については、残存張力との相関がみられたが、その他の事象については、残存張力との相関がみられなかったことから、残存張力の季節変動は気温と潮位が影響している可能性があると考え、それぞれについて詳細に検討した。

a) 残存張力と気温の関係

代表ケーソン3箇の残存張力と気温の関係を表-6に示す。散布図をみると、ケーソン3箇所すべてにおいて、残存張力が気温の変動に対して比例（直線）的に変動しており、相関係数も高い。このことから、残存張力は気温が高いほど大きい値を示し、気温が低いほど小さい値を示すことがわかった。

よって、残存張力の季節変動は気温が大きく影響していると考えられる。

表-6 残存張力と気温の相関関係

	No. 77	No. 129	No. 145
残存張力と気温の経年変化			
散布図			
相関係数	0.87	0.95	0.77

b) 残存張力と潮位の関係

気温と同様に、潮位変動が残存張力にどの程度影響を及ぼし得るかを検討した。毎正時（1時間毎）の潮位計測記録は、分析時の直近1年分（2022年3月8日から2023年3月22日まで）のデータのみ残っていたため、対象期間は分析時の直近1年間とした。

代表ケーソン（No.77）の残存張力と毎正時及び毎零時（1日毎）における潮位の関係を表-7に示す。残存張力との相関は毎零時計測記録よりも毎正時計測記録の方が小さい値を示した。毎零時計測記録では、潮位の季節変動の様子が顕著であり、大潮・小潮と思われる月毎の上下の変動も明確に表れている。これらの傾向の中で、季節変動による影響（気温による影響）が卓越することにより、残存張力との相関関係が高くなっていると考えられる。

よって潮位については、残存張力の季節変動への影響はないと考えた。

表-7 残存張力と潮位の相関関係

	No.77(毎零時)	No.77(毎正時)
残存張力と潮位の経年変化		
散布図		
相関係数	0.70	0.20

次に、同ケーソンにおいて、1日における潮位変動が残存張力にどの程度影響を及ぼし得るかを、堤体の自重（浮力含む）、水圧、および土圧を要素として検証した。算出モデルを図-4に、潮位変動に対するアンカー張力変化量の推定結果を表-8に示す。表-8より、高潮位+1.30mから低潮位+0.10mに潮位が変動した場合に残存張力の実測値が約-10kN/本であるのに対し、推定値は-8.6kN/本と非常に近い値を示した。したがって、潮位変動は残存張力の季節変動要因とはなり得ないが、日変動に影響を及ぼす要因となっていると考えられる。

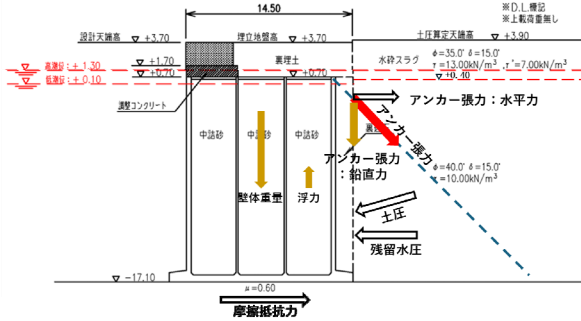


図-4 荷重値の算出モデル

表-8 荷重値の算出結果

	【高潮位時】 外水位：D.L.+1.30m 残留水位：D.L.+1.30m		【低潮位時】 外水位：D.L.+0.10m 残留水位：D.L.+0.40m 潮位差の1/4		変化量（低潮位時～高潮位時） ※張力変化量の推定	
	V (kN/m)	H (kN/m)	V (kN/m)	H (kN/m)	ΔV (kN/m)	ΔH (kN/m)
土圧 (kN/m)	120.51	449.66	125.6	468.66	5.09	19
残留水圧 (kN/m)	-	0	-	52.57	-	52.57
壁体重量 (kN/m)	6267.03	-	6254.13	-	-12.9	-
浮力 (kN/m)	-2705.18	-	-2574.02	-	131.16	-
合計 (kN/m)	3682.36	449.66	3805.71	521.23	123.35	71.57
アンカーへの負荷 外力 (kN/m)	-1759.756		-1762.2		-2.4	
張力変化量 (kN/本) (推定値)					-8.6	
張力変化量 (kN/本) (実測値)					-10.7	

(3) 長期的な残存張力の変動要因

残存張力の時系列変化には、季節変動の他に長期的な変動があり、ほぼ全てのアンカーの残存張力が減少し続けている。この長期的な変動の要因の一つとして、地盤の沈下によるケーソン変位の影響が考えられる。そこで、PC-15～17の既往測量成果（2013年11月23日～2022年11月26日）を用い、両者の関係性について分析した。側線15-aと対象ケーソンの位置関係を図-5、図-6に、側線15-aにおけるアンカー頭部の位置にあたる側点a-1と側点a-1付近のケーソンNo.61及びNo.65の残存張力との関係を表-9に示す。表-9より、残存張力は側点a-1の標高が低くなるほど低くなるのがわかり、両者には高い相関性がみられた。

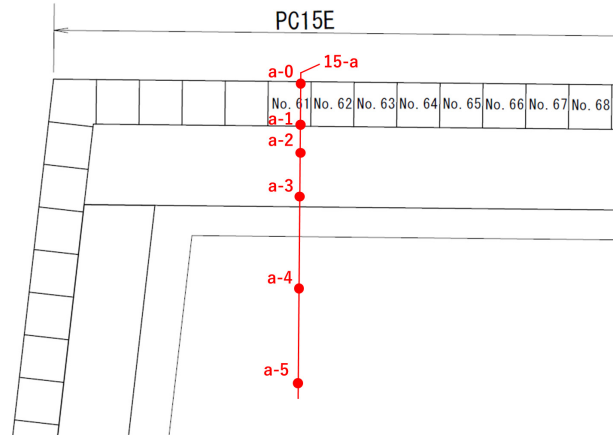


図-5 側線15-aとケーソンNo.61およびNo.65との位置関係

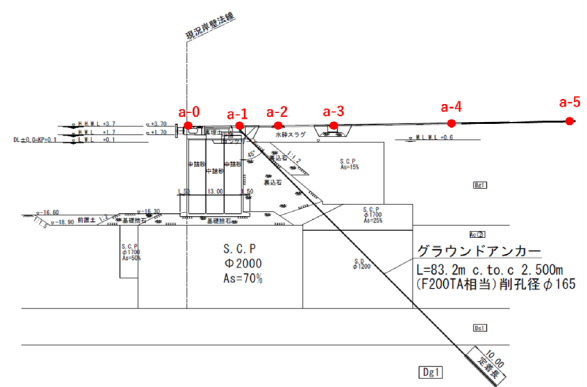


図-6 側線15-aにおける断面図

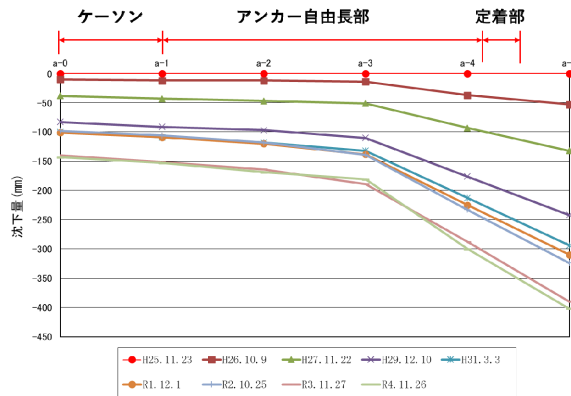


図-7 PC-15Eバースヤード内（側線15-a）沈下量断面図

表-9 残存張力と標高の関係

	No. 61の残存張力と標高の関係	No. 65の残存張力と標高の関係
散布図		
相関係数	0.87	0.934

次に、沈下量に対応するグラウンドアンカーの見掛けの縮み量とバネ係数から算出できる残存張力の減少量が張力計測結果と一致するかについて分析した。グラウンドアンカーの見掛けの縮み量（アンカー頭部と定着部との距離の縮み量）は、ケーソン直下の沖積層の鉛直変位量とアンカー頭部の水平変位量より算定した。残存張力の変化量の算定方法は式(1a)(1b)による。

$$F=K \cdot x \quad (1a)$$

$$K=As \cdot Es/Lsf \quad (1b)$$

ここに、

F:張力変化量

K:バネ定数

x:伸縮量

As:アンカー断面積 1,042mm²

Es:アンカー弾性係数 186×10³N/mm²

Lsf:アンカー自由長 81,625mm

図-6に示す通り、アンカー頭部（側点a-1）直下の沖積層はサンドコンパクションパイルで改良（改良率70%）している。そのため、9年間で153mmの沈下が改良した沖積層で発生しているとは考えにくい。

そこで、グラウンドアンカーの見掛けの縮み量を、同期間において定着部が位置する洪積層が沈下していない場合（Case-1）と洪積層が70mm沈下している場合（Case-2）の2ケースで検討した。その結果（表-10）、Case-1での算定値は、実測値の乖離が大きく、Case-2での算定値は、実測値と近い値が得られた。以上より、洪積層が70mm沈下している場合、圧密による地盤沈下は残存張力の長期的な変動要因であるといえる。

表-10 残存張力（算定値及び計測値）の減少量の関係

Case	ケーソンNo.	鉛直変位量(mm)			水平変位量 (mm)	アンカー 伸縮量x (mm)	残存張力減少量	
		アンカー 頭部	定着部 (洪積層)	ケーソン 直下沖積層			算定値 (kN)	実測値 (kN)
Case-1	No.61	-153	0	-153	65.5	-62	-147.2	-18.2
	No.65	-153	0	-153	63.5	-63	-149.6	-29.2
Case-2	No.61	-153	-70	-83	65.5	-12	-28.5	-18.2
	No.65	-153	-70	-83	63.5	-14	-33.2	-29.2
備考		側点a-1			平面測量			

次に、Case-2における洪積層の沈下量70mmの妥当性について考察した。図-8はコンテナターミナル内で測定している層別沈下計の設置概要である。沈下計は洪積層であるDg1層（48.96m）に設置されている。標高の測定期間と同じ2013年～2022年の9年間に於いて、洪積層は212mm沈下していた。今回仮定した洪積層の沈下量70mmとは若干の乖離がみられるが、おおよその値としては近いことが確認できた。なお、層別沈下計の設置位置は、沈下に伴う嵩上げ工事を行っており、それに伴

い載荷重は、側点a-1よりも大きい。また、岸壁側よりも背後の方が土の応力がかかることを考慮すると、側点a-1における洪積層の沈下量が背後の沈下量の半分程度であるという算定結果は説明のつく範囲内だと考えられる。

以上より、残存張力の長期的な減少の要因は圧密沈下が影響していると特定した。

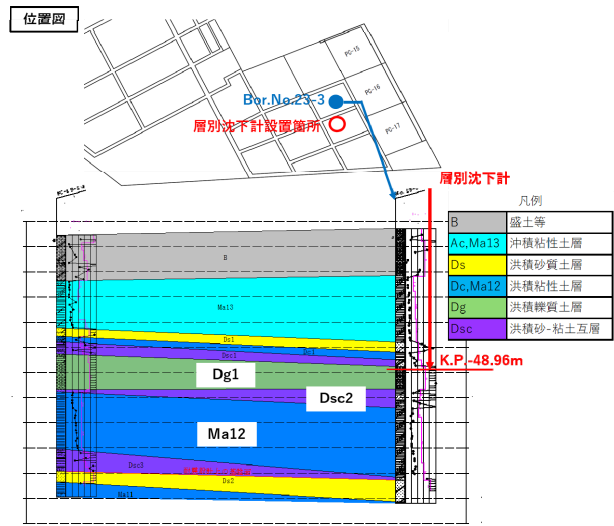


図-8 観測地点の情報（層別沈下計設置深度と地質断面図との関係）

4. まとめおよび今後の検討

本検討より、残存張力の季節変動要因は気温による影響が大きいこと、残存張力の長期的な減少要因は圧密沈下による影響が大きいことを特定した。

気温による残存張力の季節変動については、一定の範囲内の値を1年周期で増減するものであるため、維持管理上の影響は少ないと考えられる。しかしながら、リフトオフ試験等による張力調整の際には、この気温による季節変動を考慮する必要がある。

圧密沈下による長期的な残存張力の減少については、減少量によっては、地震時の引き止め効果が発揮しきれずに許容値以上の変形量が発生する可能性が生じるため、維持管理上考慮すべきである。そのため、引き続き継続した沈下測定を行い、圧密沈下の収束状況を確認する必要がある。

今後の検討として、効率的な維持管理手法の確立、偶発状態での迅速な利用可否判断の導入などを目指し、残存張力の閾値の見直し、維持管理計画書の改訂などを進めていく所存である。