

関西国際空港における 南海トラフ地震津波への対策－防潮壁の築造－

関西エアポート株式会社
技術部 基本施設グループ
山田 了平

1. はじめに

国土交通大臣が策定した津波防災地域づくりの基本指針に基づき、2013年8月に大阪府は南海トラフ巨大地震を想定した津波浸水想定を公表した¹⁾。その想定によると、関空島の1期島と2期島に挟まれる内部水面内の津波水位が最も高く上昇し、地盤高の低い1期島への浸水が想定された。この結果を受け、関西国際空港においては、ハード面の地震・津波対策として防潮壁の築造を計画した。

総延長約2,500mを4工区、3工事に分け、給油地区、旅客ターミナルビル等の重要度の高い施設を守る防潮壁を優先的に築造していき、2013年9月～2017年3月まで約3年7ヶ月の年月をかけ、築造工事を実施した。本計画により関西国際空港の当面の津波対策が完了した。

2. 関西国際空港の津波浸水想定

関西国際空港は1994年に1期が、2007年に2期が供用開始された。関西国際空港の主要施設配置を図-1に示す。1期島には、第1ターミナル、給油施設等があり、2期島には、LCC（ローコストキャリア：格安航空）ターミナルである第2ターミナルがある。このような施設配置の中で、2013年8月20日に大阪府は南海トラフ巨大地震を想定した津波浸水想定を公表した。関西国際空港の津波浸水想定と浸水箇所を図-2に示す。ここで、大阪府の公表した津波浸水想定の設定について以下に述べる。

2011年3月11日に発生した東日本大震災による甚大な津波被害を受け、内閣府中央防災会議専門調査会が、新たな津波対策の考え方を2011年9月28日に「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告」²⁾で示した。その後、2011年12月14日に「津波防災地域づくりに関する法律」が制定されたことを受け、「最大クラスの津波」（L2津波）を想定し、その津波が発生した場合に想定される浸水の区域および水深が設定された。その設定を元に行われた関空島の津波シミュレーション結果が図-2に示す津波浸水想定である。

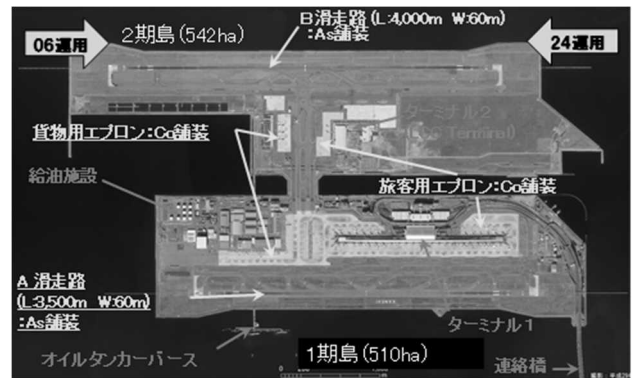


図-1 関西国際空港の主要施設配置

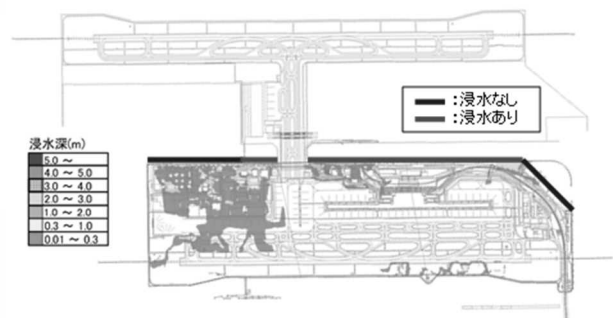


図-2 関西国際空港の津波浸水想定と浸水箇所

図-2からわかるように、関空島では、1期島と2期島に挟まれた内部水面から浸水深0.01～0.3mの浸水が想定されており、地盤高の低い1期島、特に赤線部からの浸水が想定されている。

本想定が発表されるまで、関西国際空港では、高潮への対応を前提に、波当たりの強い沖合側の空港島護岸を高くすることをやってきた。内部水面海域は、沖合波の伝播もなく静穏度も高く、波浪の影響はほとんどないと考えられていた。したがって、図-2からわかるように、比較的沖合側のエリアは、防潮ラインを高く保ち、津波浸水を防ぐ高さを確保していた。

このような状況下で大阪府津波浸水想定は、内部水面内の津波水位が最も高く上昇し、地盤高の低い1期島側へ浸水する想定であった。1期島には、図-1の通り、給

油施設や旅客ターミナルビルといった空港運営あるいは航空機運航において重要な施設があり、早急な地震津波対策が求められた。地震津波対策としてまず考えられた案は、空港島護岸の嵩上げであったが、嵩上げ高さが大きく、別途地下水対策（後述）が必要であることから、非現実的であった。そこで、防潮ラインおよびその計画高さを見直し、第2案として挙げられた対策が、**図-3**に示すように、護岸から島内に少し控えた位置に地下水対策（止水壁嵩上げ）を兼ねた壁を築造する、つまり、防潮壁を築造する計画であった。

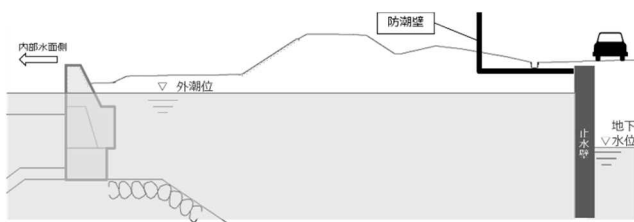


図-3 防潮壁築造と止水壁嵩上げ

3. 防潮壁築造計画の概要

関西国際空港の地震津波対策として、**図-2**の赤線部に総延長約2,500mの防潮壁を築造する計画が立てられた。計画の概要について以下に示す。

(1) 防潮壁築造のもう一つの目的「止水壁の嵩上げ」

防潮壁築造の主目的は、先述したように地震津波対策だが、防潮壁と止水壁を一体化することによる止水壁の嵩上げも目的の一つである。ここで、関西国際空港の止水壁について説明する。

関西国際空港は埋立造成された人工島の上に空港諸施設を整備したものである。埋立材料は岩砕土であり、外周護岸は石積護岸であることから、地盤は透水性が高く、空港用地の地下水位が周辺の潮位の影響を受けやすい特殊な地盤である。そのため、異常潮位時や台風の高潮時に地下水位が上昇し、空港島の周囲から海水が地下に流れ込み、地下室での漏水等地下構造物へ影響が及んだ。こうした問題を抜本的に解消する対策として、地下水位の上昇を抑えるために、2000年～2006年に空港島（1期島）の周囲約11kmにわたって止水壁を設置する「関西国際空港大規模地下水対策事業」が実施された。水を通しにくい沖積粘土層まで約30m掘削し、セメントと土砂を混合した柱を連続して建設することにより止水壁を設置した。本事業における止水壁設置イメージおよび設置位置を**図-4**に示す。止水壁設置後は、止水壁内側の地下水位をポンプにより適切に管理・制御を行っている。したがって、**図-5**に示すように、空港島周辺の海面高さと地下水位が連動することがなくなり、地下水の地下

構造物への影響もなくなった。本止水壁設置事業は、実質的には、長期的な温暖化による海面上昇や長期的な沈下が起きたとしても空港機能に問題は生じず、地下水問題への万全な対策となっている。

空港島の地盤沈下とともに止水壁も天端高が年々低くなっており、将来的に嵩上げ等の対策は必要になる。そこで、本防潮壁築造計画において、築造する防潮壁と止水壁を接続し一体化することにより、止水壁の嵩上げも兼ねることとした。

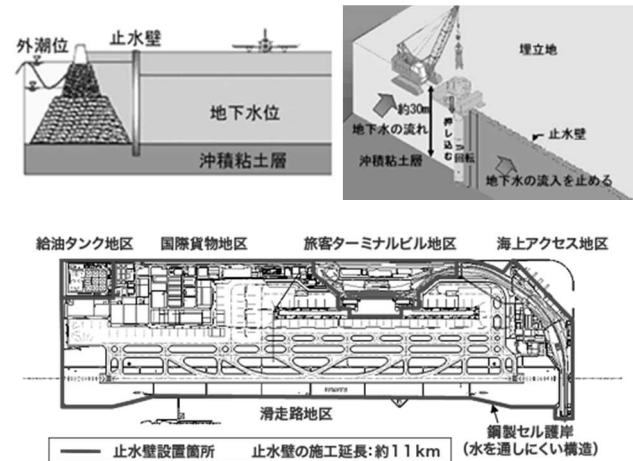


図-4 止水壁の設置イメージおよび設置位置（関空島1期島）

出典：関西エアポート株式会社HP http://www.kansai-airports.co.jp/efforts/safety/efforts-for-safety/kix/natural_b.html
より引用（2017/11/16アクセス）

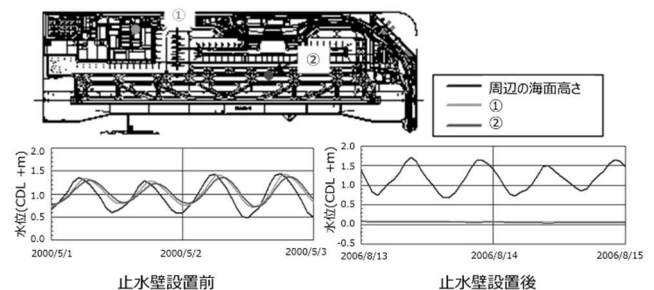


図-5 止水壁設置前後の地下水位状況

出典：関西エアポート株式会社HP http://www.kansai-airports.co.jp/efforts/safety/efforts-for-safety/kix/natural_b.html
より引用（2017/11/16アクセス）

(2) 工区分け

防潮壁築造計画は総延長が約2,500mある。場所により、地盤高や地盤沈下速度、施工環境等が異なり、防潮壁を築造する優先度も異なる。ゆえに、全延長を4工区に区切り、3工事に分けて防潮壁築造工事を実施した。図-6に防潮壁築造計画の工区分けを示す。

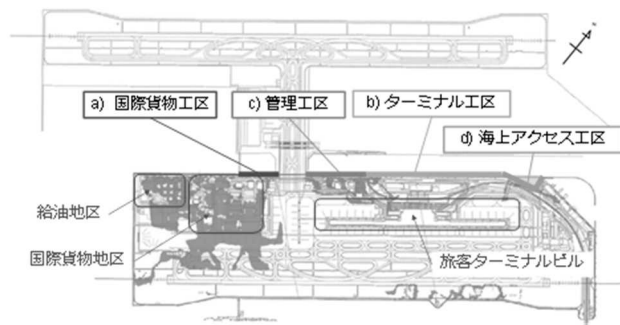


図-6 防潮壁築造計画の工区分け

a) 国際貨物工区

大阪府津波浸水想定において、最も浸水域が広がっているエリアは、図-6の通り、給油地区および国際貨物地区である。特に給油地区は、給油タンク等の給油施設があり、損傷を受けると航空機の運航に多大な影響を与える。上記のように浸水域が広いこと、および重要施設があることから給油地区は、最優先で地震津波対策を講じる必要があった。給油地区および国際貨物地区の浸水箇所は、図-2に示す通り、1期島と2期島を結ぶ連絡誘導路の南側約150mの区間である。国際貨物工区は、この区間に防潮壁を築造し、津波浸水を防ぐ。

b) ターミナル工区

空港諸施設のうち、給油施設と同じく航空機の運航上重要となる施設が旅客ターミナルビルである。大阪府津波浸水想定(図-2)によると、旅客ターミナルビル周辺は、浸水域が小さく浸水被害は小さい。そのため、優先度は高いが、国際貨物工区の次点とした。ターミナル工区では、全長約1,200mにわたり防潮壁を築造する。

c) 管理工区

管理工区は、入りくんだ内部水面の最も奥に位置する工区である。そのため、津波水位も空港島北側より高くなり、国際貨物工区ほどではないが浸水域が広がっている。しかし、旅客ターミナルビル等の重要施設に影響を与えるような想定ではないため、先述した国際貨物工区、ターミナル工区と比較すると優先度は低くなる。管理工区では延長約550mの防潮壁を築造する。

d) 海上アクセス工区

海上アクセス工区は、他3工区に比べ、最も北に位置

しており、かつ内部水面の中でも最も沖合側に位置する。したがって、4工区の中でも津波水位は低く、優先度も管理工区と同程度である。海上アクセス工区では延長約500mの防潮壁を築造する。築造工事は、管理工区、および海上アクセス工区をまとめて発注した。

(3) 各工区の防潮壁築造の計画天端高

防潮壁を築造するにあたり、式(1)により算出した各工区の計画天端高を表-1に示す。なお、関西国際空港では、高さ管理に潮位表基準面(C.D.L.: Chart Datum Level)を使用している。

計画天端高 = 最大津波水位 + 津波時の想定沈下量

・・・式(1)

表-1 各工区の計画天端高(C.D.L.)

工区	計画高さ
国際貨物工区	C.D.L. + 5.1 m
ターミナル工区	C.D.L. + 5.6 m
管理工区	C.D.L. + 5.6 m
海上アクセス工区	C.D.L. + 4.7 m

最大津波水位は、内閣府の「南海トラフの巨大地震モデル検討会」の津波断層モデルを用いて、大阪府の津波浸水シミュレーションで計算された関西国際空港における津波高を用いている。

津波時の想定沈下量には、地震による地殻沈降量、および地震動による鉛直変位量を考慮している。地震による地殻沈降量は、大阪府の津波シミュレーションにより算出されたものである。地震動による鉛直変位量は、関西国際空港における2013年の調査で算出されたものである。この調査は、地震動及び津波に対する護岸等の安定性を照査・評価するものであり、防潮壁築造位置における地盤の地震時挙動(鉛直変位量)を評価している。

表-1からわかるように各工区の計画天端高が少し異なる。その主な理由は、計画天端高を構成している最大津波水位である。海上アクセス工区は入りくんだ内部水面海域の入口に位置しているため、その最大津波水位は、海上アクセス工区よりも奥に位置している管理工区と比較すると小さい。

4. 防潮壁築造工事

先述したように、防潮壁築造工事は全延長約2,500mを4工区に区切り、3工事に分けて施工した。2013年9月から始まり、2017年3月までの3年7ヶ月に及ぶプロジェクトとなった。第1工事は、2013年9月～2014年2月の6ヶ月間で国際貨物工区を施工した。第2工事は、2014年3月～2015年6月の1年4ヶ月でターミナル工区を施工した。そ

して最後の第3工事は、2015年3月～2017年3月の2年間で管理工区および海上アクセス工区を施工した。ただし、第3工事は護岸嵩上げ工事の一部である。築造した防潮壁は最大3.8mの高さであり、主な形状は図-7に示す4タイプである。これら3つの防潮壁築造工事の中で特記すべきは、地盤改良工法としてパワーブレンダー工法（原位置土攪拌工法）を採用した第2工事である。以下に、主にパワーブレンダー工法に着目しながら第2工事、つまりターミナル工区防潮壁築造工事について説明する。

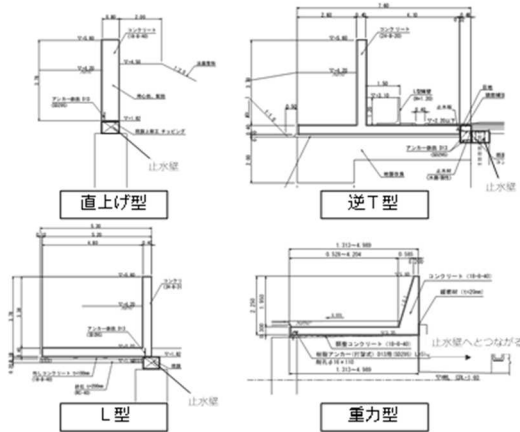


図-7 防潮壁の主な形状

(1) パワーブレンダー工法の採用

第3章(1)でも述べたように、防潮壁築造のもう一つの目的として止水壁の嵩上げがある。ここで、築造する防潮壁と止水壁のターミナル工区における位置関係を図-8に示す。図-8からわかるように、止水壁は車道部道路外側線下に位置しているため、直上に嵩上げすると、車両通行時に圧迫感を与えてしまう。ゆえに、ターミナル工区の防潮壁は止水壁と接続しながらも、路肩より外側位置に立ち上げることとした。

ここで問題となるのが、図-8の通り津波水位時に防潮壁底版部にかかる揚圧力である。一般的に揚圧力に対しては、防潮壁自体の躯体重量で安定性を確保するが、躯体全体で重量を増大させると、躯体が巨大化してしまい、非現実的であると考え、立ち上げる擁壁部はそのまま躯体下部の重量を増大させることを考えた。施工方案として、躯体下部の土をコンクリート置換することなどが考えられるが、コスト縮減や残土低減の観点から、本工事では、原位置土攪拌による地盤改良工法であるパワーブレンダー工法を採用した。具体的にパワーブレンダー工法とは、図-9に示すように、現地盤中にスラリー状のセメント系、または石灰系固化材を注入しながら、土と固化材を機械的に混合攪拌し、地盤を固化することを目的とした地盤改良工法である。この工法により防潮壁躯体下部を地盤改良することで、躯体下部の重量を増大し、さらに止水性も確保できる。

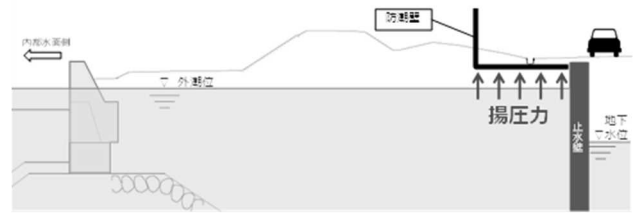


図-8 防潮壁と止水壁の位置関係（ターミナル工区）



図-9 パワーブレンダー工法 施工状況

(2) 攪拌混合土の品質管理

パワーブレンダー工法の品質管理においては、地中の施工状況が確認できないため、混合材の添加量（配合表）をあらかじめ決めておく必要がある。そのため、事前に現地にて試料土を採取し、室内配合試験を実施した。その試験結果をもとに、表-2の通り混合材の基準添加量を決定し、それをもとに施工を進め、適切に施工管理を行い、施工後の事後試験によりそれぞれの品質管理項目の規格値を満足しているかを確認する。各規格値は、現地施工前に実施した試験施工により確認し決定した。本工事における2つの品質管理項目を以下に示す。

表-2 混合材の基準添加量（混合表）

材料種類	添加量 (kg/m ³)	水セメント比 (%)
高炉セメントB種	200	70

a) 改良土の単位体積重量 γ

規格値は、 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ であり、改良土が揚圧力に抵抗できるだけの重量を確保できているか確認する。確認方法は、現場で試料採取した供試体およびボーリングコアの湿潤密度から算出し確認する。

b) 改良土の透水係数 k

規格値は、 $k = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ であり、防潮壁の底版へ直接揚圧力がはたらかないような難透水層の形成を確認する。確認方法は、現場透水試験および試料採取した供試体の透水試験により算出し確認する。

透水係数は、改良土の流動性に依存する。通常、配合

を変えない限り改良土の流動性は変化しないが、関空島では、潮位変動により地下水位が変動するため、流動性が変化する。したがって、施工中も改良土の流動性管理が重要となる。本工事では、テーブルフロー値（TF値）と呼ばれる、攪拌混合直後における改良土の流動値を管理することで、透水係数を管理することとした。TF値の計測方法は以下の通りである。TF値の測定器具と測定写真を図-10に示す。

1. 改良土をフローコーンに詰め、表面をならす。
2. 直ちにフローコーンを鉛直に取り去り、フローテーブルのハンドルを回転させ15秒間に15回の落下運動をテーブル上の改良土に与える。
3. 改良土が最も広がっている部分の長さ、この方向に直角な方向の広がりをmm単位で測定する。



図-10 テーブルフロー値の測定器具と測定写真

出典：株式会社レックスHP <https://www.rex-rental.jp/nco/c-206.html>より引用（2017/11/16アクセス）

TF値の管理値は表-3に、TF値と透水係数との相関は図-11に示す。TF値と透水係数との相関は、先述した室内配合試験により得られた結果である。図-11からわかるように、透水係数とTF値は比例関係にあり、透水係数の目標値からTF値は125mm以上155mm以下で管理すればよいことがわかる。潮位変動によりTF値も変動するため、125mm以下の場合、施工水量を増加し施工し、155mm以上の場合、原則施工しないこととした。

TF値の管理は透水係数の管理につながるが、施工性の管理にもつながる。例えば、TF値が低い、つまり流動性が低い場合、攪拌機械であるトレンチャーにかかる負荷が大きくなり、安定した攪拌混合が望めない。以上のように、TF値の管理は品質管理および施工管理の両方の上で重要である。

表-3 テーブルフロー値の管理値

試験項目	試験方法	管理値	試験基準
TF試験	JIS R 5201	125mm以上～155mm以下	2回/日

※1日2回は、干潮および満潮時に行う。

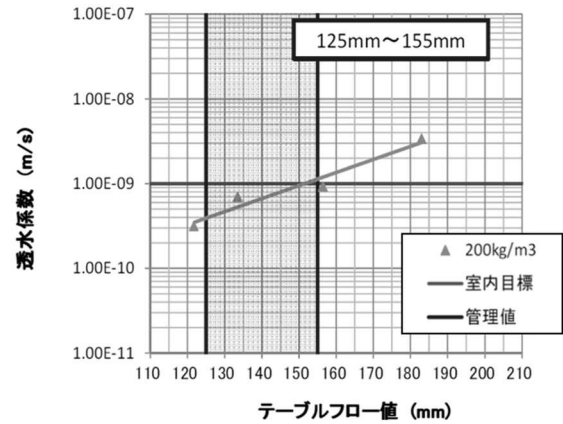


図-11 テーブルフロー値と透水係数の相関

(3) フライアッシュの使用について

防潮壁壁部のコンクリート躯体には、フライアッシュを配合したコンクリートを使用している。防潮壁は水密性の確保が重要であり、躯体のひび割れを抑制しなければならない。先述の通り、防潮壁は止水壁の嵩上げも兼ねており、既存の躯体の上にコンクリートを打設するため、外部拘束応力による温度ひび割れを生じる可能性が高い。また、打設するコンクリート躯体のスパンは10mと大きく、外部拘束応力も大きなものになると予想される。さらに、外部拘束応力による温度ひび割れは比較的大きく、貫通となりやすいひび割れである。そこで、コンクリートの混和材として水和熱の低減に効果のあるフライアッシュを使用し、ひび割れを抑制した。フライアッシュの使用によるメリットを表-4に示す。

表-4 フライアッシュの使用によるメリット

	フレッシュ性状	硬化後の性質
効果	<ul style="list-style-type: none"> ・ポンプ圧送性能の向上 ・コンクリートの充填性能の向上 	<ul style="list-style-type: none"> ・水和熱の減少 ・耐海水性の向上 ・水密性の向上 ・長期強度の増進

防潮壁壁部に使用したコンクリートは、②設計配合の高炉セメントB種（BB）の一部をフライアッシュに置換したW/B55-10-20BBである。セメントとの置換率は、プラントの提案をもとに元請と協議し、10%とした。ひび割れ抑制効果の期待が大きい置換率は20%だったが、コンクリートの形状および初期脱型強度確保の観点から安全側である10%を採用した。また、使用に先立ち、試験練りおよび一軸圧縮強度試験を行った。一軸圧縮強度試験結果の比較を図-12に示す。比較対象として、①設計通りの配合である24-10-20BB、③設計配合のBBを普通ポルトランドセメント（N）に変更し一部をフライアッシュに置換したW/B55-10-20N、の2タイプを用意した。また、現場でテストピースを採取し長期強度も確認した。長期強度の比較を表-5に示す。

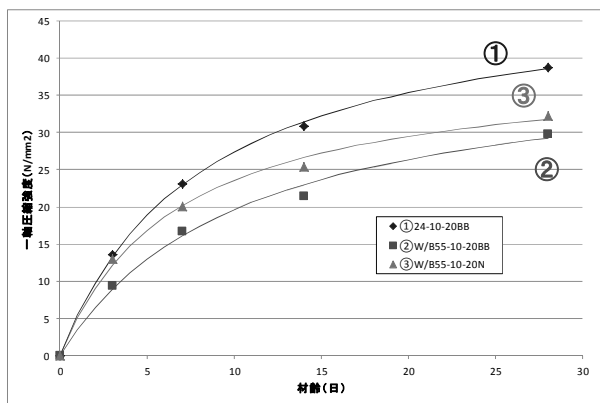


図-12 一軸圧縮試験結果の比較 (材齢0～28日)

表-5 FAコンクリート長期強度の比較 (N/mm²)

FA	σ_7	σ_{28}	σ_{56}	σ_{91}
未使用	22.3	35.3	39.1	44.3
使用	21.4	36.3	40.2	44.1

図-12および表-5からわかるように、セメントをフライアッシュに置換した②③は初期強度が低下したが、長期強度は未使用と同等まで増進している。これより、フライアッシュを配合したコンクリートは問題なく使用できるとした。さらに、フライアッシュの使用にあたり、品質を確認しながら防潮壁のコンクリート躯体を打設した結果、冬場施工ということも相まり、ターミナル工区の防潮壁は温度ひび割れがひとつも生じず竣工できた。

以上のように、パワーブレンダー工法を採用し、その攪拌混合土の品質管理を着実にを行い、コンクリートにフライアッシュを配合する等、様々な工夫を行い、3工事のうち最も山場であったターミナル工区の防潮壁築造工事を無事竣工し、図-13のように全長1,200mにわたる防潮壁を築造することができた。

5. まとめ

以上のように、関西国際空港では、地震津波対策として、2013年8月に大阪府が公表した南海トラフ巨大地震を想定した津波浸水想定に対し、防潮ライン高さが不足し津波浸水が想定されるエリアに防潮壁を築造し、防潮ラインの必要高さを確保するような計画を立てた。さらに、防潮壁を既設止水壁と接続し、止水壁の高上げも兼ねた防潮壁築造計画とした。防潮壁築造工事は、総延長約2,500mを4工区、3工事に分け、給油地区、旅客ターミナルビル等の重要度の高い空港施設を守る防潮壁を優先的に築造していき、2013年9月から始まり、2017年3月まで約3年7カ月の年月を経て無事に完了した。旅客ターミナルビル前の防潮壁築造工事においては、パワーブレンダー工法と呼ばれる地盤改良工法を採用し、コスト縮

減および残土軽減につながった。本工法は、品質管理・施工管理が課題となったが、それぞれ適切に管理し、品質も出来形も満足する施工を実施することができた。また、フライアッシュコンクリートの採用によりひび割れを抑制することもできた。そして、防潮壁築造工事の竣工により関西国際空港における当面の地震津波対策は完了した。本計画で実施したハード面の対策と、2016年4月にソフト面の対策として自社で定めた地震・津波BCP（業務継続計画）をもとに、地震・津波発生時は、人命の保護、被害の軽減、空港機能の早期復旧を目指す。



(a) 防潮壁築造前



(b) 防潮壁築造後

図-13 防潮壁の築造前と築造後

参考文献

- 1)大阪府 (2013年8月20日) 「大阪府津波浸水想定の設定について」
http://www.pref.osaka.lg.jp/attach/20873/00000000/01_zentaizu.pdf
- 2)東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会 (2011年9月28日) 「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告」
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/pdf/houkoku.pdf>
- 3)国土交通省 (2011年12月14日) 「津波防災地域づくりに関する法律」 <http://www.mlit.go.jp/common/000190963.pdf>