

未来 FRONT

日本初の複合構造 海上空港を支える鋼管杭・鋼管矢板基礎

東京国際空港再拡張事業 D滑走路建設外工事

国内航空ネットワークの要として、およそ1分間に1機のペースで離着陸が行われている羽田空港は、その処理能力が限界に達している状況にある。

そうしたなか、その冲合で365日昼夜を問わず進められている工事がある。全長2500mの滑走路を新たに建設する、「D滑走路建設外工事」である。

新たな滑走路島は、約2000mの埋立部と多摩川河口域にかかる約1100mの栈橋部による海上空港となる。これまでに、米国ニューヨークのラ・ガーディア空港など栈橋形式の海上空港はあるが、大口径・長尺の鋼管杭基礎をともなう大規模なジャケット構造による施工としては、これまでに類をみない事例となっている。

100年間の耐久性を目指し、ステンレス鋼で覆われたジャケットレグが洋上に建ちならぶさまは、神殿のようでさえある。

滑走路島が埋立部と栈橋部による複合構造であることに加え、高精度を追及しながら急速施工を可能にするなど、海上構造物の建設史にさんざんと輝くであろう本工事をレポートしてみる。

数次におよぶ拡張事業で成長を続ける羽田空港

国内49の空港と結ばれ、1日約420便が就航する東京国際空港（羽田空港）は、国内航空旅客数の約6割にあたる約6667万人（1日あたり約18.2万人／2007年度）が利用している、国内航空ネットワークの基幹空港である。

その歴史は、1931年にわが国初の国営民間航空専用飛行場として誕生。面積わずか53ha、滑走路は300m×15mの1本からの出発であった。もっとも、羽田空港の歴史は航空需要の拡大に対応するための、数次に渡る拡張の連続であり、その代表的事業が1984年1月より開始された沖合展開事業である。

1988年7月に第I期事業として新A滑走路を、5年後、第II期事業として西旅客ターミナルを供用した。さらに第III期事業として1997年3月には新C滑走路を供用したほか、翌年3月に国際線地区旅客ターミナルビルを供用し、2000年3月に新B滑走路を、2004年12月には東旅客ターミナルを供用。現在の羽田空港は面積約1271ha、(A) 3000m×60m、(B) 2500m×60m、(C) 3000m×60mの3本の滑走路を備えた国内最大級の空港で、年間の航空機発着回数は約29万6000回（2006年度）。旅客数とあわせて国内最大の空港であるとともに、国内線主体にもかかわらず世界有数の規模（乗降客数で第4位）を誇っている。



沖合展開事業の変遷

さらに沖へと向かう再拡張事業

こうした変遷をたどってきた羽田空港だが、東京都区内にあって利便性が高い反面、騒音問題や増便規制、小型機の乗り入れ禁止などの発着枠問題が存在し、さらに近年の著しい航空需要の増大で、その空港処理能力はすでに限界に達している。そのため、新たに4本目の滑走路（D滑走路）を整備し、空港処理容量を大幅に増加させようというのが、この度の再拡張事業の目的である。

この事業により、羽田空港の年間発着能力は現在の29.6万回から40.7万回に増強。発着容量の制約の解消、多様な路線網の形成による利用者利便

の向上を図るとともに、将来の国内航空需要に対応した発着枠を確保しつつ国際定期便の受け入れも視野に入れるという。



羽田空港再拡張事業の概要



D滑走路建設工事全景（2008年9月24日）

国内初適用となる 複合構造の海上空港

2000年9月より、「首都圏第3空港調査検討会」が設置され検討が始まった羽田空港の再拡張事業は、新たに整備されるD滑走路島の工法について、栈橋工法、埋立・栈橋組合せ工法、浮体工法の3工法について検討が行われた。

その結果、関西国際空港や中部国際空港などが国の海上空港で数多くの実績がある埋立工法に加えて、多摩川側約1100mについては河口域の通水性を確保するために栈橋構造を採用。埋立と栈橋とを組み合わせ、国内初の複合構造の海上空港として決定された。

埋立部は、大水深かつ軟弱な粘性土層が厚く堆積した場所に位置する。そのため、工期・工費圧縮の観点から低置換のサンドコンパクションパイル工法で地盤改良が施され、護岸構造は沈下に対して追従性が高い傾斜堤構造を採用し、海底面から約35mの高盛土埋立の長期沈下に対応している。

栈橋部には、本杭として先行打設した鋼管杭基礎（φ1320.8～φ1600）に工場製作された全198基のジャケットをかぶせるジャケット式栈橋構造を採用。そして埋立部と栈橋部をつなぐ埋立栈橋接続部（以下、接続部）には、航空機が安全

に離発着できる滑走路の基礎としての機能と、埋立部の側方変位を抑制する機能（護岸機能）の両方を満たすために、橋梁などの基礎として実績が豊富で、大きな曲げ剛性をもつ鋼管矢板基礎が採用されている。

厳しい施工条件と大深度・軟弱地盤での鋼管杭施工

このように、これまでの空港施設には見られないほど、非常に大規模で複雑な構造となっているD滑走路建設工事だが、技術的難度に加えて、非常に厳しい施工条件が多くみうけられる。

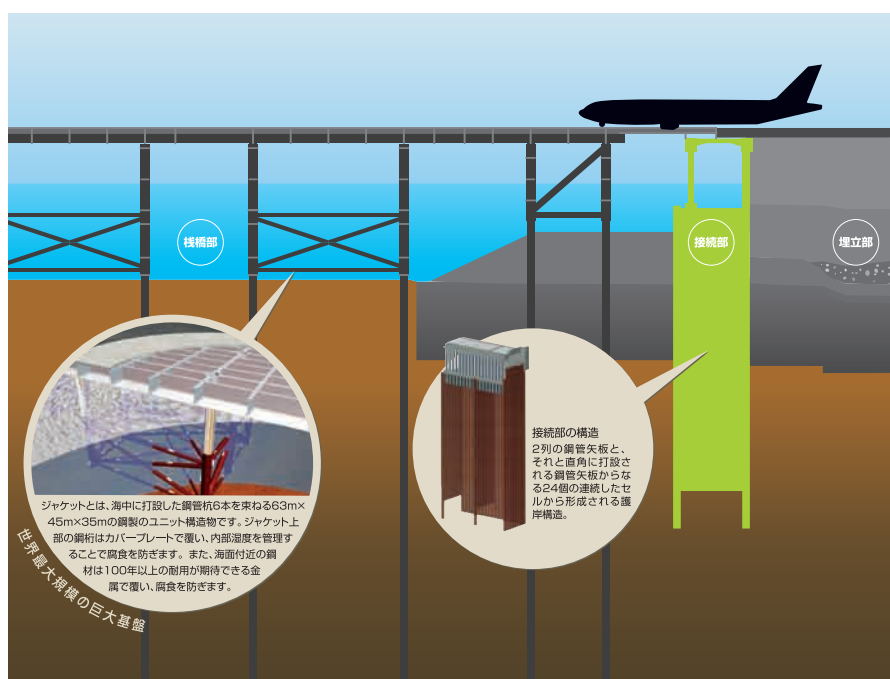
まず、そのひとつが2007年3月30日に本工事が着手され、2010年度中の完成・供用開始を目指すという、きわめて短工期での施工が求められていることである。

さらに、船舶の航行が集中する東京港第一航路に近接していることや供用中の現羽田空港の制限表面下（航空機の安全運航のための高さ制限）の中にあることなど、厳しい施工条件も重なっている。

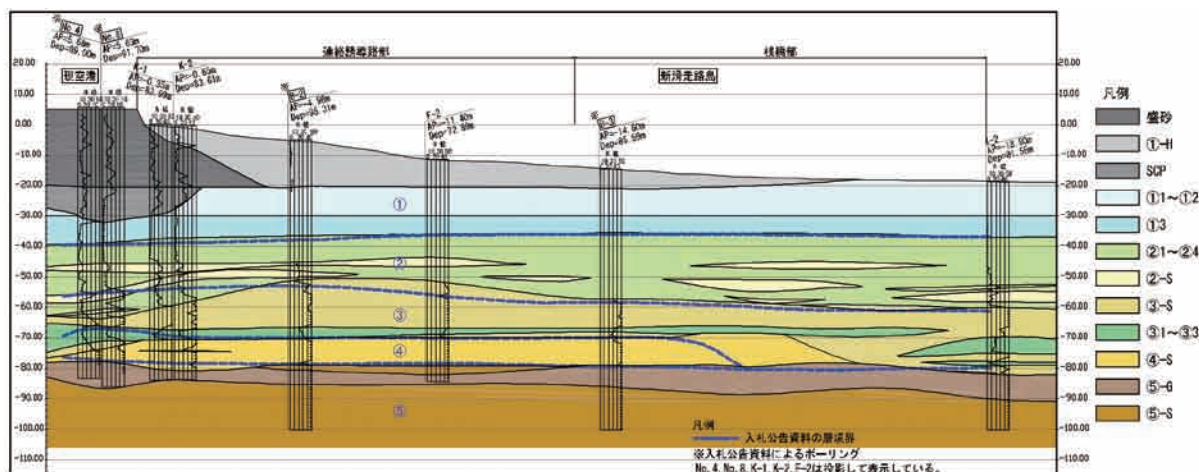
また、当現場は最大20mの大水深海域にあり、その下には軟弱な粘性土が厚く堆積しているため、杭長85m～90mにも及ぶ長尺鋼管杭を打設することが必要となっている（本現場の地層構成と各地層の特徴は次頁「地質構成図」と



D滑走路平面図



D滑走路断面構造図



地層構成図(滑走路中心断面)

「地質区分の特徴」を参照)。

基礎杭の設計支持力の設定については、杭径がφ1600と大口径であるため先端支持力の設定には十分な注意が必要であり、近隣で地盤条件の似た東京港臨海道路の載荷試験結果も活かしつつ、当現場でも鉛直載荷試験と水平載荷試験を実施。その結果、支持層に杭径の3倍の根入れ深さとし、先端閉塞率を50%として設計することとした。

このように、厳しい施工条件下での大規模かつ急速な鋼管杭施工として、世界的にも例を見ない困難かつ高度な技術的知見が求められるプロジェクトとなっている。

大規模・急速・高精度施工を可能にした鋼管杭打設

多摩川側約1100mでは、河口域の通水性確保のほか、気象・海象条件に左右される現場施工量の低減、杭本数の削減やプレファブ化による工程短縮などの理由からジャケット式栈橋構造が採用された。このような大規模なジャケット式栈橋は、これまでに海洋エネルギー施設や港湾施設での実績はあるものの、広大な空港基盤施設としては初の適用となっている。その、主要諸元は以下の通りである。

- 栈橋部 198基
- 標準寸法 W63m×L45m×H35m (1基当たり)
- 最大重量 約1600トン
- 基礎杭 φ1600・φ1422.5・φ1320.8×85～90m 1165本(約9万トン)

①層	海底面～AP-35m程度に分布する地層であり、軟弱な粘性土主体の地盤。含水比は100%以上程度、塑性指数は60%以上程度、間隙比は3以上程度。
②層	AP-35m～60m程度に分布する地層であり、粘性土主体であるが、②層の下半分に一部砂質土が挟在する。上部の粘土層については、①層に比較すると粗粒で低塑性であり、含水比は25～60%程度、塑性指数は10～40%程度、間隙比は1.3程度。
③層	AP-50m～75m程度に分布する地層であり、砂礫・粘性土・砂質土の互層地盤。N値50以上の箇所もあり、規模構造物の支持層となりうる層。
④層	AP-70m～95m程度に分布する地層であり、一部小さなN値を有する粘土が挟在しているが、N値50以上の連続した層が存在し、中規模～大規模構造物の支持層となりうる層。
⑤層	AP-80m程度以深に分布する地層であり、N値50以上の連続した層が存在し、大規模構造物の支持層となりうる層である。せん断波速度はおおむね400m/s以上。

地層区分の特徴

- 栈橋部全長 W1079.1m×L524m
- 栈橋部面積 約52万㎡

栈橋部の鋼管杭施工では、①大口径・長尺杭が使用され、かつ短工期での施工が求められていること、②非常に高い打設精度が要求されること、の2点が大きな特徴となっている。

最大径φ1600mm・総本数1165本となる鋼管杭は、工程短縮を目的に別ヤードで杭長約80m～90mに一本化され、重量約80t～90tと合わせてスケールの大きな長尺杭として打設される。

ジャケット栈橋の施工は、通常、仮受け杭を設置してジャケットを据付け、据付け後のジャケット上から杭を建て込むが、本工事では工程短縮とコスト削減を目的に、先行打設した鋼管杭にジャケットをかぶせて据付けを行っている。

そのため、鋼管杭の打設は水平方向で10cm以下、鉛直方向で±5cm以下、

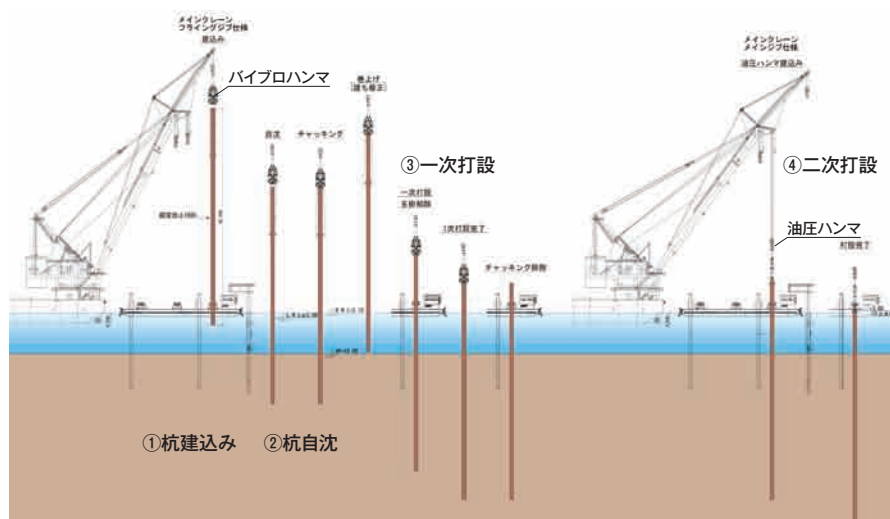


栈橋部ジャケット据付状況



鋼管杭へのジャケット挿入の状況

傾斜角は2度以下という非常に高い精度が要求されることになった。



鋼管杭打設ステップ図



パイルキーパーを用いた鋼管杭打設状況



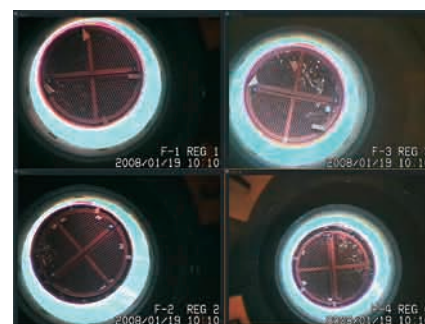
鋼管杭は、1600t吊級杭打船で建て込み、杭の鉛直精度を確保するため1次打設をパイプロハンマで、2次打設は油圧ハンマを用いたフライング工法で行われている。導材導棒を用いた杭打設では設置および撤去に時間がかかるため、パイルキーパー付きの導材台船を使用することで、工程短縮を図りながら高い精度を確保している。

導材台船は杭打設時の平面方向ガイドを搭載しており、後から据付けするジャケットへの精度確保のため、ジャケット1基あたりの杭6本の相対位置を確保するパイルキーパー 6台が配備されている。導材台船にはRTK-GPSとレーザー距離計等を連動したパイルキーパーの位置誘導システムを搭載。リアルタイムで台船の位置

決めと打設中の杭の位置情報を表示することで、打設途中の位置ズレ等へすばやく対応できるようになっている。

さらに、ジャケットレグ内には小型で精細度のカメラが取り付けられ、モニター画面を確認しながらジャケットレグを杭へと挿入でき、効率化が図られるとともに吊荷の下に立つ必要がなく安全性も向上している。

栈橋部分だけでも1165本という大規模な数量の鋼管杭を、これまでに培ってきた技術と新しい工夫の積み重ねで、繊細かつスピーディーに打設が行われている。



レグ内カメラ画面



誘導システム画面



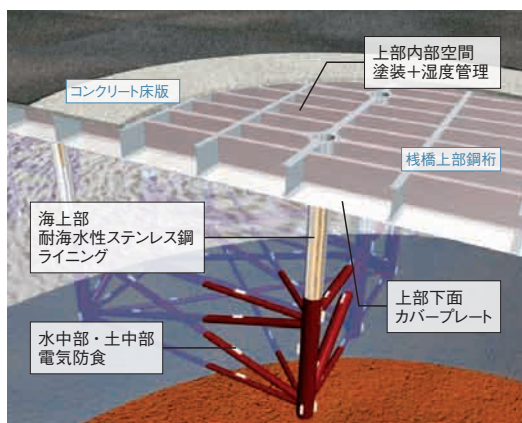
導材台船

100年対応のライフサイクル コスト低減を図る防食対策

埋立・栈橋組合わせ構造であるD滑走路は、ジャケット式栈橋構造をはじめとして大量の鋼材が使用されている。これら鋼構造物は、腐食環境の厳しい海上で長期の供用を想定していることから、長期耐久性を期待できる防食対策が施されている。

上部鋼桁部は、耐腐食性に優れるチタンカバープレートにより桁全体を覆うことで腐食環境が大幅に改善される。また、結露による桁内塗装の劣化を防ぐため、除湿器と循環ファン、送気ダクトからなる除湿システムを利用して、桁内部の相対湿度を50%以下にコントロールしている。

カバープレートから海面付近までのジャケットレグは、補修がきわめて困難な干満・飛沫帯にあることから、鋼部材の表



ジャケット式橋橋部概略図

面を耐腐食性に優れた耐海水性ステンレス鋼で覆う防食工法で対策されている。また、海中部および土中部は、港湾施設に実績が豊富で信頼性が高く、維持管理が容易なアルミニウム合金陽極を用いた流電陽極方式による電気防食工法が採用されている。

様々な要求に応える 鋼管矢板基礎

延長424mになる接続部は、D滑走路を特徴づける複雑な機能を持った特殊な構造物といえる。護岸として期待される性能もこれまでの事例とは大きく異なる。護岸高さは、水深約18mに海面上の高さ約14mを加え、30mを超える。さらに、埋立部は、圧密沈下を見越して

最大高さ約40mの盛土が施される。こうした条件下で、水平方向からの側方変位に耐え、100年間の耐久性が求められる護岸であり、供用後は上部を航空機が通るため、橋梁など同様の荷重を受け持つ基礎である。

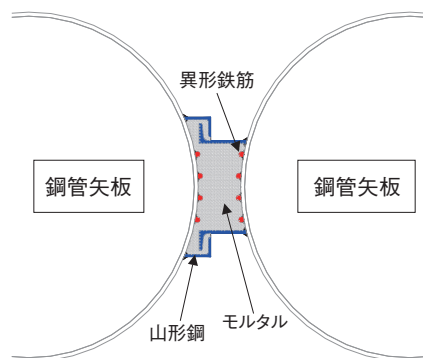
このように、埋立護岸兼渡り桁基礎としての機能が要求されるため、接続部では、コンパクトな断面で大きな曲げ剛性が得られ、橋梁・橋台の基礎として十

分な実績がある鋼管矢板井筒基礎が採用されている。地盤変位を抑えるため隔壁部の継手にはせん断耐力の大きな、高耐力継手が採用されたφ1600mmの鋼管矢板が用いられている。

工夫をこらし、工期短縮にも 貢献する技術の数々

この高耐力継手は、従来のP-P継手に比べて継手部の内空断面を大きくした山形鋼と異形鉄筋の組み合わせに、高強度モルタルを充填した構造となっている。新開発のウオータージェットを用いて掘削洗浄することで、継手内へのモルタルの充填がより確実になっている。

これらの特徴により、P-P継手と比較して2.5倍のせん断剛性と10倍のせん断耐力が実現したほか、鋼管矢板本数の



高耐力継手の概要図

削減も可能になった。

また、接続部は制限表面下にあるため、継ぎ杭での打設が行われたが、打設精度の要求とともに施工時間を短縮するために、無溶接で接合が可能な機械式継手も採用された。さらに、施工時には、鋼管矢板にひずみ計や傾斜計などの計測器が取り付けられ、変形と応力を随時監視するなど細心の注意が払われた。

接続部で使用されている鋼管矢板基礎の諸元は以下の通りである。

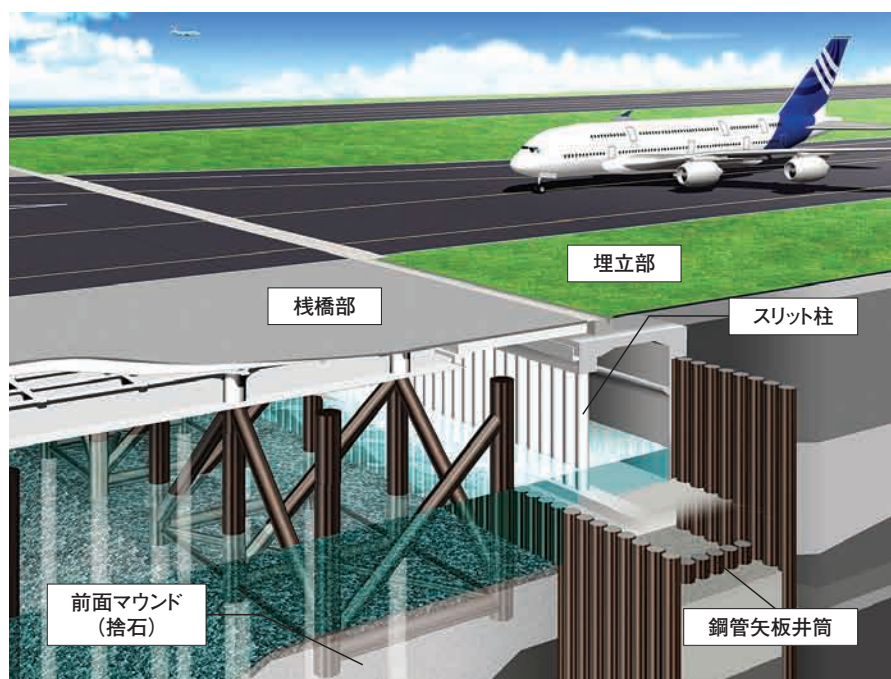
- 全長 W428.4×L14.4m
- 鋼管矢板 φ1600
- 鋼管矢板本数 約650本
- 鋼管矢板長 67m

海洋構造物のエポックメークとなる羽田再拡張事業

新たに4本目の滑走路が整備される羽田空港は、発着容量の制約解消から多様な路線網が形成され、将来の国内航空需要への対応とともに国際定期便の受け入れも視野に入れ、利用者利便が向上されていくであろう。

本工事では、数々の先進の技術を用い、既存の空港を供用しながら、大規模かつ高精度な施工を短工期で可能にしてきたわけだが、これらの先進技術が今後の利用者利便だけにとどまらず、わが国の経済波及効果や国際競争力向上に大いに貢献することで、世界に冠たる事例として残るはずである。

写真・図表提供：関東地方整備局東京空港事務所、
羽田再拡張D滑走路JV



埋立/橋橋接続部概略図