

建設用 3D プリンターを適用した 海岸ブロックの製作について

～国内初 大型土木構造物への適用事例紹介～

株式会社大林組 東京本店 土木事業部 営業部 (旧 西湘海岸突堤工事事務所)

たまい れいこ
玉井 礼子
ふじむら ひろし
藤村 博

(旧 西湘海岸突堤工事事務所 所長)

技術研究所 生産技術研究部

いしげき よしかず きたむら ゆうと
石関 嘉一, 北村 勇斗

土木本部 生産技術本部 設計第三部

はまち かつや
浜地 克也

1. はじめに

平成 19 年の台風 9 号により、神奈川県西部に位置する大磯港から二宮漁港にかけての砂浜で大規模な浸食が発生し、越波により西湘バイパスの護岸が倒壊した。

そこで、護岸の被害を防止することを目的として、600 m 間隔で計 6 基の岩盤型潜水突堤を構築し、砂浜幅 30 m を確保する事業が計画された。事業計画位置図を図-1 に示す。

突堤とは、海岸と直交方向に沖合に向けて設けられる堤防状の構造物であり、本事業では図-2, 3 に示す全長 41.83 m、幅 16.36 m の突堤が計画された。鋼管矢板 ϕ 1,000 ~ 1,200 mm による仮締切り内にプレキャストブロックを所定の高さに設置し、床付け地盤からブロック内部に水中不分離性コンクリートを充填する計画であった。

本稿では、6 基のうち 1 基目の初弾工事において施工性に課題があった突堤構造の一部に、建設用 3D プリンター（以下、「3DP」という）を活用したプレキャストブロック（以下、「3DP ブロック」という）の適用に至る経緯と工場製作、および現場施工について紹介する。

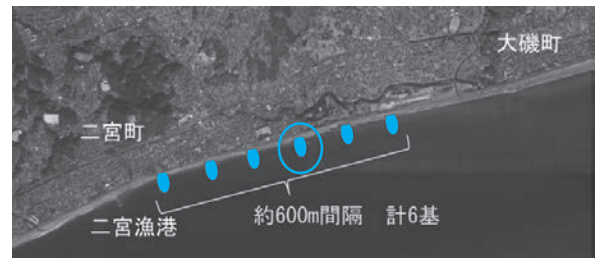


図-1 突堤事業計画位置図

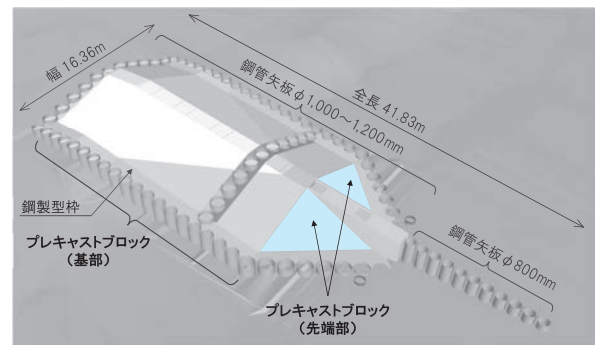


図-2 岩盤型潜水突堤完成図

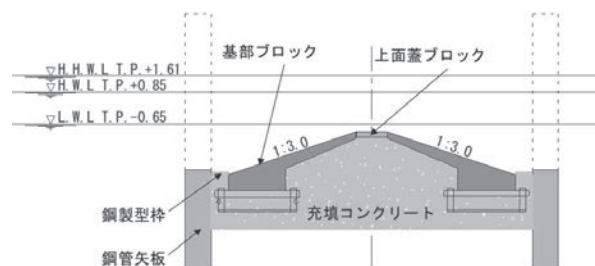


図-3 基部ブロック断面図

2. 3DP ブロック適用の経緯

プレキャストブロックは、海中に設置した鋼製の架台上に水平に据え付けた際、横断・縦断ともに傾斜する形状となっている。突堤の幅が変化する先端部と幅が一定の基部の、大きく2種類のブロック形状があり、基部の縦断勾配1:6.0に対し、先端部は1:2.0となっている。

先端部は、横断・縦断ともに傾斜が大きく、幅が変化するため、厚さ300mmのRC製プレキャストパネルを重ねて、その外形を形成する計画とされていた。図-4に示すように、左右それぞれ計26枚のパネルを陸上で3分割のブロックとして連結し、海中に据え付ける計画であった。

しかしながら、先端部を当初計画で施工するには次の3点の課題があった。

(1) 海岸線での陸上作業の工程遅延リスク

施工ヤードは海岸線にあり、高波浪による資材の流出を防ぐため、あらかじめ設定した基準を超える高さの波が予想された場合には、資材をすべて高台に退避する必要があった。当初計画ではパネルの部材数が多く、運搬・荷下ろし・陸上組立に時間がかかるため、作業中に発生する高波退避による工程遅延リスクが懸念された。パネル部材の搬入から組立、据付までの時間を短縮することが、工程を遵守する上で重要であった。

(2) 据付作業時の安全性

パネル連結ブロックの据付は各パネルを2点吊りする必要があり、図-5に示すように1ブロック当たり最大で24本の玉掛ワイヤーを使用する計画であった。海中で据付作業を行う潜水士の送気ホースが絡まる可能性が高く、安全性が懸念された。また構造上、揚重時に連結ブロックの安定性を確保することは困難を極めることが予想された。

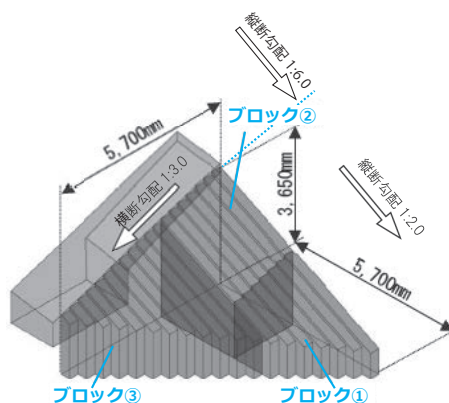


図-4 先端部ブロック 当初計画図

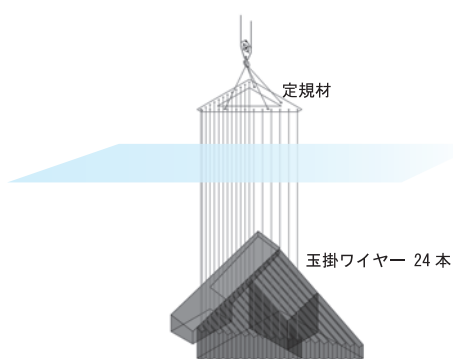


図-5 先端部ブロック 据付図

(3) 品質の確保

連結後のブロックは最大35.5tの超重量物となるため、海中での据付時に隣接するブロックと衝突し、損傷することが懸念された。

そこで、これらの課題を解決するため、先端部ブロックの構造形状を見直し合理的な構造に変更することを検討した。その際、三次元的に複雑な形状を造形できる建設用3DPの活用を検討した。

先端部ブロックの構造形状を図-6のように考案し、3DPにて外壳を製作、内部にコンクリートを充填して3DPブロックを製作することとした。トレーラーによる運搬の都合から、先端ブロックは3分割することとした。分割したブロックは据付後、中空となる部分に水中不分離性コンクリートを打設して、一体化する計画とした。この考え方は、基部ブロックの設計思想を踏襲したものである。

外壳形状は、図-7に示すように最大傾斜が約

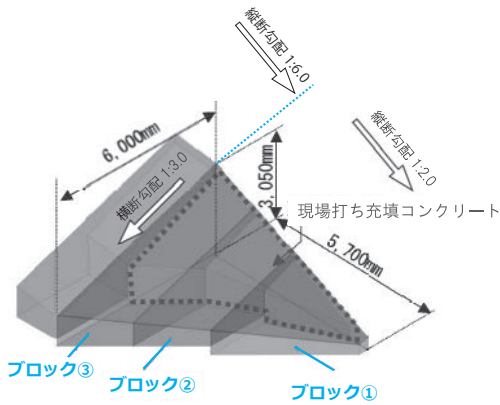


図-6 先端部ブロック 変更計画図

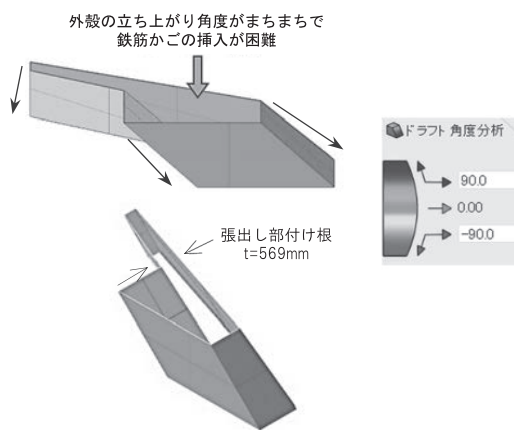


図-7 先端部ブロック③ 外殻形状図

45度となり、張出し部 (t=569 mm) への配筋が困難であることから、外殻内部は常温硬化型の超高強度繊維補強コンクリート スリムクリート(以下、「常温硬化型 UFC」という)を採用し、無筋構造とした。

「スリムクリート」とは、当社開発のセメント系複合材料で、公益社団法人土木学会の「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)¹⁾」に準拠しているが、標準材料は加熱養生を必要とするのに対して、常温で硬化する点に優位性がある。

3. 3DP ブロックの製作における 事前検討

3DP ブロックの製作に当たって、次の事前検討を行った。

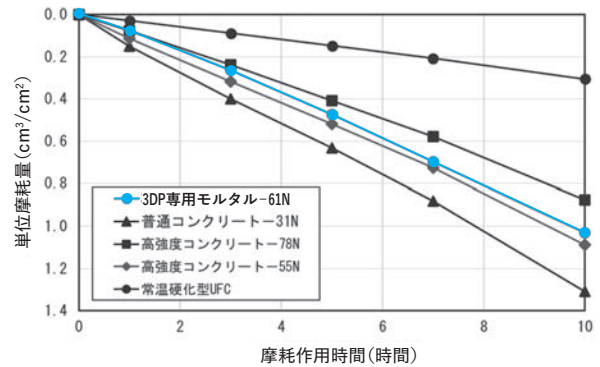


図-8 摩耗試験結果

(1) 耐摩耗性の確保

先端ブロックの上面は、長期間の波浪、砂礫による摩耗損傷が懸念され、高強度コンクリート (55 N/mm²) で設計されていた。そのため、3DP 外殻の材料である 3DP 専用モルタルが高強度コンクリートと同等の耐摩耗性を有するかどうかを確認するため、摩耗試験を実施した。なお、3DP 専用モルタルは硬化促進剤を混合したプレミックスモルタルを使用し、凝結遅延剤により硬化速度の調整を行った。

摩耗試験の結果を図-8に示す。結果より、3DP 専用モルタルの耐摩耗性は圧縮強度 55 N/mm² の高強度コンクリートと同等以上であった。さらに、内部に充填する常温硬化型 UFC (180 N/mm²) は高強度コンクリートより耐摩耗性に優れているため、3DP ブロックの耐摩耗性は高強度コンクリートに比べて著しく大きいと考えられる。

(2) 外殻と内部充填コンクリートの一体性

外殻の 3DP 専用モルタルと内部の常温硬化型 UFC の一体性を確認するため、複合供試体を用いた 3 点曲げ試験を実施した。

試験の結果、荷重-変位関係を図-9に示す。最大荷重は 47.4 kN で、常温硬化型 UFC の引張靱性によりなだらかに耐力が低下した。

常温硬化型 UFC の引張強度 8.8 kN/mm² が全域一定の矩形分布、3DP 専用モルタルの圧縮応力度 60 N/mm² を圧縮縁とする三角形分布であると仮定した時、曲げ耐力時の鉛直荷重の計算値は 42.9 kN となった。計算値に対し実測値の方が

大きい結果となったことから、3DP 専用モルタルと常温硬化型 UFC は一体化し、抵抗することが確認できた。

(3) 外殻の分割施工

ロボットアームの可動距離および高さの制限から、先端ブロック①の外殻は図-10に示すように、2分割にて製作を行った。二つの外殻を上下に重ね合わせ、内部に常温硬化型 UFC を充填して合体することとした。

(4) 軽量化検討

3DP ブロックのさらなる軽量化を図るため、据付後の先端ブロックの安定計算を行い、高さを600 mm 低減した。低減分は鋼製架台を嵩上げし、現場打ちの水中不分離性コンクリートに置き換えて、突堤の外形を確保した。先端ブロックの構造形状変更による重量比較を、表-1に示す。

これらの事前検討を経て、3DP ブロックの製

作に着手した。工場での外殻の製作状況を写真-1に、常温硬化型 UFC の充填状況を写真-2に、現場搬入後反転した3DP ブロックの状況を写真-3にそれぞれ示す。

表-1 先端ブロック形状変更前後重量

片側1個あたり	体積 (m ³)		重量 (t)	
	設計	変更案	設計	変更案
先端ブロック①	6.9	3.5	16.9	8.5
先端ブロック②	13.5	4.7	33.1	11.4
先端ブロック③	14.5	7.2	35.5	17.6
合計	34.9	15.4	85.5	37.5

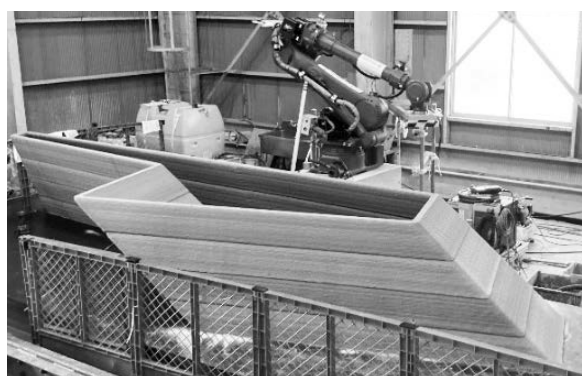


写真-1 3DP ブロック外殻製作状況



写真-2 常温硬化型 UFC 充填状況

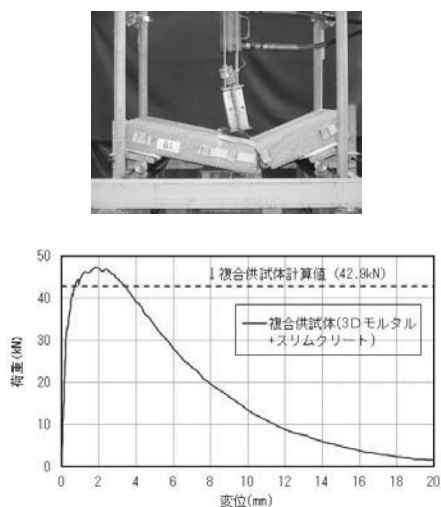


図-9 複合供試体3点曲げ試験結果

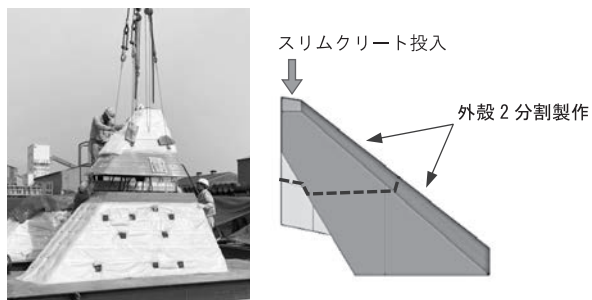


図-10 先端ブロック① 外殻製作方法



写真-3 3DP ブロック完成状況

4. 3DP ブロックの活用効果

当初計画の先端部ブロックの工場製作工程は、銅製型枠組立から打設完了まで55日（養生日数抜き）の予定であった。一方で、3DPブロックは28日（養生日数抜き）で製作することができた。

先端部ブロックの施工上の課題に対し、3DPブロックを活用した効果を次にまとめる。

(1) 海岸線での陸上作業の工程遅延リスク

ブロック数を52基から6基に削減したことから、現場搬入期間を2日削減できた。さらに、現場での組立作業が不要となり、5日削減できた。また据付作業も2倍の施工スピードとなり、4日削減できた。

以上から、搬入から据付までの期間を15日から4日に短縮し、高波浪時の退避による工程遅延リスクを大幅に低減できた。また、作業人数も延べ96人から28人へと削減でき、大幅な省人化が実現可能となった。

(2) 据付作業時の安全性

ブロック据付時、最大24本必要であった玉掛ワイヤーが4本となり、写真-4、図-11のように潜水士の送気ホースが絡まる危険性を低減できた。また、4点吊りとなったことで、揚重作業時にチェーンブロックを使用して現場で高さを調整することができ、重量物であるブロックの安定性を向上させ、据付作業時の安全性を向上することができた。

(3) 品質の確保

ブロック1基当たりの重量を、最大約36tから18tに軽量化できただけでなく、据付作業時の隣接ブロックとの衝突による損傷のリスクを低減し、品質を確保することができた。



写真-4 3DPブロック据付状況

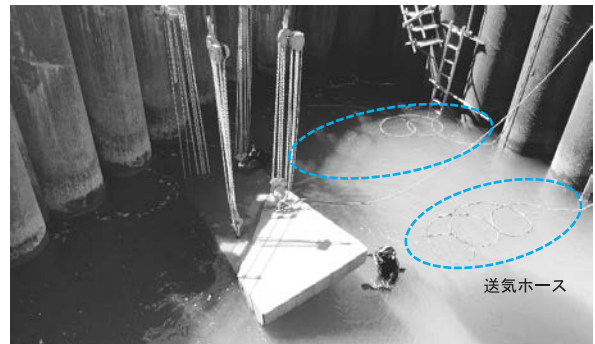


図-11 3DPブロック据付作業

5. おわりに

本工事は、外海に面した施工条件により、高波浪時の資機材の退避や海中作業における工程面、安全面、品質面のリスクがあった。それらの課題を解決する合理的な構造を、3DPの活用によってかなえることができた。

3DPを大型土木構造物に適用することは国内で初めての試みであったが、事前検討により製作上の課題を解決し、製作を可能とした。

今後、本事例を参考に、従来の建設プロセスを変革する技術として3DPの活用を進めていきたい。

【参考文献】

- 1) 公益社団法人土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書，技術推進ライブラリー，No.10，2012.