

新幹線の構造物技術

— 橋梁・土構造物・トンネル —

谷村 幸裕

構造物技術研究部
(コンクリート構造 研究室長)

神田 政幸

同
(基礎・土構造 研究室長)

小島 芳之

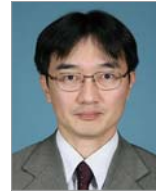
同
(トンネル 研究室長)

玉井 真一

独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構

丸山 修

同



たにむら ゆきひろ



こうだ まさゆき



こじま よしゆき



たまい しんいち



まるやま おさむ

はじめに

現在、整備新幹線の建設が進められています。平成22年12月には東北新幹線八戸・新青森間が開通し、平成23年3月には九州新幹線博多・新八代間が開業します。さらに、北陸新幹線の延伸や北海道新幹線の建設が進められています。これに伴って、新幹線構造物を建設するための種々の技術開発を実施しており、ここではその最新技術を紹介します。

高架橋の雪害対策技術

新幹線網の拡大により、積雪区間を走行することが多くなり、積雪量や雪質に応じた様々な雪害対策が実施されてきました。北陸新幹線の糸魚川・金沢間も積雪量の多い区間ですが、種々の検討の結果、高架橋上への貯雪を基本とすることとし、路盤コンクリートの高さを嵩上げた「ゲタ式」構造を採用することとなりました。ゲタ式とは、軌

道に路盤コンクリートのゲタを履かせたように見えることからつけられた通称です。

従来、路盤コンクリートは高架橋の構造部材として考慮されていませんでしたが、比較的大きな路盤コンクリートを有する本形式では、路盤コンクリート自体を縦梁として有効利用することとしました。ただし、このような形式は前例がなく、有害なひび割れなどの発生が懸念されたため、模型供試体を用いた実験を行い、ひび割れ抑制に効果的な鉄筋の配置を検討しました。

また、新幹線の高架橋は、一般的には梁と柱を結合したラーメン高架橋と呼ばれる構造形式が採用されています。線路直角方向（横断方向）に2本の柱で支えられており、その間隔は軌道中心間隔4.3mよりも広くして安定を図っています。しかし、路盤コンクリートを縦梁とすることにより縦梁の間隔を大きく広げることとはできず、柱はその直下に配置するため、柱間隔が制約を受け、高架橋が横揺れし

やすくなるのが懸念されます(図1、図2)。

そこで、通常は柱の直下に配置される杭を、外側に張り出すことにより、踏ん張りを利かせる構造を採用することとしました。しかし、この構造では、柱と杭が一直線上にないため、線路方向の水平力に対して、柱と杭の間で大きなねじりが作用する

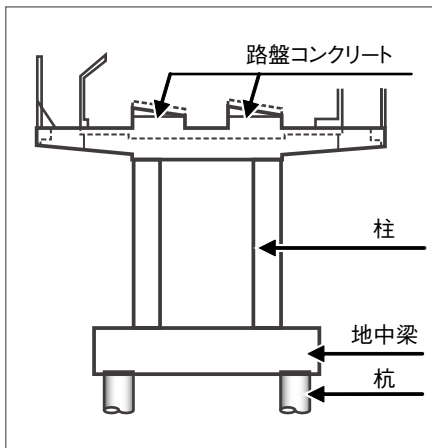


図1 ゲタ式貯雪型高架橋横断面図



図2 建設中の高架橋横断面

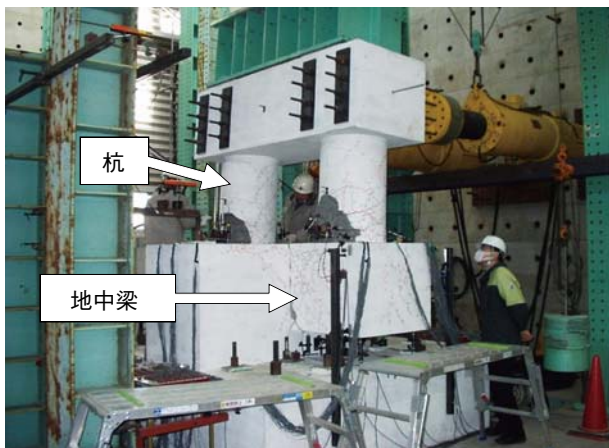


図3 模型載荷実験の状況



図5 回転杭の鉛直交番載荷試験の状況

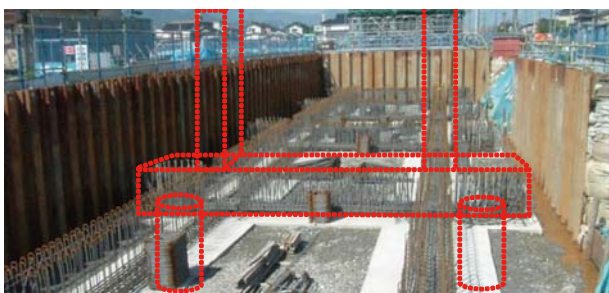


図4 施工状況(杭と地中梁の鉄筋組立)



図6 試験杭(回転杭)

ことが考えられます。このような従来はなかった構造の安全性を検証するため、この部分の模型を製作し、載荷実験を実施して安全性を検証することとしました(図3、模型は上下逆になっています)。実験の結果、本構造を採用した場合でも、所定の断面寸法を確保し適切な補強鉄筋を配置することにより、想定されるねじりに対して十分な安全性を有することを確認しました。

本構造の高架橋は、北陸新幹線や北海道新幹線で建設中ですが、柱と杭の軸線がずれていることにより、柱・杭接合部で双方の鉄筋が交錯することがないため、所定の性能を確保した上で施工性の向上が期待できます(図4)。

特殊地盤用基礎の構築技術

新幹線基礎構造物の設計・施工では、液状化地盤や軟弱地盤、地中内部の水圧が高い地盤は特殊地盤と称し、取り扱いに注意が必要な地盤です。このような地盤では、場所打ち杭の鉄筋が増大し杭径が大きくなったり、フーチングが大型化する場合や、あるいは杭の長さがさらに長くなるなど不経済となる場合が多々あります。一方、地中内部の水圧が高い地盤では、そもそも掘削を伴う場所打ち杭を用いることができません。これらの地盤に対して、新幹線基礎構造物ではせん断耐力が高く、じん性能に優れた鋼管杭

の特性に加え、杭先端に鋼製の羽根を取り付け引き抜き抵抗を有する回転杭(鋼管杭)を導入しました。導入にあたり①回転杭の施工性、②先端部の支持力性状の確認、③鋼管杭頭部の過密配筋の解消の3つの課題に対して、実杭の施工試験および鉛直交番載荷試験の他、杭頭を模擬した鋼管杭模型の水平交番載荷実験を実施しました。

図5は熊本県八代地区で実施された回転杭の鉛直交番載荷試験の状況です。試験杭は図6に示すように杭径1000mm、先端部の羽根外径1500mm、肉厚22mmを28m深さの砂礫層に貫入をしました。これより回転杭は掘削泥土が発生せず、回転杭を回転させながら比較的騒音で容易に貫入可能なこと、回転杭先端部の押し込み時、引抜き時の支持力推定式が妥当であることを確認しました。

一般に鋼管杭とフーチングの接合部には鉄筋とコンクリートが用いられます。しかしながら、液状化地盤の杭頭接合部で、杭体耐力以上の接合部耐力を保持するには配筋できないほどの鉄筋量となってしまいます。そこで、場所打ちコンクリート杭と同様に、杭頭接合部をある程度の損

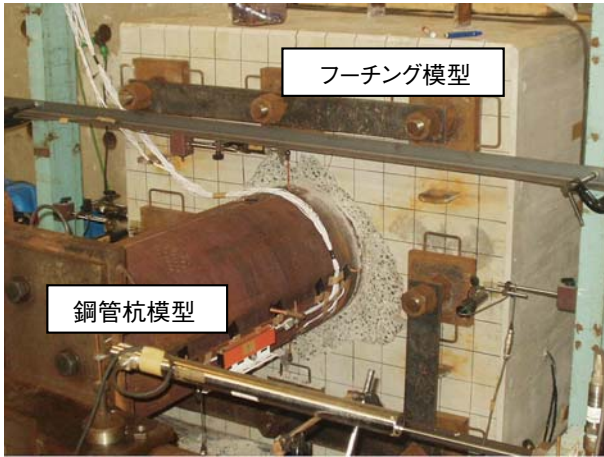


図7 鋼管杭頭部模型の水平載荷実験の状況



図8 回転杭を用いたRCラーメン高架橋
(九州新幹線博多・新八代間, 島田北BL)

傷を許容した設計を行い鉄筋量を減らす目的とし、図7に示す鋼管杭とフーチングの接合部を模擬した鋼管杭頭部模型の水平載荷実験を行いました。これより鋼管杭頭部の鉄筋量を適量に配置することが可能になりました。

これらの取り組みにより液状化地盤、軟弱地盤や地中内部の水圧が高い地盤で回転杭に代表される鋼管杭が用いられるようになりました。図8は液状化地盤で回転杭を用いたRCラーメン高架橋区間の施工後の状況です。

スラブ軌道用土構造物の構築技術

スラブ軌道は沈下に対する調整代がバラスト軌道に比べ格段に小さいため、盛土支持地盤に対しては軌道構築後の沈下が10mm/10年間以内、盛土材も基本的には砂礫系を主体とした材料以外は用いていません。また、兵庫県南部地震以降平成11年に整備された耐震標準により、L1地震動による残留変形量を10mm以内、L2地震動によるそれを100mm以内に抑えるように盛土補強材を配置しています(図9)。整備新幹線では北陸新幹線高崎・軽井沢間から

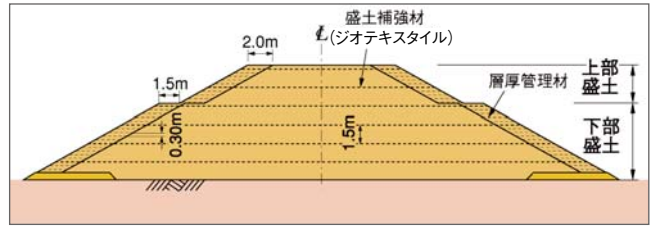


図9 省力化軌道用土構造物

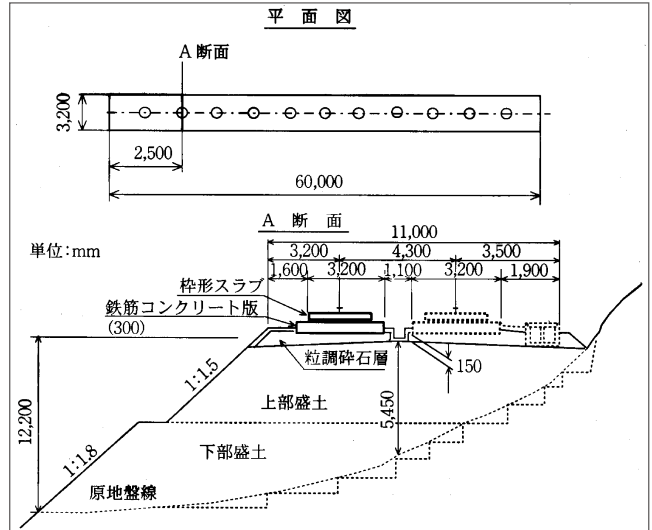


図10 スラブ軌道用土構造の試験対象断面



図11 軌道繰り返し載荷試験の状況(北陸新幹線榎山地区)

本格的なスラブ軌道用土構造物を適用し、路盤部分にはコンクリート路盤を採用しています。新幹線への適用性を確認するため、平成3年に北陸新幹線榎山地区にて実際に盛土・切土を構築し、コンクリート路盤・スラブ軌道を敷設して(図10)、静的な沈下特性と、動的な軌道載荷試験による耐久性と動的な沈下特性を確認しました(図11)。盛土の沈下は、盛土完了後6mm程度と小さく、また、軌道繰り返し衝撃試験機を用いた総計200万回(供用10年間分)に及ぶ動的繰り返し載荷試験では、動的沈下量は1mm以下と極めて小さい値であることが確認されました。この



図12 スラブ軌道用土構造物
(東北新幹線八戸・新青森間, 茨島付近RC路盤)

ことから、スラブ軌道のレール締結装置の調整余裕(最大30mm)はもちろんのこと、目標の軌道敷設後10mm以内に十分に収まるものと考え、その後の整備新幹線では標準工法としています(図12)。

耐震性橋台の施工技術

地震時に生じる橋台裏の盛土の沈下による段差の発生は、列車の走行安全性に重大な支障を及ぼすことから、鉄道においては古くから問題となっていました。地震時における橋台の背面盛土沈下対策工は、大きく分けて「揺すり込み沈下対策」と「段差対策」があります。前者には橋台背面を粒度調整砕石などを用いて十分に締め固める対策工(アプローチブロック)や粒度調整砕石にセメントを添加したセメント改良土を用いる対策工(セメント改良アプローチブロック)が、後者には橋台と背面盛土をジオテキスタイルなどの補強材によって連結する対策工があります。新たに開発した橋台は、図13に示すように揺すり込み沈下対策としてセメント改良アプローチブロックを用い、段差対策として補強材(ジオテキスタイル)を配置してアプローチブロックと橋台を連結した「セメント改良補強土橋台」です。提案橋台を実現場に適用するにあたって、橋台主体であるセメント改良アプローチブロックの施工管理手法の検討の他に、強度・変形特性に関する試験やセメント改良土中に定着した補強材の引き抜き抵抗特性に関する試験を実施し、その性能を確認しました。さらに九州新幹線において本橋台を構築した後、図14に示すように、2基の橋脚を反力にした水平載荷試験を実施しました。その結果から提案橋台はL2地震動に対して十分な耐震性能を有することを確認しました。セメント改良補強土橋台は、高い耐震性を有するだけでなく、図15に示すようにセメント改良アプローチブロックと橋台く体が補強材により一体挙動



図13 セメント改良補強土橋台



図14 セメント改良補強土橋台の水平載荷試験

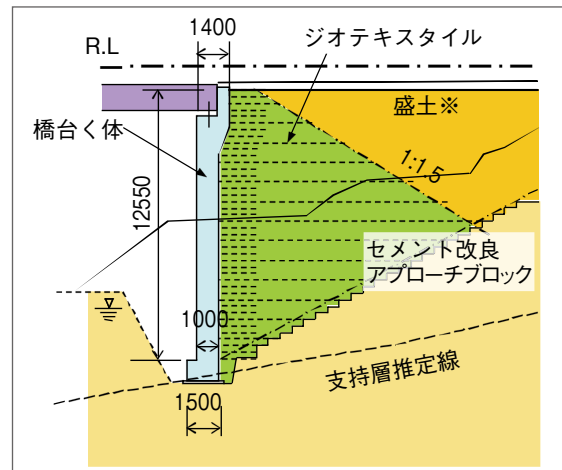


図15 セメント改良補強土橋台断面図の例



図16 セメント改良補強土橋台
(九州新幹線多・新八代間 高田付近)

するため、橋台く体やフーチングが従来型橋台と比較して格段にスリム化し、経済的に有利であることが分かりました。その後、高い耐震性と経済性を有するセメント改良補強土橋台は、九州新幹線、北陸新幹線や北海道新幹線のトンネル坑口からの高架橋取付部で標準橋台として多数採用されています(図16)。

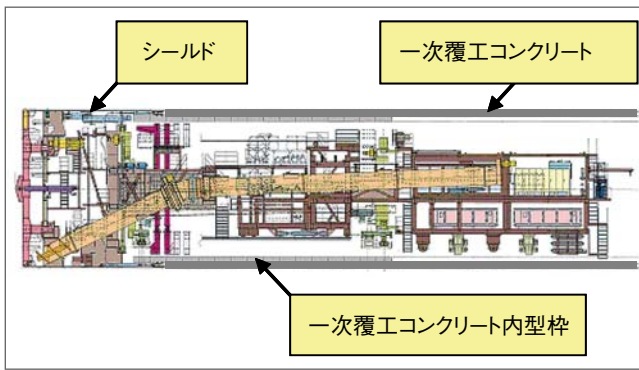


図17 SENS工法の施工設備の概略



図18 SENS工法の施工状況

トンネルの掘削・支保技術

新幹線トンネルでは、その長大化と厳しい地山条件での建設に伴って様々な技術が開発されてきました。それらは、地山評価、支保・覆工設計、掘削、切羽安定、施工管理など多岐に及びます。ここでは、トンネルの新しい掘削・支保の技術として近年実用化され、注目を浴びている「SENS工法」について紹介します。SENS工法とは、密閉型シールドマシンを用いて掘削と切羽保持を行い、シールド後方で場所打ちの一次覆工コンクリートを掘進と同時に打設し、その後二次覆工コンクリートを打設してトンネルを構築する工法です(図17)。この工法は鉄道・運輸機構、鉄道総研、地域地盤環境研究所他の共同開発によるもので、シールド工法：Shield，場所打ちライニング工法：ECL，山岳工法：NATM，施工システム：Systemの頭文字から、SENSと命名されました。山岳工法(NATM)とシールド工法の境界領域で安全な“掘削機構”と合理的な“覆工機構”を実現した工法で、東北新幹線三本木原トンネルに初めて適用されました。

三本木原トンネルは、地下水を多く含んだ土砂地山中の延長4.3kmのトンネルです。平成13年にNATMで施工が開始されましたが、地質が軟質で切羽の安定が得られなくなり、工程も大幅に遅れてきました。そこで、安全性と施工速度を向上させる新工法としてSENS工法を開発し、残り3kmの施工に適用されました(図18)。その後、施工は順調に進捗し、平成18年に無事貫通しました。なお、三本木原トンネルにおける本工法の平均的な施工速度はNATM工法の約2倍、掘削土量あたりの工事費はNATM工法とほぼ同等でした。

三本木原トンネルにおける実績を踏まえて、SENS工法は北海道新幹線津軽蓬田トンネルでも採用され、平成21年度より施工が進められています。三本木原トンネルでは、一次覆工に用いたコンクリートの粘性が高かったため、コ

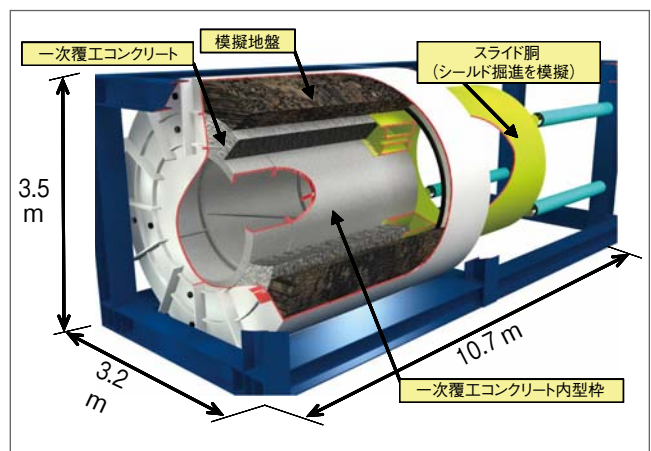


図19 覆工コンクリート打設実験機の模式図

ンクリートを確実に充填するには高い打設圧力が必要となり、このことが地表面の隆起や内型枠などへの過剰な負担要因となっていました。そのため、津軽蓬田トンネルの施工に当たっては、その課題を解決できる新たなコンクリートの開発が求められました。また、SENS工法の経済性をさらに高める上で、水圧などの地山条件に応じたコンクリートの開発が必要と考えられました。そこで、一次覆工コンクリートの更なる性能向上を図るため、図19に示す実験装置を製作してコンクリート打設実験を行い、その配合と出来型の関係を検証しました。その結果、津軽蓬田トンネルで想定される条件に適した材料を開発し、実施工に適用されています。

SENS工法は、安全性、施工性、経済性に優れた画期的な工法であり、山岳部に留まらず都市部でも十分に適用できる工法であることから、相鉄・JR直通線西谷トンネルへの採用が平成21年度に決定されました。SENS工法は、今後のトンネル建設に変革をもたらす技術として期待されています。

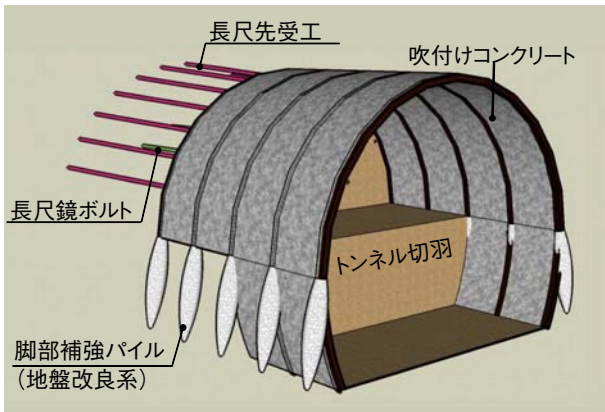


図20 これまでのトンネルの沈下対策工の例



図22 事前地盤改良工の施工状況

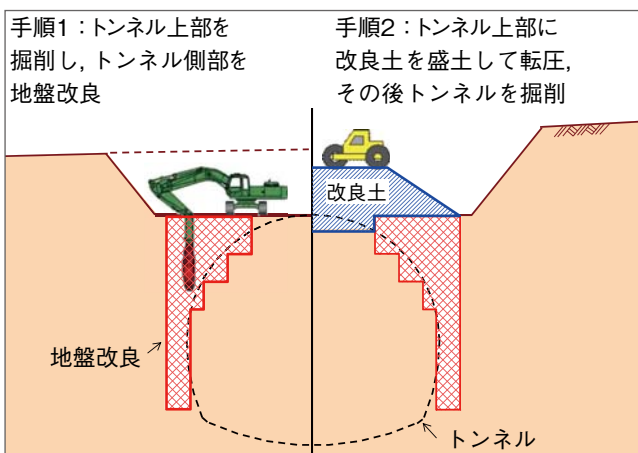


図21 事前地盤改良工

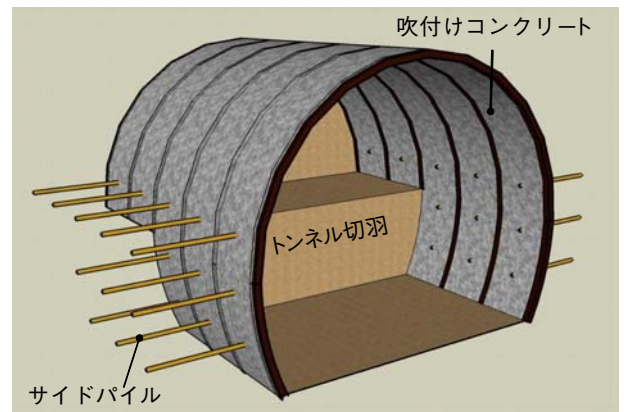


図23 サイドパイル

トンネル掘削時の沈下対策技術

トンネルを地中の浅い部分に掘削する場合は、トンネル上部の地盤やトンネル自身が沈下する問題があります。この沈下対策には、トンネル周囲やトンネル鏡面、トンネル底部の地盤改良(図20)などがありますが、施工時間や費用対効果の面で課題がありました。

そこで、「事前地山改良工」と「サイドパイル」を開発し、東北新幹線八戸・青森間において浅い土被りの土砂地山中に位置する多くのトンネル工事に採用されました。

「事前地山改良工」は、図21に示すように、トンネル上部の地盤を掘削し、トンネル側部を地盤改良します。その後、トンネル上部に改良土を盛土し、覆土した後、トンネルを掘削する工法です。トンネル側部、上部が改良されるため地表面沈下を抑制できるほか、切羽が安定するため安全にトンネルの掘削ができます。

また、結果的にトンネルの建設速度も向上します。図22に施工状況を示します。

「サイドパイル」は、図23に示すように、トンネル掘削

後に鋼管を水平に圧入して地盤の補強を行う工法で、従来の地盤改良に比べて効果は限定的ですが、施工性に優れ、経済的な工法です。鉄道総研と鉄道・運輸機構は共同で、サイドパイルの沈下抑制機構を模型実験や数値解析、現地計測により解明し、設計法を確立しました。サイドパイルを施工すれば、10～20%の沈下抑制効果があることを確認しています。

おわりに

最近の新幹線建設に用いられる構造物技術として、「高架橋」、「基礎構造物」、「スラブ軌道用土構造物」、「橋台」、「トンネル」について概説しました。紹介した技術は新幹線構造物技術のごく一部で、ここで紹介できなかった技術については別の機会を見て紹介したいと思います。今後、より安全かつ経済的な新幹線建設を進めるため、さらなる技術開発に取り組んでいきたいと考えております。RRR