

鉄道における最近の建設技術（ミニ新幹線を中心にして）

Recent Railway Construction Technology

海 野 隆 哉（かいの たかや）

長岡技術科学大学教授 環境・建設系



1. はじめに

JR が発足して満10年を経過したが、この間バブル期の好景気にも支えられて、鉄道輸送量は30%近く増加した。これは、国鉄時代に比べて鉄道従事員が「鉄道はサービス産業である」との意識を強く持って、接客態度をはじめとして、列車の高速化や車両の居住性、駅施設の改良、観光需要の発掘など、利用客の利便性・快適性等を改善してきたことも大きいと思われる。しかし、ここ2～3年の輸送量は、景気の低迷・円高の影響を受けて、横這いかやや減少に転じている。将来とも鉄道は都市間輸送、主要都市における通勤輸送、観光旅行等において大きな役割を果たしてゆくとはいえ、鉄道旅客需要を掘り起こし鉄道経営を安定させるには、投資効果の高い魅力ある新商品（サービス）を提供する必要がある。

今後にも必要な技術としては、安全性の向上、高速化、保守の省力化、駅の利便性の改善等であるといわれている。

2. ミニ新幹線の役割

東海道新幹線をはじめとするフル規格新幹線は、総延長2 000 km が営業運転されている。開業以来、高速サービスを沿線地域に提供しながら、30年以上の長きにわたって運転事故による死傷者は皆無という安全性を維持している。フル規格新幹線の時間短縮効果は大きいとはいえ、建設費が高く初期投資に見合った輸送需要がないと建設はなかなか困難である。

特に、既設新幹線のルートから外れた周辺諸都市には、利用者は普通鉄道線への乗換えを必要とし、この地域は新幹線の恩恵を十分に受けているとはいえない。

主要都市を線状に結ぶ新幹線施設をさらに有効に活用し、その高速サービスを新幹線周辺都市にも拡大する方法として、新幹線と普通鉄道を乗換えなしに直通運転させる方法の検討が、昭和58年10月当時の国鉄で始まった¹⁾。直通運転する方法としては、車両側で対応する方法と軌道側で対応する方法があるが、前者は安全性・所要時間等の点で、技術的に検討の余地がある。フランスでは、在来線も標準軌であるため TGV が簡単に地方都市へ乗り入れているなどの点から、後者の普通鉄道の狭軌を新幹線並の標準軌に改軌するミニ新幹線方式が採用された。

ミニ新幹線の効用を挙げれば、

- ① 建設費の縮減
- ② 乗換え不便の解消
- ③ 到達時間の短縮
- ④ 新幹線ルートからはずれた都市へのフィーダーサービス

の4点に集約される。

昭和61年6月国鉄盛岡工事事務所が乗換えに対する心理的抵抗感をアンケート調査した結果では、時間価値感覚に換算して約30分に当たるといわれる。

本年3月に秋田新幹線が開業したが、開業1箇月間の輸送人員は1日あたり6 400人で、平成6、7年度に比較すると2 400人程度増加している。鉄道と航空機の利用者の選択分岐点は、運賃の影響もあるが、鉄道輸送の所要時間が4～5時間といわれている。東京～秋田間は、東北新幹線・田沢湖線経由で、従来4時間30分程度かかっていた。さらに、乗換え抵抗が加わり、昭和62年度には東京～秋田間の輸送人員比率が7:3であったものが、平成7年度には6:4と追いつけられている。秋田新幹線の開業により、東京～秋田間の所要時間は3時間50分に短縮され、輸送量を大幅に伸ばしたことは、鉄道事業者にとっても大変意義のあることである。ただし、この区間の絶対的輸送量が少ないため、改軌工事等の費用は国・地方自治体からも助成を受けている。

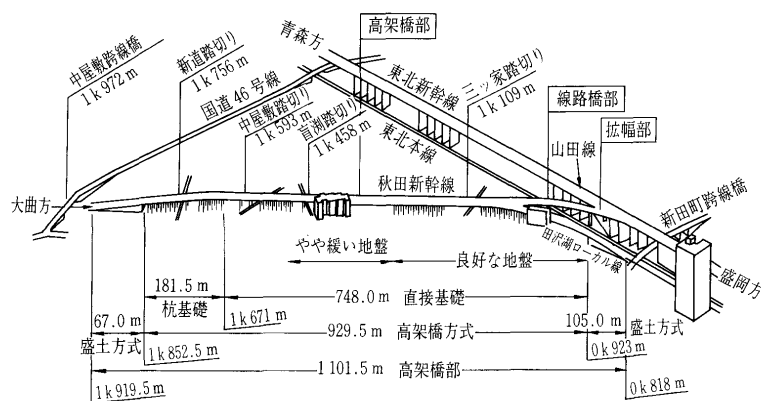
3. ミニ新幹線建設における地盤工学技術等の適用

3.1 概説

先に開業している山形新幹線²⁾においては、福島アプローチ部の鉄筋コンクリートラーメン高架橋への先駆的限界状態設計法の適用程度で、特別な地盤工学技術はほとんどない。秋田新幹線においては、従来の田沢湖線を盛岡駅の手前で東北新幹線高架橋に取り付け、併せて高架化して踏切を除却する「盛岡アプローチ部」の急速施工に伴う基礎工や盛土に関して若干の新しい工夫がなされた。また、従来の狭軌を標準軌に改軌するに当たって新たにアメリカから技術導入した軌道連続更新機による高能率施工を行った。そこで、ここでは秋田新幹線工事に用いられた技術を紹介する。なお、これらの技術はJR 東日本東北工事事務所技術研究会で検討・審議されたもので、筆者もその一員として参加していたものである。

盛岡アプローチ部（図—1）は、延長約1.2 km で、

論 説



図一 盛岡アプローチ部概念図

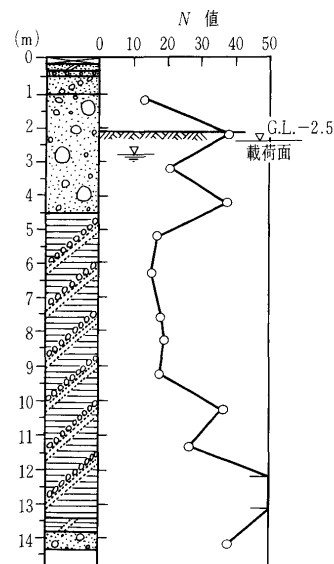
そのうち東北新幹線取付け部の0.2 kmは、東北本線等営業線上を横断したり、線路に隣接して基礎が造られる近接工事である。これらは、列車を通しながらの工事であるので、基礎設計上の制約や事故防止・安全の確保のため現場においては苦労したと思われるが、工事期間が平成5年から7年までと比較的長く、鉄道伝統の従来技術によって施工されている。残りの1.0 kmは、人家密集地域で田沢湖線の直上に秋田新幹線を築造する。列車を運行しながら、線路の両側に小さな基礎と柱を立て、それらを結んで上に桁をかける直上高架方式も考えられたが、工事費が高く、工事に使える道路が少なく工期も長くなることから、田沢湖線を1年間運転休止し、その間に高架橋等を築造することにした。ただし、1年間の内3箇月は各種検査や試験走行に、3箇月は軌道工事や電気工事にかかるので、高架橋等土木構造物の施工期間は運転休止後の6箇月間に限られた。そこで急速施工をするための工夫と、地盤条件がよくないことへの対策が必要になった。

この付近は、雫石川の氾濫によって形成された沖積低地部で、田沢湖線に沿って雫石川の旧河道が蛇行していた。そのため、構造物基礎の支持層として安定しておらず、地層の堆積状況が複雑である。

3.2 やや弱い支持地盤での直接基礎

盛岡起点1.3～1.5 km付近の地質は、薄い表土の下に厚さ1～2 mの中位の細砂層があり、その下には層厚1.5～3.5 mの砂礫（平均N値25）が分布し、さらにその下には砂礫まじり砂質粘土層を主体に砂層などが複雑に混じり合った地層（N値15～20）が分布している。その下も同様の地層であるが深さ8～11 m以深からN値30～50の締まった地層になる（図一2）。ほかの区間では良質な支持地盤が浅いところでも出現するので、構造形式として工事費が安く工期も短い直接基礎の鉄筋コンクリートラーメン高架橋が適用される。当該区間も、工程短縮・工事費節減のため同様の基礎形式が採用されることが望ましい。そのための検討として大型平板載荷試験を実施し、鉛直支持力、沈下量の推定を行った³⁾。

載荷板の大きさは、直径30 cmの円板、一辺の長さが各々50 cm, 1 m, 1.5 mの正方形である。載荷試験は、想定上のラーメン高架橋のフーチング下面に合わせて、地表から2.5 m掘り下げた水平面で行った。そのため、



図二 地質柱状図 (1 km 377 m)

載荷面はN値の変動する砂礫層中に位置することになった。試験の結果、極限支持力の計算値は4.5～181 tfであるのに対して、実験値は8.5～260 tf以上と余裕を持って計算値を上回った。

高架橋基礎底面の想定最大荷重強度20 tf/m² 載荷時の鉛直地盤反力係数 k_p (kgf/cm³)は、載荷板の一辺の長さを B (cm)として

$$k_p = 525 \times B^{-1}$$

で表される。すなわち、鉛直地盤反力係数の大きさは載荷板の一辺の長さに反比例する。この関係は、国鉄基礎標準で示している粘土地盤の計算式($k_p = 1.2E_0 \cdot B^{-1}$)に該当し、載荷板直下の砂礫層だけでなく、その下の砂質粘土の影響を受けたものと考えられる。さらに、 $E_0 = 25N$ より、N値を逆算すると18になり、載荷板直下の砂礫層の平均N値32よりかなり小さく、むしろ、その下の砂質粘土のN値に近い。

これを基に、実際の高架橋のフーチングの大きさ(3.0 m×7.2 m)にあてはめて、死荷重による各柱の弾性沈下量を計算すると8～11 mmであり、この程度なら不同沈下にも対応できるとの判断から、直接基礎の採用に踏み切った。このような支持層のN値が小さい地盤に、直接基礎の高架橋を造ったのは、近年でも釧網線網走高架橋⁴⁾や日豊本線宮崎高架橋の例があり、これら的高架橋において変状が特に認められないことも、直接基礎の採用を後押しした。この区間の盛岡駅寄り、やや地盤の良い境田第2高架橋で、実測した高架橋荷重による地盤の沈下量は、一部の中間柱で最大3 mm発生した。しかし、ラーメン構造として不同沈下の影響(＝不静定力の発生)を受けるスラブコンクリート打設時の即時沈下量およびその後1箇月間の圧密沈下量は0である。

フーチングの施工に当たっては、作業ヤードにおいて連続フーチング部と柱の一部の鉄筋を組立て、埋殺し用ネット型枠をとりつけたユニットを製作しておき、根掘り・捨てコンクリートの施工終了後、直ちにクレーンに

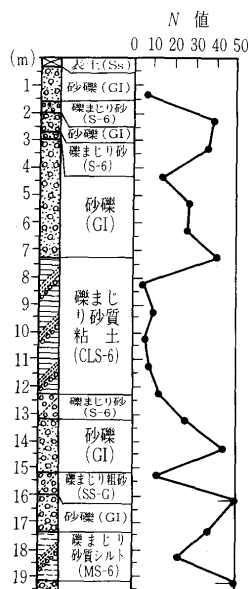
てユニットを運搬・据付け、フーチングコンクリートを打設し、工期の短縮をはかった。

3.3 ソイルセメント合成鋼管杭・コンクリート充填鋼管柱

盛岡起点1.7 km 付近は、直接基礎の支持地盤と想定していた砂礫層の下に、 N 値10未満の礫まじり砂質粘土層が3~6 m と厚く堆積しており（図一3）、直接基礎とすると圧密沈下による悪影響が生じる恐れがあったので、杭基礎を採用することとした。基礎杭の施工法には、打込み杭、中掘り杭、場所打ち杭等がある。このうち、打込み杭工法は騒音振動が大きく人家が近接しているため使用できない。中掘り杭工法は、中間層に直径の大きな礫が含まれており、施工不能になる可能性があることや、鉄道高架橋の基礎形式として中掘り杭は1柱あたり1本の杭で受けることになるが、主として先端支持力に頼る中掘り杭工法では、急速施工が条件となっておりやや信頼性に欠ける。場所打ち杭工法のうち、オールケーシング工法は騒音振動の公害問題があり、リバース工法、アースドリル工法は径の大きな礫による施工時のトラブルや、工事期間が長いなどの難点がある。以上のことから、これらの一般的基礎杭工法の採用をあきらめ、施工速度が速く、玉石層の掘削も簡単にできる鋼管ケーシング・ロックオーガー併用掘削機によるソイルセメント合成鋼管杭工法を用いることとした。

この工法は、①杭先端部までの掘削ならびにセメントミルク注入・一次攪拌、②オーガーを回転させながら地表近くまで引き上げた後再度杭先端まで下ろす二次攪拌、③セメントミルクを注入しながらのオーガーの引抜き、④リブ付き鋼管の自重による挿入・建込み・据付け、の順序で施工される。財国土開発技術研究センターにより技術審査証明を受けている当該工法の場合、先端支持力を増加させるため、支持層に埋め込まれる部分はセメントミルクをより多く注入し攪拌混合も繰り返すが、今回の場合は、特別な急速施工が要求されていることから、先端付近のみを補強して支持力を挙げる方法は採らないこととした。

そこで支持力確認のため、施工条件に合わせた試験杭（ソイルセメント柱径1.0 m、リブ付き鋼管杭径0.8 m、杭長〔ソイルセメント柱長〕16.5 m）を施工し、地盤工学会基準によって鉛直載荷試験を行った⁵⁾。国鉄建造物設計標準（基礎構造物）による試験杭の支持力は698 tf であり、その4/3倍の荷重（930 tf）を計画最大荷重として載荷したが、杭頭沈下量はわずか13 mm であり、十分な支持力を有することが確認された。最大荷重時の



図一3 地質柱状図
(試験杭付近)

杭先端への到達荷重は90 tf 程度であり、周面摩擦抵抗がよく効いていることが確認された。このときのソイルセメントの一軸圧縮強さは $q_u = 30.7 \text{ kgf/cm}^2$ である。

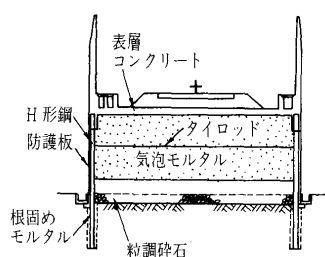
この区間では、42本のソイルセメント合成鋼管杭が、施工機械を2台投入することにより、延べ20日間で施工できた。平均サイクルタイムは、段取りを含めて180分/本であり、機械1台で1日あたり2~3本施工できた。施工精度は、傾斜角が最大2/1 000、偏心量が最大52 mm（平均22 mm）と十分に小さかった。

従来鉄道高架橋の柱は、鉄筋コンクリートで造られることが多かったが、コンクリートの場合鉄筋組・型枠支保工の組立解体に時間を要し、工期がかかる。そこで、ソイルセメント合成鋼管内の頭部のソイルセメントを撤去し、そこに合成鋼管より一回り小さい柱用鋼管（直径660 mm）を挿入した後、間詰めは無収縮モルタルやコンクリートを充填して、列車荷重を受けるスラブを施工している。この工法により、従来工法よりも工期を15日間短縮できた。また、高架橋の設計に当たっては、工事現場が狭隘な上、そこに進入する取付け道路が少ないため、通常の力学上もっとも経済的な線路直角方向の柱間隔に比較して間隔を広げ、その間を工事用車両が通れるように工夫している。

3.4 気泡モルタル盛土

3.3で述べた高架橋から地平への取付け部は、人家が密集し現場が狭隘であり、支持地盤もやや弱いため、気泡モルタル盛土（延長63 m）が用いられた（図一4）。

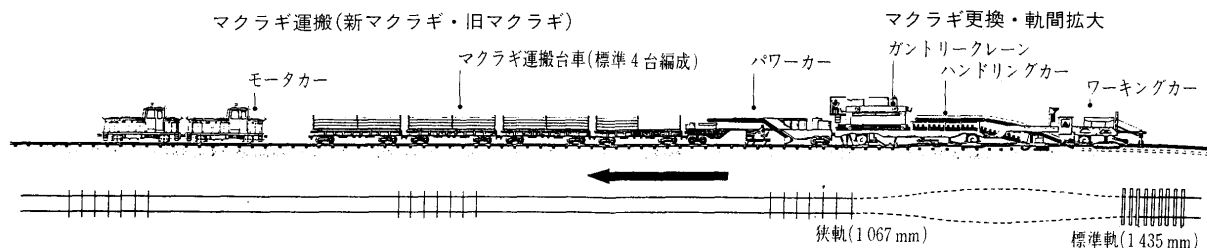
気泡モルタルは、元々エアミルクと同様に山岳トンネルの裏込め注入材として用いられてきたが、流動性が高く、配管さえすれば、かなり離れたところからポンプによる圧送が可能であり、作業現場が狭隘であったり、営業している鉄道線路に近接している場合などきわめて施工性がよい。通常の盛土のように締固め用の建設機械を使用しないですむこと、固化してしまえば自立性が高いのでいわゆる土留め擁壁は不要であることや、軽量であるため各種地盤条件への適用を可能としている。また、



図一4 気泡モルタル盛土の標準断面

強度があまり大きくないことも、将来、再構築する場合に有利な条件となる。というのは、人家密集地で古い橋台・橋脚等のコンクリートを無公害工法で除去廃棄するには、現在のところ1 m³あたり30万円近く費用がかかるからである。

このような発想から生まれた気泡モルタル盛土⁶⁾は、JR では、南武線中原高架橋の取付け部で試験的に施工され、東北本線赤羽高架橋取付け部等で本格的に施工されている。ただし、施工されてから日が浅いので、支持地盤の不同沈下や橋台との接続部での不同沈下等への追従性、自己ひずみ・クリープ、繰返し列車荷重の影響、凍結融解の影響など長期的な観察が必要であろう。また、



図—5 軌道連続更新機全体図

盛土としての適切な性能・使用材料・配合の研究や、現在やや小さい気泡モルタルの打設能力を上げることも、今後に残された問題であろう。

3.5 補強盛土

地平の田沢湖線盛岡駅からアプローチ部高架橋への取付け部(延長105 m)に用いられている。剛な壁面とジオグリッドの組合わせにより構成された急勾配盛土工法⁷⁾で、龍岡文夫東大教授と鉄道総合技術研究所等により研究開発されたものである。1990年ころより、各所で鉄道盛土に本格的に使用され、兵庫県南部地震の際にはその耐震性が発揮されている。

3.6 軌道連続更新機の導入・開発

古くなって道床砂利の中に泥が混入して適切な弾性が失われて来たり、レール・枕木が痛んできた場合、これらの軌道構造を再生(更新)する必要がある。線路容量に余裕があり、長大作業間合いを設定できる欧米においては、施工能率を上げるため、人力に頼らず機械力を主とした軌道連続更新機をかなり以前から使用していた。我が国では、列車頻度が高く作業間合いが短いことなどのため、人力を投入して徐々に軌道更新を行ってきた。

秋田新幹線の場合、改軌区間が長く、限られた工事期間中に完成させるには効率よく改軌工事を行う必要があった。そこで、改軌工事の作業間合いを長く取れるように臨時ダイヤを組んだり、長期間の列車運休を行い、欧米で使用されている軌道連続更新機を国内の状況に合うように改良して、改軌工事に導入した。軌道連続更新機(図—5)の枕木運搬台車を含む全長は、標準構成の時133 mであり、枕木供給システム、動力部分、推進部分、旧枕木撤去および新枕木敷設装置で構成されている。軌道連続更新機による改軌距離は92 kmで、全改軌延長の65%にあたる。その施工能力は、平均日進約550 m、最大日進1 240 mであり、従来工法に比べると能率が格段に向上した。

また、狭軌用軌道スラブを改造して標準軌を敷設するため、大量に埋込み栓用の孔をスラブにあける必要があり、多軸穿孔機を開発使用した。

4. おわりに

ミニ新幹線建設に伴い適用された新技術について述べてきたが、この20年程度の間で鉄道工事において開発されたその他の地盤工学関連技術には、

- ① NATM・ECL・シールド等のトンネル技術
- ② 近接狭隘箇所における基礎等の施工・アンダーピニング・線路下縦横断地下構造物の設計施工・計測

管理技術

③ 連壁剛体基礎

等が挙げられよう。

①の技術開発は、新幹線建設や地下鉄建設において工事費の増大を抑制するために重大な役割を担っている。

②は、公共土木施設が輻輳している都市部において、営業線を維持管理している過程で必要となる技術である。

③は、鉄道で設計施工した唯一の大型基礎⁸⁾であろう。

経済の低成長時代を迎えて、公共投資の伸びが期待できない今、建設コストの低減が求められている。技術的には、従前のように築造に必要な材料の数量が少なければ常に費用が安くなるとは限らず、機械化施工がしやすく労務費が削減できること、リサイクルコストが安いこと等も重要であろう。また、公害を発生しない、ないしは、低公害であることも重要な要件である。急速施工に対応できる工法も必要とされよう。財政逼迫の折から、防災対策として、常に土木施設で対処するだけでなく、ハイクテク技術を用いた計測監視システムによる災害検知・人的被害の回避も必要である。兵庫県南部地震の震害を見ると、基礎が強固であると、大きな地震力がそのまま上部構造に伝わり大きな被害をもたらしている。地盤と基礎のバランスの上に、基礎の免震性を期待する技術・設計理論の研究開発も重要である。今後、さらに、産官学が一体となって、真に合理的経済的建設技術の研究開発が行われることを祈念している。

参 考 文 献

- 1) 伊能忠敏：四線併設軌道の技術的検討—新幹線—在来線直通運転への試み，土木学会誌，Vol. 70-12, pp. 34~39, 1985.
- 2) 東日本旅客鉄道(株)東北地域本社・東北工事事務所：山形新幹線(鉄道21世紀への飛躍)，1992.
- 3) 瀧内義男・古山章一・佐々木弘：田沢湖線新在直通運転計画盛岡アプローチ部における高架橋基礎の設計，日本鉄道施設協会誌，Vol. 32, No. 5, pp. 36~38, 1994.
- 4) 梅原俊夫・福島弘文：緩い砂地盤に高架橋ができるまで—国鉄釧網線網走高架橋—，土と基礎，Vol. 34, No. 9, pp. 33~38, 1986.
- 5) 瀧内義男・古山章一：ロックオーガー併用ソイルセメント合成鋼管杭の鉛直載荷試験，日本鉄道施設協会誌，Vol. 33, No. 7, pp. 49~51, 1995.
- 6) 海野隆哉・八巻一幸・古谷時春：気泡モルタルの鉄道盛土への適用，基礎工，Vol. 18, No. 12, 1990.
- 7) 龍岡文夫・館山 勝：ジオテキスタイル補強土擁壁，基礎工，Vol. 23, No. 11, pp. 84~92, 1995.
- 8) 海野隆哉：実構造物における水中コンクリートの施工例—青森大橋における事例—，コンクリート工学，Vol. 28, No. 3, 1990. (原稿受理 1997.7.24)