

鉄道近傍に空間を創造する構造技術の革新

Innovations in structural technologies to create spaces nearby railways

東日本旅客鉄道株式会社 執行役員 構造技術センター所長

野澤 伸一郎



1. はじめに

鉄道近傍に構造物を建設する際は、営業線近接工事に分類される列車運行への影響を考慮しながらの工事が多くなります。列車やお客様の通行しない時間帯に工事をしなければならぬ時間的制約や、車両をはじめとした建築限界を避け、お客様に支障しない場所に構築しなければならない空間的制約から、工事費は上昇してしまいます。人工地盤や高架橋は、一般的な場所に建設する場合に比べて、営業線近接工事では倍以上のコストがかかる場合があります。

また、1995年に発生した兵庫県南部地震以降、設計地震動がより大きくなり、こちらも構造物を建設する際のコストアップの要因になっています。

従来の建設・改良工事の設計・施工を踏襲するだけでは、より安価に良質な社会基盤を構築できないので、構造技術を革新して新しい空間を創造しようと努力しています。

2. 一枚の写真

図1に2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震から一週間後に撮影した、仙台の南、東北本線長町駅付近の新幹線と在来線の高架橋の状況を示します。どちらも鉄筋コンクリート（以下、RC）製の高架橋です。1983年開業の東北新幹線（写真左側、スパン約8.5m）の柱には被害が多かったのに対して、写真右側の2006年に使用開始した在来線である東北本線の高架橋（スパン約17m）は柱に微細なひび割れが発生した程度でほとんど被害がありませんでした。

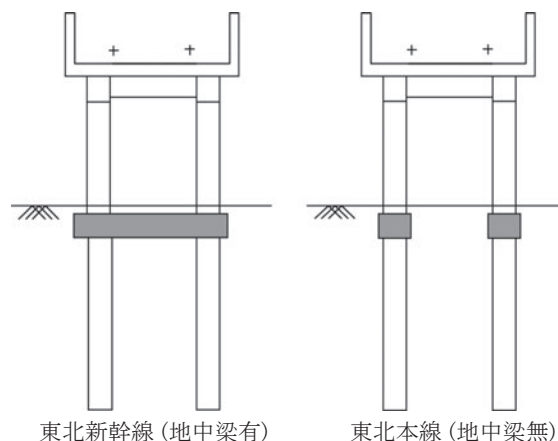
新幹線の高架橋の構造形式は、全国のRC鉄道高架橋と同様の地中梁がある高架橋ですが、右側の在来線は地中梁のない高架橋です。その概略の断面を図2に示します。在来線は、建設時にすぐ横に既に新幹線の高架橋があり、地中梁を建設するために地中を掘削するとその防護が必要になるなどから地中梁がない構造となっています。図2は断面



東北新幹線（1983年）

東北本線（2006年）

図1 高架橋柱の損傷（白石蔵王～仙台間）



東北新幹線（地中梁有）

東北本線（地中梁無）

図2 高架橋の構造形式

ですが、線路方向にも地中梁があると、新幹線に近い側（在来線高架橋の左側）の地中梁構築はコストも時間もかかります。同じく営業線近接工事となった赤羽駅付近高架化の場合、地中梁建設費は構造物建設費全体の49%を占め、既設の線路近傍での高架橋建設に地中梁省略のコストダウン効果は大きいことが報告されています¹⁾。

さらに、柱と杭の接合部も鋼管を用いて小さくしています。線路方向のスパン（柱と柱の間隔）は倍となり、線路下の空間

も広く使用できるようになりました。従来の構造から、大幅なコストダウンを可能にし、高架下空間の価値を高めた構造でありながら、地震にも強いことが立証されました。基礎の不等沈下を防止すること、柱や杭の帯鉄筋を増やして粘り強くすることなどの改良と組み合わせて、構造技術を革新した一例です。

3. 営業線近接での工事

鉄道は最初の線路が敷設されてから140年以上の歴史がありますが、それらを改良することで発展してきました。100年以上前には、現在の東京工事事務所の前身となる新永間建築事務所が東海道線を新たに高架橋に改築して線形も変えるなど、今日に至るまで改良工事に力を入れてきました。大規模な駅、例えば東京駅や新宿駅などは常に工事をおこなってお客様の利便性向上に努めています。

(1) 計画時の配慮

列車や軌道に影響ない場所で工事ができるようにすればコストダウンできる場合があります。線路を跨いで橋を架ける場合、桁が少し長くなって材料費が余分にかかっても、基礎や橋脚を少し線路から遠ざけることによって、列車や軌道への影響を少なくして工事が進められ、全体として工事費が低くなる場合があります。

また、列車運行との関係や施工を考慮したレイアウトなど、計画時の配慮が工事費に大きく影響します。

前章で地中梁の無い高架橋を紹介しましたが、人工地盤建設においても、同様の構造を採用することが効果を発揮する場合があります。一般的には構造系全体の安定のために有効な地中梁も、線路近傍では施工時に軌道変状の恐れがあり、また、時間的制約も大きく、その他の部材に比べて特に設置費用が増大します。2方向とも地中梁の無い構造となった場合、安全性を担保するために従来設けてい

た地中梁がもつ性能を分散させ、変位を制限する目的などにより一部杭、柱が太くなるケースも生じますが、人工地盤建設費用全体は低くなります。2005年に開業した大宮駅エキュートが位置する人工地盤以降、立川駅、日暮里駅、東中野駅など、ほとんどのJR東日本が建設する人工地盤はこの地中梁の無い構造となっています。

(2) より小さくする工夫

建築限界に支障することなく構造物を建設する場合や、駅構内のようにお客様が多く移動する場所では細い柱や薄い桁が役に立ちます。柱を細くするために、CFTと呼ばれる鋼管の中にコンクリートを打設した構造も多く用いられています。一方で、線路に挟まれ鋼管も搬入できないような場所では、鉄筋を運んで組み立て、あとはコンクリートを打ち込むRC構造が有利になる場合もあります。

柱と杭の接合部分は、通常アンカーフレームと呼ばれる部材を配置するか、フーチングを構築するなどして2つの部材における力の伝達を確実にしています(図3(a))。しかし、これらの構造を線路と線路の間のような狭隘なスペースに構築することは、地盤を幅広く開削することになり、また取付けに時間がかかることから、空間および時間的に制約を受けて割高になっていました。

そこで図3(b)に示す、杭と一体となった径の大きな鋼管内に柱となる小径鋼管を所定長さ差し込み、その間隙をコンクリートで充填し一体化する構造を開発しました。社内で模型実験を実施して、接合部の耐荷機構および終局強度に与える影響因子を把握し、汎用的で簡便な接合部の終局強度評価式を構築しました。この接合はソケット式接合と呼ばれています。同様に柱がRCの場合にも、鋼管を用いて狭いスペースで杭と柱の接合を可能としました。2000年以降、多くの高架橋や人工地盤の杭と柱の接合部にこの鋼管を用いた接合方法が用いられています。

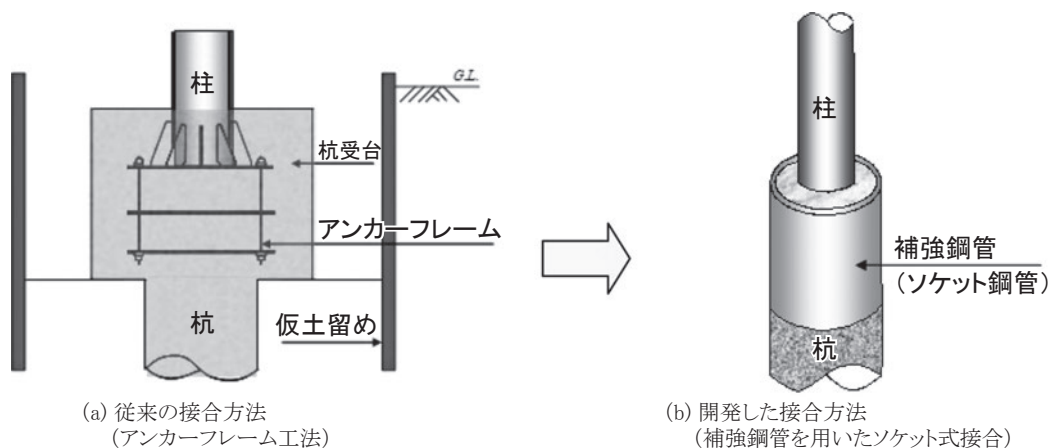


図3 柱と杭の接合

(3) 列車を運行させながらの施工

営業線近接工事の安全性を担保するため、影響の大きい工種は夜間、列車の走らない時間帯に施工しています。また、比較的影響の小さいものは列車の間合いで施工しています。夜間、列車の走らない時間帯に実施していた工事についても、一部の工種に関しては技術的根拠をはっきりさせて安全性を確認し、列車を運行させながらの施工ができれば、コストダウンできます。これらは、特集論文「列車運行時間帯の近接施工を可能とする開発工法」で紹介します。

4. 巨大地震でも安全な構造物

(1) 地震に対する要求性能の変遷と構造物の評価

鉄道構造物には古くは1923年関東大震災の被害の教訓から耐震設計が取り入れられました。1964年新潟地震では地盤の液状化の判定と設計での対応、1968年十勝沖地震では軟弱地盤状の構造物の配慮、1978年宮城県沖地震の被害の教訓からは、落橋防止工の設置、鋼棒・鋼角ストッパーの採用、RC部材の粘りのある設計、RC橋脚等で鉄筋を途中定着する場合の条件などが定められました。しかし、設計するうえで最も影響が大きかったのは、1995年兵庫県南部

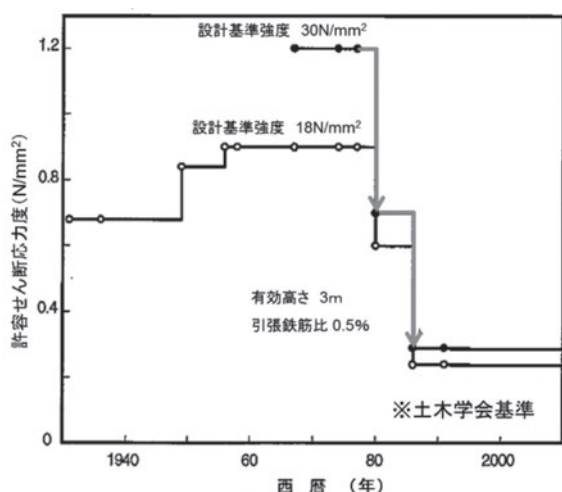


図4 RC構造物の許容せん断応力の推移

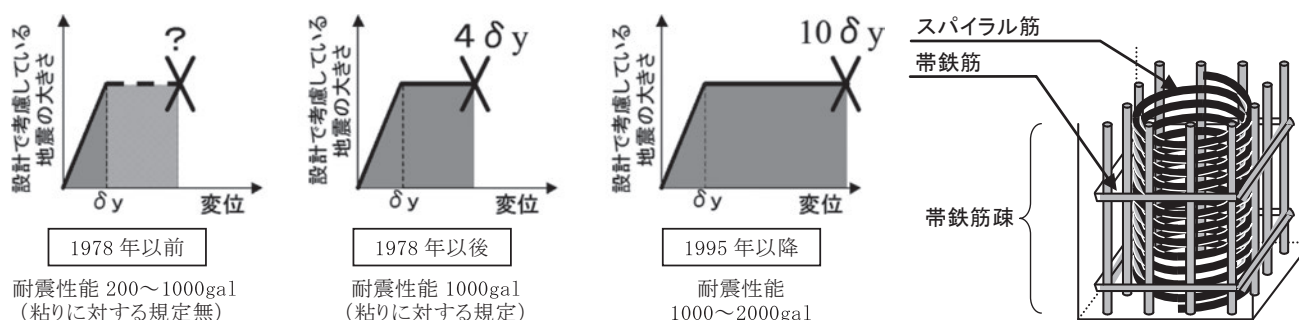


図5 耐震設計の変遷

地震です。このマグニチュード7.3の直下型地震においては、山陽新幹線8箇所など、鉄道は5事業者8路線32箇所で落橋がありました。落橋したRC高架橋の多くは、鉄筋量などから逆算するとせん断破壊が先行しやすい構造物でした。また、山陽新幹線でPC桁の落橋した今津線路橋もRCラーメン橋台の柱がせん断ひび割れに端を発した破壊をしたものでした。

図4は各年代のRC構造物の許容せん断応力を表したものです。学術の進歩により、大きなコンクリート構造物では許容せん断応力が小さくなることが解明され、技術基準にも反映されるようになりました。一方、大災害を経験するたびに地震動は大きくなる傾向にあります。そこで、図5に示すような粘りを持たせることにより大きな地震動に対しても構造物が破壊しない設計を実施するようになりました。粘りを持たせることは、降伏変位の何倍まで変形しても降伏時の荷重を保持するかという、じん性率というパラメーターを用いています。

鉄道橋においては、1978年宮城県沖地震以降ではじん性率を4以上、1995年兵庫県南部地震以降ではじん性率を10以上確保して、現在解明されている許容せん断応力を用いても柱や橋脚のねばりで地震動に対抗できるようにしています。

(2) 粘りを持たせた構造物とするために

2000年頃から、JR東日本では高架橋柱の帯鉄筋を減らして内巻スパイラルを採用しています。図6に内巻スパイラルの概要を、図7に内巻スパイラルを用いた柱で交番載荷実験を実施した際の荷重～変位曲線を示します。この図から降伏変位の20倍ほど変形が進んでも、荷重を保持していることがわかるように、変形性能に優れています。2011年東北地方太平洋沖地震の影響を受けた東日本エリアにはこの内巻スパイラルを用いた高架橋が存在しましたが、いずれも損傷はありませんでした。本来の内巻スパイラルの機能を発揮するまでの大変形は無かったと考えていますが、想定しているよりも大きい地震が来ても柱に耐震性能の余裕を保持している点は安心できます。従来工法とほとんど変わらないコストで地震

図6 内巻スパイラル概要図

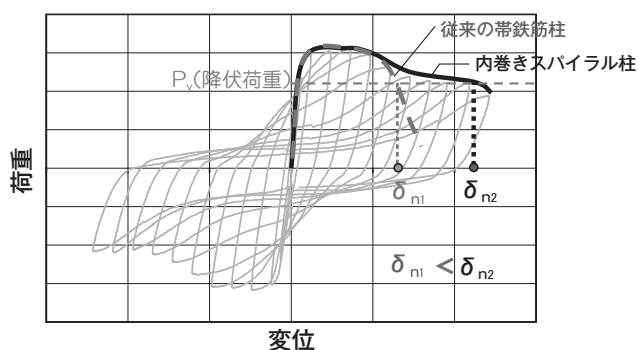


図7 内巻スパイラル荷重～変位曲線



図8 東北新幹線 金ヶ瀬橋梁（白石蔵王～仙台間）

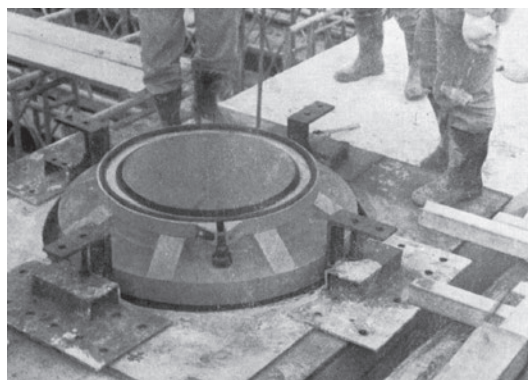
動が大きくなっても対応できる内巻スパイラルの採用が増えていきます。

既設の高架橋柱や橋脚には、表面に鉄板を巻いて変形性能を増加させることになります。支障物がある場所、狭隘な場所にも施工できるように技術開発してきた成果は、特集論文「RC高架橋耐震補強工法に関する近年の取り組み」にて紹介します。

(3) 免震構造

下部構造から上部構造への地震動を切ることのできる免震構造の採用は、上部構造の安全性確保に効果があるものの、列車の走行安定性確保や近傍の構造物との離隔確保などのための費用が発生します。歴史的なレンガ建物に変位を少なくした免震構造を採用した例は特集論文「東京駅丸の内駅舎の保存・復原」にて紹介します。

地盤が極端に軟弱な場合は、この構造に価値が出ます。東北新幹線全線の中でも、最も軟弱地盤の一つである白石蔵王～仙台間の金ヶ瀬橋梁の全景を図8に示します。地震時の地盤の大変形を考慮し、橋梁自身と列車荷重による鉛直力は橋脚と橋台で分担させ、地震時に上部工に加わる慣性力によって生じる水平力は、コンクリート桁の横方向の剛性によって両端の岩盤上に固定された堅固な橋台に伝えられ、ここに支持されるようにしました。地震時の地盤変位の



下ビュー



上ビュー

図9 スベリ支承²⁾

計算値は数10cmに及びます。上部工は桁長221m (20m×11径間) の鉄筋コンクリート3室箱型断面の連続桁が用いられました。地震時に発生する曲げモーメントに耐えるために、桁の両側にはD32の主鉄筋が116本ずつ配置されています。

橋脚の上部には地震時の大変位を考慮して、水平方向には円形で自由にスライドできる特殊なスベリ支承が用いられています。図9にこのスベリ支承の橋脚頭部に設置する前の下ビューと上ビューを示します。

5. おわりに

これからの構造物建設は、時間的にも空間的にも益々難易度が高くなる可能性があります。地震時はじめ鉄道の安全を確保した上で、工事をコストダウンできるように、構造技術を革新していきたいと考えています。

参考文献

- 1) 大湯功雄、小原和宏:線路方向地中梁を無くした高架橋の設計と施工—赤羽駅付近高架化工事—、鉄道施設協会誌 (1996.10)
- 2) 日本国有鉄道構造物設計事務所監修、構造物設計資料 No.61 (1980.3)