

耐震補強技術の開発の取組み

Technology for aseismic reinforcement of railway structures

野澤 伸一郎^{*1}

Shin-ichiro NOZAWA

General Manager of Structural Engineering Center, East Japan Railway Company



Abstract

This report outlines seismic damage to railway structures and development of technology for aseismic reinforcement. Some railway structures suffered seismic damage in Japan. Author reviewed the cause of seismic damage, through the investigation of damaged structures. And, author also reviewed the development of technology for aseismic reinforcement of railway structures, such as anti-bridge-collapse device, and improvement of ductility of bridge piers and viaduct columns. JR East also developed the technology of aseismic reinforcement for liquefaction, electric poles, embankments, cuts, mountain tunnels, and architectural structures such as platform sheds and ceilings. Furthermore, aseismic design codes was updated with the accumulation of consideration of seismic damage. Newly developed technology and considerations of seismic damage contribute to the safety and service of train operation.

●**Keywords:** Railway structures, Earthquakes, Seismic damage, Anti-bridge-collapse device, Ductility, Lequefaction, Electric poles, Enbankments, Mountain tunnels, Architectural structures

*JR東日本 執行役員 構造技術センター 所長

1. まえがき

鉄道構造物は、1923年に発生した大正関東地震をはじめ、これまで大きな地震の発生により様々な被害を受けてきた。これに対して、既設構造物を極力安価で早く、安全に補強できる技術を開発し、鉄道の安全性向上を図ってきた。しかし、それまで経験した以上の地震動を受けると新たな被害が発生することもあり、新設構造物の耐震性能と耐震補強工法ともに進化させる必要があった。今後も鉄道の安全性を経済的に向上させるためには、過去の地震被害やその対応、開発した耐震補強工法について理解しなければならない。

一方でこれまでの地震被害とその対応を鉄道構造物である土木、建築を網羅して紹介した文献は少ない。また最近の補強工法まで示めされている文献も僅かであり、現時点での最新情報をまとめる必要があった。

そのため、本稿ではまず過去に発生した主な地震による被害を振り返る。その中で比較的大きくまた頻度が高い地震被害について、新設時を含めてこれまで実施してきた技術的な地震対応を整理する。そのうえで最近開発している耐震補強工法を紹介する。

2. 過去の主な地震被害と必要とされた耐震技術

1872年に新橋～横浜間で鉄道が開通してから150年以上が経過した。今から100年前となる1923年に発生した大正関東地震による被害の写真は比較的残っている。最近100年間で耐震補強技術を考慮するきっかけとなった主な地震を振り返る。

(1) 1923 大正関東地震

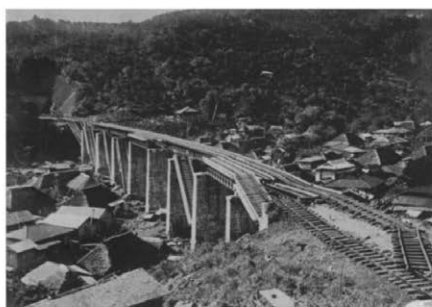
1923年9月1日、相模湾北部を震央とするマグニチュード7.9の地震が発生した。一般に関東大震災と呼ばれる。この地震では約105,000名が亡くなったが、大半は火災によるものだった。鉄道の被害としては根府川駅の土石流災害が列車と駅ごと海中に流され死者は113名に及ぶなど多くの被害が発生した。構造物の被害としては写真1 (a) のような橋脚の破壊¹⁾、写真1 (b) に示す桁の落橋²⁾が発生した。さらにトンネルの崩落も震央に近い熱海線や東海道線の他、中央線、内房線等でも発生した¹⁾ (写真1 (c))。橋脚の水平震度(地震の影響)はこの後から設計に盛り込まれるようになった。橋脚が無損傷でも桁が落ちてしまうことを避ける対策も直ちに考えられた。さらに、トンネルの補強も必要だと考えたと推定している。

(2) 1964 新潟地震

1964年6月16日、新潟県粟島南方沖を震央とするマグニチュード7.5の地震が発生した。石油コンビナートに大規模な被害が生じ、特に地盤の液状化現象がクローズアップされた。鉄道においても、写真2に示すような液状化現象に伴う列車脱線が発生し³⁾、また構造物にも多くの被害もたらされた。この地震後、緩い砂層に基礎を有する構造物を設計する際は液状化を考慮するようになり、緩い砂層上の既設重要構造物に対しては、液状化抑制対策が施されるようになった。



(a) 橋脚の破損¹⁾



(b) 桁の落橋²⁾



(c) トンネルの崩落¹⁾

写真1 1923 大正関東地震による鉄道構造物の被害



写真2 1964 新潟地震で発生した液状化による列車脱線³⁾

(3) 1978 宮城県沖地震

1978年6月12日、宮城県沖を震央とするマグニチュード7.4の地震が発生した。鉄道では、建設中の東北新幹線において写真3 (a) のような鉄筋コンクリート (以下、RCという) ラーメン高架橋柱のせん断破壊、写真3 (b) に示すRCラーメン高架橋中層梁の被害、写真3 (c) に示す支承部の損傷等が発生した。高架橋柱等の被害から、地震作用に対する耐震性として変形性能が重要であることが分かり、構造物として粘りのある設計を目指すこととした。支承部は移動制限装置を別途設ける構造が多く採用されるようになった。中層梁の損傷については構造全体系には致命的な被害を及ぼさないことも明らかとなった。

(4) 1995 兵庫県南部地震

1995年1月17日、兵庫県南部を震央とするマグニチュード7.3の地震が発生した。住宅や道路構造物などとともに鉄道でも多くの被害が発生した。特に写真4 (a) に示すRCラーメン高架橋柱のせん断破壊、写真4 (b) に示すRCラーメン橋台のせん断破壊は構造物全体の崩壊となり大きな被害につながると考えられた。設計地震動の見直しも検討され、設計地震動を2段階に設定する鉄道構造物の新しい耐震設計法が導入された。



(a) RC高架橋柱の被害



(b) 中層梁のせん断破壊



(c) 铸铁支承の破損⁹⁾

写真3 1978 宮城県沖地震による鉄道構造物の被害



(a) RC高架橋柱のせん断破壊



(b) RCラーメン橋台のせん断破壊

写真4 1995 兵庫県南部地震による鉄道構造物の被害

(5) 2004 新潟県中越地震

2004年10月23日、新潟県中越地方においてマグニチュード6.8の直下型地震が発生した。走行中の上越新幹線の脱線の他、写真5 (a) に示すトンネル覆工コンクリートの崩落、写真5 (b) に示す橋梁橋脚の鉄筋段落し部の損傷、床スラブに拘束されたRCラーメン高架橋柱のせん断破壊が発生した(写真5 (c))。効率的なトンネルの耐震補強を実施することとなり、橋梁橋脚の鉄筋段落し部の補強も進められることとなった。RCラーメン高架橋柱の途中で拘束を受けるものは優先度を上げて補強を進めることとした。

(6) 2011 東北地方太平洋沖地震

2011年3月11日、三陸沖の太平洋を震央とするモーメントマグニチュード9.0の地震が発生した。死者の大半は地震後に発生した津波によるものであったが、鉄道構造物にも地震動による被害が発生した。巨大地震であったため、今後耐震補強を予定していた構造物の被害の他、写真6 (a) に示す新幹線高架上の電柱が本震と余震合わせて800本以上折損し、粘りを持たせるように補強するか鋼製電柱に置き換えることになった。また、写真6 (b)、(c) に示すような建築物の中でも駅の天井や高架橋上の上家など、付属物と呼ばれる施設に被害が発生した。さらに、斜角を有する鋼桁で大きな桁ずれが発生した⁵⁾(写真6 (d))。



(a) トンネルの被害



(b) 橋脚の鉄筋段落し部の損傷



(c) RC高架橋柱が拘束された箇所の被害

写真5 2004 新潟県中越地震による鉄道構造物の被害



(a) 電柱の被害



(b) 駅天井の破損



(c) 高架橋上の上家被害



(d) 斜角桁の桁ずれ

写真6 2011 東北地方太平洋沖地震による鉄道構造物の被害

3. 耐震補強技術

3・1 落橋防止

(1) これまで実施されてきた落橋防止技術

1923大正関東地震発生直後に橋脚から外れやすい支承構造を改良した。ローラー支承はピンによる上・下沓を連結し、下沓はアンカーボルトを追加した。線支承では跳び上がり止めを導入し、小判型支承を開発した。

桁相互または桁と橋台の連結も実施された。1960年代では実施例があるもののいつから実施されたかは不明である。

落橋しないように橋脚や橋台の桁座を拡幅することも実施された。1976年東海道新幹線での施工を経て、1983年では設計標準に「落橋防止工」が記載され、1996年にはJR東日本として支承部の耐震補強設計の手引きをまとめた。

(2) 斜角を有する桁に対する耐震補強工法の開発

斜角を有する桁では鈍角部を回転中心とした回転挙動が生じ易い。JR東日本では、斜角桁の回転防止フローを作成している。隣の桁と連結する、サイドブロックを補強する等の対策を講じられない場合、図1に示す連結材による回転防止構造を開発している。桁の鈍角側の支承近傍と橋台上に「桁連結部」、「連結材」、「橋台連結部」からなる装置を設置し、連結材には引張力が作用するように設置している⁶⁾。

3・2 柱、橋脚等部材の変形性能の向上

(1) これまで実施されてきた変形性能向上技術

1923 大正関東地震後、上部工を支え地震時に慣性力が作用する部材には設計水平震度0.2を考慮することになった。1978 宮城県沖地震後からは大きい地震作用に耐えるためには設計水平震度だけでなく、部材に粘りを持たせて抵抗するようになった。1995 兵庫県南部地震以降はさらに大きい地震作用に耐える必要が出た。

既設構造物を耐震補強する場合、一般的には (a) 部材の変形性能のみを向上させる補強法 (靱性補強)、(b) 耐力のみを増加させる補強法 (耐力補強) に分かれる。この概念を図2に示す。(a) の補強法ではOABCの台形、(b) の補強法ではODEの三角形で囲まれる面積のエネルギーを吸収することになる。この場合 (a) は大規模地震で柱部材を損傷させながらエネルギーを吸収し、(b) は部材にほとんど損傷を生じずに地震力に抵抗することになる。(a) の靱性補強では、既設部材のせん断耐力と変形性能を

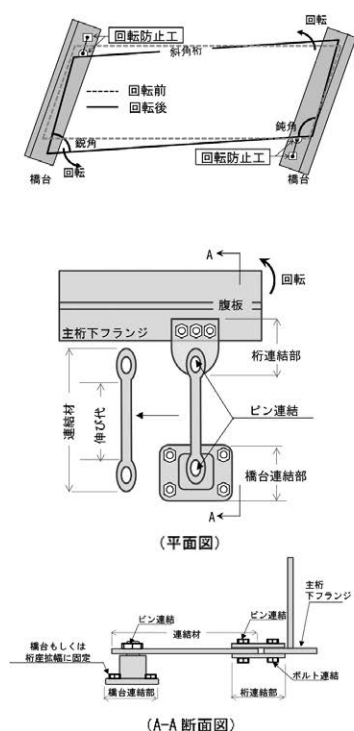


図1 連結材による桁回転防止構造

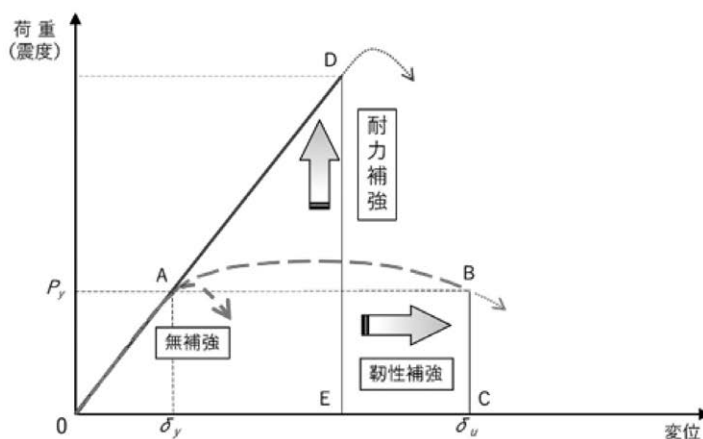


図2 耐震補強における耐力補強と靱性補強の概念

向上させるため、部材の曲げ補強が不要であるのに対して、(b)の耐力補強では、鉛直部材の水平耐力を向上させる必要があり、接続する梁部材や基礎の補強が必要になる。そこでJR東日本においては、通常(a)の靱性補強となる耐震補強工法を目指している。

部材に求められる変形性能に関する設計基準の変遷イメージを図3に示す。この耐震性は大雑把にその面積(エネルギー)を耐震性能として考えて、1983年以前は200~1000gal、1983年以降は1000gal以上、1996年以降は2000galを確保できることとなった。

耐震性能を確保するためにはRC部材では鋼板を巻き立てる、鋼管部材では中にコンクリートを充てんするなどの方法がとられてきた。

(2) 高架下を使用している個所に用いられる技術

柱に鋼板を巻き立てると柱の靱性が向上することが分かっているが、高架下を店舗等で活用している場合、支障物を撤去する、施工期間に店舗を休業しなければならない等の障壁がある。これを取り除いて高架下利用に極力影響を与えない工法を開発してきた⁷⁾。代表的な2工法を示す。他は文献⁸⁾を参照されたい。

a) RB耐震補強工法

柱の四隅に取り付け金具を設けて、ねじ加工を施した補強鉄筋を取り付け金具部でボルト締めし、RC柱を補強する工法である。施工後の状況を写真7に示す。せん断耐力を向上させ、脆性的なせん断破壊を防止し、曲げ破壊型へと破壊モードを移行させることが設計の基本的な考え方である。補強鉄筋量を計算で求められるようになっていて、この補強量を満たせばせん断破壊を防止するとともに柱部材の靱性率を10程度以上とすることができる。

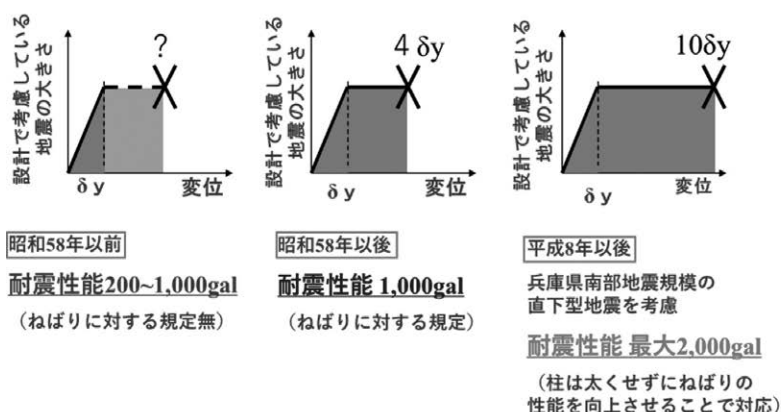


図3 部材の変形性能向上による耐震設計の変遷



写真7 RB耐震補強工法

b) 一面耐震補強工法

柱の一面のみから補強鉄筋および補強鋼板を配置する構造となっている。施工後の状況を写真8に示す。せん断耐力を向上させ、脆性的なせん断破壊を防止するとともに、変形性能を向上させることを目的としている。補強鉄筋挿入方向には補強鉄筋が、補強鉄筋と直交する方向には補強鋼板がそれぞれせん断力を負担する。また、他の工法と同様に、柱の上下端における補強鉄筋量、補強鋼板量をそれぞれ多くし、せん断耐力のみならず一定量変形性能も向上させている。

(3) 電柱の変形性能向上

電車線路用のコンクリート柱の地震時の性能規格は耐力値により定められているが、より大きな地震力に耐えられるようにするため靱性を持たせることにした。コンクリート柱を基礎天端から700mmの位置でPC鋼材ごと切断し、切断箇所を変形性能に富んだ鋼板巻RC部材に改築する方法とした⁹⁾。

構造概要を図4に示す。切断した柱上部と下部とを8本の補強鉄筋を介して一体化した上下段の補強鋼管ユニットで接続する構造である。電柱の基礎となる土木構造物の耐力とのバランスが必要だった。補強鉄筋量はPC切断断面が補強鋼管ユニットの上下部断面よりも先に塑性化し、なおかつ既存コンクリート柱が有する耐力と同程度の耐力を有するよう定めた。

3・3 地盤の液状化対策

(1) これまで実施されてきた地盤の液状化対策

1964新潟地震以降、土の固さを表すN値と粒度、地下水位に応じた液状化のしやすさを判定してきた。1986年からは液状化抵抗率FLによる判定を導入し、1999年からは液状化指数PLに応じた応答値算定を導入している。この値に応じて設計時に地盤の抵抗力を低減するなどに対応している。

盛土を含めた既設構造物基礎周辺の液状化防止としてはシートパイルを打設し頭部をタイロッドで結ぶなど地盤の変形を抑止する対策や薬液注入等を実施してきた。



写真8 一面耐震補強工法

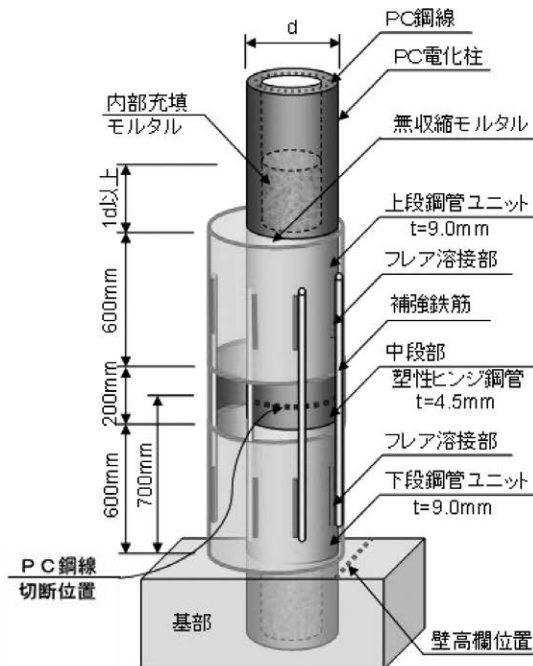


図4 電柱の高靱性補強

(2) 脈状地盤改良工法

この工法は図5に示すように脈状の改良体を地盤内に作成し、周辺地盤を効率的に密実化することで液状化抵抗を増大させる低改良率の地盤改良工法であり、鉄道総研、ライト工業㈱と共同開発した。特徴は動的薬液注入を採用している点である。通常使われる注入速度一定の割裂注入は、地盤の弱部に薬液が集中的に注入され、割裂脈は1~2方向にしかできない。動的注入は、心臓が血液を送り出すように注入速度を人為的に変化させて薬液を地盤に注入することで割裂脈を多方向に形成させることができ、マクロ的には改良対象域を平均的に密実化できる¹⁰⁾。

3・4 盛土・切土の補強

(1) これまで実施されてきた盛土・切土の補強

これまでは側溝などにより雨水等を流入させないことや表面被覆工、棒状補強材の挿入などが主な補強工であった。

(2) ネット補強による石積み壁補強工法

石積み壁は、積み石が壁面にもたれながら、積み石同士および背面栗石とのかみ合わせによる抵抗力と自重により安定を保つ構造で、在来線には多く存在する。壁面に一体性がないため、地震により脆性的に崩壊した事例もあることから、図6に示すような崩壊防止ネットと地山補強材を用いた補強方法を鉄道総研と共同開発した¹⁰⁾。従来は積み石の全面に鉄筋コンクリート壁体を増し打ちした上で地山補強材を密に打設する方法が一般的であったが、石積み前面にネット等を設置することで地山補強材を離散的に打設しても地山の安定化を図ることができる。

(3) 橋台背面沈下対策工法

過去に発生した地震時における鉄道橋台の変状は、橋台が前方へ傾斜し、背面盛土が沈下する事例が多い。ストラット等の取り付けによる傾斜対策が採用できない橋台に対して、鉄道敷きだけで施工できる対策工として、図7に示すような柱列地盤改良による対策工を開発した¹⁰⁾。橋台の背面側から盛土内にセメント系の材料を用いて、柱列状の改良体を造成することにより、背面盛土の沈下を抑制するものである。

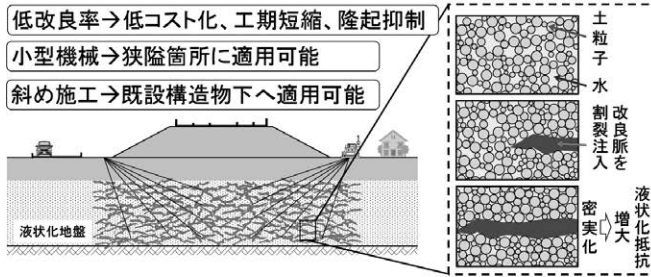


図5 脈状注入工法

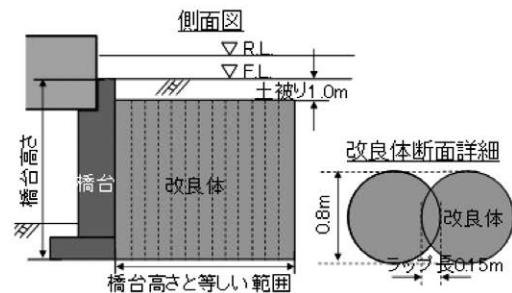


図7 橋台背面沈下対策工法

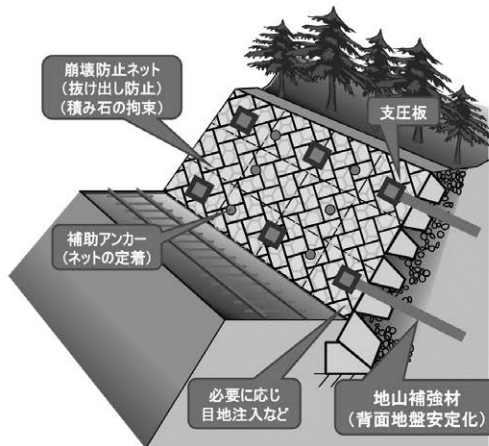
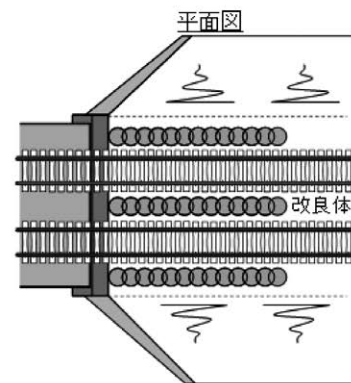


図6 ネット補強による石積み壁補強工法



3・5 トンネルの対策

(1) これまで実施されてきたトンネルの対策

大正関東地震での被害後、しばらくは崩れた覆工を再構築するなどの対策で、困難な場合はトンネルを掘りなおすこともあった。その後、覆工表面からロックボルトを打設して地山と一体化させる方法や、覆工と地山の間の空隙にモルタルなどを注入する方法、覆工落下に対して当て板工法などがとられてきた。新設トンネルに関しては、1980年代よりNATMで施工されることが主流となり、耐震性も向上していると考えている。

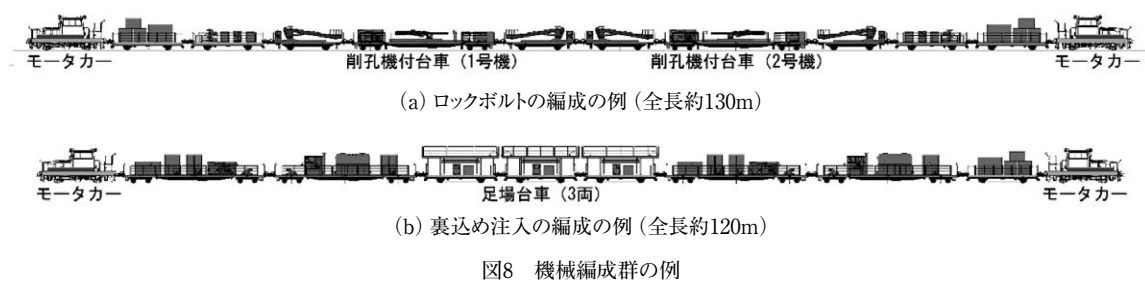
(2) トンネル内から効率よく施工する機械編成群の開発

トンネル内は限られた空間で施工することとなり、夜間の可能な作業時間も短い。そこで、図8に示すような機械編成群を開発した。き電線などを安全かつ迅速に回避しながらロックボルトを打設する削孔機付きの台車やトンネル覆工面に接近して広い範囲で作業が可能な足場台車を組み合わせて、ロックボルトの打設や裏込め注入などの対策に応じた専用の機械編成群を編成することで、施工の効率化を図った^{11), 12)}。

3・6 建築付属物の補強

(1) これまで実施されてきた建築物の補強

駅本屋等建築物は1923 大正関東地震以降、1978 宮城県沖地震や1995 兵庫県南部地震などを契機として建築基準法の改正にも適合させる形で耐震性を向上させてきた。既存建物についても耐震性能を診断した上で、必要な補強を施してきた。



(2) 天井脱落防止工法

地震時の天井脱落防止を目的として2012年に「耐震天井設計施工マニュアル」を制定し天井耐震化施策を進めている。「耐震クリップ・ハンガー構法」(写真9)では、構造躯体に設置した束材と天井下地を固定することで天井の揺れを拘束し、加えて天井下地同士を接合する金具を補強することで耐震化を図っている。天井裏の設備配管との干渉を最小限に抑えた構法として技術開発を実施し、衝撃試験等によって耐震性を確認している。

(3) 溶接を必要としないホーム上家耐震工法

高架橋上の旅客上家は土木構造物との共振防止からも耐力と剛性を向上させる必要があった。従来の現場溶接により方杖を設置するには時間の制約や養生に課題があったため、図9に示すH形鋼の方杖補強に関する無溶接工法を弱軸方向でも適用できるように開発した¹³⁾。H形柱に無溶接で取り付け可能な金物がポイントであり、センクシア(株)と東鉄工業(株)と共同で開発した。



写真9 耐震クリップ・ハンガー工法

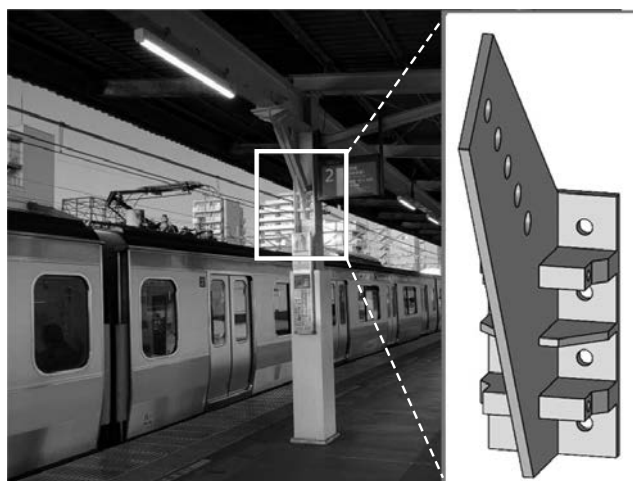


図9 溶接を必要としないホーム上家耐震工法

4. あとがき

最近も地震が頻発しているが、耐震補強を施した構造物の効果は発揮している。鉄道はラインで構成されており、一か所でも致命的な被害を発生させないことが必要である。今後も経済的に、早く安全に施工できる耐震補強技術を開発して鉄道の安全性向上に貢献していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 東京鐵道局寫眞部、関東地方大震火災記念写真帳, (1924), pp.122-133
- 2) 鐵道省、國有鐵道震災誌, (1926)
- 3) 日本國有鐵道新潟支社、新潟地震災害記録, (1964)
- 4) 日本國有鐵道新幹線建設局他、宮城県沖地震対策会議報告書, 1979.4
- 5) 野澤伸一郎、松尾伸二、鐵道被災報告-過去災害に学んだ対応・対策の検証と今後の課題、鋼構造協会誌、No.6, (2011), pp.3-6
- 6) 黒田智也、加藤 格、安田武道、山田正人、金子達也、今井 勉、2011年東北地方太平洋沖地震における第一宮中架道橋の被害と斜角を有する鋼鐵道橋の回転防止対策、SED、No.43, (2014), pp.30-37
- 7) 石橋忠良、津吉 毅、菅野貴浩、鐵道高架下の店舗環境を考慮した新しい耐震補強技術、セメントコンクリート、No.704, No.704, (2006), pp.52-58
- 8) 小林將志、鐵道の耐震設計の変遷、耐震補強および耐震設計 ②鐵道構造物の地震被害と耐震補強、コンクリート工学、Vol.60, No.11, (2022), pp. 1020-1027
- 9) 佐々木崇人、野澤伸一郎、築嶋大輔、金子 顕、新幹線用コンクリート製電柱の地震被害とその対策、コンクリート工学、Vol.53, No.7, (2015), pp. 624-628
- 10) 滝沢 聡、中村 宏、油谷彬博、高崎秀明、池本宏文、山本 忠、土構造物耐震補強における技術開発成果の現場適用事例、SED、No.53, (2019), p.38-39
- 11) 中村宏、岡村直利、土屋尚登、小野桂寿、大規模機械編成による効率的なトンネル耐震対策-東北新幹線トンネル他耐震工事-、トンネルと地下、(2009), pp.703-714
- 12) 北川一希、水野光一郎、安田武道、鈴木尊、藤井幹生、JR東日本における既設山岳トンネルの耐震対策に関する技術資料の制定、インフラメンテナンス実践研究論文集、Vol.2, No.1, (2023), pp.269-278
- 13) 楠田 健、渡辺恵介、原口 圭、吉田卓矢、田中秀宣、阿部周平、池沼良章、佐藤絢子、H形柱における溶接を用いない弱軸方向方杖補強接合の開発、日本建築学会大会, (2022), pp.1039-1040