

日米比較の観点から見た地下鉄の地震防災対策*

Perspectives of Earthquake Disaster Prevention in Subway Systems*

浅岡克彦**, 若林拓史***, 亀田弘行****, 岸尾俊茂*****

By Katsuhiko ASAOKA **, Hiroshi WAKABAYASHI ***, Hiroyuki KAMEDA **** and Toshishige KISHIO *****

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震は、近代都市神戸を襲った最大規模の都市直下型地震であり、ビル等の建築物のみならず都市基盤施設である高速道路、鉄道、港湾施設等に対しても大きな被害を与えた。このうち地下施設は、過去の内外の大地震において大きな被害を受けておらず、地震に対して強いと考えられてきたが、兵庫県南部地震では、神戸高速鉄道大開駅や神戸市営地下鉄三宮・上沢・新長田駅などで被害が発生した。ここでは、地下構造物の代表例として、9都市10事業者合計で573kmの営業延長を持ち(97.6.3現在)、都市交通の重要な一翼を担う日本の地下鉄の地震防災の現状を取り上げ、日本と並び地震多発地帯であるアメリカ西海岸の地下鉄の地震対策と比較し、その課題について述べる。

2. 地下鉄システムの構成

地下鉄は、都市の活動に重要な役割を果たしているライフラインの一つである。ライフラインシステムは、被害が局所ないしは軽微であってもシステム全体に対する影響が発生する場合があったり、自己システムは健全であっても他のシステムの被害により影響を受ける場合がある等、地震等の非常時においては、脆弱性のあるシステムである。

地下鉄システムは、耐震対策の面から大別すればトンネルや軌道などの構造関係システム、列車を安全に運行するために必要なCTC・ATCなどを備える運行管理システム、列車の動力や駅の照明・空調などに電気を供給する電力システムに区分される。

運行管理システム、電力システムの中核は、各々運転指令所及び電気指令所であり、事故が発生した場合、的確な処置を指令して復旧に務めるとともに警察・消防等の関係機関と連絡をとり、情報伝達の中心となる。本章では、地下鉄システムを構成する各システムの耐震設計や地震時対策の考え方を示す。

2.1 構造関係システム

兵庫県南部地震以前では、地下構造物は、特殊な条件下でなければ、地盤の振動とはほぼ同様に振動するため、地震の影響を受けることなく安全であると考えられてきていたが、前述のように兵庫県南部地震においては、地下構造物の一部が大きな被害を受けた。このため各事業者とも既設構造物の耐震補強を実施するとともに土木学会等の動向を踏まえ設計基準の改定を進めている。ここでは構造物の耐震基準や既設構造物の補強等を中心に述べる。

(1) 兵庫県南部地震以前の耐震基準

国内地下鉄事業者の地下構造物の耐震基準は、大きく2つに大別できる。1つは、トンネルは一般的に排除した土の重量より軽く、地震時には地盤の動きに追随していくと考えられるので、均質地盤の中にある場合には、地震の影響は考慮しなくて良いと考えるもので、国内8事業者で、その考えを基本に地下構造物の耐震設計を行っている。ただし、特殊な構造や地盤条件の場合、必要に応じ地震の影響を考慮するとしている。他の1つは、基本的に応答変位法で設計し、必要に応じ動的解析を行うという考え方で、営団・東京都営地下鉄の最新の路線の一部区間ではこの考え方を採用している。

(2) 兵庫県南部地震後の既設構造物の耐震補強

兵庫県南部地震後、運輸省は、鉄道被害の原因及び復旧方法の検討を行う「鉄道施設耐震構造検討委員会」(委員長:松本善司 東京理科大学教授)を設けた。その結果、同地震における神戸高速鉄道大開駅の被害は、激し

*キーワード:地下鉄, 防災計画, リスクマネジメント

**正員, 工修, 大阪市(〒550大阪市西区九条南2-34-3 TEL 06-581-9579 FAX06-581-7569)

***正員, 工博, 名城大学都市情報学部(〒509-02岐阜県見市虹ヶ丘4-3-3 TEL0574-69-0131 FAX0574-69-0155)

****フェロー, 工博, 京都大学防災研究所(〒611京都府宇治市五ヶ庄 TEL0774-38-4040 FAX0774-33-0963)

*****正員, 工博, 大阪港トランスポートシステム(〒552大阪市港区築港2-1-2 TEL06-574-6271 FAX06-574-6274)

表-1 全国の鉄道における緊急耐震補強の対象構造物

		高架橋	開削トンネル RC 中柱	落橋防止工
J	新幹線	約25,000本	—	約2,300連
R	在来線	約8,000本	約100本	約4,700連
民営鉄道		約6,200本	約800本	約2,000連
地下鉄		約6,300本	約4,100本	約1,800連
合 計		約45,500本	約5,000本	約10,800連

い地震動による大きな地盤変位により構造物がせん断変形を起こし、中柱がせん断破壊を生じた結果であると推定された。これを受け、1995年7月31日に運輸局長より各鉄道事業者に対し、既設開削トンネル中柱等の耐力の診断を行い、補強が必要な柱について補強工事を行うよう通達があった。

開削トンネル中柱については、次の条件に当てはまる柱を補強するよう指導がなされた。

- ・大規模地震が発生した時に大きな地盤変位を起こしやすい地盤条件下にあり(地盤変位が大きく地震時に上床版と低床版のずれが大きい構造)
- ・かつ、せん断に対する安全度が曲げに対する安全度より小さい中柱(せん断破壊先行)

全国の鉄道における補強対象構造物をまとめたものを表-1に示す。補強が必要なRC中柱は、全地下鉄事業者で4,100本ある。大阪市交通局でも、全既設地下中柱数15,623本中、1,029本の中柱に対して6mm厚の鋼板を巻いて補強する必要がある。耐震補強工作車を特別に製作し、平成12年度中の完了を目的に工事の進捗に務めている。

(3) 地下鉄の耐震基準の改定

兵庫県南部地震以前では(1)で示したように被害を受けた神戸市交通局を含め大多数の地下鉄事業者では、地下構造物の設計については特別な条件下の場合を除き常時荷重で決定されるとしてきた。

同地震でも地下構造物は、大開駅の事例を除き地上構造と比べ被害は少なく、人命に直接関わる被害ではなかった。このことから、今までの耐震の基準でもある程度の規模の地震に対しては安全ではあるともいえるが兵庫県南部地震のような直下型大地震に対しては充分ではなく、設計基準の改定が必要であると考えられる。大阪市交通局でも、土木学会等の動向を踏まえ、新線を対象とする耐震設計基準の改定作業を進めており、ほぼ完了している。

2.2 運行管理システム

地震が発生した場合、地下鉄構造に対する地震の

表-2 大阪市交通局の地震時対応

地震計設置位置及び警報を発する加速度	弁天町・大国町にSM41型地震計を設置。大震災後、森ノ宮・江坂に追加設置。他にニュートラム用を中環に設置。データは運転指令所に通報される。 ・第1次地震警報→25gal以上80gal未満 ・第2次地震警報→80gal以上150gal未満 ・第3次地震警報→150gal以上
対応	第1次警報→25km/h以下で徐行運転。列車添乗での監視後、平常運転。 第2次警報→25km/h以下で次駅まで運転後、運転中止。徒歩監視。異常がなければ無乗客で列車運行後、平常運転。 第3次警報→自動的に送電停止。再送電が可能ならば15km/h以下で次駅まで運転。他は第2次警報と同じ

大きさを即座に把握し、どこに伝達・協議し、どのような対策をとるのかということは非常に重要なことである。この中心となるのが運転指令所であり、各事業者が対応の規定を定めている。また、地震後の地下鉄構造物の被害調査などについても、地震加速度の大きさごとに各種方策を定め、安全な運行ができるように配慮している。

(1) 地震計の設置箇所や警報体制について

国内の地下鉄には各々1～5ヶ所に地震計があり、そのデータは各運転指令所に通報される。

警報が発令される加速度については、40～80galを感知すれば第1段階の警報発令としている地下鉄が6事業者、25～80gal(改定前気象庁震度階級Ⅳに対応)の地下鉄が3事業者となっている。また、各地下鉄ともそれ以上の加速度を感知した場合、第2段階の警報が発令される。代表的な地下鉄として大阪市交通局の事例を取り上げ表-2に示す。

(2) 警報発令時の構造物の検査及び営業体制

警報が発令された場合の対応については、各地下鉄とも対策を定めており、基本的には表-2の大阪市交通局の事例と同様に軽度の警報の場合は、徐行運転で列車添乗による巡回により異常の有無を確認する。また、大きな地震動を感知した場合は、次駅まで徐行し営業を中止して、徒歩などによる巡回により構造物の異常の有無を確認するようにしている。

なお大阪市交通局のみ第3次警報発令の場合には、新幹線と同様に自動的に送電を停止するようになっている。この方法は、電力会社からの給電が停止すればやむを得ないが、地下鉄の場合、地下で激しい揺れと同時に突然に車内が薄暗い非常用照明に切り替わるのは乗客の不安感を助長する恐れ等があり、列車無線で全列車に通報し、緊急停止させる等の対応が望ましいとも考えられる。

2.3 電力システム

地下鉄においては、地震時の被害波及の観点から、停電と火災について充分注意が必要である。このため地下鉄の施設や車両は、不燃化・難燃化対策を施すとともに、バッテリーによる非常時照明など各種対策が実施されている。

地下鉄の非常照明対策については、運輸省の昭和50年1月30日の通達「地下鉄道の火災対策の基準について」で「常用する電源が停止した場合、非常電源により即時に自動的に点灯し、床面において1Lux以上の照度を確保することができる照明設備を設けること」の規程があり、その他建物の不燃化についても指導が行われている。そして各地下鉄ともこの通達に添った対策を実施している。なお、1Lux といってもこれは最も暗い場所での照度であり、現実には常用照明を消して非常照明を点灯した場合でも、駅構内ではある程度の明るさが確保されている。また、各地下鉄とも、非常用蓄電池に対する補充電や排煙設備・排水ポンプ・防災関係施設の稼働用に非常用発電装置を備えており、最低限の地下鉄施設は動くように考えられている。ただし、これで列車を運行することは想定しておらず、2系統受電等の対策をとっているが、地震により電力会社からの送電が停止した場合、駅間で列車が停止し、次駅までも運行できないケースも発生すると考えられる。事実、兵庫県南部地震においては、地下区間の列車は、下り勾配を惰性で運転した例を除き、すべて停電のためその場で動けなくなった。なお、非常用発電機の持続時間は、数時間程度であり、大地震のため電力の復旧が大幅に遅れた場合、燃料の補充が必要となる。

3. アメリカの地下鉄の耐震対策（BART・Red Lineを例に取って）

アメリカ・カリフォルニア州は、日本と並ぶ地震多発地帯であり、ここ10年の間でも1989年10月17日のロマ・ブリエタ地震ではサンフランシスコ都市圏がバインブリッジの落橋、サンプレス高架橋の崩壊を代表とする大きな被害を受け、兵庫県南部地震の1年前の1994年1月17日にはノースリッジ地震がロサンゼルスを襲った。このような地震多発地帯に建設された地下鉄であるサンフランシスコのBART、ロサンゼルスRed Lineの耐震対策について述べる。

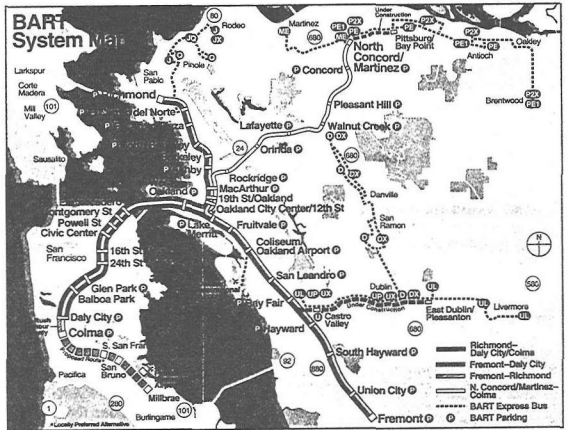


図1 BART路線図

3.1 BARTの耐震対策¹⁾

BART (Bay Area Rapid Transit) は、サンフランシスコの代表的公共交通機関であり、1976年に115km (34駅) が、'95~'96年には15km (3駅) が開通した (図-1)。一日の輸送人員は、約265千人であり同規模の路線長である大阪市交通局の約1/10の乗客数となっている。BARTの各種地震時対策及びロマ・ブリエタ地震時の状況について述べる。

(1) 耐震設計基準

- ・0.1gまでの地震に対しては、弾性範囲内であり何の被害もないこと
- ・地盤の固い地域では極限設計で0.33gまで、柔らかい地域では0.5gまでの地震に対して破壊しないこと

(2) 地震計と警報

活断層の位置を考慮して8駅に強震加速度計を設置。0.1g以上を感知すると運転司令所に連絡される。

(3) 地震時対応計画

- ・対応計画Ⅰ：運転士が地震を感じて列車を停止させた後、被害報告もなく、地震計の警報も発せられない場合、徐行運転で軌道の検査を実施。異常がなければ平常運転に。
- ・対応計画Ⅱ：運転司令所は被害報告を受けているが、地震計の警報がない場合、乗客を次駅で降ろし、該当区間の軌道検査を徐行で実施。ただし盛土区間は特別点検を実施する。異常があれば計画Ⅲに移行。異常がなければ平常運転に。
- ・対応計画Ⅲ：地震計の警報があれば運転司令所は、全列車の緊急停止を命じる。ただし地下区間の列車は安全な所まで移動することも認められている。該当区間に、保線担当の職員が派遣され、軌道の点検を実施。被害があれば構造関係の技術職員も派遣され対応を検討、司令所に対策を報告する。

(4) ロマ・ブリエタ('89.10.17)地震時の状況

地震時対応計画Ⅲが発動され、ヘリコプター等を利用して調査が実施された。その結果、軽微な構造被害が数カ所あったが、線路保守が必要な箇所は全くなかった。ただし、停電のため営業は中止し、深

2.3 電力システム

地下鉄においては、地震時の被害波及の観点から、停電と火災について充分注意が必要である。このため地下鉄の施設や車両は、不燃化・難燃化対策を施すとともに、バッテリーによる非常時照明など各種対策が実施されている。

地下鉄の非常照明対策については、運輸省の昭和50年1月30日の通達「地下鉄道の火災対策の基準について」で「常用する電源が停止した場合、非常電源により即時に自動的に点灯し、床面において1Lux以上の照度を確保することができる照明設備を設けること」の規程があり、その他建物の不燃化についても指導が行われている。そして各地下鉄ともこの通達に添った対策を実施している。なお、1Lux といってもこれは最も暗い場所での照度であり、現実に常用照明を消して非常照明を点灯した場合でも、駅構内ではある程度の明るさが確保されている。また、各地下鉄とも、非常用蓄電池に対する補充電や排煙設備・排水ポンプ・防災関係施設の稼働用に非常用発電装置を備えており、最低限の地下鉄施設は動くように考えられている。ただし、これで列車を運行することは想定しておらず、2系統受電等の対策をとっているが、地震により電力会社からの送電が停止した場合、駅間で列車が停止し、次駅までも運行できないケースも発生すると考えられる。事実、兵庫県南部地震においては、地下区間の列車は、下り勾配を惰性で運転した例を除き、すべて停電のためその場で動けなくなった。なお、非常用発電機の持続時間は、数時間程度であり、大地震のため電力の復旧が大幅に遅れた場合、燃料の補充が必要となる。

3. アメリカの地下鉄の耐震対策 (BART・Red Lineを例に取って)

アメリカ・カリフォルニア州は、日本と並ぶ地震多発地帯であり、ここ10年の間でも1989年10月17日のロマ・ブリエタ地震ではサンフランシスコ都市圏がペイプルリッジの落橋、サイプレス高架橋の崩壊を代表とする大きな被害を受け、兵庫県南部地震の1年前の1994年1月17日にはノースリッジ地震がロサンゼルスを襲った。このような地震多発地帯に建設された地下鉄であるサンフランシスコのBART、ロサンゼルスRed Lineの耐震対策について述べる。

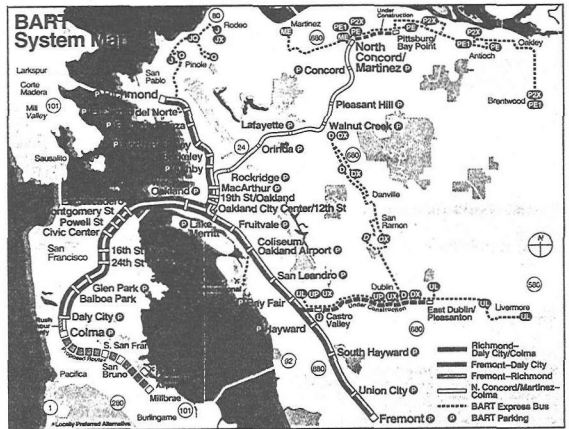


図1 BART路線図

3.1 BARTの耐震対策¹⁾

BART (Bay Area Rapid Transit) は、サンフランシスコの代表的公共交通機関であり、1976年に115km (34駅) が、'95~'96年には15km (3駅) が開通した (図-1)。一日の輸送人員は、約265千人であり同規模の路線長である大阪市交通局の約1/10の乗客数となっている。BARTの各種地震時対策及びロマ・ブリエタ地震時の状況について述べる。

(1) 耐震設計基準

- ・0.1gまでの地震に対しては、弾性範囲内であり何の被害もないこと
- ・地盤の固い地域では極限設計で0.33gまで、柔らかい地域では0.5gまでの地震に対して破壊しないこと

(2) 地震計と警報

活断層の位置を考慮して8駅に強震加速度計を設置。0.1g以上を感知すると運転司令所に連絡される。

(3) 地震時対応計画

- ・対応計画Ⅰ：運転士が地震を感知して列車を停止させた後、被害報告もなく、地震計の警報も発せられない場合、徐行運転で軌道の検査を実施。異常がなければ平常運転に。
- ・対応計画Ⅱ：運転司令所は被害報告を受けているが、地震計の警報がない場合、乗客を次駅で降ろし、該当区間の軌道検査を徐行で実施。ただし盛土区間は特別点検を実施する。異常があれば計画Ⅲに移行。異常がなければ平常運転に。
- ・対応計画Ⅲ：地震計の警報があれば運転司令所は、全列車の緊急停止を命じる。ただし地下区間の列車は安全な所まで移動することも認められている。該当区間に、保線担当の職員が派遣され、軌道の点検を実施。被害があれば構造関係の技術職員も派遣され対応を検討、司令所に対策を報告する。

(4) ロマ・ブリエタ('89.10.17)地震時の状況

地震時対応計画Ⅲが発動され、ヘリコプター等を利用して調査が実施された。その結果、軽微な構造被害が数カ所あったが、線路保守が必要な箇所は全くなかった。ただし、停電のため営業は中止し、深