

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

コンクリート構造物の耐震技術

我が国の鉄道コンクリート構造物の耐震設計法は、巨大地震によって構造物が被害を受けるたびに見直されてきました。また、巨大地震に対しても壊滅的な被害を受けることを防ぐために、多くの鉄道コンクリート構造物の耐震補強が進められてきました。ここでは、これまでの大地震を教訓とした耐震設計法の変遷と、最近の鉄道コンクリート構造物の耐震設計、耐震補強への取り組みについて紹介します。

過去の大地震と耐震設計法の変遷

大正12年の関東大震災を契機として、これ以降、鉄道コンクリート構造物の耐震設計がルール化されるようになりました。当初の耐震設計は、『震度法』と呼ばれる方法で行われていました。震度法とは、例えば橋りょうの場合、**図1**に示すように桁と橋脚の重量(W)の何割かの重さ($K \times W$)が地震力として橋りょうに水平に作用するという考え方です。この時のKを震度と呼び、当初、震度としては0.2程度の値が用いられていました。この震度法の考え方は、関東大震災以降、長い間鉄道構造物の耐震設計法として用いられてきました。

関東大震災以降にも、昭和39年の新潟地震、昭和43年の十勝沖地震、あるいは昭和53年の宮城県沖地震など、我が国は度々大きな地震を経験してきました。特に宮城県沖地震では、鉄道コンクリート構造物が大きな被害を受け、それまでの耐震設計で想定していた地

震力をはるかに超える大きな地震力が構造物に作用していることが明らかとなりました。一方で、耐震に関する研究開発も進められ、構造物が受ける地震力は、地盤や構造物の振動特性に影響を受けることがわかりました。また、構造物がある程度の損傷を受けた場合であっても、柱をねばりのある構造とすることで、構造物が倒壊するなどの壊滅的な被害を生じないこともわかってきました。そして、これらのことから、宮城県沖地震以降の昭和58年に定められた旧国鉄の設計基準である建造物設計標準においては、これまでの震度法に地盤の影響や構造物の振動特



岡本 大
Masaru Okamoto
構造物技術研究部
コンクリート構造研究室
室長
【専門分野】コンクリート工学



田所 敏弥
Toshiya Tadokoro
構造物技術研究部
コンクリート構造研究室
主任研究員
【専門分野】コンクリート工学

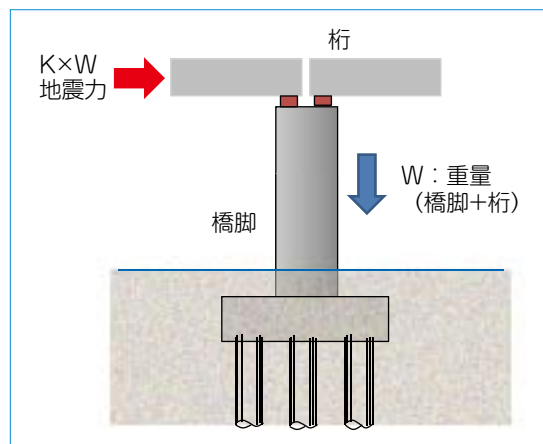


図1 震度法の考え方

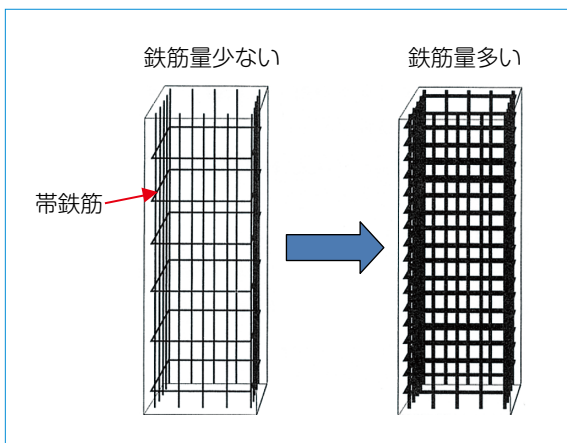


図2 柱の鉄筋配置の変化



図3 柱のせん断破壊の例

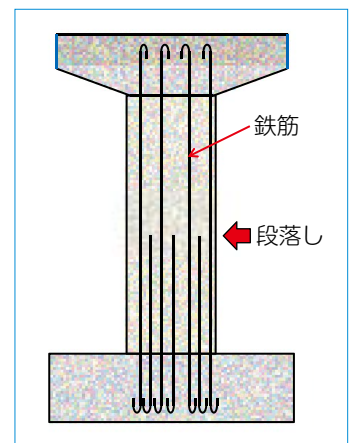


図4 段落しの模式図



図5 RC橋脚の段落し部の地震被害事例

性を考慮した『修正震度法』が用いられるようになりました。加えて、**図2**に示すように、柱の帯鉄筋の量を増やすなどの仕様を規定して、**図3**に示すような柱のせん断破壊（**☞**参照）を防止して、ねばり強くすることで壊滅的な被害を防止するという考え方が取り入れられました。

その後の平成7年に発生した兵庫県南部地震では、多くの鉄道構造物が甚大な被害を受けました。特に被害が大きかった構造物は鉄筋コンクリート（以下、RC）造のラーメン高架橋で、**図3**のような柱のせん断破壊による損傷が多数発生しました。このような破壊を生じた構造物は、前述した昭和58年の建造物設計標準よりも前の

基準で設計された構造物でした。そして、このような状況を鑑みて、平成7年7月に「既存の鉄道構造物に係る耐震補強の緊急措置について」が提言され、新幹線構造物などを中心に、大規模な地震に対しても構造物が崩壊しないことを目標とした耐震補強が行われてきました。

兵庫県南部地震後の設計基準としては、平成11年に鉄道構造物等設計標準（耐震設計）が制定され、想定外の巨大地震に対してもせん断破壊を生じず、損傷を受けた場合でも地震後にできるだけ早期に復旧できるように損傷を制御することを目標とした耐震設計法となりました。

耐震に関する研究開発は、過去の地

震での被害を教訓として継続的に進められています。以下には、最近の耐震技術に対する鉄道総研の取り組みについて紹介します。

RC橋脚の地震被害と耐震補強工法の開発

先に述べたように、兵庫県南部地震では多くのRCラーメン高架橋の柱が被害を受けたことから、これらを対象に耐震補強が行われてきましたが、河川を渡河する橋りょうのRC橋脚が損傷した事例も確認されています。ここでは、RC橋脚の耐震補強技術を紹介します。

従前のRC橋脚の設計では、地震による力は橋脚下端に集中し、橋脚中間部分には下端ほど大きな力は作用しないことを勘案して、**図4**に示すように橋脚中間部で橋脚の軸方向の鉄筋の本数を減じる「段落とし」を行う場合が多くみられました。その結果、過去の大地震では、**図5**に示すように、橋脚中間の段落し部分が破壊する事例が観察され、一方で段落しを行っていない橋脚の被害は比較的小さいものでした。そのため近年では、段落し部の破壊を防止するための耐震補強の取り組みが行われています。段落し部の補強は、既存の橋脚の周りに鉄筋コンクリートを巻立てるRC巻立て補強工法が広く用いられています。RC巻立て補強工法の場合、既存の橋脚に比べて補強

☞ せん断破壊

せん断破壊は、地震の影響などで横方向（水平方向）に力を受けた時に柱の斜め方向にひび割れが発生し、帯鉄筋が少ない場合には斜めひび割れのすれが拡大して、高架橋の崩壊に至ってしまうものです。せん断破壊は、斜めひび割れが拡大すると急激に耐力力が低下し、脆い破壊となるのが特徴です。

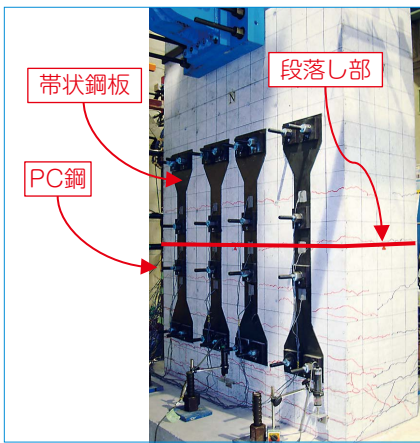


図6 実大試験体の载荷実験

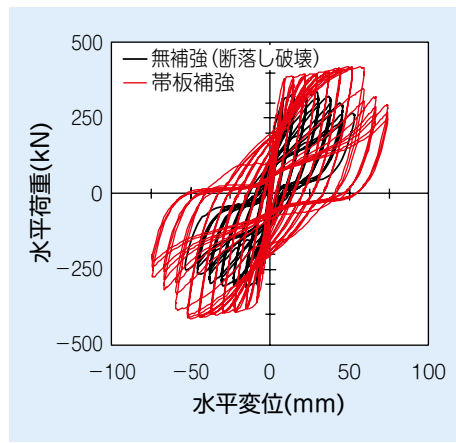


図7 段落し部の耐震補強の効果

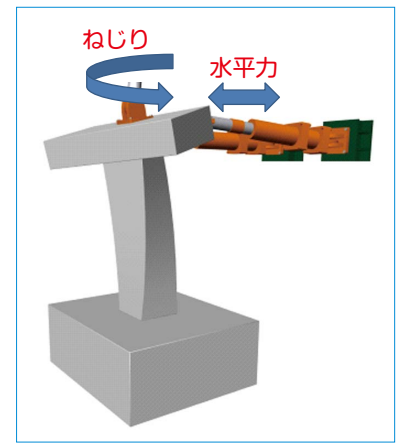


図9 ねじりと水平力を同時に作用させた载荷試験

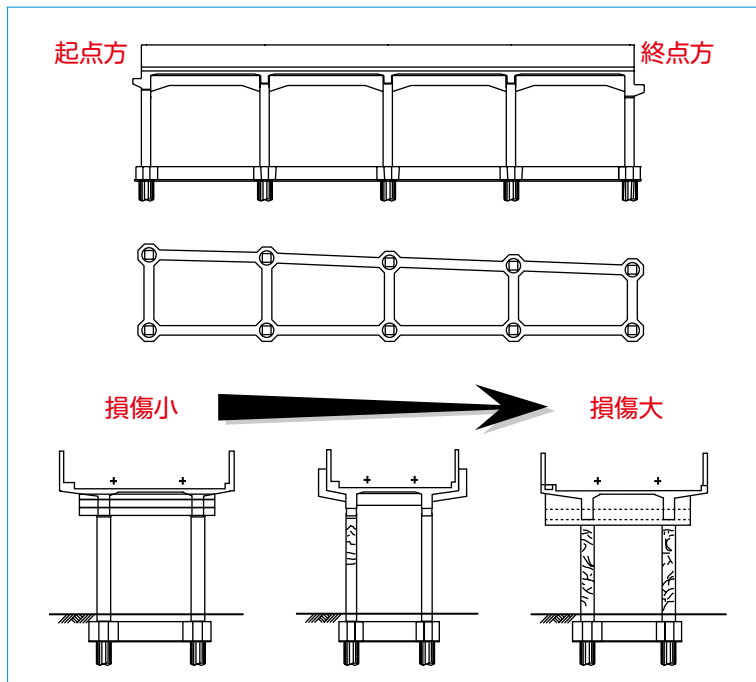


図8 地震で被害を受けたラーメン高架橋の例

後の橋脚の断面が大きくなるという特徴があります。そのため、場合によっては河積阻害率(☞参照)の問題から、耐震補強の実施が難しい場合も出てきます。また、河川部の橋脚の補強工事は、施工時期が河川の渇水期に限定される場合があるため、できるだけ工期が短いことが望まれます。そのようなことから、橋脚断面の増加を極力抑え、短い期間で施工可能な耐震補強工法を

開発しました。本工法は、図6に示すように、橋脚の段落し部に帯状の鋼板を鋼棒によって取り付けるもので、橋脚断面の増加がほとんどなく、短時間での施工が可能です。補強効果については橋脚を模擬した試験体の载荷実験により検証しました。実験の結果、無補強時には段落し部で破壊してしまう橋脚を、橋脚基部で破壊させることが可能となり、その結果、図7に示す

☞ 河積阻害率

河川を横断する橋りょうにおいて、川幅に対して橋脚の寸法が大きすぎると、洪水時などに川の流れを阻害したり、川の流速が早くなり橋脚周辺の河床が洗堀されてしまう恐れが生じます。そのため、河川横断方向の橋脚の幅の合計と川幅との比である河積阻害率の上限を定めて、これらを防止することが規定されています。

ように無補強時に比べて耐力が向上し、大きな変形まで破壊しない性能を付与できることを確認しました。

不整形なラーメン高架橋の耐震設計

これまでに、RCラーメン高架橋の耐震性に関してはさまざまな研究が行われてきましたが、地震時のRC柱の被害は、载荷試験などで観察される損傷と異なる場合が少なくありませんでした。実構造物の損傷は、構造物の形状、地盤、地震動の特性などさまざまな要因に影響を受けます。ところで、鉄道高架橋の耐震設計にあたっては、柱にねじりが生じないように配慮しています。しかし、実構造物においては、構造物立地の制約などにより、柱にねじりが生じる場合があります。例えば、駅分岐部において幅が変化するような不整形な形状のラーメン高架橋などでは、地震時に柱にねじりが生じる可能性があります。ここでは、地震により柱にねじりが生じた可能性があるラーメン高架橋の実被害とねじりを受けた場合の柱の耐震性能について紹介します。

地震により被害を受けたラーメン高架橋を図8に示します。この構造物は、起点方の柱間隔が終点方よりも大きい不整形な形状の高架橋です。高架橋の損傷は図8に示したように、終点方の柱に集中し、起点方に向かうにした

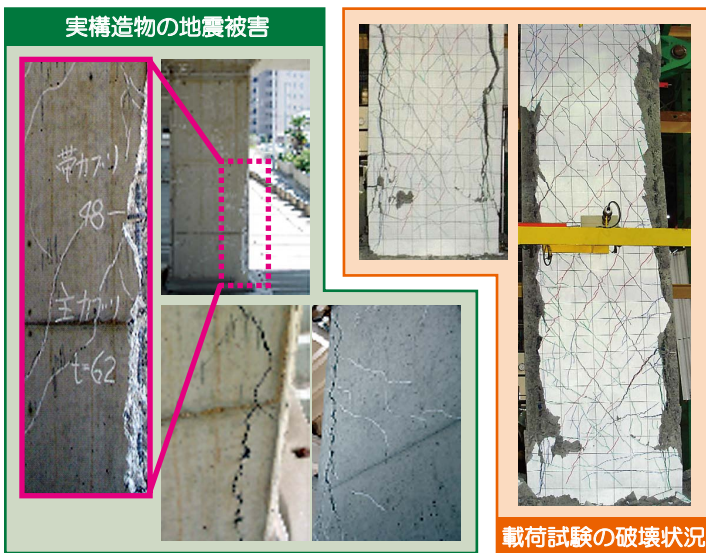


図10 実構造物と試験体の損傷状況の比較



図12 津波による鉄道橋りょうの被害事例

がって損傷が小さくなり、起点方の柱では損傷がほとんどみられませんでした。また、損傷が大きい終点方の柱では、柱高さ中央に斜めのひび割れが多数みられました。このことから、この高架橋の柱にねじりが作用した可能性が考えられます。

ねじりが柱の耐震性能におよぼす影響を確認するため、柱に水平力とねじりを同時に作用させた図9のような載荷試験を実施しました。実構造物の被害と試験体の損傷の比較を図10に示します。実構造物、試験体ともに柱の四隅に鉄筋に沿った鉛直方向ひび割れや斜め方向のひび割れが柱全長にわたって発生し、柱の角のコンクリートはく落するという大変類似した損傷となりました。

また、載荷試験において、ねじりが生じた場合の柱の変形状況について検

討しました。図11には、ねじりが作用しない柱、小さなねじりを加えた柱、および大きなねじりを加えた柱試験結果の比較を示します。図に示すように、ねじりが作用することによって、早い段階で荷重の低下が生じており、ねじりの影響で耐震性能が低下していることがわかります。また、ねじり量の大小は、性能の低下にほとんど影響しない結果となりました。

このことから、ラーメン高架橋を構築する場合には、柱にねじりが生じないようにできるだけ整形なラーメン高架橋の計画を策定することが重要であることがわかりました。ただし、やむを得ず不整形なラーメン高架橋とする場合には、三次元の応答解析などの詳細な解析を行い、ねじりの影響により低下する性能を補うように、設計に余裕を持たせることが重要となります。

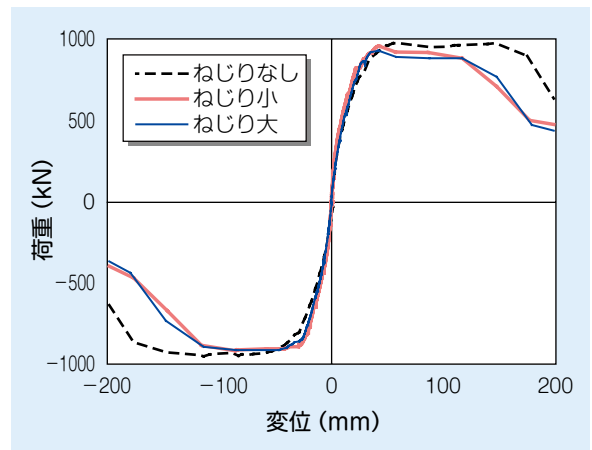


図11 ねじりの影響

そして、こうすることによって、目標とする耐震性を確保できる構造物の設計が可能となります。

津波による鉄道橋梁の地震被害と今後の取り組み

東北地方太平洋沖地震においては、地震に伴う津波により鉄道構造物は壊滅的な被害を受けました。図12は、津波の大きな力により鉄道橋りょうが被害を受けた事例です。桁は流出し、橋脚は大きく傾斜しています。現在、鉄道総研では、被災結果と水理実験をもとに、津波によりこのような被害を生じた原因の分析と、津波に強い橋りょうの形式について国土交通省の補助金を受けて研究開発に取り組んでいます。

おわりに

これまでの耐震に関するさまざまな研究開発の成果を基に、耐震設計や耐震補強に関する耐震技術が提案されてきました。現在は、東海、東南海、南海の三連動地震や、首都圏直下地震などの大地震の発生が危惧されており、今後も継続的に巨大地震へのさまざまな対策が求められています。今後も耐震技術に関する研究開発を行い、これらの地震への対策に少しでも寄与できればと考えています。[RRR]