

I. コンクリート構造物の主な被害

1. 被害の概要

新幹線における構造物の被害は、新大阪駅の終点方から西明石駅の姫路方約 3km付近までの約 55km (うちトンネル延長約 32km)の区間で発生しており、特に東京起点523k200m付近の下食満高架橋から六甲トンネルの入口までに集中している。

コンクリート構造物で被害を受けた部位は、主としてラーメン高架橋の柱部分、ラーメン橋台の柱部分、単柱橋脚など鉛直部材であるが、RC、PC、合成桁等の横ずれ、沓の被害が認められた。

被害を受けた構造物は、昭和47年(1972年)に供用開始されたもので、設計に用いられた水平震度は0.2、軌道構造はバラスト軌道である。

設計時点で適用された設計基準は以下のとおりである。

- ・土木構造物の設計基準(案)：昭和30年(1955年)
- ・新幹線構造物設計基準(案)：昭和36年(1961年)
- ・新幹線鉄筋コンクリート構造物設計要領(案)：昭和41年(1966年)
- ・新幹線建造物設計基準規程(案)：昭和42年(1967年)
- ・建造物設計標準(鉄筋コンクリート構造物及び無筋コンクリート構造物)：昭和45年(1970年)

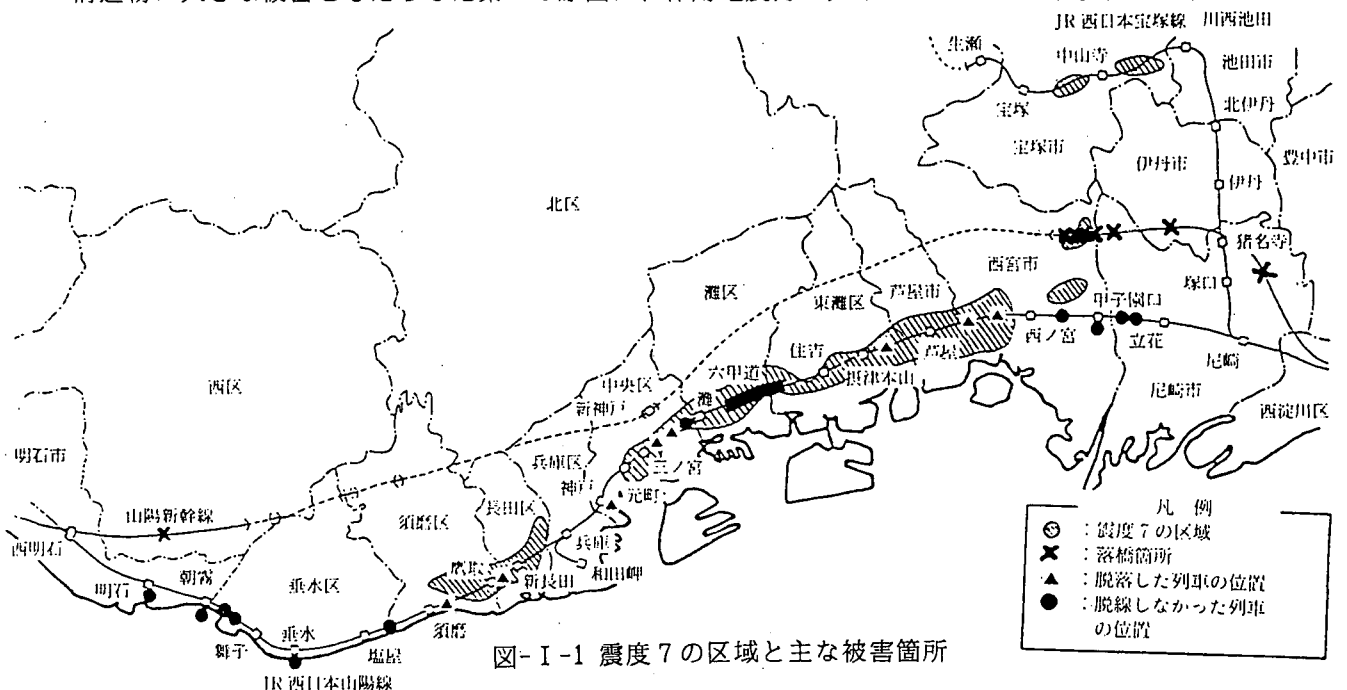
在来線では、東海道・山陽本線 西宮～明石間でコンクリート高架構造物を中心に被害が発生した。三宮駅付近(東京起点587km付近)の高架橋の被害はかぶり部分のコンクリートが剥落した程度であったが、住吉・灘間(東京起点580km673m～582km696m付近)の高架橋間 2.2km(4線区間)は大きな被害が発生した。

当該区間の高架橋は、昭和42年から51年にかけて設計施工され、4線区間であるが、上り2線下り2線がそれぞれ独立した構造となっている。設計水平震度は0.2、軌道構造はスラブ軌道である。住吉・灘間の構造物については新幹線とほぼ同時期に施工されており、適用された設計基準は新幹線と同じ以下のものである。

- ・土木構造物の設計基準(案)：昭和30年(1955年)
- ・建造物設計標準(鉄筋コンクリート構造物及び無筋コンクリート構造物)：昭和45年(1970年)

2. 崩壊のメカニズム

構造物に大きな被害をもたらした第一の原因は、作用地震力が大きかったことであろう。「今回の



兵庫県南部地震による地表の強震記録の中には0.8Gを超える最大加速度や1m/sec前後の最大速度を示すものがあり、これらは日本で観測された強震記録として最大級のものといえる」とされており、構造物の被害、とりわけ住吉・灘間の構造物については概ね震度7とされた領域と重なる(図-I-1)。

構造物が崩壊にまで至った原因は、柱部材がせん断破壊したことによる。

現行の設計では曲げによる鋼材の降伏あるいは曲げ破壊そのものがせん断破壊に先行するいわゆる曲げ破壊先行型の部材となるように設計しなければならないとされている。しかしながら、今回被災した構造物が設計された昭和40年代前半においては、必ずしもこれらのことは明確に意識されたはいなかったようである。せん断補強鉄筋量は現行の基準と比較する少なく、せん断補強鉄筋が十分な定着を確保できる形状にはなっていなかった。すなわち、柱のせん断補強鉄筋として帯鉄筋φ9mmが柱の上端、下端では150mmピッチ、中間では300mmピッチで配置されていた。これは当時の基準を満足するものである。ただし、帯鉄筋の形状は設計図面は135°フックになっているが、実際には直角フックとしたものが多いようである。また、曲げによるせん断に対する許容応力度(=τ_{a1})の値を大きく取っていた。すなわち、昭和58年の建造物設計標準では、コンクリートの設計基準強度が240kg/cm²の場合のτ_{a1}=3.9kg/cm²であるのに対して、当時の設計標準では7.0kg/cm²としていた。更に、荷重の組み合わせに対する割増係数を地震時には1.5としていた(現在は割増を考慮してはならないと定められている)ことを考え合わせると、10.5kg/cm²までコンクリートだけでせん断がとれることになり、帯鉄筋にはせん断補強筋としての意味あいは殆どなく、組立筋としての側面が大きいものであったと考えられる。言い換えればすべての構造物が「せん断破壊しやすい」状態になっていたといつてよい。

したがって、現在の基準と比較すれば、せん断補強鉄筋量、形状とも不十分なものであった。これらの条件はすべての高架橋に共通しており、ある高架橋がせん断破壊し、別の高架橋は曲げ破壊したという点については、「せん断スパン比」について考察する必要が生じる。

山陽新幹線のラーメン高架橋では基礎の天端からスラブ天端までを高さhとして、h=7.0m、8.5m、10.0m、12.0m、14.0mのものが設計されている。12.0m、14.0mのものは、中間ばりを有する2層構造となっている。被災した阪水高架橋の一般図を図-I-2に示す。高架橋天端の高さは縦断計画から決定され、一方、実際に構造物が建設される地点の高さは地形上様々であるため、構造物の高さは場所によって様々である。標準設計の適用にあたっては、必要な高さに最も近く、且つそれよりも高さが高い標準設計のものの柱を短くすることによって現地の状況に合った構造物とする方法がとられている。この方法は、「曲げ」に対しては安全側の結果を与えるが、「せん断スパン比」が小さくなり、破壊モードはせん断破壊の方へシフトすることになる。

昭和58年の建造物設計標準は、耐震に関する一般構造細目のなかで、せん断破壊し易い条件として、次の3点を挙げている。

(a) l/dが2.5未満の場合

(b) 軸方向力によるコンクリートの圧縮応力度が0.25σ_{sk}をこえる場合

(c) 引張鉄筋比が1%をこえる場合」と定めている。そしてこのような条件のいずれかに該当する場合には、「じん性を向上させる特別な検討をするか、耐力を大きくする等の検討をしなければならない。」としている。

今回崩壊にまで至ったのは、(a)~(c)までの条件に該当しながら結果としてじん性の向上を図るとか耐力を大きくするなどの処置がなされなかった構造物といえる。すなわち、

① ラーメン高架橋のせん断スパン比の小さいもの

② 異径間ラーメンなど大きな軸力が作用し、且つせん断スパン比の小さい部材

③ ラーメン橋台の前柱など、上部工から大きな軸力が作用し、且つせん断スパン比の小さい部材と考えてよいようである。

II. コンクリート構造物の復旧

・ 構造物復旧の基本方針

現地調査の結果、損傷は鉛直部材に集中しており、その影響で上部の桁が落下したり、梁・スラブなどの水平部材が沈下したりした。しかしながら、水平部材の損傷は一部を除いて、比較的軽微であることがわかったので水平部材についてはできるだけ再使用するものとし、鉛直部材については極力じん性能を高める方向で補強することにした。なお、復旧の基本方針は新幹線、在来線とも同様である。

1. ラーメン高架橋・ラーメン橋台

柱部分の損傷の程度に応じて、次の3つのタイプに分類した(図-II-1)。また、タイプ別の柱の損壊数を表-II-1に示す。

type I ひび割れが生じている場合

type II 主としてかぶりが剥落している場合

type III コンクリートが圧壊し、鉄筋が湾曲、破断している場合

type IIIの場合の具体的な施工方法は、次の通り鋼製バンドなどで梁・スラブを一旦仮受けした後、湾曲した鉄筋を切断し、破壊したコンクリートを取り除いて、梁・スラブ部分とフーチングを分離する。その後、ジャッキアップによって、はり・スラブを所定の位置に戻す。梁あるいは柱上部からの軸方向鉄筋(=切断後も残っている部分)、柱下部あるいはフーチングからの軸方向鉄筋(=切断後も残っている部分)のそれぞれに新しい鉄筋をガス圧接(熱間押抜き圧接)し、中間部で新しい鉄筋と鉄筋をフレア溶接する。帯鉄筋としてD13を100mmピッチに配置した後、6mm~9mmの鋼板を柱全長にわたって巻立て、無収縮モルタル等を打設する。

施工基面の沈下の程度が小さいtype IIについては、ジャッキアップは行わず、損傷部分に帯鉄筋としてD13を100mmピッチに配置した後、6mm~9mmの鋼板を柱全長にわたって巻立て、無収縮モルタル等を打設する。この時、注入用のチューブをあらかじめひび割れ付近に配置しておき、鋼板巻立て、無収縮モルタルの打設が終了した時点で、樹脂注入を行うこととした。

type Iについては、ひび割れ注入を行った後、柱全長にわたって鋼板巻き立てを行い、無収縮モルタル等を打設する。

ジャッキの能力その他の条件から、全体を押し上げるなり、つり下げることができない場合にははりの切断を行い対処することにした。人為的に切断したこのような箇所は、梁の軸方向鉄筋に新しい鉄筋をガス圧接(熱間押抜き圧接)し、新しい鉄筋と鉄筋は重ね継手とし、スターラップをD16を100mmピッチ(既設部分は200mmピッチ)に配置した。さらに、継手部分は疲労耐力が低下すると考えられるため、梁の軸方向鉄筋を増やすとともに、梁に鋼板(厚6mm)接着を行った。

また、既設軸方向鉄筋の曲げ戻しをおこない再使用することにした。

●鋼板巻き立て供試体の載荷試験

鉄道施設耐震構造検討委員会によって、ラーメン高架橋の柱部分を想定した供試体を用

表-II-1 柱の損壊数

	線名・区間	破	壊	損	傷	計
J R 西日本	山陽新幹線					
	新大阪~姫路	124	337	247	708	
東海道線	浜~神戸	0	113	148	261	
	住吉~浜	499	346	105	950	
J R 東海	東海道新幹線 京都~新大阪	0	65	107	172	
合計		623	861	607	2,091	

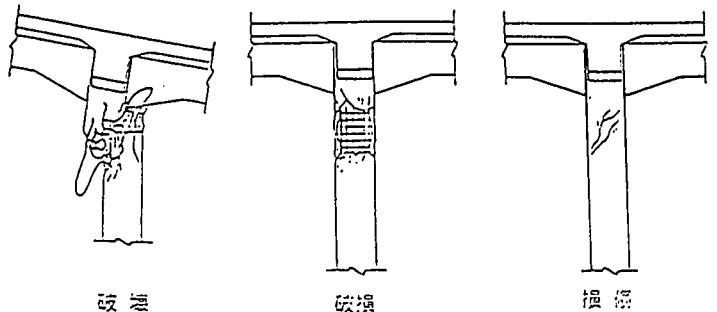


図-II-1 柱の損傷の程度

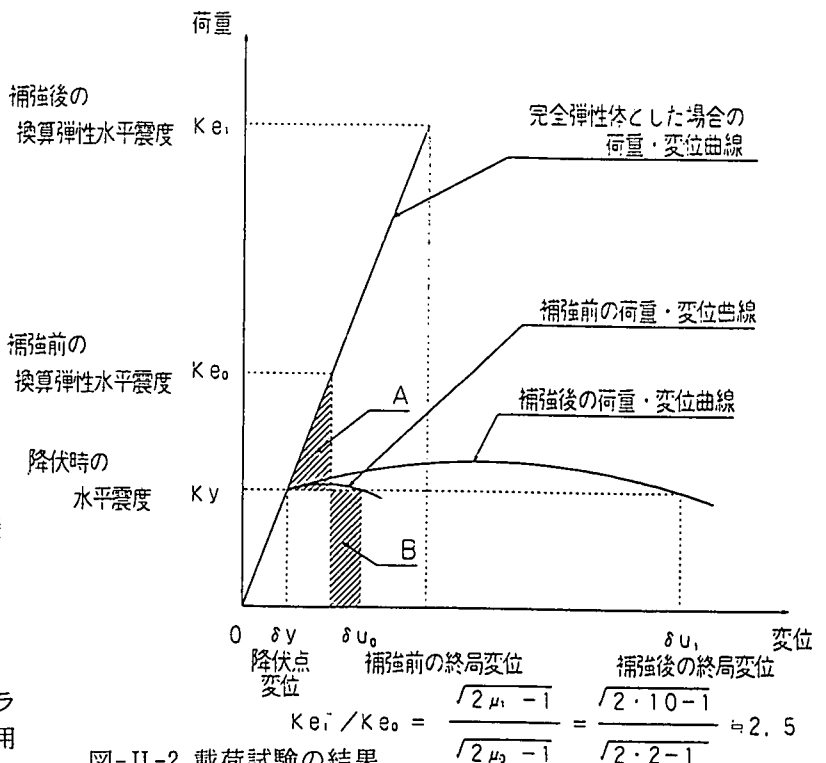


図-II-2 載荷試験の結果

いて、載荷試験が実施された。その結果を図-II-2に示す。鋼板巻立てを行う前の供試体のじん性率は概ね $\mu=2$ であり、鋼板巻立て後は $\mu=10$ となるとされている。補強によって換算弾性水平震度は、補強前の約2.5倍となる。

●既設軸方向鉄筋の引張試験

過去に応力履歴を受けた鋼材の応力・ひずみ曲線は、一般に、図-II-3のようにモデル化することができる。

既設軸方向鉄筋の再使用については、昭和53年6月の宮城県沖地震の際に被害を受けた構造物に対して実施した例があるものの引張試験等を行い、確認することにした。試験をおこなった全ての供試体が、降伏点強度、引張強度、伸び率の規格値を満足している(図-II-4)。

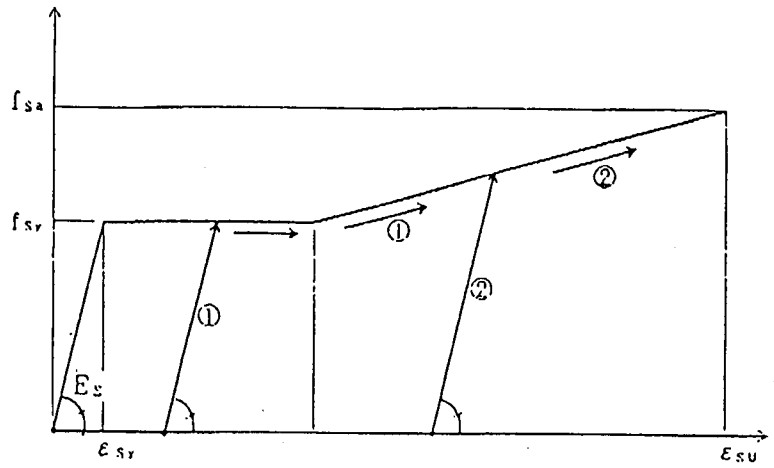


図-II-3 過去に応力履歴を受けた鋼材の応力・ひずみ曲線
経路①：降伏ひずみ程度の履歴を受けた場合
経路②：ひずみ硬化領域までの履歴を受けた場合
fsvは、通常JIS規格の下限値の1.2~1.3倍程度

III. 耐震に配慮した今後の設計施工

1. 新設構造物

「新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料」(平成8年3月)によって設計することになる。

設計の基本的流れを図-III-1に示す。鉄道構造物等設計標準(平成4年10月)による耐震設計に加えて、兵庫県南部地震に対する検討を行うものである。具体的には動的解析(簡易に行う場合には降伏強度スペクトル)によって応答塑性率を算定を行い、別に求めた部材のじん性能を上廻ることを確認することによって安全性の検証を行うものである。

2. 被災しなかった既設構造物

「設計標準」が改訂されても、改訂の都度、既設構造物の補強を行うなどの対策はとられてはいないので、現状では設計された時期が異なると耐震性能が大きく異なるということになっている。言い換えれば、いつの規準によって設計されたかによって鉄筋コンクリート構造物の耐震性能は大きく異なるといえる。

2.1 耐震評価(優先度の判定)

耐震評価に關しての基本的な流れを図-III-2に示す。せん断破壊先行のもの、保有換算弾性水平震度が低位のものを優先して補強する。せん断耐力、曲げ降伏、曲げ耐力の算定にあたってはラーメンのフレーム解析を行い、(死+温+乾)の場合の $Vd/Vyd^{(1)}$ 、 $Md/Myd^{(2)}$ 、 $Md/Mud^{(3)}$ を計算する。同様に(死+温+乾+地震の影響⁽⁴⁾)の荷重の組み合わせに対する、 Vd/Vyd 、 Md/Myd 、 $Md/$

鉄道構造物等設計標準による耐震設計

兵庫県南部地震に対する検討

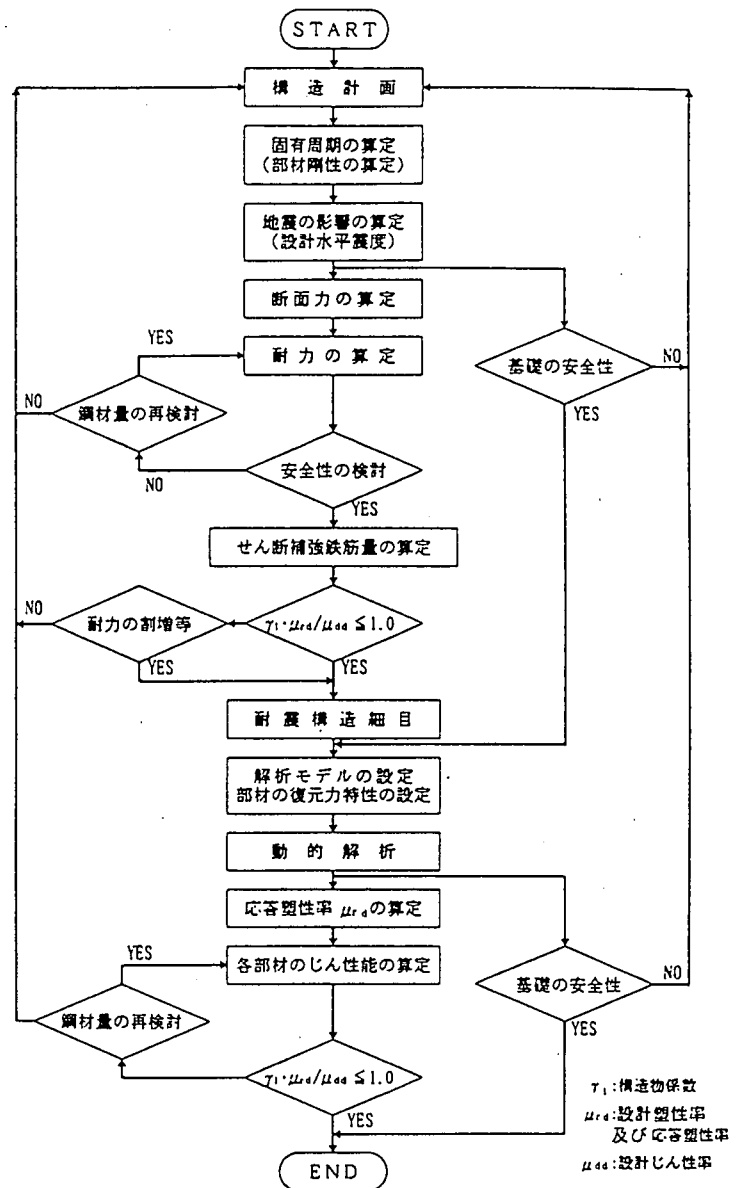


図-III-1 耐震設計の基本的な流れ

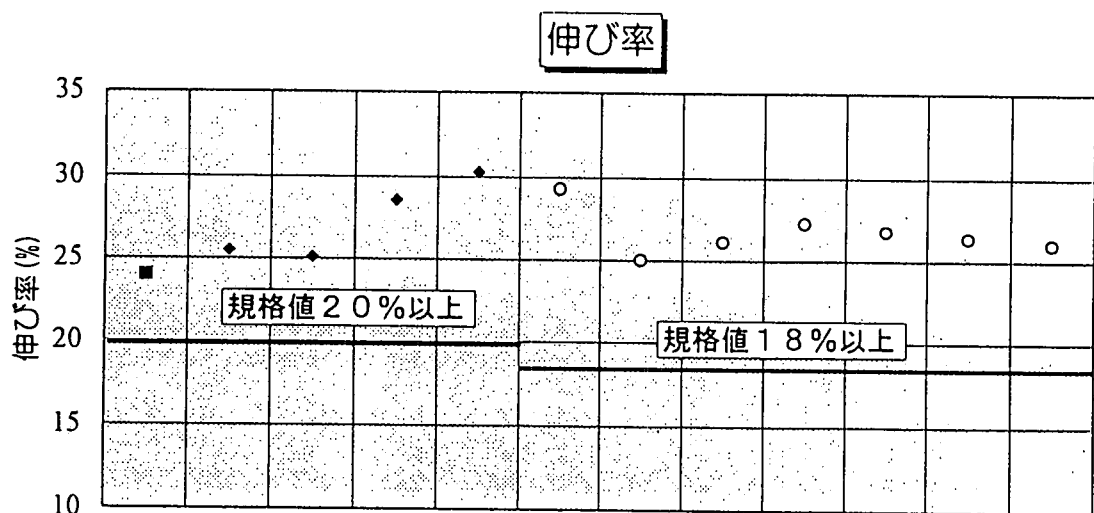
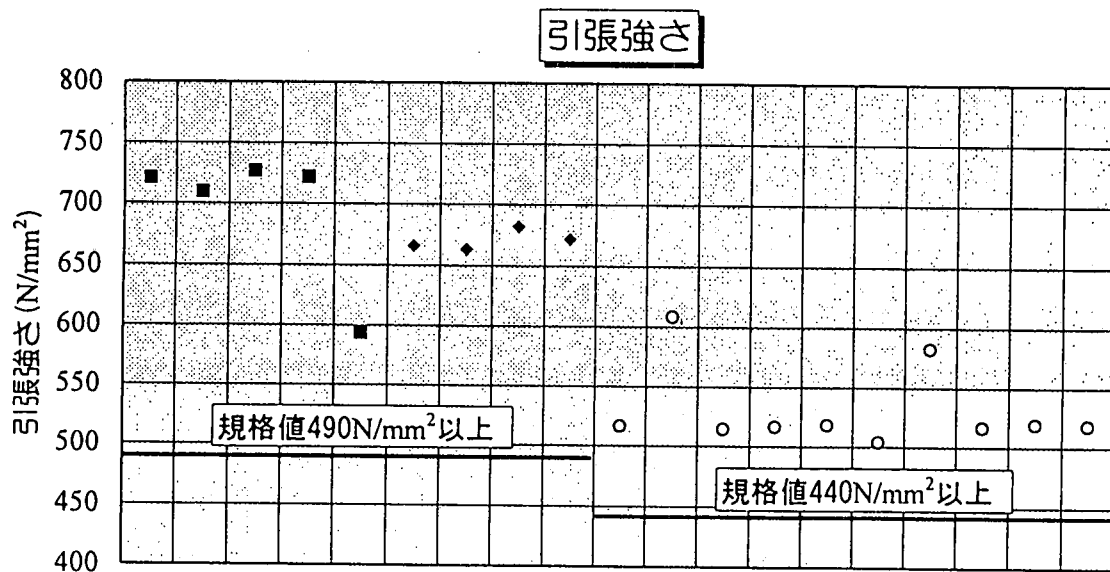
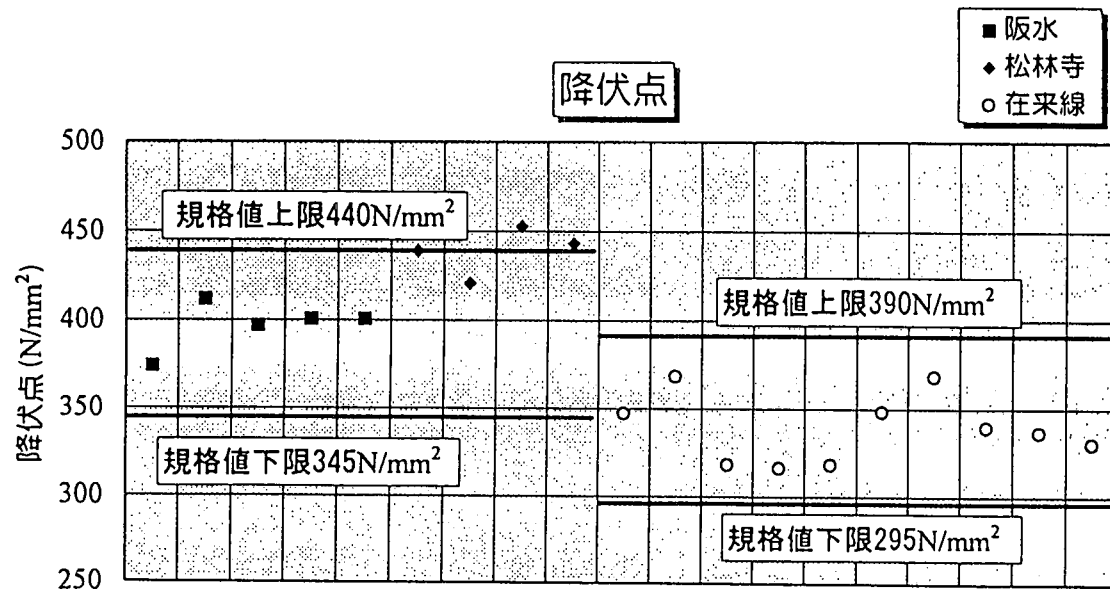


図-II-4 引張試験の結果

Mudを計算する。

図-III-3に例を示すが、縦軸に安全率、横軸に設計水平震度を取り、Vd/Vyd、Md/Myd、Md/Mudをそれぞれ直線で結ぶと、その延長線上に安全率が1.0となる点が求められる。その位置における設計水平震度がそれぞれせん断耐力、曲げ降伏、曲げ耐力ということになる。

注1)Vydの算出は、鉄道構造物設計標準(平成4年)(6.3.2)式による

注2)Mydは、軸方向鉄筋が設計引張降伏強度に達するときの曲げ耐力

注3)Mudの算出は、鉄道構造物設計標準(平成4年)(解6.2.7)式による

注4)図-III-3の例では設計水平震度を0.2として算出している。

曲げ降伏が先行すると云うことになれば、図-III-2に示す手順でじん性率を求め、換算弾性水平震度を求める。

2.2 補強方法

今回の震災を踏まえて、橋脚等に対する耐震補強が各所で行われているが、主に採用されている工法は、以下の4種類である。

- 鋼板巻立て工法…JR、首都高速道路公団
- 鉄筋コンクリート巻立て工法…主として日本道路公団
- 鉄筋コンクリート・鋼板巻立て併用工法
…主として阪神高速道路公団
- 炭素繊維巻立て工法

…日本道路公団が鉄筋の段落し箇所を採用

これらの工法の概要について以下に述べる。

(1)鋼板巻立て工法

鋼板巻立て工法は、既設の橋脚等に厚さ6mm~12mm程度の鋼板を巻立てて、補強する方法である。鋼板巻立て工法には、鋼板を帯鉄筋とみなして補強する場合と、鋼板を帯鉄筋と同時に主鉄筋と考えて補強する場合がある。

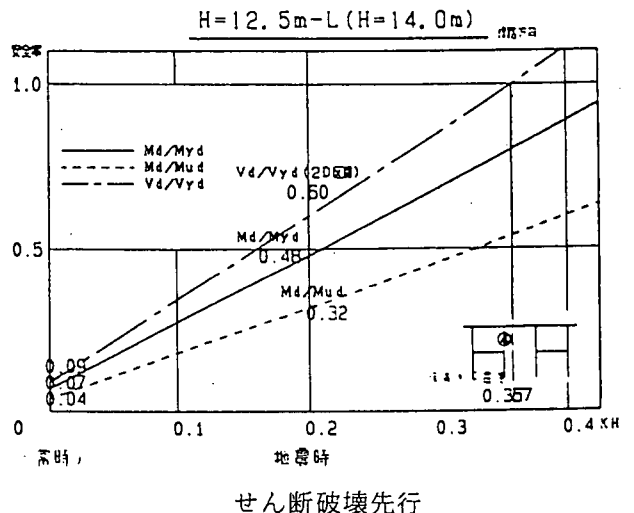
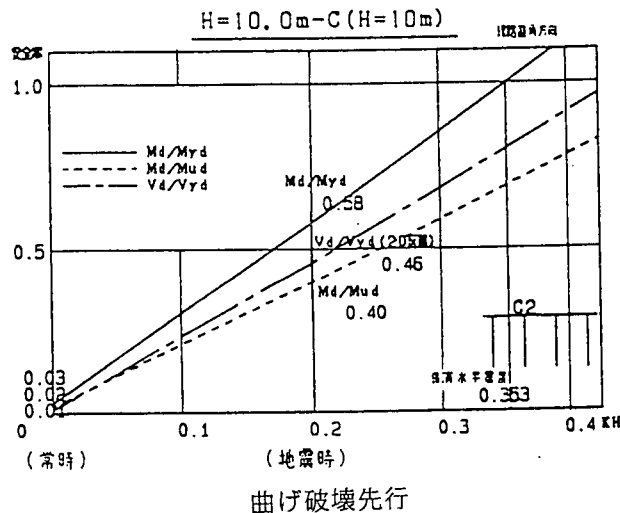


図-III-3 耐震評価の例

a) 鋼板を帯鉄筋とみなした場合

巻立てた鋼板を帯鉄筋とみなした場合の効果は、せん断耐力を向上させ、曲げ破壊先行型の部材とすることができる。言い換えれば、脆性的な破壊を防ぐことができる。

既設橋脚と巻立てた鋼板の間隙には一般に無収縮モルタルを注入する。円形断面あるいは正方形に近い矩形断面の場合には、せん断補強鉄筋としての効果及び横拘束効果が期待できる程度の充填がな

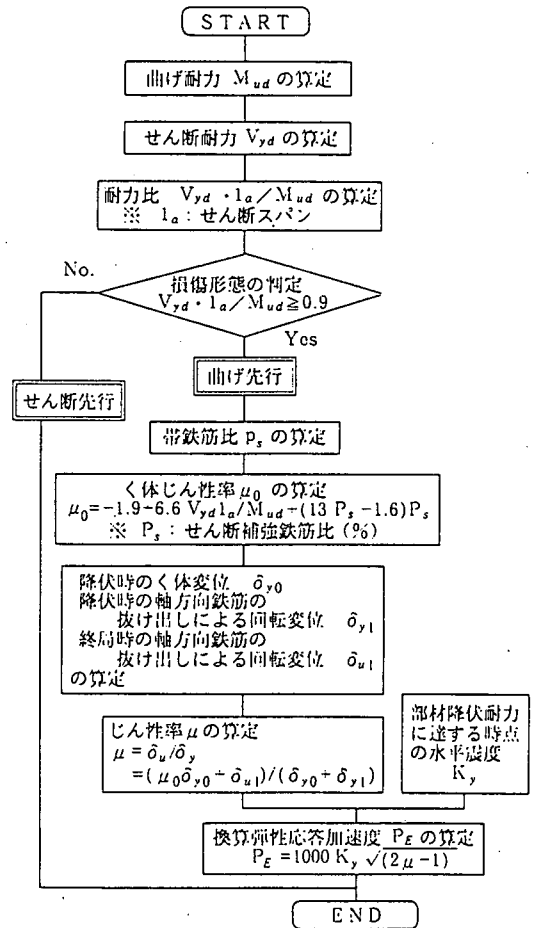


図-III-2 耐震評価の基本的な流れ

されれば、ずれ止め等のアンカーは必要としない。壁式橋脚のような長短辺比の大きな断面については、長辺中間部にせん断補強鉄筋としての機能及び横拘束効果を確保するために中間帯鉄筋を配置する必要がある。

b) 鋼板を帯鉄筋と同時に主鉄筋とみなす場合

帯鉄筋としての効果はこの場合も、「鋼板を帯鉄筋とみなした場合」と同様である。更に、主鉄筋としての効果を期待するのであるから、巻立てた鋼板と既設橋脚のコンクリート面が平面保持され、ずれが生じないようエポキシ樹脂等により一体化させることが必要である。しかし、単純に鋼板と既設橋脚のコンクリート面とを平面保持させるだけでは、曲げ耐力が大きくなり過ぎて基礎に負担がかかったり、破壊形式がせん断破壊先行型にシフトしたりする。既設橋脚躯体を鋼板で巻立て、エポキシ樹脂等により一体化させるとともに、アンカー筋を通じて鋼板をフーチングに定着させ、フーチングに埋め込まれたアンカーの断面積をもって主鉄筋として考慮する鋼板の断面積とする工法がある。アンカー筋の断面積を制御することによって必要な曲げ耐力を得ることができることから「曲げ耐力制御式鋼板巻立て工法」(図-III-4~5を参照のこと)と呼ばれている。

(2) 鉄筋コンクリート巻立て工法

RC巻立て工法は、既設橋脚をRC部材で増厚する工法である。このためこの工法で補強した場合には、補強された橋脚は靱性の向上より曲げ耐力を向上させることになる。

RC巻立て工法を用いる際の注意事項としては、巻立てたRC部材と既設の橋脚断面とが一体となるよう巻立て部の主鉄筋は確実にフーチングに定着する必要がある(図-III-6参照)。また、巻立て部の帯鉄筋は主鉄筋を拘束するように配置するとともに必要に応じて中間帯鉄筋を配置する必要がある。巻立てるRC部分の最小厚さは、鉄筋の配置、コンクリートの充填などを考えると250mm程度となる。巻立て厚さが大きくなると荷重増による基礎への影響や建築限界に対する影響などが問題となってくる。

(3) 鉄筋コンクリート・鋼板巻立て併用工法

RC巻立てと鋼板巻立てを併用した工法は、RCの巻立てによって曲げ耐力を向上させ、鋼板巻立てによってせん断耐力を向上させるものである。このため、橋脚部位毎に両者を使い分けることも可能である。例えば、段落とし部については鋼板で巻立てを行い、橋脚基部についてはRC巻立てを行う場合、あるいは橋脚全体にRC巻立てを行い、必要な帯鉄筋相当分を鋼板巻立てによって補強するなどの方法が考えられる。

(4) 炭素繊維巻立て工法

炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維などのいわゆる新素材を用いて補強する工法も開発されている。これらの新素材は、各々の物性は異なるもののいずれも軽量であるため、補強による橋脚自重の増加、断面の増加は殆ど無視することができる。施工性もよい。

なかでも、炭素繊維は高強度・高弾性であるため、補強材料として多く用いられている。炭素繊維の使用法としては、図-III-7に示すように、炭素繊維シートを用いる方法や炭素繊維ストランドを用いる方法がある。また、繊維補強をおこなう場合には、貼り付ける繊維の方向により、補強目的を選択することが可能である。すなわ

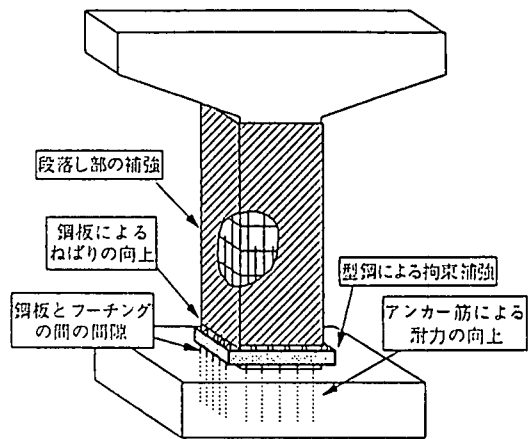
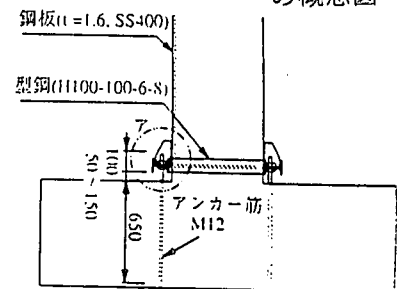


図-III-4 曲げ耐力制御式鋼板巻立て工法の概念図



“ア”詳細

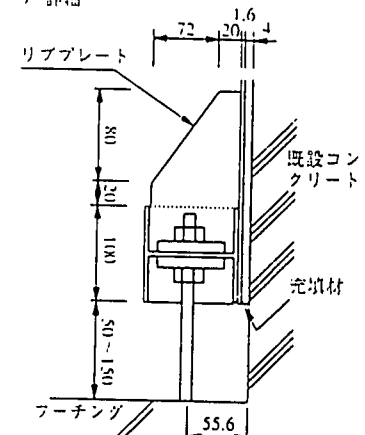


図-III-5 アンカー部の構造

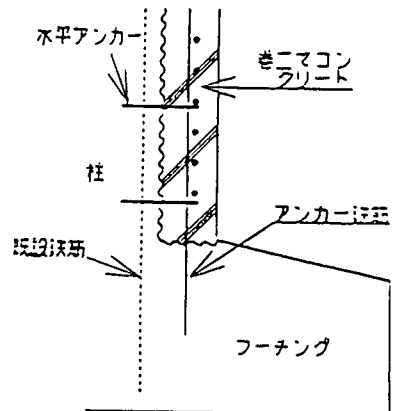


図-III-6 RC巻立て工法

ち、主鉄筋方向に貼り付けることによって曲げ耐力の向上が図れ、帯鉄筋方向に貼り付けることによってせん断耐力の補強を行うことができる。

IV. 今後の課題

兵庫県南部地震で被災したコンクリート構造物の多くは、昭和40年代に設計施工されたものである。当時の技術レベルではじん性などの非線形領域における部材の挙動について

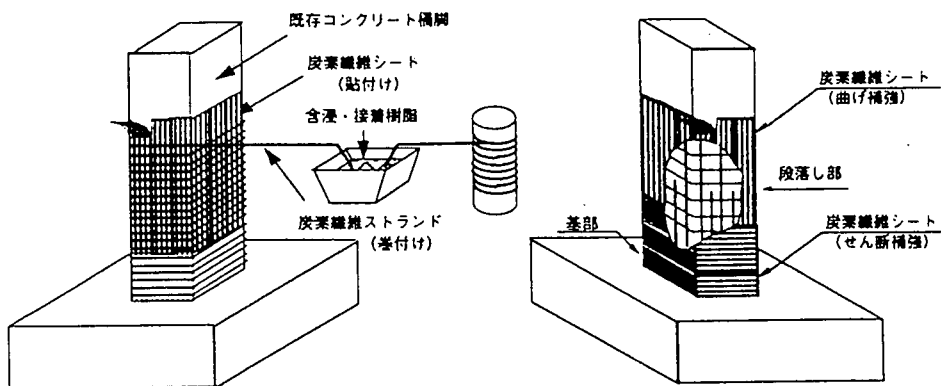


図-III-7 炭素繊維補強工法

十分に把握されてはいなかった。また、昭和10年代に造られた三宮駅付近の高架橋の被害がそれほど大きくないことに象徴される「施工の入念さ」という点においても十分ではなかった。

昭和53年6月の宮城県沖地震を契機に昭和54年に耐震設計指針(案)が定められ、昭和58年には設計標準が改訂された。短絡的ではあるが、これらを受けて、今回被災した構造物に何らかの耐震補強がなされていれば、崩壊などの大被害は防ぐことができたと思われる。実際にはかなり難しいことではあるが、新しい知見が盛り込まれた新基準が提示されたとき、その知見の重要性、構造物の側でのプライオリティーなどを判断しながら、予算の許す範囲でそれらの新しい知見を既設構造物に反映させていくことが必要であると思われる。

参考文献

- 1) コンクリート委員会：震災を受けたRCラーメン高架橋の耐震性能と損傷に関する検討結果、土木学会誌 1996.3 Vol.81
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・コンクリート構造物(平成4年10月)
- 3) 日本国有鉄道：建造物設計標準(昭和58年2月)
- 4) 川島一彦他：曲げ耐力制御式鋼板巻立て工法による鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強、土木技術資料 37-12(1995)
- 5) JCI近畿支部：土木コンクリート構造物の地震対策に関する研究委員会中間報告書、1995.12