

# 次世代高性能・高機能耐震構造に関する実験研究

蓮上茂樹\* 足立幸郎\*\* 星隈順一\*\*\*

## 1. はじめに

構造物の耐震設計は、一般に鉄筋コンクリートや鋼材を用いて設計で想定する地震力に耐えられるように構造物を造ることを基本に行われる。しかしながら、大規模地震に対して全く被害を生じないようにどこまでも構造物を強く造ることは困難であり、また、経済的な観点からも合理的ではない。このため、一般に、希に起こるような大規模地震に対しては想定する部材に適切に損傷を誘導し、ここで確実に振動エネルギーを吸収することにより、大規模地震による強い地震力に対して構造全体としての所要の耐震性能を確保するよう耐震設計が行われる。したがって、大規模地震時には何らかの損傷が構造物に生じ得ることを考慮することから、甚大な地震被害を受けにくく、あるいは、被害を受けたとしても地震後の診断・修復が容易な構造物が実現できれば地震後の早期の機能回復に有効と考えられる。

本文では、地震被害を受けにくい構造や、地震後に容易に被害状況を診断でき、さらに容易に復旧が可能な次世代高性能・高機能耐震構造の可能性について整理するとともに、このうち、耐震設計上重要な変形性能の高性能化及び地震後に簡易かつ精度よく損傷程度を診断することが可能な自己診断構造の1つについて実験的に検討した結果を報告する。

## 2. 次世代高性能・高機能耐震構造の可能性

### (1) 基本的な考え方

地震に対する高性能化・高機能化といつてもいろいろな観点が考えられるが、本研究では以下の3点を基本的なポイントとして設定した<sup>1),2)</sup>。

なお、ここでは高性能と高機能の用語としては、それぞれ、耐力や変形性能などの力学的特性の向上、および、自己診断などの新たな機能の付加を意味するものとして用いている。

### 1) 地震被害を受けない、あるいは、受けにくい耐震構造(弾性限界・終局限界の高性能化)

### 2) 地震被害を自己検知する耐震構造(自己診断機能)

### 3) 地震被害を受けても容易に復旧可能な耐震構造(自己修復機能)

このような観点で従来にはない高性能・高機能耐震構造の可能性について例を挙げてみると、表-1のような構造が考えられる。この中には、高強度材料やセンサー機能などを有するインテリジェント材料を活用する等の新しい高性能材料を用いて高性能化・高機能化を図るという材料面の考え方と、構造的に高性能化・高機能化を図るという構造面の考え方がある。

### (2) 地震被害を受けにくい耐震構造

構造物が地震被害を受けにくくする方法としては、その力学的特性から、一般に、①耐力・変形性能等の構造特性を向上させる、②作用する慣性力を低減する、方法が考えられる。

構造部材の例として、鉄筋コンクリート柱の力学的特性を考えてみる。曲げ破壊型の鉄筋コンクリート柱の水平耐力と水平変位との関係は、図-1に示すように弾性状態から軸方向鉄筋の降伏により水平抵抗が一定になり、その後、かぶりコンクリートの剥離やコアコンクリートの破壊、軸方向鉄筋の座屈・破断等により水平耐力が低下するというようく、損傷の進展に対応して水平耐力が変化する。

このような鉄筋コンクリート柱の耐震性を高性能化しようと考えると、断面の大きさなどの寸法を変えることなく、図-2に示すように橋脚の水平耐力を大幅に大きくしたり、じん性を大きくすること等により高性能化を図る方法が考えられる。

こうした高性能化を図るための方法の1つとしては、高強度材料や高弹性材料等の高性能材料の活用がある。ここで、どの耐震性能の向上にポイントを置くかによって高性能材料の選択、配置方法が異なってくることになり、例えば、表-1に示したように高耐力構造、高弹性構造、高剛性構造、超弹性構造、高じん性構造などが考えられる。

一方、地震の影響を低減する構造の代表例としては免震構造があり、現状の免震構造をさらに高

表-1 次世代高性能・高機能耐震構造の可能性

分類	特性・性能	高性能・高機能耐震構造の構造イメージ
地震被害を受けるないあるいは受けにくい耐震構造	構造の高性能化	高耐力構造 ・高強度材料(高強度鉄筋、PC鋼材、高強度コンクリート等)を用いた高曲げ耐力構造、高せん断耐力構造
		高弹性構造・高剛性構造 ・PC鋼材等弹性範囲の広い高強度材料を用いた弹性変形領域の広い構造 ・高弹性特性を有する高性能材料を用いた高剛性構造
		超弹性構造(弹性変形吸収構造) ・地震時の変形を弹性変形吸収部材、弹性変形吸収装置により吸収する超弹性構造
	地震の影響の低減	高じん性構造 ・圧縮側材料(コンクリート等)の高拘束と引張側材料の伸び性能・低サイクル疲労特性を高性能化した高じん性構造 ・損傷を分散させ、特定の箇所での損傷を低減させる損傷分散制御構造
		地震時慣性力の影響の低減(免震構造) ・高免震構造(高性能すべりタイプ支承等を用いた高免震構造等) ・桁あるいは橋台間等で緩衝構造を介して衝突を積極的に発生させることにより桁の振動エネルギーを吸収する衝突免震構造
		地震時地盤変位の影響の低減(変位免震構造) ・連結桁の伸縮上部構造(伸縮桁構造) ・高性能伸縮構造 ・大変位に対する支持機構を有する構造
地震被害を自己検知する耐震構造	自己診断構造	センサーネットワークを配置したモニタリング構造 ・センサー材料と構造材料の両特性を有するインテリジェント材料(CFGFRP、TRIP鋼等)を活用した構造
容易に復旧可能な耐震構造	高復元性構造	・残留変形を小さくすることが可能な高復元性構造 ・残留変形を小さくすることが可能な2次剛性の大きい非線形履歴特性を有する構造 ・損傷を分散させ、特定の箇所での損傷を低減させる損傷分散制御構造 ・残留変形を自己復元可能なインテリジェント材料(形状記憶合金等)を用いた構造

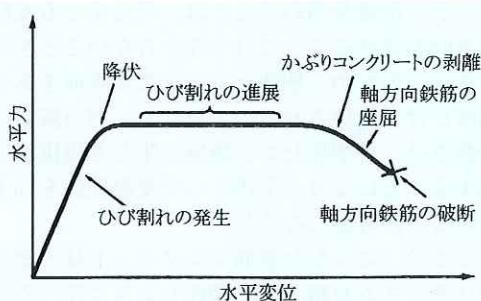


図-1 鉄筋コンクリート柱の水平耐力と水平変位の関係

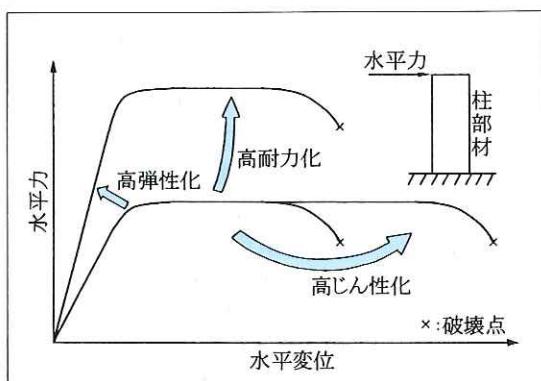


図-2 鉄筋コンクリート柱の高性能化

性能化を図ることが考えられる。免震構造においては、例えば橋梁構造物では、長周期化に伴う相対変位の増加や常時の使用性の問題などのために支承にはある程度の初期剛性や2次剛性が必要とされること、想定外の地震力が作用しても急激な破壊が生じにくい性能が必要なこと、支承空間やメンテナンスの制約などから、従来は主としてゴム製の免震支承が一般的に用いられてきている。しかしながら、例えば、摩擦型の免震構造の場合には、理想的には摩擦係数から定まる水平力以上は下部構造に伝達しないため水平力の制御という観点では優れている点も多く、上記の他の性能も満足できるような配慮を行うことによりさらに発展が見込めるものと考える。

また、隣接する桁同士や桁と橋台などの間でエネルギー吸収性能を有する緩衝構造を介して適切に衝突させ、これによって橋桁の振動を低減し、結果として下部構造に慣性力を伝達させないという衝突免震構造も考えられる。

さらに、構造物位置において大規模な地盤変位が生じた場合でも致命的な被害を防止することを目的とする変位免震構造も考えられる。地盤の変位は、断層条件によって上下、水平を始めとする

様々な方向に生じ得るが、あるレベル以下の相対変位に対しては、変位に応じて桁が伸び縮みする伸縮桁や、桁が落下するのを防止できる高性能伸縮構造・支持機構などが考えられる。

#### (3) 地震被害を自己検知する耐震構造

例えば、橋梁をはじめとする道路施設を考えると、地震発生直後は、まず、道路の通行安全性を確認するために、緊急パトロール調査などにより道路施設の被害の概要を早急に把握することが必要とされる。地震直後のこの段階では、できる限り短時間で重要な箇所を中心に道路施設の被害の概要を把握するとともに、大きな2次災害につながる危険性があると認められる箇所を判定することが必要とされる。

従来は、路面の大きな亀裂や欠壊、橋脚の大きな傾斜やひび割れなど目視で明らかに確認できる大きな損傷を中心に調査し、これをもとに被災度を把握し、必要に応じて通行止めなどの緊急措置を講じる方法が用いられてきている。しかしながら、構造物が複雑化したり、また、夜間などで目視調査が困難な場合や地中部の構造部分などで地表面からの被災の把握が困難な場合がある。また、被害度の判定精度についても、あくまで外観からの判定が基本となるため、ある範囲での主観的な被災度の判定とならざるを得ない。

このような場合には、図-3に示すように構造物にセンサーを埋め込んでおき、地震後の緊急調査において簡単なテスターのようなものをもつていくだけで誰でも被災度を確実に、かつ、精度よく判定できるようになれば地震被害調査に有効と考えられる。

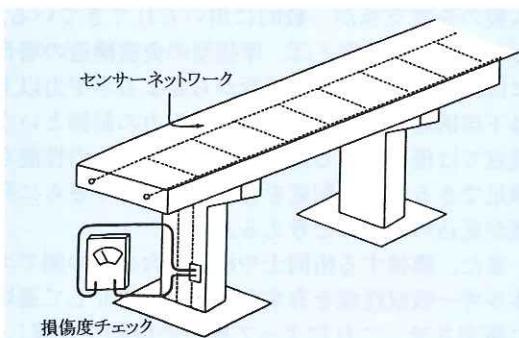


図-3 センサーネットワークと被災調査

#### (4) 地震被害を受けても容易に復旧可能な耐震構造

早期に復旧が可能な耐震構造としては、高復元性能を付与した構造や、図-2に示した履歴特性において降伏以降の2次剛性を大きくした履歴特性を付与するなど、耐力の低下の度合いが少ない履

歴特性を有するように部材の履歴復元力特性を適切に制御した構造により、地震後の残留変位を小さくする構造が考えられる。履歴復元力特性の制御方法としては、鉄筋コンクリート構造では、例えば、PC鋼材等の高強度材料等の活用や鋼材の配置方法などにより様々な特性を創造することが可能である。

さらに、振動制御を図るダンパー機能と自己復元機能を有する形状記憶合金ダンパーを用いるなど、地震時には橋桁の振動エネルギーを吸収するとともに、橋桁に残留変位が残ってもこれを簡単に修復できる自己修復機能を有する材料を活用する方法などが考えられる<sup>3),4)</sup>。

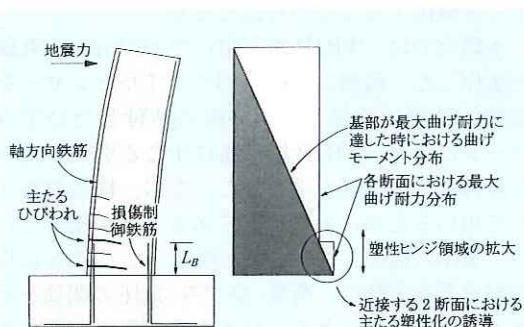
### 3. 鉄筋コンクリート柱の損傷メカニズムを考慮した変形性能の向上に関する実験検討

#### (1) 損傷メカニズムと変形性能

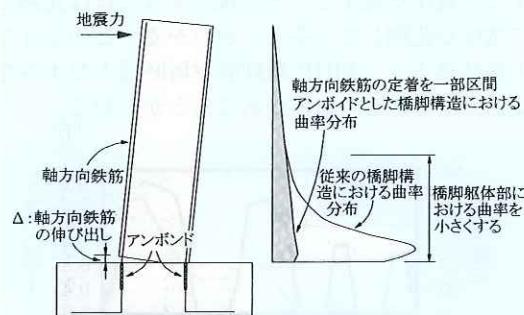
鉄筋コンクリート柱の変形性能を高める構造的な方策としては、塑性ヒンジ領域のコンクリートの破壊を遅らせることを目的に帶鉄筋や中間帶鉄筋量を増加させる方法が一般に用いられる。しかしながら、ある程度以上にコンクリートの拘束を高めると、逆に損傷が生じる領域がある断面に集中するという傾向を有する<sup>5)</sup>。これは、コンクリートの拘束を高めることは、どこまでも変形性能を向上させることにはつながらないことを意味する。このため、塑性ヒンジとなる断面をある一箇所だけに集中させるのではなく、別の断面にも分散させ、各塑性ヒンジ領域に生じる損傷度を低減することにより、全体として変形性能を向上させることができる<sup>6)</sup>。

ここで、こうした鉄筋コンクリート柱の塑性変形メカニズムを踏まえ、塑性ヒンジに生じる損傷レベルの低減を図ることを目的とした実験検討を行い従来構造との比較を行った。実験を行った構造としては、塑性ヒンジ領域を2断面に設けるようにした構造、軸方向鉄筋のフーチングへの定着を一部区間を定着させない(以下、アンボンドと呼ぶ)ことにより、軸方向鉄筋の伸び出しに伴う基部の回転を生じ易くした構造の2通りとした。

図-4は、このように損傷メカニズムを考慮して変形性能の向上を図る構造を示したものである。ここに、柱部材の中に損傷制御鉄筋を配置することにより塑性ヒンジ領域を基部と損傷制御鉄筋の位置近傍に誘導することにより損傷を分散する構造と、軸方向鉄筋の伸び出しを容易にしここに変形性能を分散する構造を示している。



(1) 損傷制御鉄筋による損傷制御

(2) 軸方向鉄筋の伸び出しによる損傷制御  
図-4 变形性能に向上を図る損傷分散構造

## (2) 模型実験と載荷方法

実験に用いた供試体は、図-5に示す3体である。断面は、いずれも一辺が600mmの正方形であり、基部から載荷点までの高さは3010mm、フーチング厚さは700mmである。実験パラメータは、軸

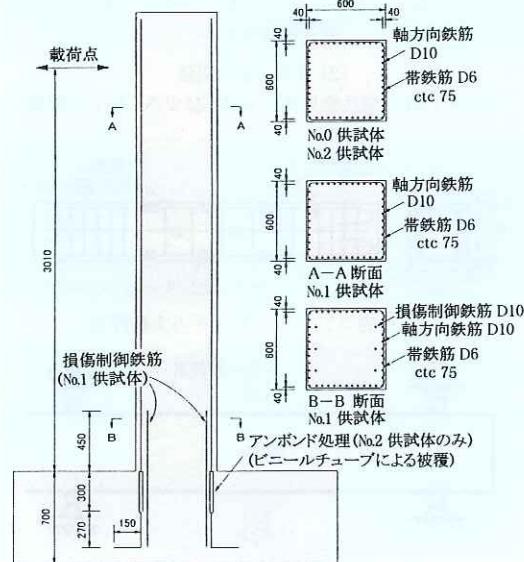


図-5 模型供試体の諸元

方向鉄筋のみである。供試体0は、基準となる供試体であり、軸方向鉄筋としてD10を48本配筋している。供試体1は、供試体0において主たる塑性化断面が基部から150mm付近の断面であったことから、その断面よりも300mm上方にも塑性化断面を誘導するように損傷制御鉄筋6本を450mmだけ延ばして途中定着した構造である。一方、供試体2は、軸方向鉄筋の配筋は供試体0と同一とし、フーチング上面から300mmの深さまで全ての軸方向鉄筋にビニールチューブを被覆してアンボンド処理を施したものである。なお、いずれの供試体も帶鉄筋としてはD6の鉄筋を75mm間隔で配置した。

載荷は、降伏変位の整数倍毎に正負交番で行い、各載荷ステップにおける繰返し回数は3回とした。なお、軸力としては、 $1N/mm^2$ に相当する軸力を載荷した。

## (3) 実験結果

図-6は、3体の実験より得られた載荷点における水平力と水平変位の包絡線を示したものである。また、図-7は、基準供試体0においてかぶりコンクリートがはらみだし始めた $6\delta_y$ 載荷における各供試体の損傷状況を比較したものである。

供試体0は、 $5\delta_y$ 載荷までは水平ひびわれ程度の損傷であったが、 $6\delta_y$ 載荷により基部から約300mmの範囲においてかぶりコンクリートのはらみだしが生じ始め、水平力の低下が生じた。

供試体1は、 $7\delta_y$ 載荷までは水平ひびわれ程度であり、 $8\delta_y$ で2断面でかぶりコンクリートのはらみだしが生じはじめ、供試体0に比較すると $2\delta_y$ 載荷分变形性能が大きくなっている。供試体2は、 $5\delta_y$ 載荷までは基部の付け根で変形しており、橋脚軀体部にはほとんど損傷が生じていなかった。 $6\delta_y$ でかぶりコンクリートが剥離はじめ、 $7\delta_y$ で水平力の低下が生じた。

このように、塑性化を生じる断面を軸方向鉄筋

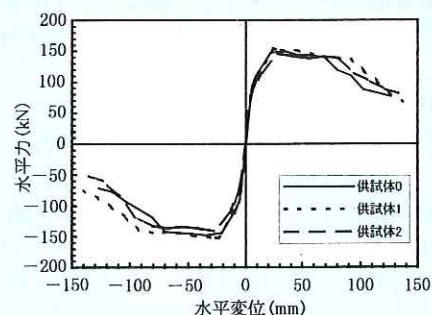
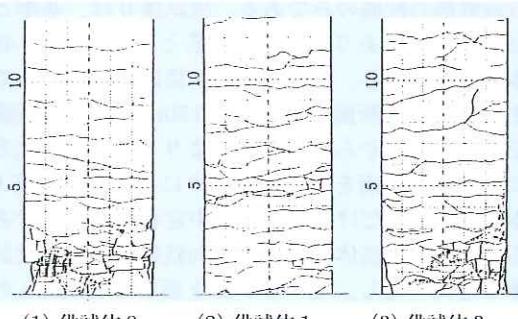


図-6 水平力-水平変位の包絡線



(1) 供試体0 (2) 供試体1 (3) 供試体3

図-7  $6\delta_y$  載荷時における損傷状況

の配置方法で制御することにより、柱軸体部に生じる損傷レベルの制御が可能となり、従来構造よりも変形性能を高めることが可能であることがわかる。また、軸方向鉄筋の伸び出しを有効に活用すれば、柱軸体に損傷等をほとんど生じさせずに塑性変形性能を発揮できることも可能になることがわかる。

#### 4. ひずみ記憶センサーによる地震被害検知機能に関する模型載荷実験

##### (1) ひずみ記憶センサー

前述のように、従来構造物の被災度の判定は、主として外観の損傷度から判定する方法が用いられてきた。この方法ではある程度専門的な判断が求められるとともに、地中部で被災の直接の確認が困難な場合は判断が困難となる。このため、構造物に何らかのセンサーをあらかじめ設置しておき、地震直後にこれをチェックすることにより、地震時に構造物がどの程度の最大応答が生じたかを検知することができれば被災の判定がより簡易に、また、客観的に実施することが可能となる。

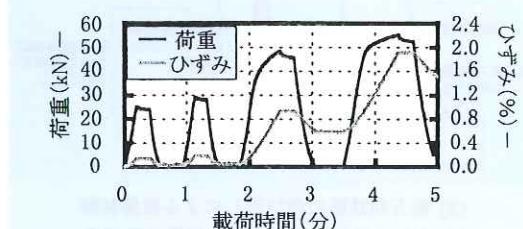
構造物にセンサーをとりつけ當時モニタリングすることができればよいが、もし、當時のモニタリングを必要としない方法があれば、より簡単なシステムとして構築可能となる。ここでは、構造材料としての性能を有するとともに、最大ひずみを記憶可能なセンサーとして機能するTRIP鋼鉄筋を対象に、その損傷検出特性に関して実験的に検討した<sup>7)</sup>。

##### (2) TRIP鋼とTRIP鋼鉄筋のひずみ検知特性

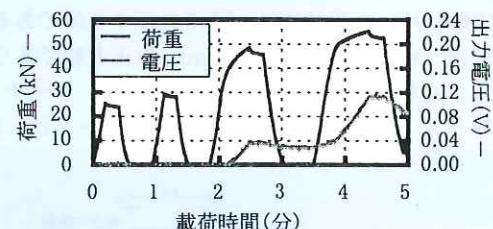
TRIP鋼 (Transformation-induced-plasticity steel) は Fe-Cr 系のステンレス特殊合金であり、外部応力に伴うひずみの増加によって結晶構造が非磁性から強磁性に変態する。さらに、一旦変態した結晶構造は応力を除荷しても元の結晶構造には戻らない特性をもつ。したがって、磁気の変化を計測することによって、過去に経験した最大ひ

ずみを検出することが可能となる。

本研究では、TRIP 鋼を用いて  $\phi 13\text{mm}$  の丸鋼を製作した。最初に、円筒形のコイルセンサーを鉄筋の外側に設置し、同位置に貼付したひずみゲージにより、TRIP 鋼鉄筋に生じる引張ひずみと誘導電圧の関係を調査した。なお、構造材料として用いるためには異形筋であることが望ましいが、製作の都合上ここでは丸鋼とした。図-8 に片振幅交番載荷時の、荷重-ひずみ-電圧の関係を示す。荷重の変動とともにひずみ及び電圧が変化することがわかる。また、ひずみが概ね 0.2% に達すると電圧が発生し、その後ひずみにほぼ比例して電圧が比例していることがわかる。このような実験結果より、TRIP 鋼鉄筋が履歴最大ひずみを記憶計測できる可能性があることがわかる。

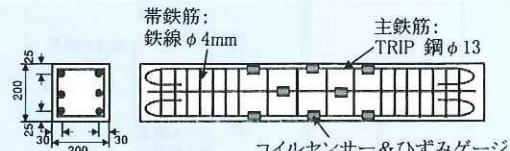


(1) 荷重-ひずみ関係



(2) 荷重-電圧関係

図-8 TRIP 鋼鉄筋単体の荷重-ひずみ-電圧の関係



(1) 鉄筋コンクリート柱の実験模型

(2) 載荷方法の概念図  
図-9 鉄筋コンクリート柱の載荷実験

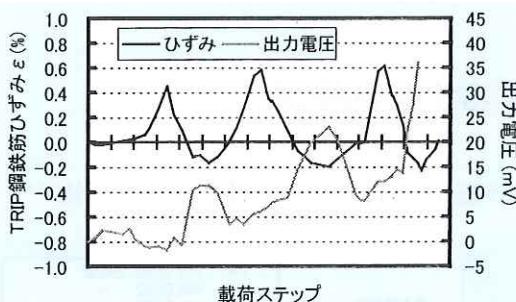


図-10 TRIP 鋼鉄筋のひずみ-電圧関係

### (3) TRIP 鋼鉄筋を用いたコンクリート構造の損傷診断実験

TRIP 鋼をコンクリート構造の鉄筋に用いた場合において、TRIP 鋼が同様な損傷診断機能を有するかについて確認を行うため、TRIP 鋼鉄筋を用いたコンクリートはりの正負交番載荷実験を行った。コンクリートはり模型の配筋図及び載荷方法を図-9 に示す。本実験では、交番荷重を載荷させたため、TRIP 鋼鉄筋には引張力と圧縮力が作用する。図-10 には、支間中央部のひずみと出力電圧との関係を示した。ひずみは交番状に発生している。また、TRIP 鋼の電圧は、圧縮ひずみを受けた場合に主たる電圧の上昇が生じ、除荷と共に電圧の減少が生じるが、その後引張ひずみが生じるようになると電圧が上昇していることがわかる。このように出力電圧は、引張及び圧縮の累積ひずみ量との関係が見られ、TRIP 鋼鉄筋を構造材料かつ損傷診断センサーとして用いた場合、構造物の累積ひずみを診断できる可能性があることがわかる。

## 4. まとめ

高性能・高機能耐震構造の可能性についてまとめるとともに、このうち、変形性能の高性能化及び被害の自己診断構造に関して実験的に検討した。以上の結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 変形性能の高性能化を図ることを目的に、鉄筋コンクリート柱を対象に損傷を橋脚の複数断面に分散する構造、軸方向鉄筋のアンカ一部に分散する構造の 2 種類を考案した。実験的な検討によれば、2 つの構造ともに、従来の基本構造に比較して同程度の損傷が生じる変形を大きくすることが可能になるとともに、変形性能を向上できる可能性が示された。

(2) TRIP 鋼鉄筋単体の引張試験によれば、引張応力のみが作用する場合には、磁気特性を計測することにより、最大ひずみを診断することが可能であることが示された。また、TRIP 鋼鉄筋を用いた鉄筋コンクリートはり模型の正負交番載荷実験によれば、磁気特性を計測することにより、TRIP 鋼の累積ひずみを診断することが可能であることが示された。

今後、こうした高性能、高機能耐震構造の実用化に向けた検討を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 運上茂樹：インテリジェント耐震構造技術、ベース設計資料（土木編）、平成 10 年 3 月
- 2) 運上茂樹：高性能耐震構造に関する一考察、土木学会第 3 回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム、1999 年 12 月
- 3) 足立幸郎、運上茂樹、近藤益央：形状記憶合金の橋梁ダンパーへの適用性に関する研究、土木技術資料、Vol.40, No.10, 1998 年 10 月
- 4) Y. Adachi, S. Unjoh : Development of Shape Memory Alloy Damper for Intelligent Bridge Systems, Proc. of 6th Smart Structures and Materials, Newport Beach, March 1999.
- 5) (社) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編、平成 8 年 12 月
- 6) 星隈順一、運上茂樹、長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の耐震性能の向上策に関する実験的研究、土木学会第 1 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム、2000 年 3 月
- 7) 足立幸郎、運上茂樹：自己診断機能を有する構造材料を用いたインテリジェント耐震構造に関する研究、土木学会年次学術講演会、2000 年 9 月

運上茂樹\*



建設省土木研究所  
耐震技術センター  
耐震研究室長、工博  
Dr.Shigeki UNJOH

足立幸郎\*\*



阪神高速道路公團工務部設計課  
(前 耐震研究室主任研究員)  
Yukio ADACHI

星隈順一\*\*\*



建設省土木研究所  
耐震技術センター  
耐震研究室主任研究員、工博  
Dr.junichi HOSHIKUMA