

土木分野の地震対策技術

Earthquake-resistant Technologies for Civil Engineering Structures

山野辺 慎一 河野 哲也 曾我部 直樹

I. はじめに

我が国は世界でも有数の地震国であり、橋梁や高架橋などの鉄筋コンクリート（RC）構造物の耐震性能の確保は、サステナブルな社会基盤を創る上で必須の課題である。社会資本整備に向けられる財源が無尽蔵であれば、地震に対して無損傷となる構造物を建設することも技術的には可能である。しかし、財源だけでなく、建設作業人口の減少や高齢化といった問題もあり、耐震性能を確保しながら効率よく社会資本を整備することが、ますます重要になっている。

本稿では、当社土木部門の耐震技術に関する取組みとして、高耐震性 RC 橋脚「HiDuc 橋脚構造」、コンクリート製ダンパ「円弧拘束ダンパ」、および既設の地中 RC 構造物の耐震補強工法「CCb 工法」を概説する。

II. 高耐震性 RC 橋脚「HiDuc 橋脚構造」

1. 開発の背景

近年、各種のセメント系材料において大きな革新があり、高性能材料が数多く開発されている。こうした材料は、その製造量が少ないため、強度で標準化した単価についてみても従来の材料よりもかなり割高であり、現時点での土木分野における活用は極めて限定的である。構造技術者は、新たな視点から新材料を活用し、建設コストの削減を図りながら、要求される耐震性能を満たす構造やその特性に基づいた設計法を開発する必要がある。

そうした課題に対する当社の成果の一つが、Fig.1 に示す高耐震性橋脚（以下、HiDuc 橋脚¹⁾）である。本構造のコンセプトは、塑性ヒンジ部のかぶり部分だけを超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）製のプレキャスト（Pc）型枠で高強度化し、地震時における曲げ圧縮をかぶり部分に負担させることでコアコンクリートを無損傷として、橋脚全体の耐震性能や変形性能を確保することにある。また、UFC 製 Pca 型枠に設けた水平目地により地震時の曲げひび割れを分散し、特定の断面への損傷の集中を防ぐことで、高い変形性能を実現している。

Fig.2 に、従来構造と HiDuc 構造の橋脚模型試験体の正負交番載荷実験の結果を示す。従来構造の No.1 試験体は、変位 65 mm で軸方向鉄筋の座屈に伴い耐力が大幅に低下し、かぶりコンクリートの剥落を伴い破壊しているが、HiDuc 構造の No.2 試験体は、鉄筋降伏後、変位 105 mm まで安定して耐力が保持されており、剥落などは生じておらず、終局状態においても鉛直軸力を負担できる損傷であった。

2. HiDuc 橋脚の特徴

HiDuc 橋脚は、塑性ヒンジ部のかぶり部分を超高強度化すると同時に、損傷を分散させるという、確実に明快な構造となっている。それによる従来の RC 橋脚との大きな違いは、地震後のかぶりコンクリートの状態にある。従来構造では、終局状態においてかぶりコンクリートの剥落を想定しているのに対し、本構造では、終局時に

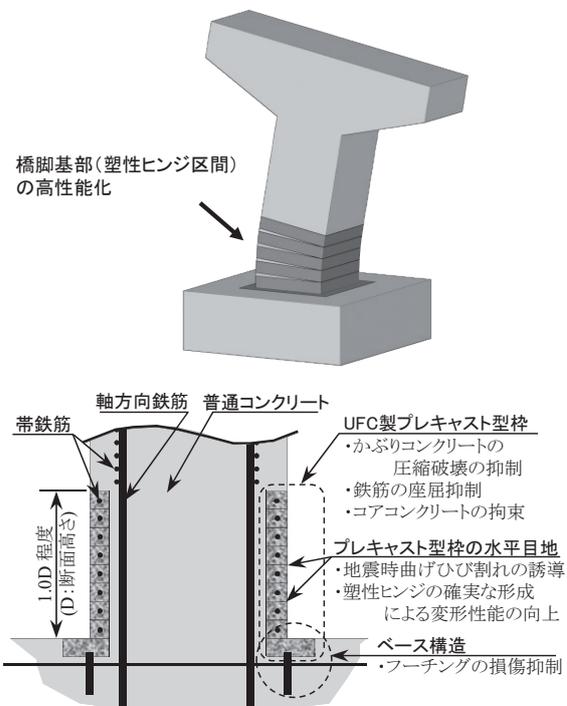
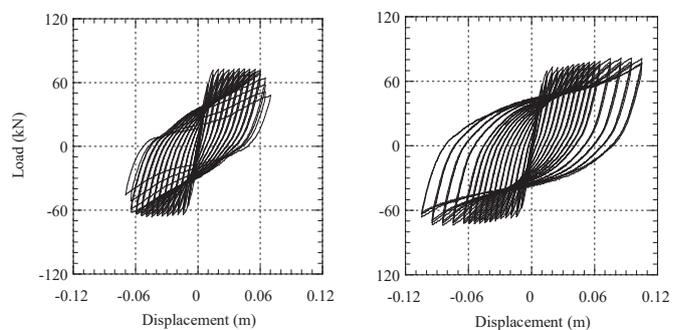


Fig.1 HiDuc 橋脚の概要
(Overview of HiDuc Pier)



No.1 試験体 No.2 試験体

Fig.2 終局状態と荷重-変形関係の比較
(Comparison of Ultimate State and Load-displacement Hysteresis)

も剥落を防止することが可能である。

これにより、橋脚が従来構造を大きく上回る安定した変形性能を示すとともに、地震後の補修作業が鉄筋に対する耐久性の確保を目的としたひび割れ注入に止まり、従来構造のような、脆弱なかぶりコンクリートのはつりや断面修復作業が不要となる。

3. 適用実績と今後の展開

これまで種々の載荷実験を行い、各種の特性を確認しながら細部構造の改良を重ねてきた。また、実験の再現解析により解析手法の妥当性を検証した上で、各種の諸元が橋脚全体の変形性能、耐震性能に及ぼす影響について検討し、同橋脚の設計法を開発して、阪神高速大和川線三宅ジャンクションに初めて適用した (Photo 1, 2)。

HiDuc 橋脚の研究開発は、RC 橋脚の変形性能の向上と地震後の損傷低減という課題に対して、従来構造の延長ではなく、現時点で適用可能な材料・施工技術を見直して考案する必要があるとの認識より始めたものである。そのための構造を考案し、基本特性を実験および解析により確認し、その設計法を提案した。また、実適用に当たっては、阪神高速道路(株)殿のご指導のもと、現場条件を踏まえた設計方針の協議を行い、細部構造や製作・施工方法について検討を重ね、実橋へ適用した。

今後は、本構造の特性を考慮したより合理的な橋脚仕様での実適用を展開していきたい。



Photo 1 PCa 型枠の建込み
(Installation of PCa Formwork)



Photo 2 橋脚の施工完了
(Completion of Pier)

Ⅲ. 後施工せん断補強工法「CCb 工法」

1. 開発の背景

各種の RC 構造物の設計基準は 1980 年前後に大きく改訂されており、それよりも古い基準で設計されたものの中には、せん断補強鉄筋が少ないために、大規模地震時にせん断破壊する可能性のあるものが存在している。

発電施設の取・放水路や上下水道の貯水槽をはじめとするボックスカルバートや開水路などの地下構造物の耐震補強工事では、掘削を行って躯体をオープンに晒すことが困難なため、通常は構造物の内側からのみの施工となる。

こうした背景から、供用中の既設 RC 地下構造物に対して、不足しているせん断補強鉄筋を構造物の内空側から設置する「後施工のせん断補強工法」がいくつか開発されている (Fig. 3)。その中で、当社グループが開発した工法が、セラミックキャップバー工法^{2),3)} (以下、CCb 工法) である。

2. 工法の概要と特徴

CCb 工法は、既設の地下構造物を削孔し、両端にセラミック製の定着体を設置したねじ鉄筋を後施工型のせん断補強鉄筋として内空から挿入して、グラウトにより一体化させるものである (Fig. 4)。定着体は、削孔の先端側 (地盤側) と後端側 (内空側) で形状が異なる。先端側はセラミック製の袋ナット状であり、地盤側のかぶりコンクリート内への設置が可能である。後端側は膨らみを持つ円錐状として定着力を高めており、これを 2 段削孔により拡張した部分に設置し、端面は既設コンクリートの表面と一致させている。

CCb 工法の定着体は、アンカーやインサートにも広く用いられている高い耐食性のある高純度アルミナ系セラミックス製である。そのため、海水に接する発電所の取・放水路や腐食環境にある下水道施設のように、塩害や硫酸などの影響を受ける厳しい環境において

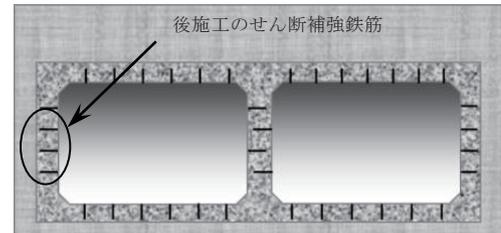


Fig. 3 地下構造物の後施工せん断補強
(Shear Reinforcement of RC Underground Structures)

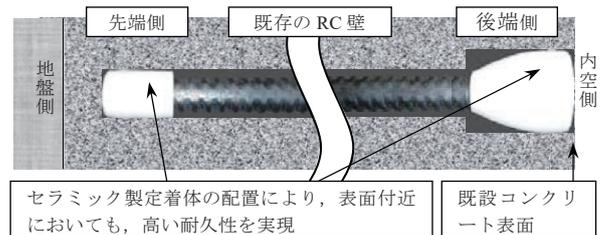


Fig. 4 セラミック定着体を用いた地下構造物の耐震補強工法
(Seismic Retrofitting Method using Ceramic Cap Bars)

も、補強箇所の部材表面となる鉄筋の定着部の耐久性を確保できる。定着部を補強箇所の表面付近に設置することは、対象となる部材の断面高さに対してせん断補強鉄筋の長さを最大限に確保できるため、従来工法よりも高いせん断補強効果を実現している。

また、CCb はねじ鉄筋とセラミック製定着体をねじ接合しエポキシ樹脂を用いて固定するため、鉄筋の長さを施工現場で調整することも特徴の一つである。さらに、施工する壁の背面に配管などの設備があり、十分な施工空間を確保することが困難な場合でも、

通常の機械式継手を用いて接続しながら補強鉄筋を挿入することも可能となっている。

3. Ccb 工法における施工品質の確保

施工品質の確保は、その施工法が原理的に確実であること、そうでない場合は施工後の検査により確実性を証明できること、それもできない場合は確実な技量をもつ作業員による施工が必要となる。カルバートの底版補強のような下向きに削孔した孔であれば、流動性のあるグラウトを流し込んだ後にせん断補強鉄筋を挿入することで、空気を巻き込まない確実なグラウトの充填が可能であり、原理的に確実な方法といえる。しかし、壁の場合のように水平横向きに削孔した孔では不可能であり、施工後にグラウトが確実に充填されているか否かを検査することは一般に困難である。

そこで、横向き施工の Ccb 工法では、グラウト充填と Ccb 挿入において、Fig.5 および Photo 3 に示す「グラウト貯留槽」と「養生治具」を用いている。すなわち、まず削孔した孔に養生治具を合わせて貼り付け、グラウト貯留槽を取り付ける。次に、孔内先端までホースを差し込み、流動性のあるグラウトを充填する。孔内とグラウト貯留槽がグラウトで満たされたら、Photo 3 に示すように、Ccb を貯留槽に没してそのまま孔内へ挿入する。最後に養生治具の蓋をスライドして閉じ、グラウト貯留槽内の余剰グラウトを回収して貯留槽を撤去する。

このようにグラウト貯留槽を用いることで、取扱いが容易な通常の流動性を有するグラウトを用いながら、エア抜きホースなどを残置することなく、確実なグラウト充填が効率よく行える。

4. 今後の展開

Ccb 工法は 2009 年に土木研究センターの建設技術審査証明を取得し、下水道施設に適用された。その後、特殊な施工条件への対応や適用部材の拡大に対する要望があり、それに応える形で、新たに適用できる鉄筋の種類および工法が追加され、適用範囲も拡大してきた。2016 年 9 月時点で、累計施工本数は、施工中を含めると 30 万本に及ぶ。

本工法のグラウト充填方法は、アンカーボルトなどへも応用できるものである。今後も現場のニーズに合わせて改善・改良を重ね、より使い易い工法として適用の拡大を図って行く予定である。

IV. 円弧拘束ダンパ

1. 開発の背景

新設橋梁や既設橋梁の耐震補強として、主桁下面と橋脚天端の間にエネルギー吸収を図るダンパを設置する方法があるが、機械式ダンパは初期コストが高く、海岸線の橋梁などの塩害環境下での適用において防錆処理を必要とする上、維持管理に多大なコストを必要とするといった問題点があった。

こうした課題に対し、RC 部材は有効な解決策となり得る。RC 部材の変形特性に関しては、橋脚や柱部材を中心に、軸方向鉄筋の座屈を防止する方法やコアコンクリートの拘束を高める方法など、耐震性の向上を目的とした数多くの研究開発が行われ、その成果は各種の規準にも取り込まれている。しかし、今までの RC 部材が安定した履歴特性を実現できる変形性能は、部材変形角で 4% 程度であり、制震装置として十分とはいえない。また、既往の RC 構造の損傷メカニズムは塑性ヒンジ部に局所的な破壊を伴うため、多数回の変形に

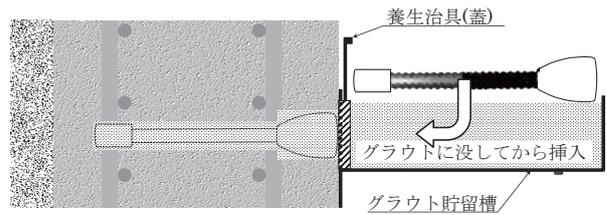


Fig. 5 グラウト貯留槽による施工法
(Construction using Grout Storage Tub)



Photo 3 グラウト貯留槽による施工状況
(Construction using Grout Storage Tub)

対して安定した履歴性能を確保するのは難しいといえる。

そこで当社は、必要な変形性能を有する RC 製の制震装置である円弧拘束ダンパを開発した。

2. 円弧拘束ダンパの概要

RC の棒部材において、制震装置として必要な変形性能を持たせるため、塑性ヒンジが形成される箇所の変形を緩やかな円弧を有する部材で拘束することによって、曲げ変形により局所的に生じるひずみを緩和し、コンクリートの圧縮破壊や鉄筋座屈などが生じる局所的な曲げ応力を生じさせないことで RC 部材としての変形性能を飛躍的に向上させた円弧拘束ダンパを考案した。Fig.6 にその機構のコンセプトを示す。

円弧拘束ダンパでは、高密度ポリエチレン製の管（以降、PE 管）で塑性変形する RC 部材を被覆している。PE 管は、斜張橋ケーブルの外套管などとして数十年の実績があり、塩害地域においても RC 部材に高い耐久性を付与することができる。さらに、PE 管で RC 部材を被覆することで、RC 橋脚の炭素繊維シート巻立て補強工法と同様に地震変形時の横拘束効果やかぶり剥落抑制を期待できる。

開発においては、円弧拘束形状、軸方向鉄筋比、および軸方向鉄筋強度をパラメータとして実大相当の試験体を製作し、繰返し載荷実験とシミュレーション解析を実施した。その結果、地震時繰返し変形性能を従来の RC 部材の 2 倍以上に高めることが可能となり、さらには、多数回の繰返し変形による耐力低下や履歴減衰低下を極めて小さく抑えることが可能となることが確認された⁴⁾。

3. 適用実績と今後の展開

西湘バイパスの高架橋では、RC ラーメン橋脚の耐震補強において、主桁と橋脚間への制震装置の設置による地震時慣性力の低減と、柱部 RC 巻立てによるせん断耐力向上の併用工法が計画されていた。詳細設計において、レベル 2 地震時の主桁と橋脚間に 100 mm を超える大きな相対変位が生じると想定されたこと、海岸線に面した塩害環境下であることから、十分な繰返し変形性能と塩害耐久性を有す

る制震装置として円弧拘束ダンパの適用性および合理化の検討が行われ、実適用に至った⁵⁾ (Photo 4, Fig.7, Photo 5)。

既設橋梁の制震ダンパによる制震橋化は、長周期化、高減衰化による橋脚に作用する地震時慣性力の軽減に加えて、下部構造の剛性や耐力に応じて上部構造の慣性力をバランスよく分担させることができ、省コスト化が可能な合理的な耐震補強工法である。この事例でも、標準的 RC 巻立て工法に比べ約 15%のコスト削減が得られたと報告されている⁵⁾。円弧拘束ダンパは、寸法・配筋などの仕様の変更により、より大きな要求変位にも適用可能であるとともに、変位量・荷重にバリエーションを持たせた規格製品化を行うことにより、さらなるコスト削減・使用の汎用化が可能と考えている。

IV. おわりに

耐震性能は、地震時の安全性と地震後の復旧性からなる性能であり、それぞれに対する要素技術がバランスよく組み合わせられなければならない。個々の要素技術については優れた技術は数多く開発されているが、それらを総合して真に構造物の耐震性の向上に寄与できる技術はまだ不足しているのではないかとというのが、筆者らの偽らざる思いであり、反省でもある。

当社は、長大橋梁や特殊橋梁といった分野において高い耐震技術を発揮してきた。しかし、耐震補強に求められる技術は、こうした従来の新設構造物における耐震技術とは少し異なり、中小規模の橋梁や一般的な地下構造物のように、数多くの構造物に適用できる汎用技術の側面が強く、同時に様々な制約のある施工条件下における施工の確実性も重要である。構造物を設計施工するという建設会社としての立場は、構造物を取り巻く環境の中央に位置しているといっても過言ではなく、その立場を活かして、サステナブルな社会基盤の実現に向け今後も改善・改良を重ねて行きたい。

参考文献

- 1) 山野辺慎一, 河野哲也, 齋藤公生, 榎本恵太, 茂呂拓実, 楯岡衛; 超高強度繊維補強コンクリート製型枠を用いた高耐震性橋脚の適用—阪神高速大和川線三宝ジャンクション—, 橋梁と基礎, Vol.46, No.5, 2012, pp.19-24.
- 2) 山野辺慎一, 植田政明; セラミック定着型せん断補強筋による RC 構造物の耐震補強工法, 電力土木, No.362, 2012, pp.57-60.
- 3) 山野辺慎一; セラミック定着型せん断補強鉄筋による既設地下コンクリート構造物の耐震補強, 一般社団法人電力土木技術協会, 第57回電力土木講習会テキスト, 2015, pp.95-105.
- 4) 河野哲也, 山野辺慎一, 曾我部直樹, スンワリパン シャンヤコン, 真田修; 塑性ヒンジ部に円弧拘束機構を配置し高密度ポリエチレン管で被覆した RC 部材の繰返し変形特性, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) 72(1), 2016, pp.148-165.
- 5) 徳高秀晴; 既設橋の耐震補強への円弧拘束型 RC 製制震装置の適用に関する検討, 国交省国土技術研究会, 2012.

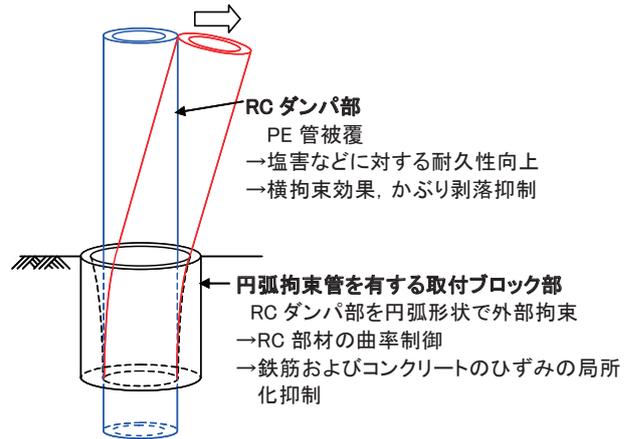


Fig.6 円弧拘束ダンパのコンセプト
(Concept of RC Damper with Arc Shape Controller System)



Photo 4 試験体の載荷状況
(Cyclic Loading Test)

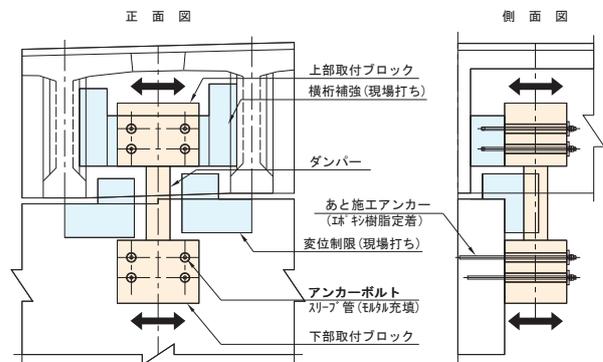


Fig.7 円弧拘束ダンパの設置方法
(Installation of Damper with Arc Shape Controller System)



Photo 5 ダンパの設置状況
(Installation of Dampers)