

厳しい制約条件下におけるRC橋脚の耐震補強工法の開発

オリエンタル白石(株) 正会員 工修 ○梅本 洋平
 オリエンタル白石(株) 岩本 靖
 オリエンタル白石(株) 正会員 堀越 直樹
 九州大学大学院 正会員 工博 大塚 久哲

1. はじめに

既設RC橋脚や基礎の耐震補強工法は、RC巻立て工法や鋼板巻立て工法、増し杭工法などがある。しかし、既設構造物直下の厳しい制約条件下では、仮締切や栈橋など大規模な仮設備が必要となることから、施工が困難で、工費も高額となる状況であった。そこで、厳しい制約条件下において、施工性に優れ、大規模な掘削および土留めが不要で経済的な工法として、圧入により鋼板巻立てを行う橋脚のせん断補強工法「ピア-リフレ工法」を開発し、実績を重ねてきた¹⁾。

ピア-リフレ工法は、せん断補強工法であるため、曲げ補強が必要な橋脚には適用できなかった。そこで、施工性に優れ、経済的な工法であるピア-リフレ工法を発展させて、既設橋脚の曲げ補強が可能な耐震補強工法（以下、本工法という）の開発を行った。本工法の概要を図-1に示す。

本工法による曲げ補強を確立するためには、施工面では、フーチングに削孔した孔へ、軸方向鉄筋をアンカー定着する必要がある、設計面では、図-1に示した補強構造の挙動の確認を行う必要があった。

施工面におけるフーチングの削孔では、①フーチングの鉄筋位置を探查する作業空間がないこと、②鋼板と橋脚の隙間が250mmと狭隘であること、③削孔を行う位置が数m先であること、また、軸方向鉄筋のアンカー定着では、定着する孔が場合によっては湿潤あるいは水で満たされる状態になること、などの条件下での施工方法の確立が必要であった。一方、設計面における補強構造の挙動の確認では、補強部の軸方向鉄筋と補強鋼板が連続していないことから、補強部の補強効果、耐荷力および変形性能の確認を行い、その設計方法の確立が課題であった。

このため、フーチングの削孔は、フーチングの既設鉄筋を切断することなく行えるウォータージェット工法（以下、WJ工法という）を用いること、軸方向鉄筋のアンカー定着は、湿潤あるいは水で満たされた状態でも、確実に充てんおよび定着することが可能な接着剤（エポキシ樹脂）を用いることとした。また、補強効果、耐荷力および変形性能の確認は試験体による載荷試験を行うこととした。

以下に、本工法を模擬した試験体を用いて実施した、①WJ工法による削孔試験と、②アンカー定着および接着剤の充てん試験、ならびに本工法を適用した実橋脚の1/5モデルの試験体を用いて実施した、③正負交番載荷試験の結果について報告を行う。

2. WJ工法による削孔試験

削孔試験に用いた試験体は、図-1で示した本工法を模擬したものであり、高さ5.5m(橋脚4.5m、フーチ

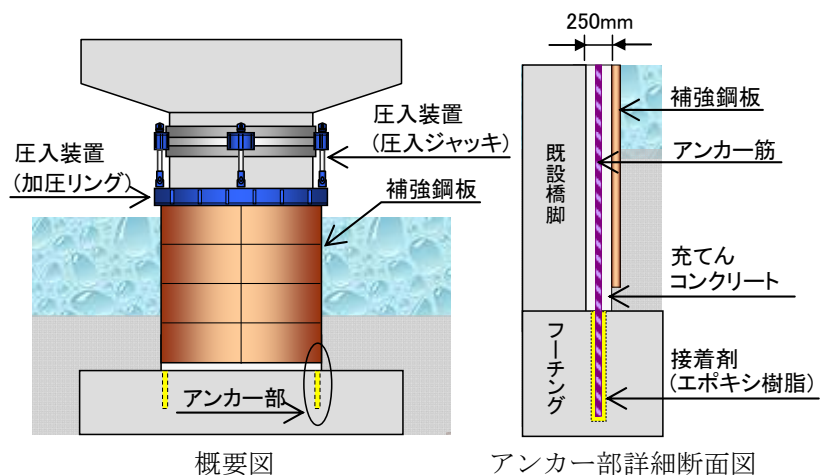


図-1 本工法の概要

ング1m), 幅550mm, 鋼板と橋脚の隙間250mmとした。また, 空頭制限を2mとした。写真-1に作業足場とともに試験体の状況を示す。WJ工法に用いた削孔装置は本工法のために開発を行ったものであり, レール上を移動し, 削孔を行う。レールが空頭制限以下の長さ分割され, 現地にて容易に連結できる構造となっている。図-2にWJ工法に用いた削孔装置を示す。削孔の深さは, 実際に使用するアンカー筋D35から, 700mm(=20×鉄筋径)²⁾とした。WJ工法による削孔試験の結果を写真-2に示す。開発した削孔装置を用いることで, 所定の長さ分割に削孔できることを確認した。また, 写真-2(b)は, 削孔時に削孔装置が既設鉄筋に干渉した場合であり, 削孔装置を移動させることで, 既設鉄筋を切断することなく, 所定の長さ分割に削孔することができた。



写真-1 試験体

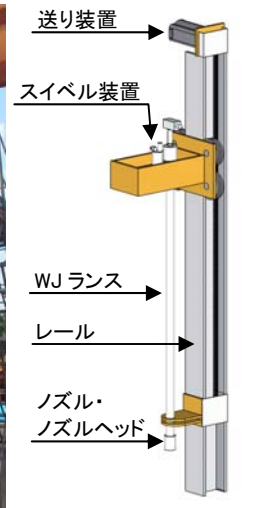


図-2 削孔装置

3. アンカー一定着および接着剤の充てん試験

アンカー一定着および接着剤の充てん試験は, 前記2のWJ工法により削孔した孔を用いて実施した。また, 孔内の状態は, 削孔にWJ工法を用いることから, 孔内を乾燥状態とすることが困難な状況が想定される。そこで, 孔内の状態によるアンカー一定着への影響を確認するため, 孔内の状態を乾燥, 湿潤, 水中(水で満たされた状態)の3種類とした。接着剤は, 乾湿両用のエポキシ樹脂を用いた。

アンカー一定着試験は, エポキシ樹脂により孔内に定着したアンカー筋を用いて引張試験を行った。孔内のいずれの状態においても, 引抜強度は, アンカー筋の降伏強度以上の値であり, 十分な引抜耐力を有していることが確認できた。

エポキシ樹脂の充てん試験は, アンカー一定着試験が終了した後に, 試験体をアンカー筋の軸方向に沿って切断し, 目視により充てん状況の確認を行うことで実施した。写真-3に切断した試験体のエポキシ樹脂充てん状況を示す。写真-3からわかるように, WJ工法による削孔では孔内表面には凹凸があるが, エポキシ樹脂は密実に充てんできていることが確認できた。



(a)



(b)

写真-2 削孔状況



(a) 乾燥 (b) 湿潤 (c) 水中

写真-3 エポキシ樹脂の充てん状況

4. 正負交番載荷試験

4. 1 試験体

試験体の諸元を表-1に, 使用したコンクリートの材料試験の結果を表-2に, 試験体の概要を図-3に示す。試験体は, 実橋脚の1/5モデル³⁾のRC橋脚3体とし, CASE1は補強しない試験体, CASE2はRC巻立てによる補強試験体, CASE3は本工法による補強試験体である。CASE2およびCASE3はCASE1に対して補強を行ったもので, CASE2とCASE3の曲げ耐力が同程度となるように補強鋼材量を決定した。載荷は, 上部構造の死荷重反力に相当する軸力(1MPa)をプレストレスにより作用させた状態で, 橋脚基

表一 試験体諸元

試験体	断面寸法 (mm)	軸方向鉄筋(アンカー筋)			帯鉄筋		
		既設部 (SD295)	補強部 (SD345)	鉄筋比 Pt	既設部 (SD295)	補強部 (SD345)	鉄筋比 ρ_s
CASE1: 補強なし	$\phi 500$	D13-22本	-	1.42%	D6@120mm	-	0.21%
CASE2: RC 巻立て	$\phi 600$ (補強厚 50mm)	D13-22本	D13-12本	1.61%	D6@120mm	D10@50mm	1.43%
CASE3: 本工法	$\phi 604.6$ (補強厚 50+2.3mm)	D13-22本	D13-10本	1.51%	D6@120mm	補強鋼板 2.3mm (SS400)	1.40%

※Pt, ρ_s は SD295 に換算した断面積を示す。

表二 コンクリートの材料試験結果

(単位: N/mm²)

		圧縮強度	引張強度	弾性係数
補強なし	既設部	40.4	3.50	3.08×10^4
	RC 巻立て	45.9	2.64	2.95×10^4
本工法	既設部	41.9	3.53	3.10×10^4
	補強部	49.7	3.37	3.16×10^4

部から高さ1900mmの位置に水平載荷した。試験は、「橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン(案)」（独立行政法人土木研究所）³⁾を参考に、荷重制御によりひび割れ発生荷重、最外縁鉄筋の初降伏荷重の正負交番載荷を行った後、初降伏時の変位を $1\delta_y$ とし、 $1\delta_y, 2\delta_y, 3\delta_y \dots$ と変位を漸増させて、各ステップ3サイクルずつの変位制御による正負交番載荷を行った。試験の終了は、各ステップで1サイクル目の荷重が前のステップの最大荷重の80%を下回った時点とした。

4. 2 試験結果

試験終了時の試験体の損傷状況を図-4に示す。補強した試験体の損傷の進展状況について比較すると、CASE2では水平方向の曲げひび割れ発生後、 $3\delta_y$ で斜めひび割れが発生した。その後、 $8\delta_y$ でかぶりコンクリートがはく落し、 $11\delta_y$ 以降、座屈したアンカー筋の破断により荷重が低下し、 $12.3\delta_y$ で終局に至った。一方、CASE3では橋脚基部および高さ50mmに位置する補強鋼板の下端位置に水平方向の曲げひび割れが発生し、 $7\delta_y$ でかぶりコンクリートがはく落した後、 $10\delta_y$ で橋脚基部の座屈したアンカー筋の破断により荷重が低下し、 $10.8\delta_y$ で終局に至った。

試験終了後、CASE3の補強鋼板を取り除いて、各試験体の損傷状況を比較した。CASE3は、CASE2に比べて、鋼板の巻立て範囲においてひび割れ本数が少なく、かぶりコンクリートのはく落も橋脚基部に集中する結果となった。

載荷点における水平力と水平変位の関係を図-5に、試験体に使用したコンクリートと鉄筋の材料強度を用いて、道路橋示方書⁴⁾により計算した曲げ耐力と試験により得られた諸数値との比較を表-3に示す。CASE1とCASE3の試験結果より、最大荷重は、CASE1では137.1kNであり、CASE3では224.9kNであった。CASE3は補強することで、CASE1に比べて約1.6倍の耐荷力を有している。また、終局時の変位は、

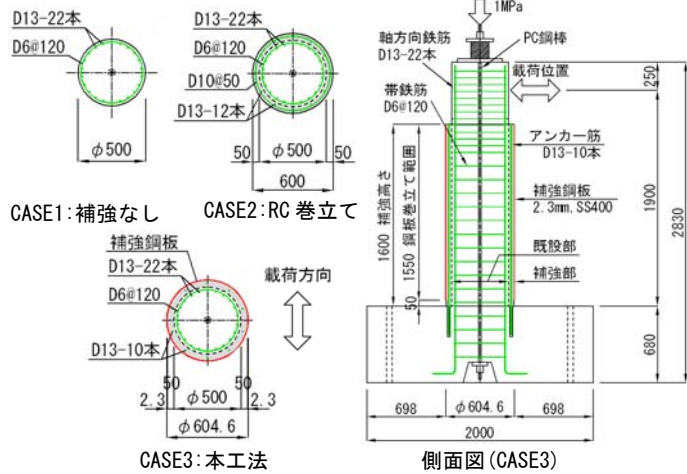


図-3 試験体概要

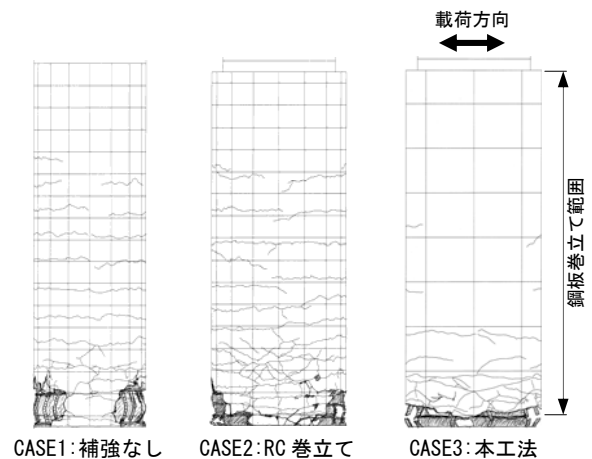


図-4 試験終了時の損傷状況

CASE1では70.0mmであり、CASE3では76.9mmであった。CASE3は補強することで、CASE1に比べて約1.1倍の変形性能を有している。これらのことから本工法による補強効果が確認できたといえる。

CASE2とCASE3の試験結果は、ひび割れ発生時、初降伏時および最大時の荷重はほぼ同程度であり、本工法はRC巻立てと同様な挙動であることを示している。但し、降伏変位 δy に対する終局変位 δu は、CASE2では12.3、CASE3で10.8であり、変形性能はRC巻立てと比べて小さかった。

図-6に本工法の水平力と水平変位の履歴曲線を示す。同図には試験値と併せて計算値も付記した。なお、本工法の計算値は、補強鋼板を帯鉄筋に換算して求めたものである。

CASE3の試験結果の最大荷重は、計算結果とほぼ同程度であり、本工法は、補強鋼板を帯鉄筋に換算し、RC巻立てと同様に評価することができると言える。

5. まとめ

本工法を用いて実施した試験体の削孔、アンカー一定着および接着剤充てん試験結果および、実橋脚の1/5モデルの試験体に対して実施した正負交番荷試験結果により以下のことが確認ができた。

①開発したWJ工法による削孔装置を用いることで、所定の長さを削孔できる。

②削孔装置が鉄筋に干渉した場合も鉄筋を切断しない。

③開発した削孔装置を用いた作業は安全に実施できる。

④アンカー一定着を行う孔の状態に関わらず、試験に用いたエポキシ樹脂により定着することで、鉄筋の引抜強度は鉄筋の降伏強度以上であり、十分な引抜耐力を有している。

⑤アンカー一定着を行う孔の状態に関わらず、試験に用いたエポキシ樹脂の充てん状態は良好であり、確実に充てんできる。

⑥補強を行うことにより曲げ耐力および変形性能が向上する。

⑦補強鋼板を帯鉄筋に換算し、RC巻立てと同様に評価することができる。

以上のことから、本工法は実施工が可能であることが実証できた。最後に、試験の実施において、ご協力頂いた、第一カッター興業株式会社、レジテム株式会社の関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 例えば、オリエンタル白石株式会社：ピア-リフレ工法施工実績，平成23年11月
- 2) 財団法人海洋架橋・橋梁調査会：既設橋梁の耐震補強工法事例集，平成17年4月
- 3) 独立行政法人土木研究所：橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン(案)，平成18年8月
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，平成14年3月

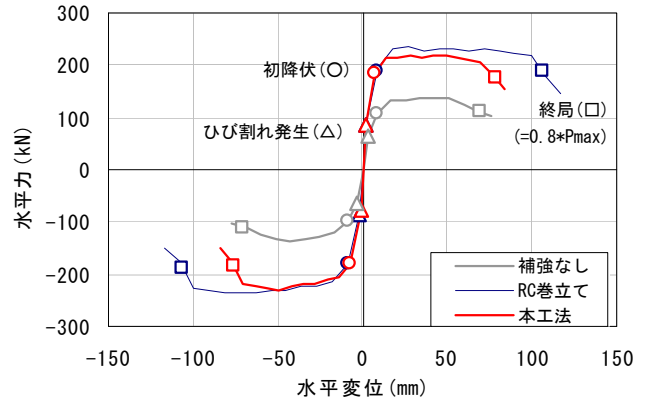


図-5 水平力-水平変位関係 (包絡線)

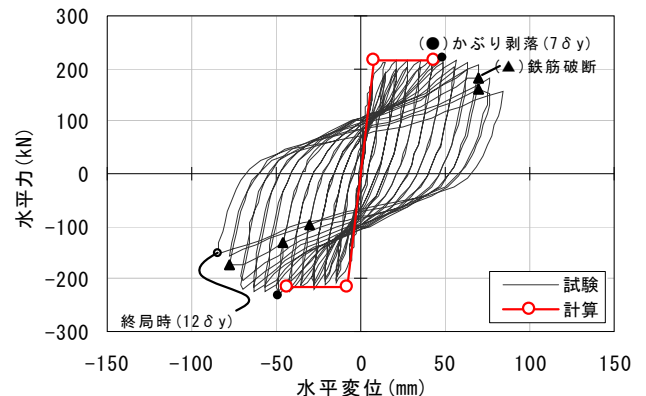


図-6 水平力-水平変位関係 (CASE3)

表-3 計算値と試験値との比較

		補強なし	RC巻立て	本工法	
計算値	曲げ耐力 P_u	kN	119.5	221.0	216.5
	最大荷重 P_{max}	kN	137.1	235.7	224.9
試験値*	降伏変位 δy	mm	8.3	8.6	7.1
	終局変位 δu	mm	70.0	105.9	76.9
	$\delta u / \delta y$		8.4	12.3	10.8
	P_{max} / P_u		1.15	1.07	1.04

*試験値は正負の平均値を示す。