

震災を受けた道路橋の応急復旧技術の開発に関する試験調査

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～21

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：星隈順一，塚淳一

【要旨】

被災発見後に余震の影響を適切に考慮して速やかに被災診断を行うとともに、即効性のある復旧工法を用いて迅速かつ合理的に機能回復を図るための応急復旧技術の開発が必要とされている。本研究では、本震で損傷した橋脚の余震に対する耐震性能に関する検討、損傷した橋脚を早期に応急復旧する工法に要求される事項の整理を行い、これらをもとに迅速かつ効果的な応急復旧工法として、機械式定着繊維バンド巻立てによる応急復旧工法を開発、提案した。鉄筋コンクリート橋脚模型に対する正負くり返し載荷実験より、提案工法の設計法を提案した。

キーワード：橋，鉄筋コンクリート橋脚，応急復旧，機械式定着，繊維バンド巻立て

1. はじめに

大規模な地震が発生した場合、道路橋などのライフライン建造物の被災状況の把握とそれに基づく災害時道路ネットワークの確保は、地震直後の救急救命活動、被災者の避難、救援物資輸送等の震後対応において極めて重要である。道路橋が被災した場合には、まずはその被災を発見するとともに、被災の程度を把握することが重要であり、その後、必要に応じて道路橋の機能を応急的に確保するために修復が行われる。

地震後の被災調査・被災診断、応急復旧や本復旧工法の選定に関しては、兵庫県南部地震の経験を含む過去の震災経験を反映した道路震災対策便覧（震災復旧編）¹⁾が活用されている。一方、平成 16 年 10 月に発生した新潟県中越地震では、橋梁建造物の被災発見後、被災診断、復旧工法の選定、復旧工事の実施に約 1 週間を要し、この間通行止めを余儀なくされるという事例が見られ、機能回復に要する時間の重要性が再認識されたところである²⁾。また、本震発生後 1 週間程度の間規模の大きな余震が頻発したため、応急復旧作業を中断せざるを得ない状況がたびたび発生した。このため、被災発見後に建造物の余震に対する安全性を適切に考慮して速やかに被災診断を行う手法の構築とともに、本復旧工事を実施するまでの間の建造物の耐震性（安全性及び供用性）を確保するために、即効性のある復旧工法を用いて迅速かつ合理的に橋梁建造物の機能回復を図るための応急復旧技術の開発が必要とされている。

こうした背景から、本研究では、迅速かつ効果的な応急復旧工法を開発することを主たる目標とし、これまでの大規模地震において被災事例の多い鉄筋コンクリート（RC）橋脚を対象に、本震で損傷した RC 橋脚の余震に対する耐震性に関する検討、損傷した RC 橋脚を早期に応急復旧する工法に要求される事項の整理、迅速かつ効果的な応急復旧工法の提案及び提案工法の設計法の構築を行った。

2. 被災した RC 橋脚の余震に対する応答特性

地震により損傷を受けた RC 橋脚に余震によってどの程度の地震応答が生じるか、損傷が進展するかを調べるために、円形断面を有する鉄筋コンクリート橋脚模型を対象に振動台加震実験を行った。

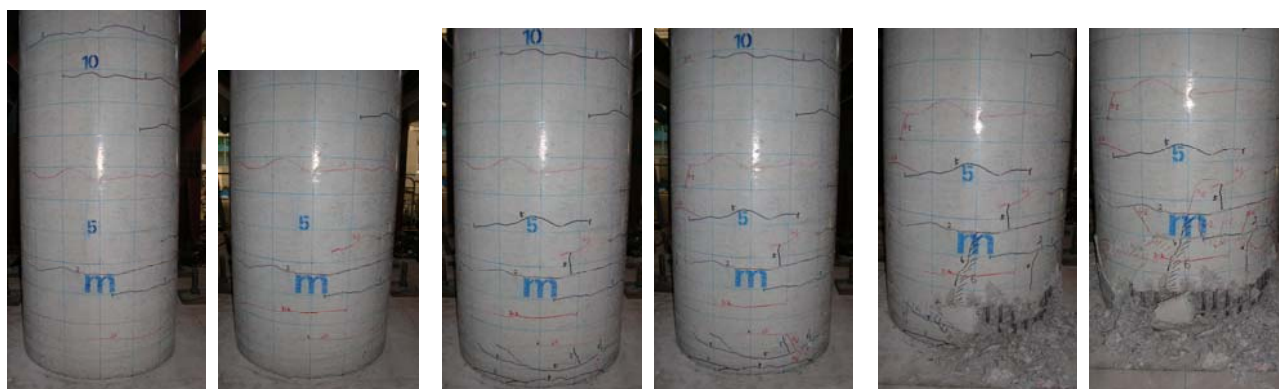
模型は、我が国で建設される一般的な都市高架橋の RC 橋脚の約 4 分の 1 のサイズとし、既往の地震によって被害が比較的多く生じている昭和 55 年道路橋示方書より古い基準に準拠した橋脚を想定した。柱の断面は、直径 0.6 m の円形とした。橋の上部構造による慣性力および軸力を模擬するために、RC 橋脚模型の頂部には鋼板を載せた。

加震は水平 2 方向＋上下方向の三次元加震とし、入力地震動としては、兵庫県南部地震の JR 鷹取駅の記録³⁾を用いた。X 方向に EW 成分を、Y 方向に NS 成分を、Z 方向に UD 成分を入力した。

実験模型は実橋脚の約 4 分の 1 のサイズを想定したため、相似則より入力地震動の時間軸を 50% に圧縮した。加震振幅は、様々な塑性率における応答特

表-1 各加震における応答と損傷

		加震前の周期 (秒)		最大振幅 (mm)			損傷状態
		X方向	Y方向	X方向	Y方向	距離	
10%加震	弾性	0.28	0.27	3	4	4	無損傷
20%加震	本震	0.30	0.30	8	14	14	曲げひびわれ
	余震	0.32	0.31	14	16	20	曲げひびわれの進展
30%加震	本震	0.34	0.33	29	42	47	残留ひびわれを確認
	余震	0.56	0.59	36	55	61	縦ひびわれ, コンクリートの浮き
50%加震	本震	0.59	0.60	53	86	93	基部でコンクリートの軽微な剥落
	余震	0.67	0.65	50	82	87	かぶりコンクリートの剥落
60%加震	本震	0.62	0.67	60	101	108	かぶりコンクリートの剥落, 軸方向鉄筋のはらみだし
	余震	0.67	0.85	60	114	121	上記の損傷が全周に広がる



(a) 本震加震後 (b) 余震加震後 (a) 本震加震後 (b) 余震加震後 (a) 本震加震後 (b) 余震加震後
 (1) 30%加震後 (2) 50%加震後 (3) 60%加震後 (最終損傷状況)

図-1 損傷の進展

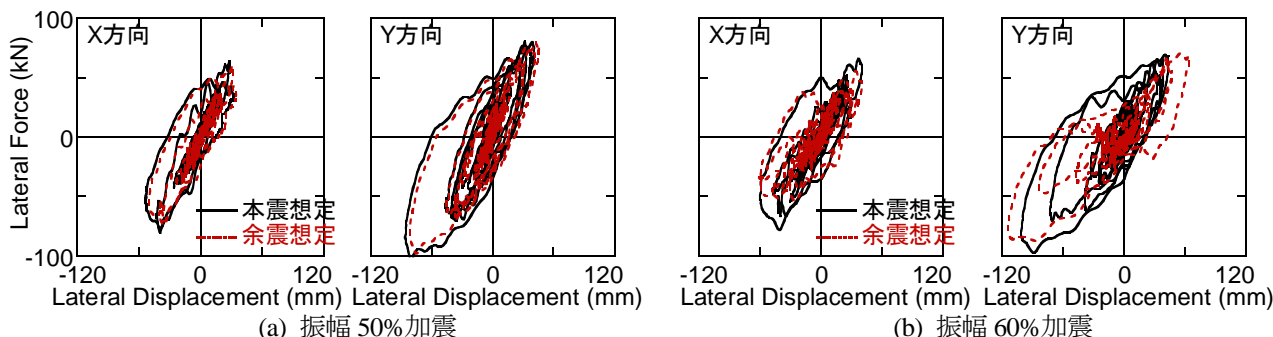


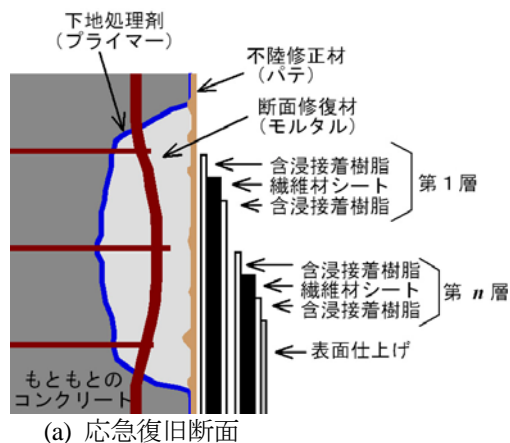
図-2 本震および本震と同強度の余震に対する応答

性を調べるために、表-1 に示すように振幅を 10%, 20%, 30%, 50%, 60%と徐々に増加させることとし、本震を想定した加震のあとに余震を想定した本震と同強度の入力地震動を作用させた。

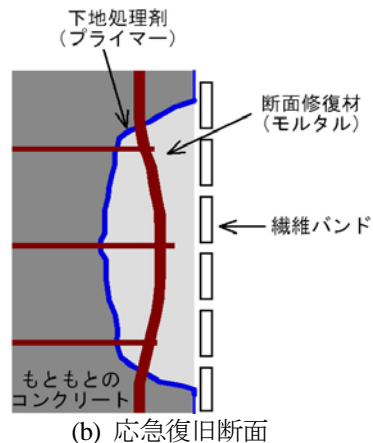
図-1 に、損傷の進展の例として、30%加震、50%加震、60%加震の後の模型の損傷状況を示す。図-2 は 50%加震、60%加震を例に水平力～水平変位の履歴を示した結果である。ここには、本震を想定した加震と余震を想定した加震を比較した結果を示す。

これらおよび表-1 より本震の後に、余震として本

震と同強度の地震力が作用すると、応答変位は増加したり、損傷が進展する場合もあるが、本研究では、かぶりコンクリートが剥落し、軸方向鉄筋のはらみ出すという道路橋示方書における終局変位に相当する段階の損傷レベルが生じた後にも、本震規模の余震によって、橋脚の耐震性が低下するレベルの損傷の進展は観察されなかった。これは、本実験では帯鉄筋のゆるみやはずれがなく、また、コアコンクリートの圧壊も限定的であったためと考えられる。以上より、基部で曲げ破壊するタイプの RC 橋脚は、



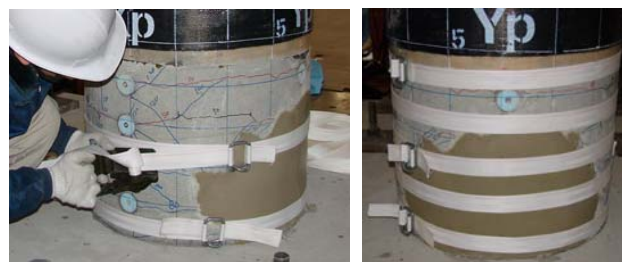
(a) 応急復旧断面



(b) 応急復旧断面



(b) 修復作業の様子と復旧後の柱基部
図-3 速乾性材料を用いたCFS巻立て工法



(b) 修復作業の様子と復旧後の柱基部
図-4 機械式定着による繊維バンド巻立て工法

軸方向鉄筋が破断する前の段階では本震規模の余震に対しても耐震性が大きく低下しないと考えられる。

3. RC 橋脚に対する即効性のある応急復旧工法⁴⁾

3.1 即効性のある応急復旧工法に求められる事項

ここで開発する応急復旧工法による復旧は、地震により損傷したRC橋脚に対して本復旧工事を実施するまでの間の耐震性（安全性及び供用性）を確保することを目的としている。本工法で対応する損傷レベルとしては、橋脚の軸耐荷力は残存し、柱として自立しており、かつ水平耐力についても著しい低下のない段階までを想定することとした。こうした点を踏まえ、本研究で提案する応急復旧工法に対する要求事項は以下の通りとした。

- a) 余震による脆性的な破壊を防止すること
- b) 施工管理が容易であること
- c) 1日程度で復旧作業が完了すること
- d) 重機等による施工を必要としないこと
- e) 資材は長期間、備蓄可能なこと

上記の a), b)は性能確保の観点からの要求事項である。a)の脆性的な破壊を防止するためには、せん断破壊を防止すること、あるいは変形能を確保する

こと、もしくはその両者を確保することが必要となる。また、b)は復旧後の品質を確保するという観点から重要である。これについては、作業に特殊な技術を要しないことも要求される。c), d)は応急復旧の作業において迅速、簡便であることを要求するものである。e)は平成16年の新潟県中越地震の例では修復資材の調達にもある程度の時間を要したという報告がある⁵⁾ことから、震災後にすぐ利用できるように、例えば橋を管理する事務所や「道の駅」等に資材を長期間備蓄できるようにするための要求事項である。

本研究では、特にc)に着目して、以下の速乾性材料を用いた炭素繊維シート巻立て工法と機械式定着繊維バンド巻立て工法を提案した。

3.2 速乾性材料を用いた炭素繊維シート巻立て工法

本工法は、従来型の炭素繊維シート（CFS）巻立て工法において、使用する材料に速乾性のメチルメタクリレート（MMA）樹脂を用いて復旧に要する時間を1日以内とする工法である。一般的な工程は以下に示すとおりであり、修復された断面の概要および修復作業の様子を図-3に示す。

1. 損傷したコンクリートの除去、修復部の清掃

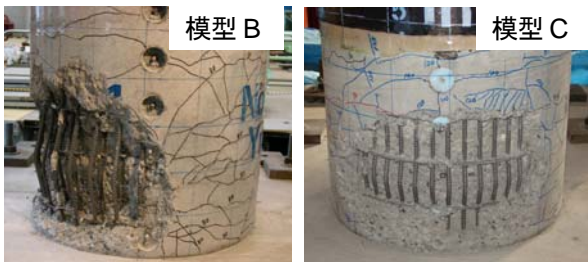


図-5 加震後の損傷状況（補修前の状況）

2. 下地処理剤（プライマー）の塗布
3. モルタル等による断面修復
4. 不陸修正材（パテ）等による表面不陸の修正
5. 樹脂系の含浸接着剤によるシートの貼り付け
（複数層のシートを巻く場合にはこれをくり返す）
6. 耐候性のための表面仕上げ

一般には工程2～5では、材料が乾くまでそれぞれ1日程度の養生期間が必要であるため、作業完了まで3～5日程度を要するが、提案工法では、断面修復材、下地処理剤（プライマー）、不陸修正材（パテ）、含浸接着剤にMMA樹脂系材料を用いることにより、各工程の養生時間を1時間程度にして、全体工程を1日程度におさめる点がポイントである。

本工法では、CFSを接着剤により橋脚躯体に貼り付けるため、十分なせん断補強効果が期待できる。また、曲げ破壊するタイプにもCFSによる横拘束効果による変形能向上が期待されたが、これに関しては、後述の実験により、CFSが破断するため、大きくは期待できないことが明らかになった。

断面修復には樹脂モルタルを用いる。これは、練り混ぜに用いられる水がCFSの接着性に悪影響を及ぼすことからCFSを巻立てる場合には一般にはセメント系のモルタルは適さないためである。樹脂モルタルは、粘性が高く、手でこねながら損傷断面に塗り込めることから、その充填性はそのたびの施工に依存するため、品質管理が難しいという欠点がある。材料試験によれば弾性係数、圧縮強度に大きなばらつきが生じたことも報告されており⁴⁾、実際の施工においても弾性係数、圧縮強度が適切に確保されるかの懸念がある。

本工法の作業は、一般のCFS巻立て工法と変わらないため、特殊な技術は要さない。また、CFSは軽いので、施工には重機を要さない点も要求事項を満足する。ただし、一般には樹脂系の材料は品質保証期間が6ヶ月程度とされており、長期の備蓄には不向きである。

3.3 機械式定着繊維バンド巻立て工法

本工法は、断面修復は超速硬性無収縮モルタルにより行い、断面修復後に繊維バンドを機械式定着によって巻立てる工法である。本文ではこれを機械式定着工法と呼ぶ。一般的な工程は以下に示すとおりであり、修復された断面の概要を図-4に示す。

1. 損傷したコンクリートの除去、修復部の清掃
2. 下地処理剤（プライマー）の塗布
3. モルタル等による断面修復
4. 機械式定着による繊維バンドの巻立て

本工法では、繊維バンドを橋脚躯体に接着しないため、せん断耐力補強の観点からはCFS巻立て工法よりも劣ると考えられる。曲げ破壊する場合には、繊維バンドの横拘束効果による変形能の向上が期待できる。

断面修復に用いるのはセメント系のモルタルであるため、樹脂系のモルタルに比べて施工性がよく、品質管理も比較的容易である。なお、緊急の復旧工法の観点からは重要度は高くないが、MMA樹脂モルタルよりも廉価な点も利点として挙げられる。

繊維バンドを巻立てる作業は、簡単な作業であり特殊な技術は要さない。また、繊維バンドは、CFSと同様に軽いため、施工には重機を要さない点も要求性能を満足する。さらに、本工法で用いた材料は、用いる繊維材によっては紫外線による劣化等があるため、備蓄には紫外線を防ぐ等の対策が必要な場合もあるが、こうした対策を施せば、ある程度長期備蓄可能な材料である。

3.4 即効性のある応急復旧工法の効果

提案する応急復旧工法の効果を検証するために、柱基部に曲げ損傷が生じた橋脚模型3体に対して提案工法による応急復旧を行い、復旧された模型に対して振動台加震実験を行った。以降、本文では損傷を生じさせる実験を損傷実験、提案工法による復旧後の模型に対する実験を復旧実験と呼ぶこととする。

本実験に用いた3体の配筋、セットアップ、加震条件は異なるが、図-1(3)、図-5に示すように、加震後の柱基部の曲げ破壊による損傷は同程度であり、かぶりコンクリートの剥落、軸方向鉄筋のはらみ出しが生じたが、軸方向鉄筋の破断は生じていない段階である。これらの模型のうち、速乾性材料を用いたCFS巻立て工法を2体に、機械式定着繊維バンド



(a) 模型 A (CFS1 層巻き)

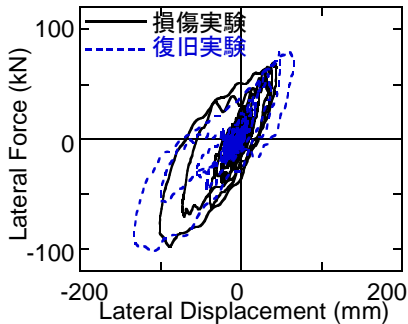


(b) 模型 B (CFS2 層巻き)

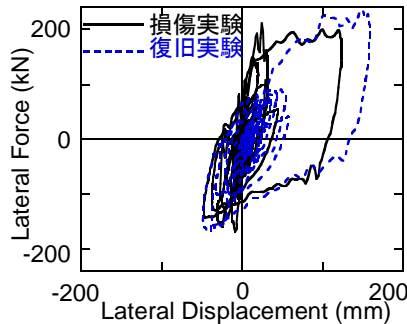


(c) 模型 C (繊維バンド巻立て)

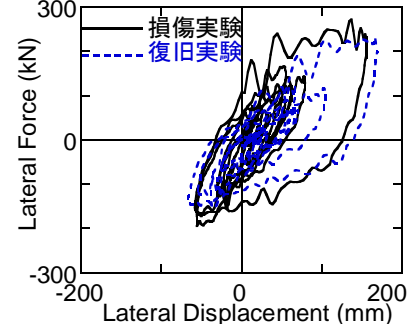
図-6 復旧実験後の損傷状況



(a) 模型 A (CFS1 層巻き)



(b) 模型 B (CFS2 層巻き)



(c) 模型 C (繊維バンド巻立て)

図-7 本震と同強度の余震が生じた場合の水平力～水平変位の履歴 (橋軸 (Y) 方向)

巻立て工法を1体に適用することとした。CFS 巻き立て工法については、巻立て層数の影響を調べるために、1層巻き、2層巻きとした。ここでは、CFS を1層巻き立てた模型を模型 A、2層巻き立てた模型を模型 B、機械式定着繊維バンド巻立て工法を適用した模型を模型 C と呼ぶ。

復旧実験では、弾性レベル加震として振幅を10%とした加震を行った後、2段階の非線形レベル加震を行った。非線形レベル加震では、損傷実験における最大加震の振幅を本震とし、本震の約70%レベルの加震と100%レベルの加震を行った。

復旧実験後の最終損傷状況を図-6に示す。図-7には各模型の最大強度の加震の際の水平力～水平変位の履歴を示す。ここでは、同じ地震動強度を入力させた場合の損傷実験と復旧実験の履歴を比較している。

速乾性材料によるCFS巻立て工法の場合には、その巻立て層数に関わらず本震の70%強度の余震を想定した加震によってシートに軽微な破断が生じた。本震と同強度の加震では図-6に示すようにCFSが破断し、断面修復材が圧壊、剥落した。

一方、機械式定着繊維バンド巻立て工法の場合には本震の70%強度の余震により断面修復材にひび割れが生じ、繊維バンドのひずみが最大で0.01に達し、

バンドがわずかにはらみだした。本震と同強度の加震では断面修復材の損傷は大きくなったが、バンドの伸び能力が高く、破断しなかったため、断面修復材は剥落しなかった。

ホワイトノイズ試験から推定した橋脚模型の固有周期は損傷によって1.5～2.6倍に増大するが、これを上記の工法により修復すると剛性が多少回復するため、固有周期は健全な状態の1.3～1.7倍となる。ただし、補修後にもその剛性は損傷前の健全な状態の50%に満たない。図-7によれば、いずれの工法の場合にも、大きな塑性変形が生じた段階(例えば、水平変位が100mm程度の段階)では、損傷実験と修復実験における水平力は同程度であるため、曲げ耐力としては健全な状態と同程度の耐力が確保されると言える。応答変位としては、損傷を生じさせた実験よりも30%程度大きくなるケースもあるが、修復された橋脚はいずれも安定した地震応答を示しており、こうした応急復旧により損傷前とほぼ同程度の耐震性を確保できたと考えられる。

表-2 要求事項の観点から見た提案工法の特徴

	要求事項	速乾性材料CFS巻立て	機械式定着繊維バンド巻立て
a)	耐震性の確保 (せん断補強効果)	◎ シートを接着するため 効果大	○ 4.の検討により、補強 効果があることを確認
	耐震性の確保 (変形能)	△ シートの破断のため 大きくは期待できない	○ バンドの高い伸び能力に より補強効果あり
b)	施工管理が容易 (施工性がよい)	△ 樹脂モルタルは粘性が 高く充填性が悪い	○ セメント系モルタルは 施工性はよい
c)	1日程度で復旧を完了	○ 7時間程度 (模型)	◎ 5.5時間程度 (模型)
d)	重機を要しない	○ シートは軽量	○ バンドは軽量
e)	長期の備蓄性	× 樹脂系材料は品質保証 期間が6ヶ月程度	○ (紫外線対策等が 必要な場合あり)



(a) 2008 模型



(b) 2009-No.1 模型



(c) 2009-No.2 模型

図-8 提案工法による修復前の損傷状況

3.5 要求事項の観点から見た提案工法の評価

上述した要求事項の観点から実験結果をふまえて、2つの提案工法を評価した。この結果を表-2に示す。

余震に対する応急的な安全性の確保の観点では、せん断損傷を防止し、耐力を確保する観点ではCFS巻立て工法の方が優れていると考えられる。機械式定着工法によるせん断補強効果については、これに着目した検討を4.に示すように別途行っており、十分な補強効果を確認した。変形能を確保する観点では、CFSは本震相当の加震によって生じたレベルの大きな応答変位が生じると破断したため、機械式定着工法の方が優れている。

施工管理による品質確保の観点からは、樹脂系モルタルを用いない機械式定着工法の方が優れている。復旧時間に関しては、機械式定着工法の方が短い。重機を用いないという観点では、いずれの工法も同じである。長期間の備蓄に関しては、樹脂系の材料の品質保証期間が短いため、樹脂系の材料を用いない機械式定着工法の方がよい。

本研究で特に注目している、損傷の発見から1日以

内で応急復旧を完了するという観点からは特にc)、e)が重要であり、これらに関しては、繊維バンドの機械式定着工法の方が優れており、実用化に適していると考えられる。

4. 機械式定着繊維バンド巻立て工法のせん断補強効果に関する検討^{5),6)}

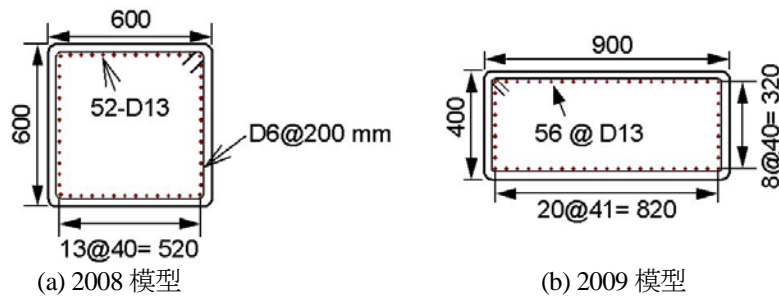
4.1 実験模型と実験条件

本研究で提案する機械式定着繊維バンド巻立て工法の実用化に向けた検討として、せん断補強効果に関する実験を行い、破壊のメカニズム、耐荷力特性を明らかにし、復旧設計法を確立することとした。

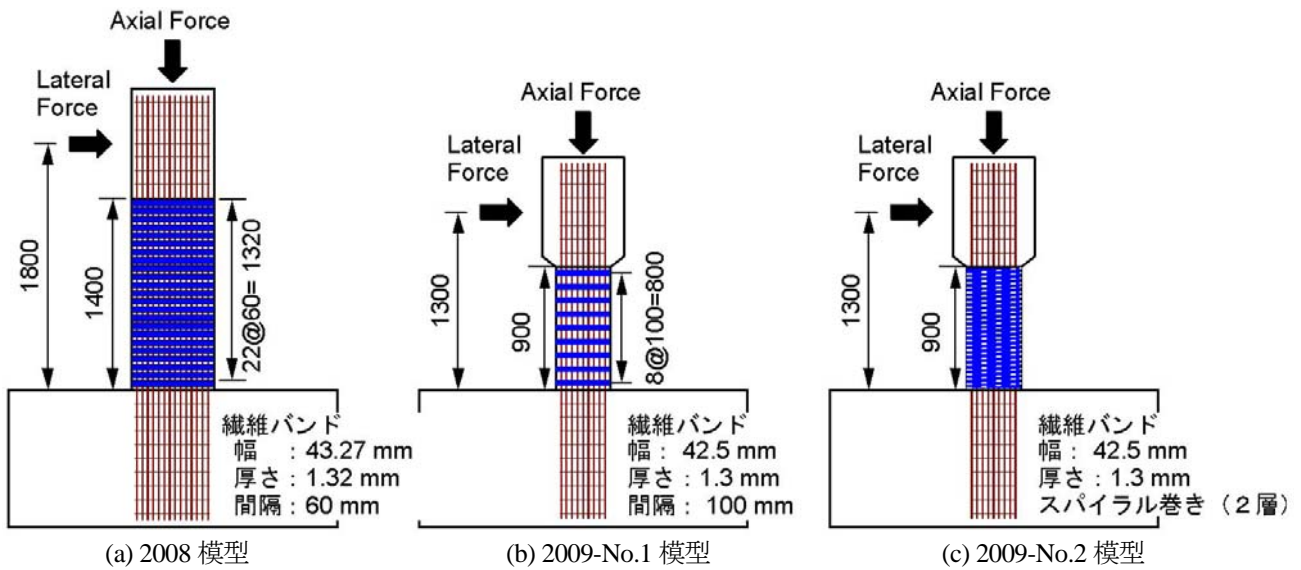
実験では、せん断破壊するRC橋脚模型に対して正負繰り返し載荷実験により図-8のようにせん断破壊を生じさせたあと、提案工法で応急復旧し、再度、実験を行った。対象としたのは、表-3及び図-9に示す正方形断面1体と長方形断面2体のRC模型である。ここで、バンドの補強量としては、体積比にして0.25%~1.23%の範囲で変化させて、補強量の影響を調べることにした。修復の様子を図-10に示

表-3 修復後の模型の繊維バンド補強量

	2008 模型	2009- No.1 模型	2009 -No.2 模型
断面	600×600 mm	450×900 mm	450×900 mm
帯鉄筋の配置	D6 200 mm間隔	なし	なし
初期緊張力	あり	なし	なし
巻立て方法	ゼブラ巻き	ゼブラ巻き	スパイラル巻き
バンドの断面	1.32×43.27 mm	1.3×42.5 mm	1.3×42.5 mm
バンドの断面積	57.1 mm ²	55.3 mm ²	55.3 mm ²
巻立て層数	1層	1層	2層
バンドの配置間隔	60 mm	100 mm	40 mm
バンドの有効長	600 mm	900 mm	900 mm
バンドの体積比	0.635%	0.246%	1.228%



(1) 断面



(2) 模型の側面図と繊維バンドの巻立て

図-9 提案工法による修復後の模型

す。補修時間は8時間程度を要した場合もあったが、1日で復旧作業は完了した。なお、補修時間の約半分は断面修復に要した時間であり、この工程に要する時間を短縮できれば、より迅速に橋脚の機能回復が可能と考えられる。

繊維バンドとしては、素材としての弾性係数、破断強度がそれぞれ70.5 kN/mm²、2920 N/mm²であるアラミド繊維バンドを用いることとした。本工法の

効果を定量的に評価するためには、これを織ってバンドとした場合の力学的特性を把握することが重要である。このため、3本の試験体を作製し、これらに対する引張試験により力学的特性を調べることとした。試験結果を図-11に示す。バンドとして織った繊維材が軸方向変形量の増加とともに締まっていくために徐々に接線剛性が高くなる。この結果、繊維材の引張力～変位関係は下に凸の曲線となる。試

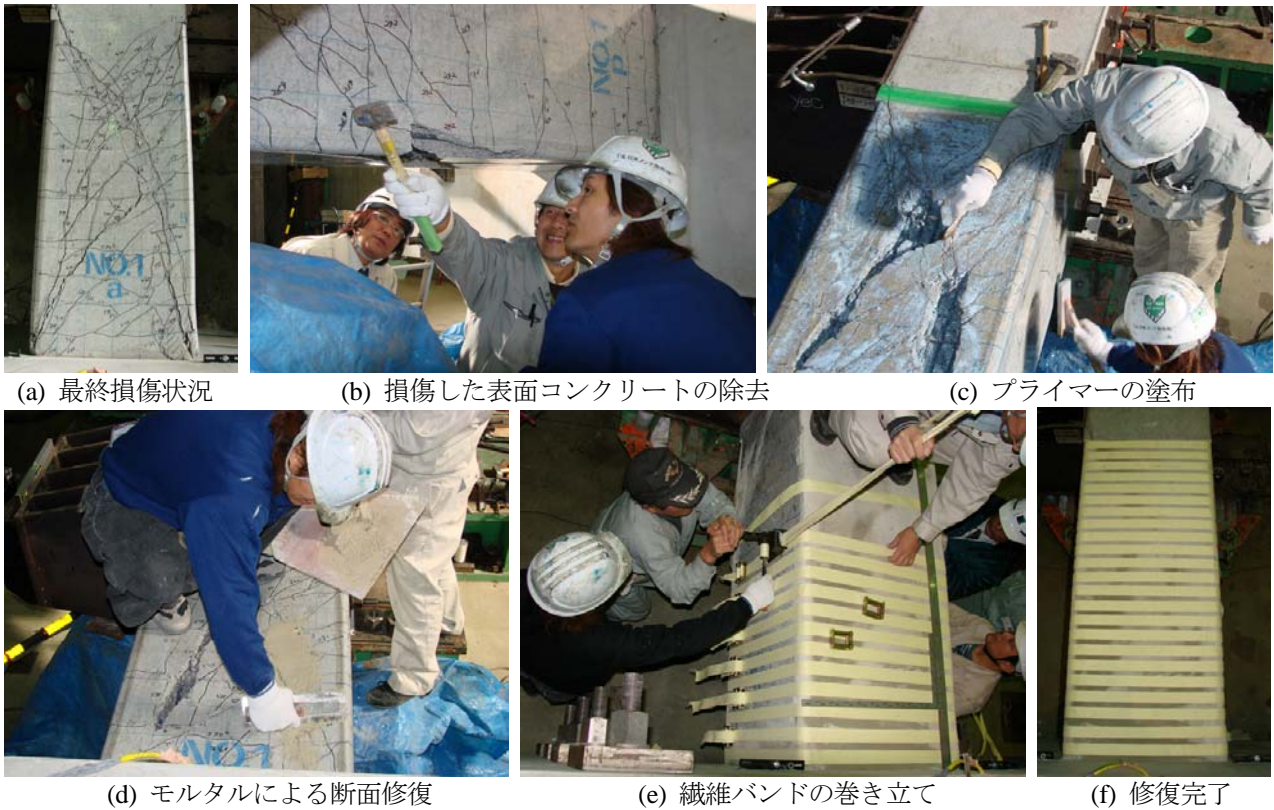


図-10 提案工法による応急復旧の様子

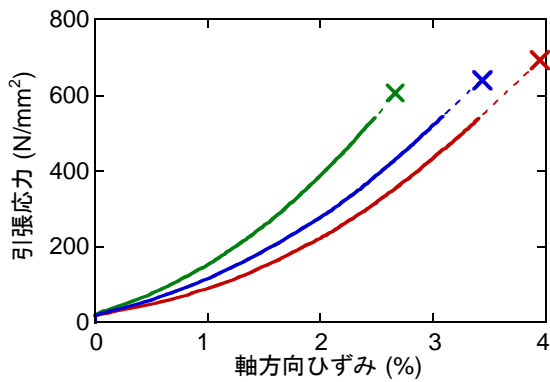


図-11 繊維バンドの力学的特性

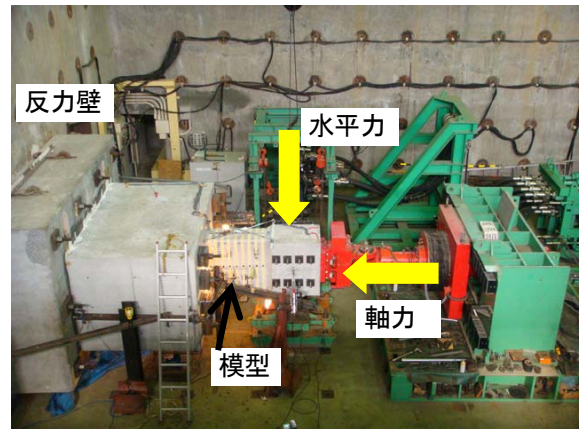


図-12 実験セットアップ

験結果にはばらつきがあるが、破断強度は 619～702 N/mm^2 、破断ひずみは 3～4%程度である。

4.2 提案工法のせん断補強効果

本工法の効果及びバンドの補強量の影響を調べるために、損傷を受けた模型を提案工法により修復した後の模型に対して正負繰り返し載荷実験を行った。その様子を図-12 に、水平力～水平変位履歴の比較を図-13 に、最終損傷状況を図-14 にそれぞれ示す。

これらによれば、補強量に関わらず、いずれの模

型も水平変位がある程度増加すると、いわゆる曲げ降伏するタイプの橋脚と同様に、その後は耐力がやや増加するかおおむね一定となり、その後、載荷点高さに対する水平変位の比（ドリフト）が 4～5%になるまで耐力はおおむね維持された。その後、最終的には柱基部における曲げ破壊となった。実験後には、いずれの模型でも柱基部付近は丸みを帯びてふくらみ、軸方向鉄筋はバンドによる拘束によって特に角部で複雑に座屈し、柱基部のコンクリートは圧壊してぼろぼろになったが、このような状態になっ

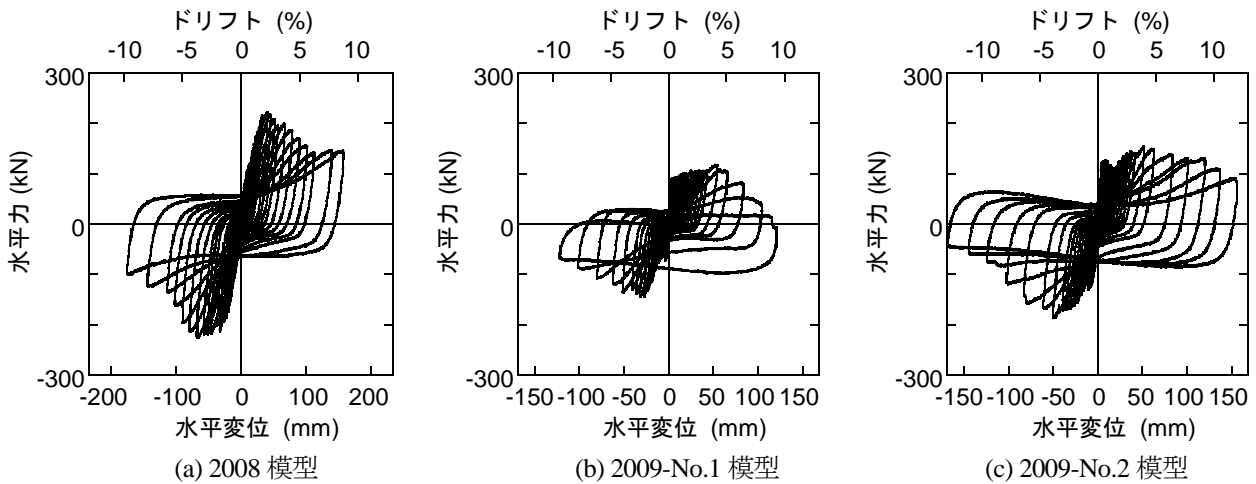


図-13 提案工法により修復された模型の水平力～水平変位の履歴

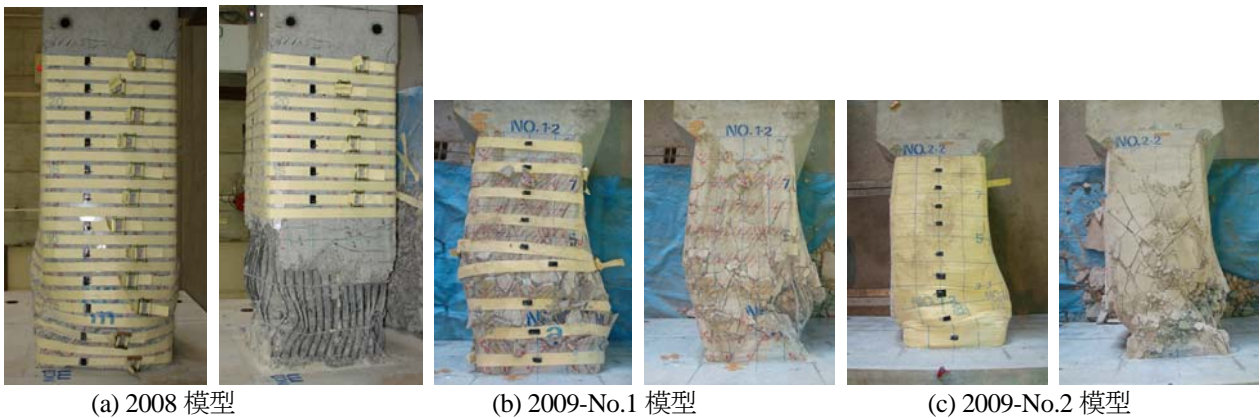


図-14 修復実験後の損傷状況 (左：載荷終了後，右：バンド及び損傷コンクリート除去後)

でも、バンドによる補強効果により安定した変形能を確保できた。繊維バンド体積比 ρ_{band} が最も小さかった 2009-No.1 模型 ($\rho_{band} = 0.25\%$) では、最終段階ではバンドが破断したが、この模型においてもドリフトが 5% 程度までは安定した曲げ破壊性状を示したことから、この程度の補強量で所要の効果が得られると考えられる。

今後、より規模の大きな模型等に対する実験データの蓄積は必要と考えられるが、ここでは、以上の検討結果をもとに、設計上の安全余裕度も考慮してバンドの必要巻立て量を暫定的に、0.5% とすることを提案する。

これによれば、たとえば、断面幅が 3 m の実大橋脚に対しては、厚さ 1.8 mm のバンドを 2 層のスパイラル巻きにすれば、 $\rho_{band} = 0.5\%$ を確保できる。断面幅 b が 4 m の場合には、厚さ 2.4 mm のバンドが必要となるが、いずれも、現実的に対処可能な補強量であり、本工法により損傷後にも迅速に応急復旧でき、脆性的な破壊を防止できるため、所要の耐

震性を確保することが可能と考えられる。

5. 耐震補強された橋脚の被災診断、応急復旧工法

古い設計基準に準拠した RC 橋脚に対する耐震補強工法としては、鉄筋コンクリート巻立て工法、鋼板巻立て工法、繊維材巻立て工法が一般的であり、補強の対象や制約条件等を踏まえてこれらの中から工法が選定される⁷⁾。本研究では、これらの 3 工法により耐震補強された橋脚の被災診断手法及び応急復旧工法について検討した。

まず、鉄筋コンクリート巻立て工法の場合には、力学的特性、破壊特性は鉄筋コンクリート橋脚と同様であるため、鉄筋コンクリート橋脚と同様の手法により被災診断及び応急復旧を行うことが可能である。このため、橋脚の軸耐荷力は残存し、柱として自立しており、かつ水平耐力についても著しい低下のない段階である場合には、ここで提案する機械式定着繊維バンド巻立て工法が適用可能である。

鋼板巻立て工法により曲げ耐力補強がされた場合には、アンカー筋が破断する前までは鋼板の損傷によるせん断耐力や変形能の低下は小さいと考えられるため、応急的な対策は一般には不要と考えられる。一方、これが破断したあとは水平耐力が著しく低下するため、応急復旧による機能の回復は容易ではなく、この場合にはベント等による上部構造の支持を行い、2次災害の防止対策を実施することが必要となる。なお、鋼板巻立て補強の場合には根巻きコンクリートが設置されるのが一般的であり、その場合にはアンカー筋の破断の有無の確認が一般には困難である。このためこれに対する診断手法の開発が必要であり、これについては今後の課題である。

繊維材を軸方向に巻立てることより曲げ耐力補強がされた場合には、その耐力の低下度合いによって適切な対策を講じる必要がある。一方、周方向の巻立てによるせん断耐力補強、変形能の補強が施された橋脚において、周方向繊維材が破断した場合には、提案する機械式定着繊維バンド巻立て工法により、応急的に機能を回復することができると考えられる。

6. まとめ

本研究では、迅速かつ効果的な応急復旧工法を開発することを主たる目標とし、RC橋脚を対象に、本震で損傷したRC橋脚の余震に対する耐震性に関する検討、損傷したRC橋脚を早期に応急復旧する工法に要求される事項の整理、迅速かつ効果的な応急復旧工法の提案及び提案工法の設計法の構築を行った。以下に、本研究で得られた成果を示す。

- 1) 本震の後に余震により本震と同強度の地震力が作用すると、応答変位は増加したり、損傷が進展する場合もあるが、基部で曲げ破壊するタイプのRC橋脚は、軸方向鉄筋が破断する前の段階では本震規模の余震に対しても耐震性が大きく低下しないと考えられる。
- 2) 応急復旧工法に求められる事項を整理した。要求事項は5つあり、それらは、短期的な耐震性能の確保、施工性がよいこと、1日程度で復旧作業を完了すること、重機等による施工を必要としないこと、資材が長期備蓄可能であることとした。実験結果に基づき、提案する工法の評価を行い、機械式定着による繊維バンドによる応急復旧工法が実用化には適していることを示した。
- 3) 提案する工法により、橋脚の軸耐荷力は残存し、柱として自立しており、かつ水平耐力についても著

しい低下のないレベルの損傷を受けたRC橋脚に対しては、1日以内で応急復旧を可能であることを実験模型に対する施工から示した。

4) せん断破壊した模型を提案工法で修復した模型に対する実験から、繊維バンドの巻立て量が体積比にして0.25%の場合にも脆性的な破壊を防止できるため、所要の効果が得られることを示した。これより、本工法における繊維バンドの必要巻立て量としては、実験結果及び設計上の安全余裕度を考慮して0.5%とすることを提案した。

5) 鉄筋コンクリート巻立て工法、鋼板巻立て工法、繊維材巻立て工法により耐震補強された橋脚について、それぞれの構造的特性を踏まえて、その被災診断手法及び応急復旧工法に対する考え方を整理した。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路震災対策便覧（震災復旧編），2007.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所，独立行政法人建築研究所：平成16年（2004年）新潟県中越地震被害に係わる現地調査概要，2005.
- 3) Nakamura, Y.: Waveform and its analysis of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, JR Earthquake Information No. 23c, Railway Technical Research Institute, Japan, 1995.
- 4) 堺淳一，運上茂樹：地震により曲げ破壊した鉄筋コンクリート橋脚に対する緊急復旧工法の提案，地震工学論文集，Vol. 30, pp. 306-316, 2009.
- 5) 堺淳一，運上茂樹，星隈順一：機械式定着繊維バンド巻立て工法によるRC橋脚の応急復旧効果に関する実験的検討，第13回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，（社）土木学会，pp. 53-58, 2010.
- 6) 星隈順一，堺淳一：3.4 震災を受けた道路橋の応急復旧技術の開発に関する試験調査，H21年度重点プロジェクト研究報告書，土木研究所，2010.
- 7) (社)日本道路協会：道路震災対策便覧（震前対策編），2006.