

論文 ラーメン橋脚はり部の耐震補強法に関する実験的研究

足立幸郎^{*1}・運上茂樹^{*2}・長屋和宏^{*3}

要旨：既設鉄筋コンクリートラーメン橋脚の耐震補強では、柱部材だけでなくはり部材のせん断耐力等耐力の向上や変形性能の向上が重要である。特にはり部材ではせん断耐力のみを増加させることが望まれる。はり部材は、上面に支承等が存在すること、街路上での高所作業となること、さらにコスト縮減等の観点から施工が容易な工法の開発が必要とされる。ここでは、鋼板補強法として巻立て面数を変化させた場合のせん断補強効果について実験的検討を行った。この結果、側面にのみ鋼板を配置した補強法でもアンカ一定着を行う場合せん断補強に有効であることが判明した。しかし、補強面の断面高さに対する比が小さい場合は補強効果が減少することも明らかとなった。

キーワード： 鉄筋コンクリート橋脚、はり、せん断補強、鋼板補強

1. はじめに

兵庫県南部地震によって道路構造物が多大な被害を受けた。鉄筋コンクリートラーメン橋脚も柱部にせん断被害やはり部にひび割れ被害など面内方向の被害を受けた。これら兵庫県南部地震による被害の教訓を生かし、鉄筋コンクリートラーメン橋脚の面内方向の耐力と変形性能をバランスよく向上させるため、道路橋示方書に地震時保有水平耐力法¹⁾が規定された。

既設鉄筋コンクリートラーメン橋脚の耐震安全性を高めるためには、柱部材だけでなくはり部材のせん断耐力等耐力の向上や、変形性能の向上が重要である。特にはり部材では、作用軸力が小さいため変形性能に余裕があること、曲げ耐力の増大は隅角部の破壊を招く可能性があることから、せん断耐力のみを増加させることが望まれる²⁾。一方、はり部材は上面に支承等が設置されていること、都市内でのはり補強は街路上での高所作業となること等から、施工が容易な補強工法の開発が必要とされる。また、補強工費の縮減の観点から、現場作業量を簡易にする補強工法の開発が望まれる。

このような背景のもと、鋼板巻立て工法に着

目し、現場作業を縮減する目的から補強面数および接着面積の違いによるせん断補強効果への影響について実験的検討を行った。本稿ではこれらの結果について報告を行う。

2. 実験方法

2.1 実験供試体

載荷試験に用いた供試体は Case0～Case4 の 5 体である。Case0 は無補強供試体で基本ケース³⁾とし、Case1～Case4 は補強供試体とした。供試体の断面は 600mm×600mm、はり端部より載荷点までの長さは 1,500mm であり、実物の鉄筋コンクリートラーメン橋脚はり部の約 1/4 を想定している。せん断支間比は 2.5 は、一般的なラーメン橋脚はり部のせん断支間比の調査結果により設定した。無補強供試体の一般図を、図-1 に示す。軸方向鉄筋として、SD295A-D22 を 26 本配置し、帯鉄筋は SD295A-D6 を 500mm 間隔で配置した。主鉄筋量に対して帯鉄筋の配筋量を少なく配置し、せん断破壊を先行させる設計を行った。材料強度を表-1 に示す。

図-1 に示した無補強供試体に対して、Case1～Case4 では表-2 に示す補強を行いその補強

* 1 建設省土木研究所耐震技術研究センター耐震研究室 主任研究員 工修 (正会員)
 * 2 建設省土木研究所耐震技術研究センター耐震研究室 室長 工博 (正会員)
 * 3 建設省土木研究所耐震技術研究センター耐震研究室 研究員

効果を検証した。Case1 では、基本的な工法として補強鋼板(SPCC, $t=1.6\text{mm}$)を4面に巻立てた。これは実物補強に用いる鋼板の板厚下限値6mmの1/4を想定した。この補強効果を基準として取り扱うこととした。なお、補強鋼板と無補強供試体との隙間10mmには無収縮グラウトを充填した。Case2では、Case1と同じ補強鋼板(SPCC, $t=1.6\text{mm}$)を3面に巻き立てた。これは、はり上面には支承等が存在するため鋼板の取付け施工が困難であることを考慮したものである。同じく無収縮モルタルで隙間を充填した。なお、無補強面側については固定治具としてM16アンカーポルトを200mm間隔で、軸方向鉄筋の内側に接するように貫通配置し、鋼板を固定し

表-1 材料強度

	Case0	Case1	Case2	Case3	Case4
コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	23.4	25.5	24.9	27.4	28.8
主鉄筋(D13)引張降伏強度 (N/mm ²)	379			365	
帯鉄筋(D9)引張降伏強度 (N/mm ²)	369			377	
補強鋼材引張降伏強度 (N/mm ²)	-	179	178	176	321

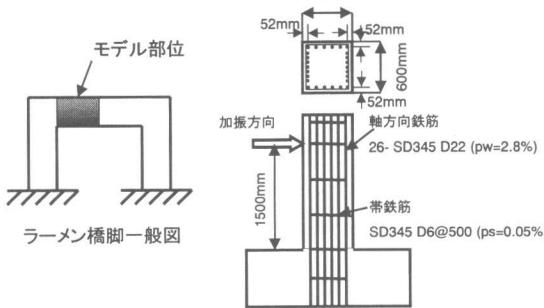


図-1 無補強供試体（Case0）

表-2 実験ケースおよび補強工法

た。鋼板は支圧降伏しないよう補強を行った。アンカーポルト径と配置間隔は、ポルトのせん断力と45度の影響線を考慮した鋼板の引張降伏力とが釣合うよう設計した。Case3では、Case1と同じ補強鋼板(SPCC材, $t=1.6\text{mm}$)を2面に巻立てた。Case3は補強面を2面にすることにより、施工性を向上させることを想定した補強工法である。同じく、無収縮モルタルを隙間充填に用いた。鋼板はCase2と同径同ピッチのアンカーポルトにより鋼板の上下端を固定した。Case4では、Case3と同じく2面に鋼板(SS400, $t=4.5\text{mm}$)を巻立てたが、補強高さは断面高さの半分とした。これは、桁かかり長拡幅のために行っている縁端拡幅用の鋼製プラケットを補強材として想定した補強工法である。

2.2 実験方法

本実験では荷重の載荷は正負交番にて行った。

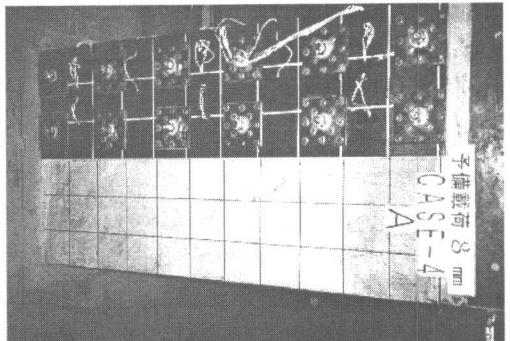
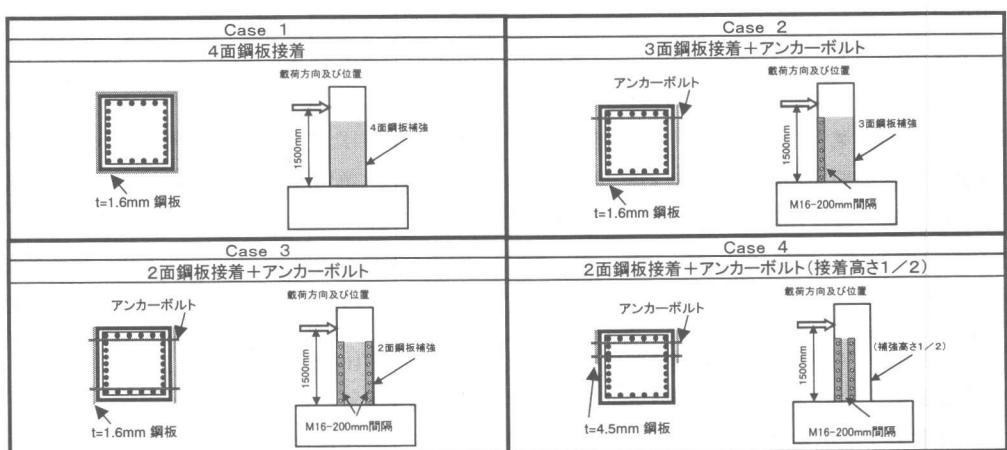


写真-1 実験状況



計算上の初降伏耐力に対応する実験変位を初降伏変位 δ_y と定義し、初降伏変位の整数倍変位を漸増させながら各載荷変位毎に3回ずつ一定振幅載荷した。なお、この基準変位は Case1～Case4 に共通させた。なお Case0 では、 $0.7\delta_y$ に相当する変位を繰返し回数1回で予備載荷後、 $1.0\delta_y, 1.5\delta_y$ と3回繰返しで載荷した。なお実験の統一性を考え全てのケースで δ_y は 10mm とした。実験後の解析により、設定した δ_y 変位は、どのケースにおいてもほぼ初降伏変位に相当したことを確認している。軸力は導入していない。動的加振機の制御は変位制御、載荷変位は正弦波で与え、載荷速度は 3cm/sec とした。

3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係と損傷状況

各模型供試体の載荷点における水平荷重-水平変位関係を図-2 に示す。実験後、鋼板除去した後の供試体のひび割れ状況を図-3 に示す。

無補強供試体 Case0 では、 $0.7\delta_y$ 載荷時に斜めひび割れが発生し、 $1.5\delta_y$ 時に斜めひび割れの急激な進展により脆性的な破壊に至った。

4面に鋼板補強を行った Case1 では、 $3\delta_y$ 載荷時に載荷軸直角方向面ではり中央部より端部にかけて鋼板がはらみだし、 $5\delta_y$ 載荷時に鋼板がさらに大きく変形し水平耐力が低下した。鋼板除去後の供試体観察では、斜めひび割れが確認されたもののひび割れ幅は小さいことが確認された。これらのことからせん断破壊から曲げ破壊へと破壊モードが移行し、本補強法によるせん断補強効果があることが確かめられた。

3面に鋼板補強を行った Case2 では、 $4\delta_y$ 載荷時に端部かぶりコンクリートの剥落と同時に付着割裂破壊とみられる破壊が進行し水平耐力が低下した。本ケースでは最終破壊形態が付着割裂となったが、せん断破壊が確認されなかつたことから付着割裂破壊に至るまでの間はせん断耐力の増加が確認されたと考えられる。鋼板除去後の供試体観察では、斜めひび割れの発生が確認されたが、アンカーボルトおよび3面の

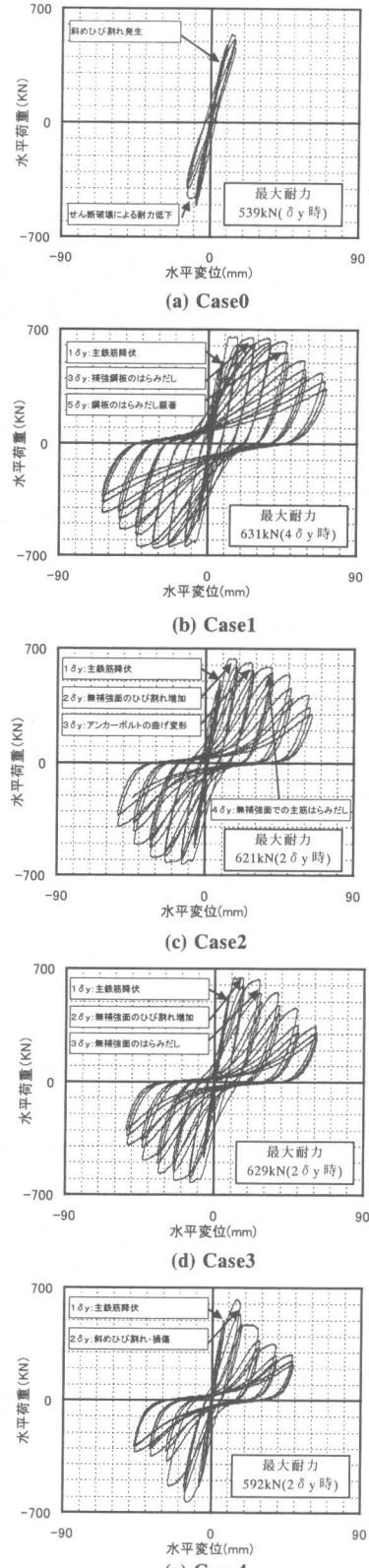


図-2 水平荷重-水平変位関係

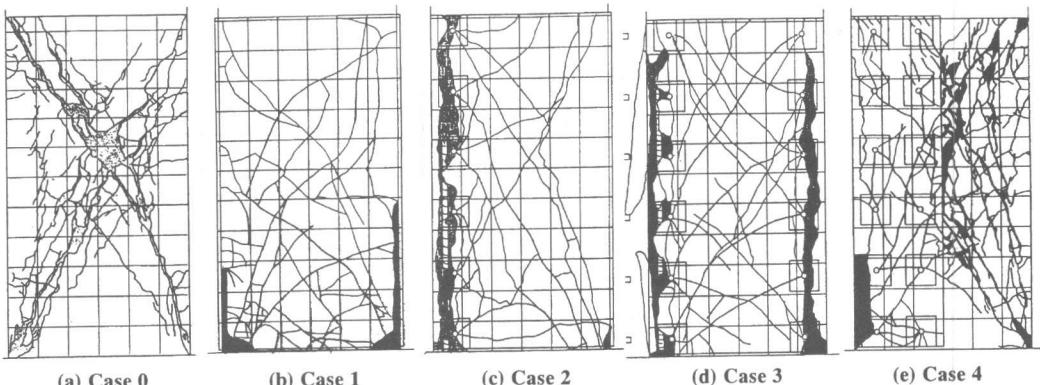


図-3 実験後の鋼板除去後の供試体観察によって得られたひび割れ状況（載荷方向：紙面左右方向）

鋼板で拘束された躯体部分に発生したひび割れは幅が小さく、コンクリート骨材等のかみ合せ効果などはまだ失われていないものと推察され、この囲まれた部分のせん断抵抗は増加しているものと考えられた。

2面に鋼板巻立てを行ったCase3では、Case2と比較して若干早い $3\delta_y$ 載荷時に、付着割裂破壊が進行し、水平耐力が低下した。Case2と同様に、最終破壊形態が付着割裂となったが、せん断破壊が確認されなかったことから付着割裂破壊に至るまでの間はせん断耐力の増加が確認されたと考えられる。鋼板除去後の供試体観察では、アンカーボルトで囲まれたコンクリート躯体部分に発生したひび割れ幅は狭く、コンクリート躯体部分に生じたひび割れによりせん断破壊が進行した様子は見られない。

2面に鋼板巻立てで巻立て高さを断面の $1/2$ としたCase4では、 $2\delta_y$ 載荷時にせん断破壊を生じた。 $1\delta_y$ 載荷により、斜めひび割れの発生がない状態で曲げ降伏を経験したものの、 $2\delta_y$ 載荷時の第2波目載荷時に主として鋼板を巻き立てていない部分を中心として斜めひび割れが発生しそれが急激に進展せん断破壊した。鋼

板除去後の供試体観察では、主に斜めひび割れが進展したのは鋼板で補強を行っていない無補強部分のコンクリート躯体に生じており、アンカーボルトと鋼板とで囲まれたボルト間隔にして断面高さの $1/3$ 程度の部分においてはせん断ひび割れ幅は狭い。このことから、他のケースと同様にアンカーボルトと補強鋼板によって囲まれたコンクリート部分のせん断抵抗機能は喪失していないものと考えられた。

以上のように、全てのケースにおいて、若干であってもアンカーボルトを併用した鋼板によるせん断補強により、部材のせん断耐力が増加したことがわかる。しかしながら、Case4ではせん断破壊を生じ、このことからCase4の補強工法は鋼板による補強効果が他のケースと比較して小さいことが判明した。また実験観察から、鋼板とアンカーボルトにより囲まれた部分がせん断に対して抵抗することが考えられた。

3.2 帯鉄筋と補強鋼板に生じたひずみ

図-4に、帯鉄筋および補強鋼板に生じたひずみを示す。ひずみははり端部から 500mm 位置の帯鉄筋で計測されたひずみ、およびそれに

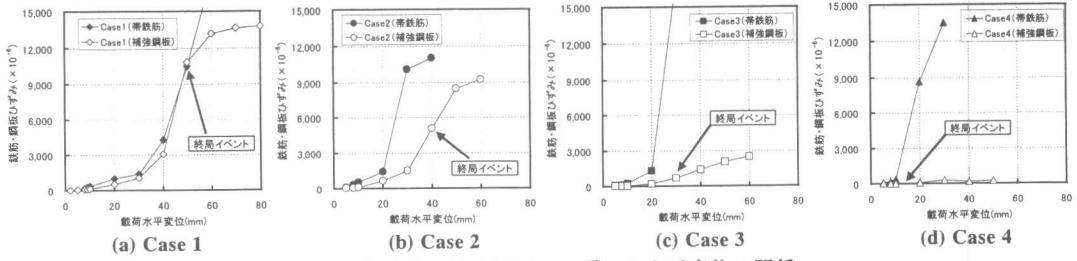
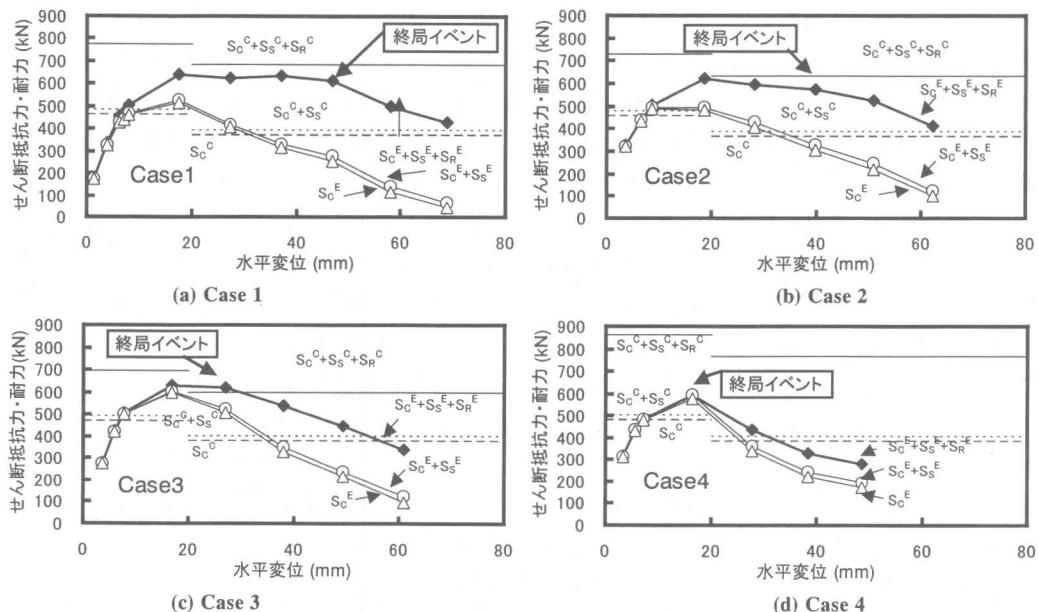


図-4 帯鉄筋と補強鋼板のひずみと水平変位の関係

最も近い位置で計測された補強鋼板のひずみの最大値を用いた。

Case1 の場合、 $3\delta_y$ 載荷までは帶鉄筋および補強鋼板とも同じ傾向でひずみが増加し、 $4\delta_y$ 載荷時で降伏し、 $5\delta_y$ 載荷時ではひずみが急増した。ただし、補強鋼板のひずみには鋼板が面外変形している影響も含まれている。本供試体は、曲げによる終局を迎えたが、帶鉄筋や補強鋼板のひずみの増加傾向から判断して終局イベント発生時にはせん断変形も進行していると考えられる。Case2 の場合、 $2\delta_y$ 載荷までは帶鉄筋および補強鋼板とも同様な傾向でひずみが増加し、 $3\delta_y$ 時に帶鉄筋のひずみが急増している。Case3 の場合は、Case2 と同様の傾向を示しているが、 $3\delta_y$ 時の帶鉄筋ひずみは Case2 と比較し

た場合大きい。帶鉄筋のひずみが大きい原因としては、付着割裂破壊との関連性があると考えられる。Case2 と Case3 で補強材に生じたひずみを比較した場合、Case3 に発生したひずみは Case2 と比較して少なく、 $2\delta_y$ 載荷に至るまでのせん断力分担にも違いが認められる。これは、補強鋼板を主鉄筋を囲い込むように配置した場合とそうでない場合とで、せん断抵抗メカニズムに差があるものと考えられる。 $2\delta_y$ 時にせん断破壊を生じた Case4 の場合、終局時に帶鉄筋に大きなひずみの増加が認められるが、補強鋼板のひずみはほとんど生じていない。したがって、補強鋼板はせん断抵抗にはほとんど寄与していないことがわかる。



$$\text{抵抗力} : S_R^E = \frac{A_s^R \cdot \sigma_s^R(\varepsilon_s^R) \cdot d_R}{a} \quad (1), \quad S_S^E = \frac{A_s' \cdot \sigma_s'(\varepsilon_s') \cdot d}{a} \quad (2), \quad S_C^E = P - S_S - S_R \quad (3)$$

$$\text{耐力} : S_R^C = \frac{A_s^R \cdot \sigma_s^R(\varepsilon_s^R) \cdot d_R}{a} \quad (4), \quad S_S^C = \frac{A_s' \cdot \sigma_s'(\varepsilon_s') \cdot d}{a} \quad (5), \quad S_C^C = C_C \cdot (\sigma_c|_{Case(n)} / \sigma_c|_{Case0})^{1/3} \cdot S_C^E|_{Case0(\delta=10mm)} \quad (6)$$

ここに、 S_R^E : 補強鋼板によるせん断抵抗力、 S_S^E : 帯鉄筋によるせん断抵抗力、 S_C^E : コンクリートによるせん断抵抗力、 P : 水平荷重、 A_s^R : 補強鋼板の単位長さ a あたりの断面積、 $\sigma_s^R(\varepsilon_s^R)$: 発生ひずみが ε_s^R 時に鋼板に生じる引張り応力、 d_R : 補強鋼板の有効高さ（アンカーボルト間隔として算定）、 A_s' : 帯鉄筋の断面積、 $\sigma_s'(\varepsilon_s')$: 発生ひずみが ε_s' 時に帯鉄筋に生じる応力、 d : 有効高さ、 a : 帯鉄筋間隔、 S_R^C : 補強鋼板によるせん断耐力、 S_S^C : 帯鉄筋によるせん断耐力、 S_C^C : コンクリートによるせん断抵抗力、 ε_s^R : 補強鋼板の降伏ひずみ、 ε_s' : 帯鉄筋の降伏ひずみ、 $S_C^E|_{Case0(\delta=10mm)}$: Case1 での δ におけるコンクリートのせん断抵抗力、 $\sigma_c|_{Case(n)}$: Case(n)におけるコンクリートの圧縮応力度、 $\sigma_c|_{Case0}$: Case0 のコンクリートの圧縮応力度、 C_C : 荷重の交番作用の影響に関する補正係数（ここでは、道路橋示方書の場合タイプII 地震動で 0.8、ここでは図示の都合上 $\delta < 2\delta_y$ の場合 1.0、 $\delta > 2\delta_y$ の場合 0.8 を用いて図示した）。

図-5 コンクリート、帶鉄筋および補強鋼板の分担せん断力とせん断耐力の関係

4. せん断抵抗力の分担性状と耐力の関係

図-5 には、各ケースにおける水平荷重-水平変位の包絡線を示す。また、各載荷時におけるコンクリート躯体、帶鉄筋、補強鋼板のせん断抵抗力の分担、および耐力を示した。

各せん断分担力は、図中に示す式(1)～(3)の算定式に基づいて実ひずみに対応した分担力を算出した。なお、ひずみははり端部から 500mm 位置に位置する帶鉄筋で計測されたひずみ、およびその帶鉄筋に最も近い位置で計測された補強鋼板ひずみの最大値を用いた。なお、図中には、繰返しにより水平荷重が低下した載荷変位を「終局イベント」として表示している。

Case1～Case4 とも載荷変位の増加とともに、コンクリートの分担するせん断抵抗力が減少していることがわかる。これは、塑性変形の増加と共にコンクリートの分担耐力が減少するという既往の知見に一致する。また、補強鋼板の分担耐力は、載荷変位の増加とともに分担割合が大きくなることがわかる。補強鋼板によるせん断抵抗を各ケース比較した場合、Case1 から Case4 になるにつれてせん断抵抗の分担が少なくなることがわかる。一方、帶鉄筋については Case1 から Case4 にかけてその分担量に違いは認められない。このように、コンクリート躯体内に存在する帶鉄筋と補強鋼板、および補強鋼板の取付け方法により、せん断抵抗の分担に違いがある。

図中には、道路橋示方書のせん断耐力算定法に基づき、実降伏応力度を考慮せん断耐力を算定した結果もあわせて示している。せん断耐力の計算においては、図中に示す式(4)～(6)算定式に基づき、降伏ひずみに対応した分担耐力を算出した。コンクリートのせん断耐力は、Case0 における δ_y 載荷時のコンクリートのせん断分担力に基づいて算出した。圧縮応力度による補正是土木学会標準示方書の考え方によった。

曲げ破壊した Case1 に対しては、せん断耐力の計算結果は荷重変位の包絡線を上回っており、また終局イベント時のせん断力の分担はほぼせ

ん断耐力の比に近いことがわかる。せん断破壊した Case4 については、トラス理論を仮定した場合ははり全体のせん断耐力は補強鋼板による耐力増加が期待されるが、実際にはほとんどせん断力が分担されていない。はり高さの中央部に鋼板をアンカーボルトにて固定した場合は、せん断抵抗メカニズムとしてトラス理論を用いたせん断耐力の累加は危険側の評価になることがわかる。

5. おわりに

鉄筋コンクリートラーメン橋脚はり部の鋼板巻立て補強法における鋼板巻立て面数や巻立て面積の違いが補強効果に及ぼす影響について実験的検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- ①はり模型供試体に 4 面を鋼板巻立て補強した場合、適切な厚さの鋼板であればせん断耐力が向上せん断補強が可能となる。
- ②はり模型供試体に、2 面および 3 面補強を行う場合で帶鉄筋量が少ない場合は、付着割裂破壊が発生するおそれがある。
- ③巻立て面数もしくはアンカー等定着方法の違いによりせん断補強効果が変化する。補強面数が少なくなるにつれ、鋼板面積が少なくなるにつれ補強鋼板が分担するせん断力が小さくなる傾向にあった。
- ④特に、2 面半高さ補強の場合は、鋼板の補強効果はほとんど見られなかった。この場合トラス理論によるせん断耐力の累加は危険側の評価を与える。

付記

本研究は、建設省土木研究所、首都高速道路公団、および阪神高速道路公団による共同研究として実施したものである。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、1996.12
- 2) 寺山徹、運上茂樹、近藤益央：鉄筋コンクリートラーメン橋脚のはり柱節点部の動的耐力と変形性能、第1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論文集、1998.1
- 3) 寺山徹、運上茂樹、長屋和宏：炭素繊維シートにより補強された R C ラーメン橋脚はり部材の正負交番載荷実験、第 52 回土木学会年次学術講演会論文集、1998.9