

スラブを有するRC梁のせん断耐力に関する実験的研究

京野 光男¹・岡本 大¹・轟 俊太郎¹・佐藤 勉²

¹正会員 工修 (財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

²正会員 工博 (財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

1. はじめに

鉄道構造物に多く採用されている RC ラーメン高架橋の上層梁は、一般的にスラブと単体的に構築されており、図-1 に示すようにスラブを突縁とした T 形梁と考えることができる。既往の研究¹⁾では、T 形梁はスラブの効果により、矩形断面に比べてせん断耐力が大きくなることが確認されている。また、実際に、兵庫県南部地震等の被災事例をみると、既設 RC ラーメン高架橋の上層梁がせん断により大きく損傷を受けた事例はほとんどみられず、スラブがせん断耐力の向上に寄与していると考えられる。

鉄道 RC 構造物の部材の耐力は、鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）（以下、鉄道 RC 標準）²⁾に示される方法により算定することとなる。しかし、現在の鉄道 RC 標準においては、スラブの効果が不明確であり、また、安全側の評価が得られることから、T 形梁のせん断耐力はスラブを無視した矩形断面で算定することとしている。

一方、既設構造物の耐震診断において T 形梁のせん断耐力を過小に評価した場合、実際には上層梁に十分な耐力を有するにも係わらず、補強が必要であるとの判定となることもありうる。そのため、RC ラーメン高架橋上層梁の耐震補強の必要性を合理的に判断するためには、せん断耐力にスラブの効果を

適切に考慮することが必要であると考えられる。

ラーメン高架橋の上層梁は、地震時の水平力によって図-1 に示すように、逆対称曲げモーメントが作用し、スラブが圧縮縁になる場合と引張縁になる場合があり、スラブの効果については、それぞれのケースで異なった効果を示すと考えられる。スラブが圧縮縁にある場合については、既往の研究^{3),4)}によりせん断耐力の評価法の検討がなされているが、スラブが引張縁となる場合の研究はほとんど見られない。

そこで本研究では、引張縁にスラブを有する逆 T 形梁の単純曲げ試験を実施し、引張縁スラブがせん断耐力に与える効果について検討した。そして、実際の既設 RC ラーメン高架橋の耐震診断において、上層梁がせん断耐力の照査を満足しない事例に対し、上層梁のせん断耐力にスラブの効果を考慮して、せん断耐力の再評価を行った。

2. 逆T形RC梁のせん断試験

(1) 実験の概要

本研究では、実在する鉄道 2 層ラーメン高架橋の上層梁を 1/2 に縮小モデル化した T 形梁を実験対象とした。

実験は、スラブ厚をパラメータとして行い、上層

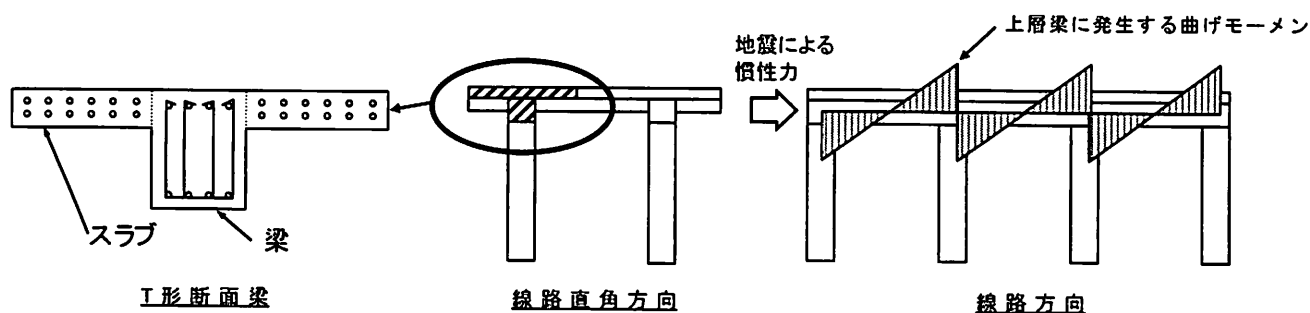


図-1 鉄道RCラーメン高架橋

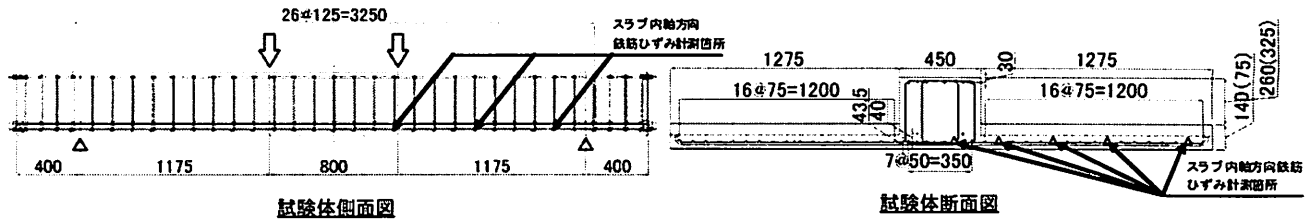


図-2.1 試験体概要

()内はtype-B

表-2.1 試験体の使用材料

No.	コンクリート		軸方向鉄筋			せん断補強筋		
	f_c	E_c	規格値	f_s	E_s	規格値	f_s	E_s
type-A	29.6	24.8	細径異形PC鋼棒 12.6mm-D種1号 (梁内) 引張側10 本圧縮側8本 (スラブ内) 34本	1383	227	SD295A D6 c/c125mm	342	171
type-B	35.3	27.2		1405	228		350	177

f_c : コンクリート強度(N/mm²) f_s : 鋼材降伏強度(N/mm²) E_s, E_c : ヤング係数(kN/mm²)

梁相当のスラブ厚さとした type-A⁵⁾および中層梁相当のスラブ厚さとした type-B の2体の試験体について行った。スラブ厚はそれぞれ、 $t_f=140\text{mm}$ (上層梁) および $t_f=75\text{mm}$ (中層梁) とした。なお、今回の検討ではスラブ厚の違いを確認するものとし、梁部の配筋等、その他の諸元は各試験体とも共通とした。せん断スパン比は $a/d=3.3$ とし、スラブ幅は 3m とした。

梁とスラブの軸方向鉄筋には、試験体の曲げ破壊を防止することを目的として、細径の異形 PC 鋼棒 (D 種 1 号) を用いた。なお、スラブの配筋については、実構造物のスラブの配筋は 2 段配筋となっているが、試験体の場合スラブが薄いため、鉄筋比を同一として 1 段配筋にモデル化した。また、梁のせん断補強鉄筋は、鉄筋径、および配置間隔を実構造物の $1/2$ とした。

試験体概要図および使用材料を図-2.1 および表-2.1 にそれぞれ示す。

(2) 載荷方法と測定項目

載荷は、図-2.1 に示すようにスラブが引張縁となるような単純支持載荷とし、載荷梁を介し 2 点集中載荷とした。

実験における測定項目は、載荷荷重、鉛直変位、軸方向鉄筋ひずみ、せん断補強鉄筋ひずみ、圧縮縁コンクリートひずみとした。

(3) 破壊状況と荷重変位-関係

破壊状況としては、type-A および type-B とともに、まず、スラブの等曲げ区間において、スラブの上面と梁の境界から曲げひび割れが発生した。

その後、type-A は、 200kN 付近で梁のせん断スパンに斜めひび割れが発生し、 300kN 付近でせん断補

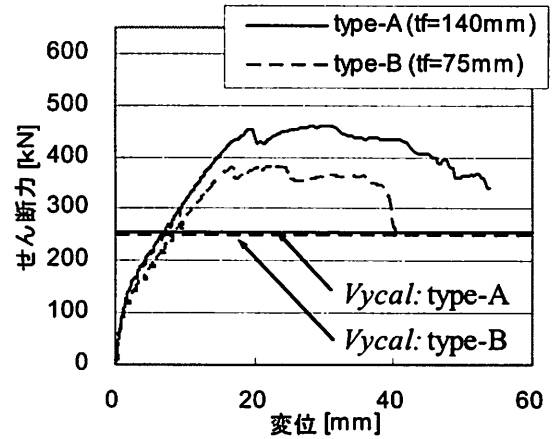


図-2.2 荷重変位関係 (支間中央鉛直変位)

強筋が降伏ひずみに達した。その後、斜めひび割れがスラブまで貫通した時点で概ね、最大荷重となり、徐々に荷重が低下した。

type-B は、 150kN 付近でせん断スパンに斜めひび割れが発生後、 265kN 付近でせん断補強筋が降伏ひずみに達した。type-A と同様に、斜めひび割れがスラブまで貫通した時点で概ね最大荷重となり。その後、徐々に荷重が低下した。図-2.2 に各試験体の荷重-変位関係を示す。図には、表-2.1 に示す材料試験結果を用いて、式(1)⁶⁾により矩形断面として計算したせん断耐力 V_{yal} の計算値を示す。

$$V_s = V_c + V_t \quad (1)$$

$$V_c = 0.20 (0.75 + 1.4 d / a) \cdot \sqrt{f'_c} \cdot \beta_s \cdot \beta_r \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

$$V_t = A_s \cdot f_m \cdot Z / S_v \quad (3)$$

$$\beta_s = \sqrt{1000 / d} \leq 1.5 \quad (4)$$

$$\beta_r = \sqrt{100 / p_r} \leq 1.5 \quad (5)$$

$$p_r = A_s / (b_w \cdot d) \quad (6)$$

ここに、 V_c :せん断補強筋以外で受持つ棒部材のせん断耐力[kN]、 V_t :せん断補強筋により受け受持たれるせん断耐力[kN]、 d :有効高さ[mm]、 a :せん断スパン[mm]、 f'_c :コンクリート設計基準強度[kN/mm²]、

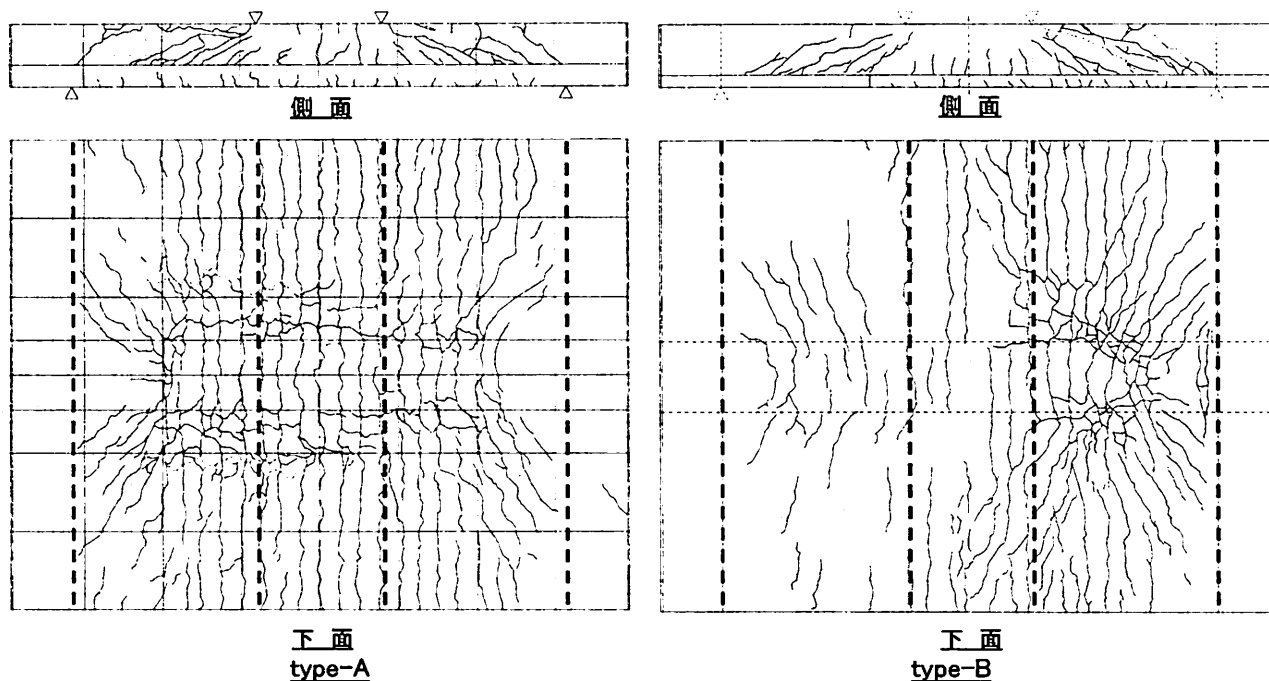


図-2.3 ひび割れ状況図 (載荷終了時)

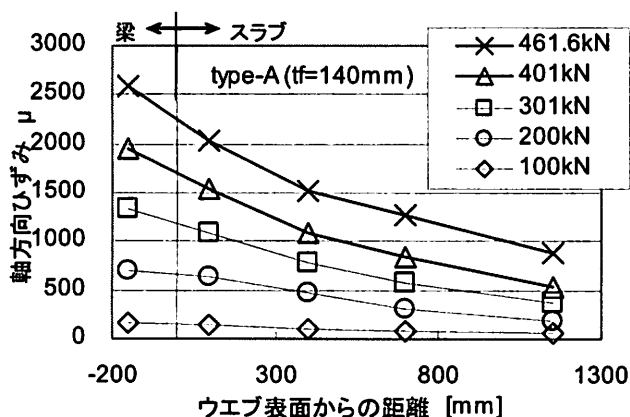


図-2.4 スラブ内鉄筋軸方向鉄筋のひずみ分布 (Type-A)

b_w : RC梁のウェブ幅, S_s : せん断補強筋の配置間隔[mm], A_{ws} : 区間 S_s におけるせん断補強筋の総断面積[mm²], f_{wy} : せん断補強筋の設計引張降伏強度[kN/mm²], Z : 圧縮応力の合力位置から引張鋼材の図心までの距離(一般に $d/1.15$), p_s : せん断引張鋼材比

計算値は実験値に対し, type-A の場合 53%程度, type-B の場合 67%程度, となっており, 矩形断面でせん断耐力を評価した場合, 過小評価となっている. また, スラブ厚の厚い type-A の実験値の方が, type-B の実験値よりも大きくなっている. このように, 実際のせん断耐荷機構には, スラブの影響があり, スラブ厚が厚い方がせん断耐力が向上する.

図-2.3 に, 載荷終了時のひび割れ状況図を示す.

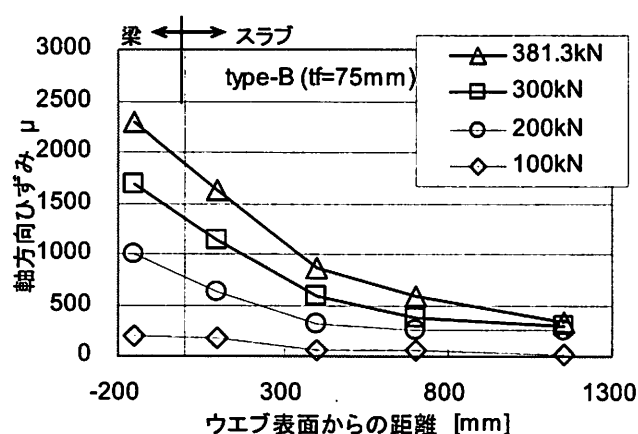


図-2.5 スラブ内鉄筋軸方向鉄筋のひずみ分布 (Type-B)

type-Bの試験体はtype-Aに比べて, 最終的な損傷が片側のせん断スパンに集中する傾向が見られるがものの, いずれの試験体も最終的には梁がスラブを押し抜くような破壊を生じている. そのため, 梁とスラブの界面に軸線方向のひび割れを生じている. なお, 梁がスラブを押し抜くような破壊は, いずれの試験体も最大荷重以降に生じており, 直接的にせん断耐力に影響を及ぼすものではないと考えられる.

(4) スラブ内の軸方向鉄筋のひずみ分布

次に, 各試験体の載荷点の直下におけるスラブの軸方向鉄筋のひずみ分布を図-2.4 および図-2.5 にそれぞれ示す. type-A および type-B のひずみ分布は, スラブ端部に向かって減少しており, 同様の傾向を示している. しかし, スラブの薄い type-B のひずみ分布は, スラブの厚い type-A のひずみ分布と比較し,

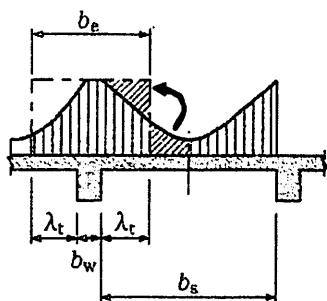


図-2.6 鉄道 RC 標準に示される曲げの有効幅

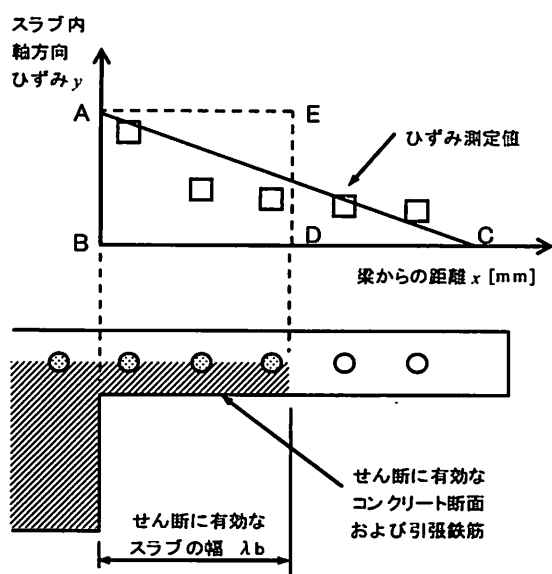


図-2.7 有効幅の算出方法

梁の軸方向鉄筋に対するスラブ先端の軸方向鉄筋のひずみの減少割合が大きくなる傾向を示している。このことから、スラブが厚い方が、スラブ内の広い範囲で引張力が伝達されており、軸方向鉄筋がスラブ端まで有効に効いていると考えられる。なお、載荷点直下の他に、せん断スパンの中央、支点近傍のスラブ内軸方向ひずみの計測を行ったが、いずれも同様の傾向が見られた。

(6) スラブの有効幅を考慮したせん断耐力評価

鉄道 RC 標準では、図-2.6 に示されるように、梁～スラブの圧縮応力分布を基に、圧縮縁にスラブを有する T 形梁の有効幅 b_e を求め、有効幅内の断面を考慮して曲げ耐力を算定することとしている。そこで、せん断耐力を算定する際の引張縁スラブの有効幅についても、測定したスラブ内の軸方向鉄筋のひずみ分布を用いて、同様な方法で有効幅を設定することを試みた。まず、実験から得られた最大耐力時における、スラブ内軸方向鉄筋のひずみ測定値の分布を図-2.7 に示すように直線近似し、三角形 ABC を考える。そして、それと等価な面積の四角形 ABDE を考え、辺 BD で与えられる長さをスラブ有

表-2.2 せん断耐力の比較

試験体	有効幅 λ_b [mm]	せん断耐力 V_{cal} [kN]		実験値 V_{exp} [kN]	耐力比較 V_{exp} / V_{cal}	
		矩形	T形 (有効幅)		矩形	T形 (有効幅)
type-A	794.8	246.2	424.7	461.6	1.87	1.09
type-B	592.8	257.1	342.0	381.3	1.48	1.11

効幅 λ_b とした。この考え方により、各試験体について、計算したスラブの有効幅を表-2.2 に示す。表に示すように、スラブ厚 t_f が厚ければ、有効幅が広くなるという傾向となる。

次に、前述の方法で算出したスラブの有効幅により、引張縁スラブの影響を考慮したせん断耐力と実験値の比較を行った。

せん断耐力算定は矩形断面梁の算定方法に準じて、前述の式(1)～(6)を用いることとした。このとき、スラブの有効幅については以下のとおり考慮した。

- ①：式(2)により V_c を算定する際に、せん断力に抵抗するコンクリート断面積 $b_w d$ に、図-2.7 に示すスラブ斜線部分の断面積を考慮する。
- ②：式(5)によるせん断引張鋼材比による補正係数 β_p を算出する際の A_s に有効幅 λ_b の範囲のスラブ軸方向鉄筋を考慮する。

表-2.2 に各試験体の計算値と実験値の比較を示す。計算値としては、一般的な矩形断面とした場合の計算値と、スラブ有効幅考慮した T 形梁とした場合の計算値の双方を示した。表に示すように、矩形断面とした計算値は実験値を過小評価しており、スラブ厚さの厚い type-A の方がその傾向が強い。一方、有効幅を考慮した場合の計算値は、実験値との整合性が良好であり、スラブ厚が異なっても同様な傾向を示している。この結果から、スラブの軸方向鉄筋の引張ひずみ分布を基に算定したスラブの有効幅により、スラブのせん断耐力に与える評価できると考えられる。

3. 既設高架橋の耐震診断への適用例

(1) 検討の概要

T 形梁のせん断耐力を適切に評価することによりラーメン高架橋上層梁の耐震補強の必要性を合理的に判断できると考えられる。

本検討では、実在する RC ラーメン高架橋の上層梁について、通常の設計方法のように矩形断面としてせん断耐力の照査を行った場合に補強が必要と判定された場合に対して、2章に示す方法でスラブの

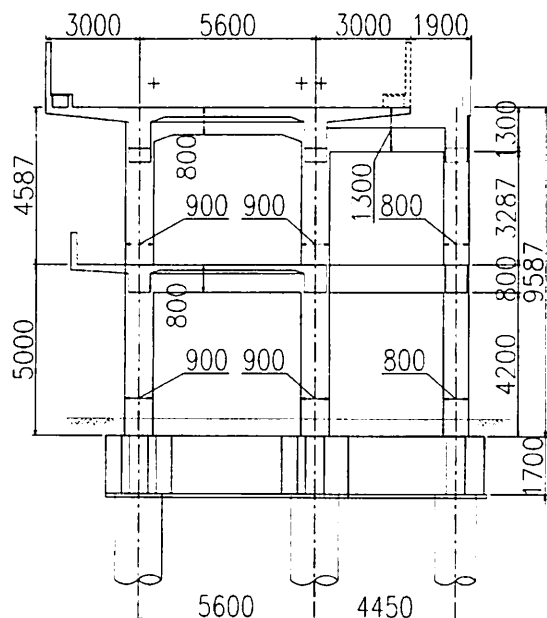


図-3.1 検討の対象とした高架橋一般図

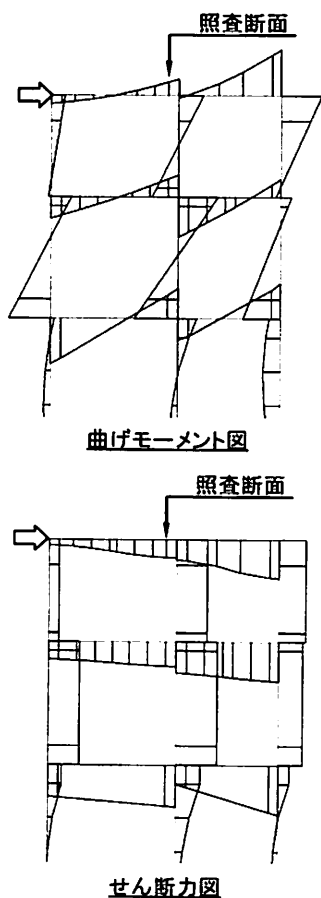


図-3.2 静的非線形解析による断面力図

有効幅を考慮し、せん断耐力の再評価を行った。なお、ここでは、スラブが引張縁となるような曲げモーメントが発生する、いわゆる負曲げ区間について、再検討した例を示す。

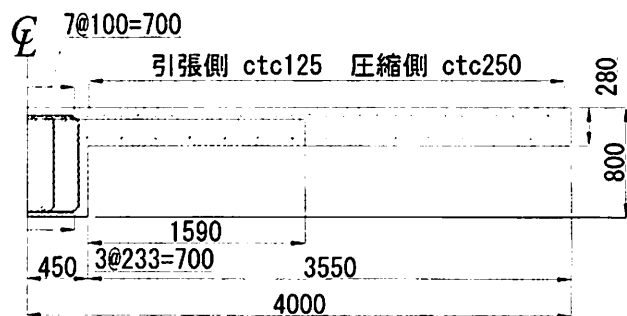


図-3.3 照査断面(上層梁線路直角方向)

表-3.1 既設高架橋の使用材料

コンクリート	軸方向鉄筋	せん断補強筋
27 N/mm ²	SD345-D29(スラブ) SD345-D19 (梁)	SD345-D19

表-3.2 せん断耐力の照査結果

	設計せん断耐力 V_{yd} [kN]	設計せん断力 V_d [kN]	照査値 V_{yd} / V_d
設計式で評価した せん断耐力	667.4	733.6	1.10
有効幅を考慮した せん断耐力	995.7		0.70

(2) 対象構造物

検討対象としたRCラーメン高架橋の構造一般図を図-3.1に示す。対象構造物は、線路方向スパンが8m、線路直角方向スパン5.6mの2柱2杭式の既設RCラーメン高架橋を3柱式に拡幅するものである。なお、今回の検討では、既設部分の線路直角方向ラーメンを対象とした。

(3) せん断耐力の算定方法

2章で検討を行ったせん断耐力の算定式は、式(1)に示すようにせん断スパン比の影響を考慮した実験式である。通常的设计では、一般的にせん断スパン比の影響を考慮しない式(8)²⁾によって行われている。今回の検討においても、せん断スパン比の影響は考慮せず、式(8)を用いることとした。

$$V_c = \beta_s \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_s \quad (8)$$

$$f_{ctd} = 0.2 \sqrt{f'_{cd}} > 0.72 \quad (9)$$

$$\beta_s = 1 \quad N'_s = 0 \text{ の場合} \quad (10)$$

上層梁の有効幅は、2章に示す実験結果を反映した。実験を行ったT形梁は、本検討で対象とした既設高架橋の上層梁を1/2に縮小したものである。そ

のため、実験で得られた有効幅の2倍を、既設高架橋の上層梁の有効幅とした。また、実高架橋のスラブ内の軸方向鉄筋は2段配筋となっている。本検討では、図-3.3に示す斜線部のように、梁の引張鉄筋より下側のスラブコンクリートを有効であるとし、有効幅内のスラブ軸方向鉄筋を式(5)に示す β_p の算定に含めることとした。

(4) 耐震診断結果とせん断耐力の再評価

せん断力に対する耐震診断は、プッシュオーバーによる静的非線形解析を用いて、各部材の最大応答せん断力に対して行った。解析の結果、図-3.2に示すような断面力分布となり、図に示すスラブが引張縁となる上層梁の照査断面がせん断の照査を満たさない結果となった。

既設高架橋上層梁の主な使用材料を表-3.1に示す。現行の設計式を用いた場合、および有効幅を考慮した場合のせん断耐力の照査結果を表-3.2に示す。

せん断の照査でスラブの有効幅を考慮した場合、矩形断面としてせん断耐力を算定する場合に比べて49%大きく算定されている。その結果、せん断の照査を満足し、せん断補強が不要という評価となった。

4. まとめ

本研究では、引張縁にスラブがせん断耐力に与える影響を確認するために単純曲げ試験を実施した。また、実験で得られた知見を基に、既設RCラーメン高架橋上層梁のせん断耐力の評価を行った。

- (1) 逆T形RC梁のせん断耐力は、矩形断面のみでせん断耐力を算出した場合、過小評価となった。実際のせん断耐荷機構にはスラブの効果が寄与していると考えられる。
- (2) せん断耐力は、スラブの軸方向のひずみ分布より換算した幅分のスラブの効果を見込むことにより、実験値と良好に一致した。スラブのひずみ分布を考慮することで有効幅を評価できると考えられる。
- (3) 試験体の2倍のスケールを有する既設高架橋の断面に、実験で得られた有効幅の考え方を適用してせん断力に対する照査を行った。その結果、せん断耐力は約49%大きいとの評価となり、今回のケースにおいては補強を行わなくともせん断の照査を満足する結果となった。

- (4) 今回の検討では、スラブの有効幅の算定方法を一般化するには至っていない。よって、今後はせん断スパン比等をパラメータとした実験結果を基に、スラブの有効幅の算定方法を一般化することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 岡本大，谷村幸裕，渡辺忠明，藤田郁美：T形断面を有するRC梁のせん断耐力の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No2，2004。
- 2) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，2004。
- 3) 岡本大，川村力，服部尚道，酒谷弘行：せん断補強筋を有する鉄筋コンクリートT型梁のせん断耐力の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No2，2005。
- 4) WithitPansuk,YasuhikoSato：SherMechanism of Reinforced Concrete T-Beams with Stirrups，Journal of Advanced Concrete Technology，Vol.5，No3，395-408，October 2009。
- 5) 黒川浩嗣，岡本大，西口健太郎，近藤政弘：逆対称曲げモーメントを受けるT形RC梁のせん断耐力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No3，2008。
- 6) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，第372号/V-5，pp.67-77，1995.2。