

鋼桁とRC橋脚の剛結構造に関する研究（第3報）

Rigid Structure for Joining Steel Girder to RC Pier (Part 3)

佐藤 徹*¹ 清水 功雄*² 鳥越 弘行*³
Toru SATO Isao SHIMIZU Hiroyuki TORIGOE

Summary

A cyclic loading test with two specimens and FEM analysis were performed to learn the dynamic properties and load bearing capacities of a rigid section formed by a steel girder and an RC pier in a hybrid bridge structure. The results clarified the mechanism whereby loads that the bearing action of main reinforcing bars or concrete in an RC column transmits to the rigid section are conveyed to a steel girder and concrete in that section. The results also revealed the effect of stud shear connectors fixed to the stiffener on the transmission of loads to the steel girder. These results might serve as basic information for establishing a method for designing the rigid sections of such structures.

キーワード：複合構造，結合部，応力伝達，スティフナ，スタッドジベル

1. まえがき

建設工事に対するコスト削減要求の高まりとともに、一方では耐久性、耐震性など所要の性能および品質の確保・向上が求められている。このような状況の中、経済性に優れる構造として、鋼桁とRC橋脚を剛結する複合ラーメン橋が注目されてきている。この形式の橋梁構造は、高価な支承の数を削減するため、初期建設費および維持管理費の縮減に効果があり、さらに上部工の軽量化に伴って基礎工、下部工の規模が縮小可能であるため、全体構造としての建設費削減が可能であると考えられている。また、全体の構造物としての不静定次数が増すことにより、より耐震的となるなど、鋼とコンクリートの特長を効果的に利用し合う合理的な構造形式であり、近年、日本道路公団を中心に採用事例が増えてきている。

当社では以前からこの構造形式に関する研究を行っているが、現場施工の省力化を考慮した、構造的には最も簡易と思われるRC結合方式による剛結構造の適用を目指しており、これまでの研究成果の一部は、JH東京第一建設局の「横浜緑IC・Dランプ橋」に活用されている。鋼桁とコンクリート柱との結合部に関する基本的な力学的性状、耐荷性能、応力伝達機構は実験・解析によりほぼ解明されている状況にあるが、未だ結合部の合理的な設計法を提案するには至っていない。ここでは、結合部設計法を確立する上で必要となる基礎資料として、主鉄筋が結合部内の応力伝達に果た

す役割と、結合部内スティフナに設けたスタッドジベルがスティフナの耐荷性能に与える影響を解明するために実施した、載荷実験およびFEM解析の概要について報告する。

2. 載荷実験

(1) 実験概要

1) 供試体

実験供試体は過去に実施した実験と同様に、RC柱より延長した主鉄筋を鋼桁下フランジにあけた孔を貫通させ、鋼桁の上下フランジ、ウェブ、およびスティフナで囲まれる空間に充填したコンクリートに定着させることで、鋼桁とRC柱を剛結させる結合構造としている。

今回の実験では結合部内で破壊が生じることを意図し、大きな力をRC柱から結合部へと伝達するように、主鉄筋の径を太く(D19→D25)し鉄筋量を増加させた。結果的に鉄筋量が以前の供試体に比べ変化(引張鉄筋比0.9%→1.2%)しているが、結合部の破壊形態を観察するために、結合部内の補強は行わないこととした。また、結合部に合わせて鋼桁およびRC柱の耐荷力も上げるため、供試体を大型化している。供試体は実験設備の関係から、最大荷重を100tf程度として断面寸法を計算している。なお、供試体には自重を軽減するために軽量コンクリートを使用し、コンクリートの設計基準強度は300kgf/cm²とした。また鋼桁はSS400

*¹技術本部技術開発部技術開発課

*²技術本部技術開発部長

*³技術本部付参与

材、鉄筋はSD345材を用いている。今回の供試体では主鉄筋が結合部の応力伝達に果たす役割を定性的に理解するとともに、スタッドジベルがスチーフナの耐荷機構に及ぼす影響を解明することを目的としているため、結合部内スチーフナのスタッドジベルの有無をパラメータとした。供試体名はスタッドを取り付けない供試体をS-Type、スタッドを取り付けた供試体をT-Typeとしている（図-1）。

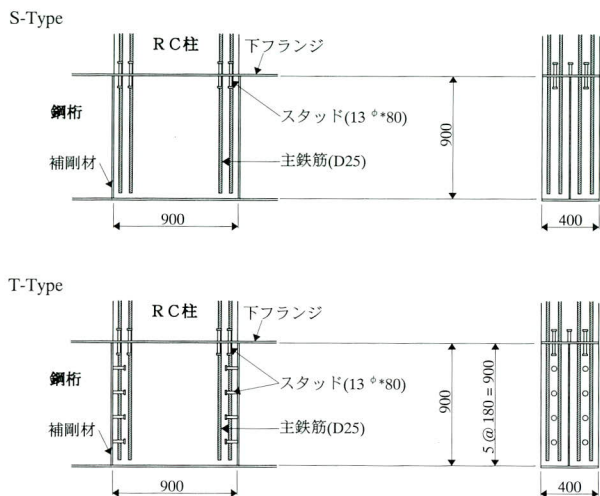


図-1 供試体の接合部詳細

2) 荷重方法

供試体は実際の構造物とは上下方向を逆にして設置し、RC柱の先端部にアクチュエーターのヘッドが伸びる方向を正、縮む方向を負とする静的正負交番荷重を載荷した。

荷重は弾性理論により求めたひびわれ発生荷重の1/2、ひびわれ発生荷重、主鉄筋許容応力、主鉄筋降伏の各レベルまで、それぞれ負方向、正方向の順で交互に載荷を行った。実験状況を写真-1に、載荷装置を図-2に示す。

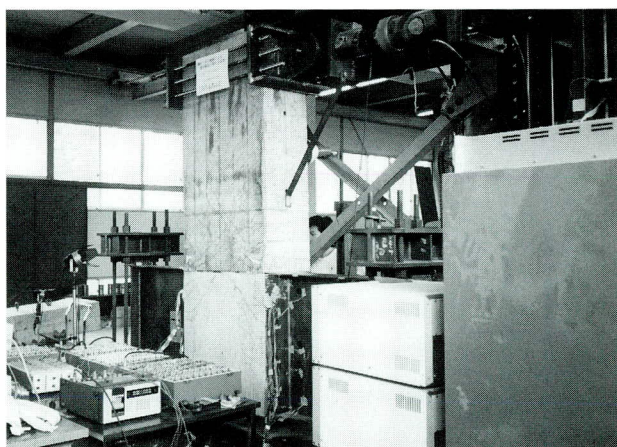


写真-1 実験状況

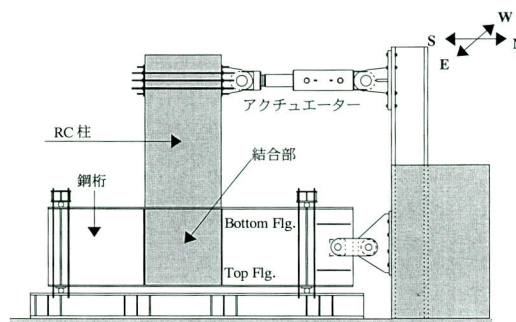


図-2 載荷装置図

(2) 実験結果

1) 供試体のひびわれおよび破壊性状

供試体には計算ひびわれ発生荷重（11.0tf）以下の10.0tf前後から、鋼桁下フランジ近傍に水平方向ひびわれが発生し、荷重の増加とともに進展した。また初期段階から結合部内にもひびわれが発生しており、結合部にも応力が伝達されていることが確認できた。

さらに載荷を進めると、両供試体とも主鉄筋の降伏後、結合部内での定着破壊が起り、主鉄筋の引き抜けによって結合部内コンクリートに斜めひびわれが発生して、最終的にはRC柱圧縮側コンクリートが圧壊し、引張側コンクリートの鋼桁とRC柱との間の口開きが進行した。各供試体でのひびわれ状況を図-3に示す。

2) 供試体の耐荷力

表-1に載荷試験結果を示す。また図-4に、載荷によって生じる鋼桁（下フランジ位置：a点）とRC柱（鋼桁から190mm位置：b点）の口開き量と、載荷荷重との関係を表したものを示す。a点の主鉄筋が降伏に至るまでは荷重と開口量は比例関係にあり、供試体の剛性は保たれていると考えられる。このとき結合部でも、RC柱側が耐荷力を失うまで大きな損傷を生じることはなかった。S-Typeでは84.0tf、T-Typeでは86.2tfでb点の主鉄筋が降伏したが、それ以降もすぐに供試体の耐荷力が低下することなく、結合部内の主鉄筋が定着破壊により抜け出し、コンクリートに斜めひびわれが発生するまで耐荷力の低下はみられなかった。今回の実験では主鉄筋の定着長を鉄筋径の35倍としており、計算定着破壊荷重は84.8tfと設計降伏荷重より大きくとっている。

以上の結果から、主鉄筋の降伏荷重より定着破壊荷重が大きい場合、主鉄筋の降伏までの範囲では供試体の剛性は保たれることが示され、この接合構造の耐荷機構の信頼性が確認された。

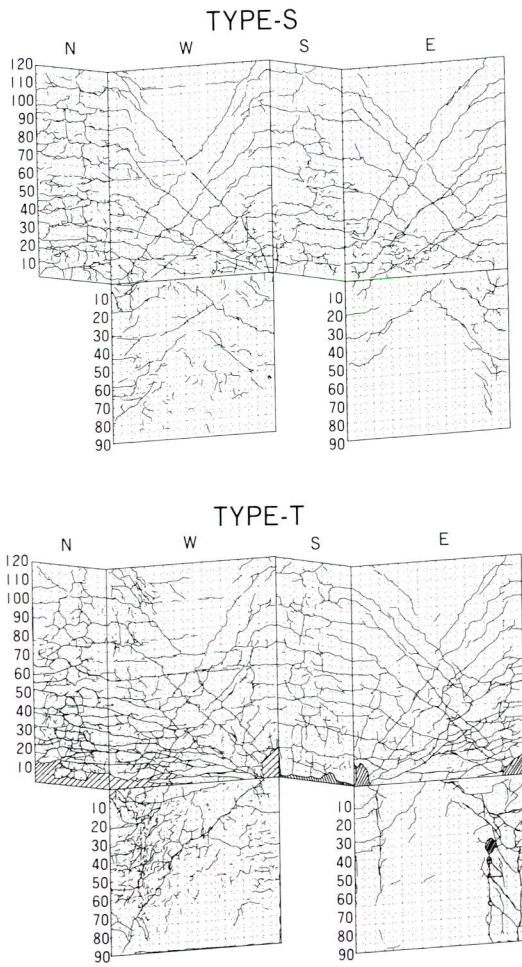


図-3 ひびわれ状況図

表-1 載荷試験結果

		Ps _{y1}	Ps _{y2}	P _y	P _{cal}
S-Type	荷重 (tf)	76.0	84.0	88.0	83.5
T-Type (with studs)	荷重 (tf)	75.0	86.2	88.8	83.5

Ps_{y1} : a 位置主鉄筋降伏、Ps_{y2} : b 位置主鉄筋降伏
 P_y : 供試体降伏、P_{cal} : 弾性計算による主鉄筋降伏

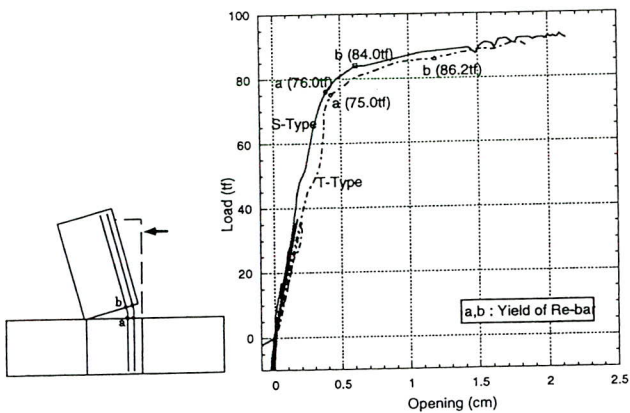


図-4 結合面開口量と主鉄筋降伏荷重関係

3) 主鉄筋の付着性状

結合部内においては、RC柱の主鉄筋は確実に定着されていることを確認する必要があることから、鉄筋のひずみデータを用いて付着応力を算出した。図-5にT-Typeにおける外側鉄筋の付着応力分布を示す。

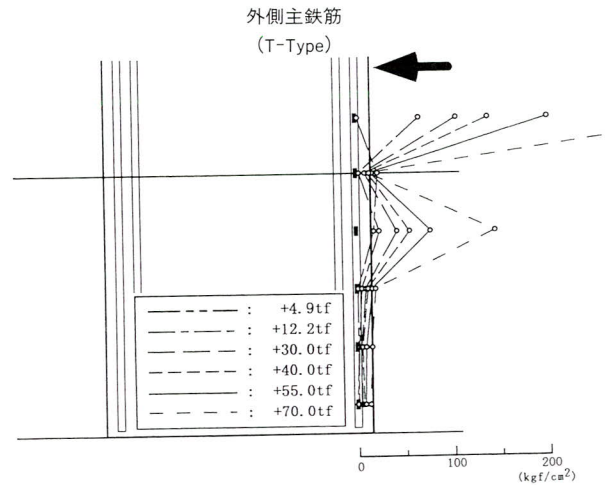
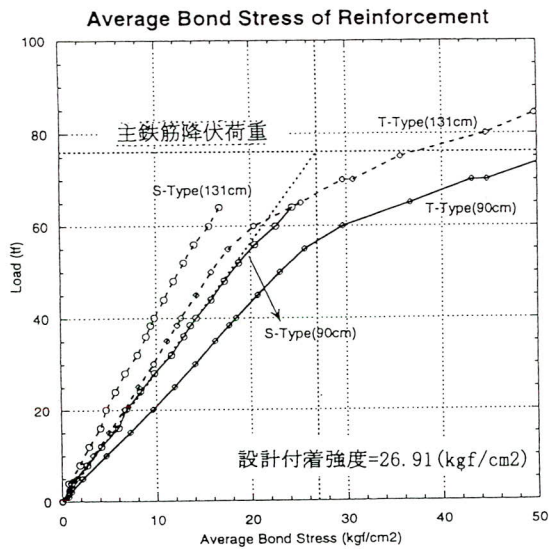


図-5 主鉄筋の付着応力分布の一例

結合部のRC柱側では大きな付着が発生しており、主鉄筋の引張力はこの付着応力によって結合部内コンクリートへ伝えられると考えられる。また、結合部内主鉄筋の付着応力度を積分し、定着長で割ることで求めた平均付着応力度と荷重との関係を図-6に示す。



90cm : 主鉄筋定着長を結合部全高 (90cm) 有効とした場合
 131cm : 主鉄筋定着長を結合部全高 + D / 2 有効とした場合
 D : 有効高さ

図-6 荷重-平均付着応力関係図

主鉄筋に付着劣化が生じることなく、安定して引張力が結合部内に伝達されるためには、主鉄筋の降伏荷重と設計付着強度 ($f_{bok} = 0.6 f'_{ck}{}^{2/3} = 26.91 \text{ kgf/cm}^2$) との交点と原点を結ぶ直線より上の安全側に位置する必要がある。S-Typeではほぼこの直線上に位置しているが、スティフナにスタッドジベルを設けたT-Typeでは結合部内コンクリートがより拘束され、スタッドを介して力が効率よく伝達されるため、主鉄筋の付着応力が大きくなり危険側に位置することとなる。結合部の応力伝達を確実に行うためには、スティフナにスタッドジベルを設ける必要があるが、これは載荷荷重が増大した場合に主鉄筋の降伏荷重との関係によっては、結合部内で定着破壊が発生する恐れがあることを示しており、実際にT-Typeの載荷試験の終局状態では、結合部内コンクリートで主鉄筋に沿った縦ひびわれが発生している。終局限界状態での塑性ヒンジ化が結合部で生じると、補修等の作業が非常に困難となるため、結合部は健全な状態に保つことが望ましい。従って、実際の構造物を設計する際には安全側となることを考慮して、主鉄筋の定着長をコンクリート標準示方書の算定値とするのではなく、フーチング等の規定に示されているように、柱の有効高さの半分を加算するなどの措置を検討する必要があると考えられる。

また、スタッドジベルを設けない場合は、主鉄筋の付着応力は大きくならないものの、鋼桁下フランジに過大な応力が発生していることから、結合部の構造としてはスタッドジベルを設けるのが望ましいと考えている。

4) スティフナのひずみ性状

スティフナの受けているひずみ分布を供試体間で比較

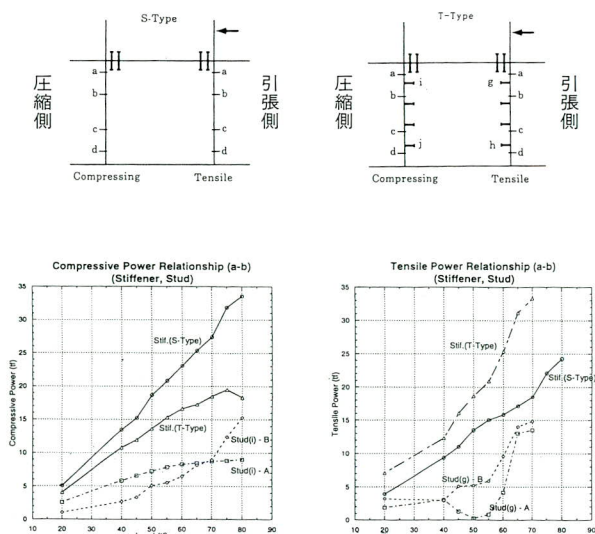


図-7 スティフナの荷重分布曲線

すると、圧縮側ではS-Typeが大きく、引張側では逆にT-Typeの方が大きな値を示した。両者の相違はスティフナに設置したスタッドジベルの有無であり、スタッドジベル有りのT-Typeの場合、圧縮側スティフナはスタッドを介して結合部内コンクリートへ圧縮力が分散されるためスティフナの受ける圧縮力は小さく、引張側スティフナでは結合部内コンクリートの引張力がスタッドを介してスティフナに伝達されるため大きな値となるものと考えられる。スティフナに作用する力と荷重との関係をまとめたものを図-7に示す。

3. FEM解析

実験で用いたS-Type、T-Typeの供試体をモデル化し、解析結果と実験結果の比較を行った。モデルの寸法と各部材要素を図-8に、構成方程式を図-9に示す。

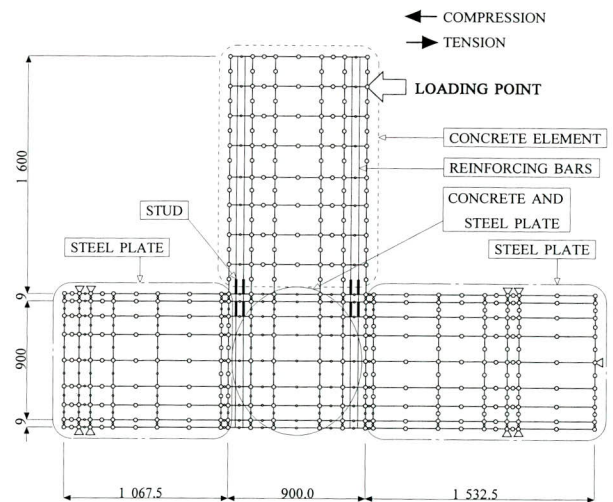


図-8 解析モデルの要素と寸法

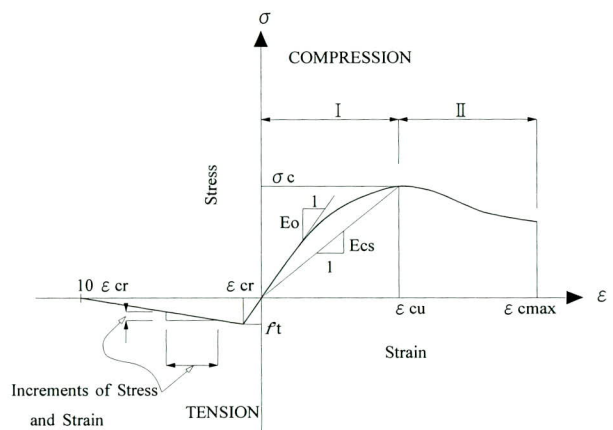


図-9 コンクリートの構成方程式

圧縮側コンクリートの挙動は、最大ひずみ ϵ_{cu} に達するまでは以下の方程式で表される。

$$s = \frac{E_0 \epsilon}{1 + \left(\frac{E_0}{E_{sc}} - 2 \right) \frac{\epsilon}{\epsilon_{cu}} + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{cu}} \right)^2}$$

E_0 : 初期正接係数

E_{sc} : 最大ひずみでの正割係数

最大ひずみに達した後の挙動は、下式で表される。

$$\sigma = \sigma_c \{ 1 - 100 (\epsilon_{cmax} - \epsilon_{cu}) \}$$

σ_c : コンクリートの圧縮強度

ϵ_{cmax} : 終局ひずみ

また引張側においては、主応力がコンクリートの引張強度に達したとき、ひびわれが主応力の直角方向に発生するものと仮定した。ひびわれ発生後もコンクリートはひびわれ間の引張力を伝達し、その大きさはひびわれひずみ ϵ_{cr} の10倍とした。

各供試体の荷重-変位関係では、弾性範囲内における解析モデルの曲げ剛性は実験結果より若干小さいものの良く一致している。代表例としてS-Typeでの荷重-変位関係の解析と実験の比較結果を図-10に示す。

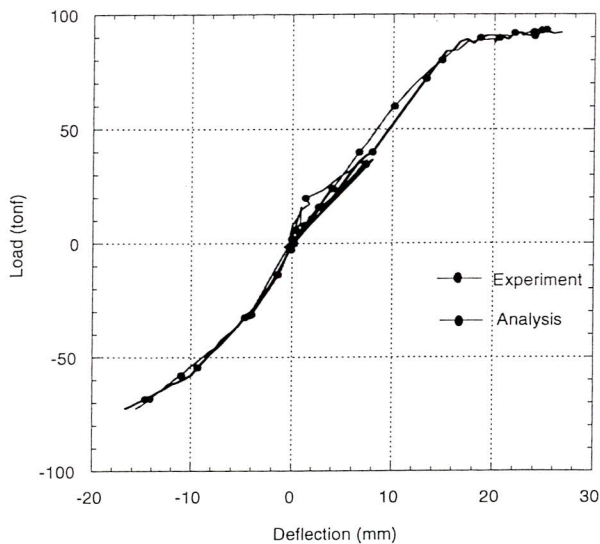


図-10 S-Typeの荷重-変位曲線

解析においては、終局状態は結合部内コンクリート要素の圧壊であったが、結合部の変形が大きい場合でもスティフナは降伏点まで達していなかった。また、実験でも結合部内コンクリートのひびわれが生じたが、終局状態は鋼桁とRC柱との境界面での極端な開口であった。この位置で塑性ヒンジが作られることにより、鋼桁側の致命的な損傷の発生は抑えられると考えている。

スティフナの挙動に関する解析結果は、実験を裏付け

の結果が得られており、スティフナに作用する圧縮および引張力の実験結果との比較を図-11に示す。

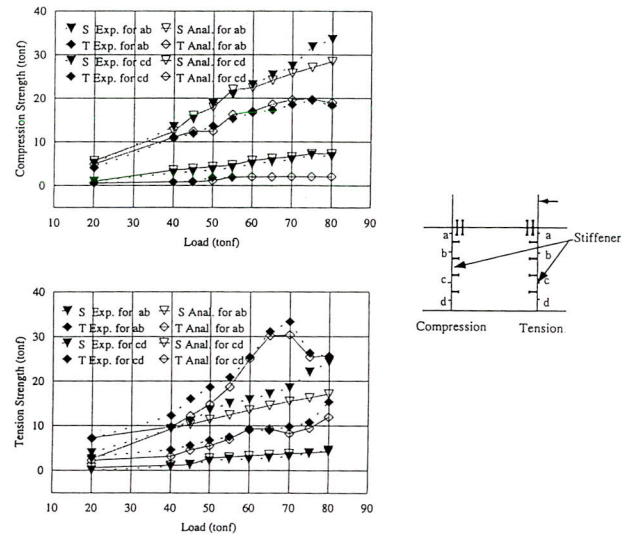


図-11 スティフナの作用力関係図

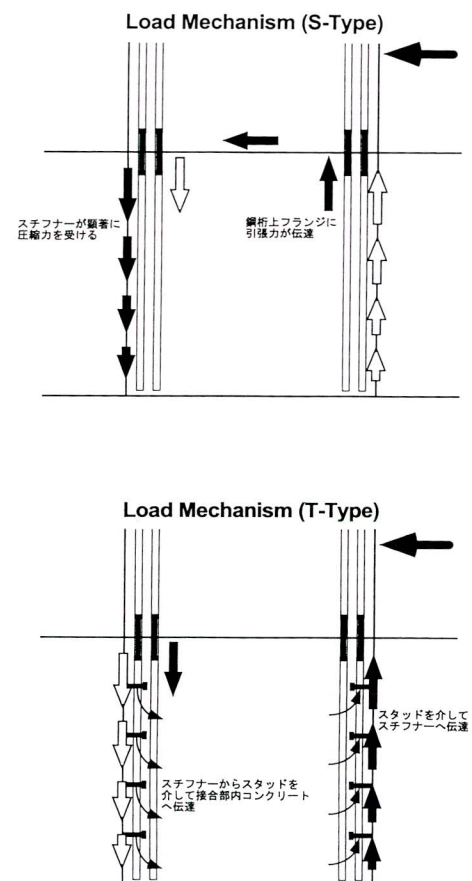


図-12 応力伝達におけるスタッドの役割

スタッドを有するT-Typeの引張側スティフナにおいては、S-Typeに比べてより大きい力が作用しており、更に柱に近い側でより大きい。また圧縮側スティフナでは、スタッドの無いS-Typeの受ける圧縮力が大きくなっている。これはスタッドジベルが有る場合、引張側スティフナでは、結合部内コンクリートの引張力がスタッドを介してスティフナに伝達されるため作用力が大きく、逆に圧縮側では、圧縮力を結合部内コンクリートへ分散するため、スティフナの作用力は小さくなるものと考えられる。従って、結合部の応力伝達にスタッドが大きく関わっていると理解でき(図-12)、結合部の応力を確実に伝達するためには、スタッドジベルの取付けは不可欠であると考えられる。

4. まとめ

以上の実験および解析結果から主鉄筋の役割、スティフナに取り付けたスタッドジベルの役割に関して以下のような結論が得られた。

- ①鋼桁下フランジ位置主鉄筋が降伏に至るまでは、供試体の剛性は保たれるとともに、結合部も剛結と考えて良い挙動を示しており、RC結合方式の信頼性が示された。
- ②主鉄筋の定着長は主鉄筋の降伏荷重と定着破壊荷重との関係によっては、平均付着応力が安全側となるように、十分な長さを確保する配慮を検討する必要がある。
- ③スティフナに設けるスタッドは、圧縮側ではスティフナの応力を結合部内コンクリートへ分散させ、引張側では結合部内コンクリートの応力をスティフナへ伝達する働きをする。
- ④スティフナはRC柱側の方が大きいひずみを受けており、スティフナに設けるスタッドは柱側ほど応力の伝達に効果的役割を果たす。ただし、スタッドジベルの必要本数、適切な配置方法などに関しては、現在も検討を進めているところである。

5. あとがき

本研究は第1報、第2報と同様に、埼玉大学工学部建設工学科との共同研究として実施したものである。現在も引き続き上部工から基礎までを含めた全体構造物としての挙動に関する解析を行っており、耐震設計を考える際の基礎データとしてまとめたいと考えている。今後はこの構造形式を広く提案していくために、過去から一連の研究成果を取りまとめ、それらを基に結合部の設計法をまとめる作業にかかる予定である。

今回の実験および解析にあたっては、埼玉大学の町田篤彦教授、大学院生の杉山孝雄氏(当時、現在は日本道路公団)、Mochammad Afifuddin氏に御尽力いただきました。また、田島橋梁構造研究所の田島二郎博士にも多くの助言を賜りました。ここに紙上を借りて深謝いたします。

<参考文献>

- 1) 杉山, AFIFUDDIN, 町田, 佐藤: 鋼-コンクリート複合構造接合部の耐荷機構に関する研究, 日本コンクリート工学論文集(投稿中), 1997
- 2) 杉山, 町田, 佐藤, AFIFUDDIN: 鋼-RC剛結ラーメン橋梁の連結機構に関する実験研究, 土木学会第52回年次学術講演会概要集, I-A137, pp. 272-273, 1997.9
- 3) AFIFUDDIN, MACHIDA, SATO: NUMERICAL STUDY ON THE BEHAVIOR OF STIFFENER IN JOINT CONNECTION OF HYBRID RIGID-FRAME BRIDGE, 土木学会第52回年次学術講演会概要集, I-A138, pp. 274-275, 1997.9
- 4) 鳥越, 清水: 鋼RC複合多径間ラーメン橋の提案, 宮地技報No. 5, pp. 3-15, 1989
- 5) 清水, 鳥越: 鋼とRC橋脚の剛結構造に関する研究(第1報), 宮地技報No. 10, pp. 106-111, 1994
- 6) 清水, 鳥越: 鋼とRC橋脚の剛結構造に関する研究(第2報), 宮地技報No. 11, pp. 37-44, 1995

1997.10.31 受付