

鋼桁とRC橋脚の剛結構造に関する研究（第2報）

Rigid Structure for Joining Steel Girder to RC Pier (Part 2)

清水 功雄*¹ 鳥越 弘行*²
Isao SHIMIZU Hiroyuki TORIGOE

Summary

Continuous rigid-frame bridges, constructed by using concrete piers with the top of the piers joined rigidly to the bridge body for intermediate support of a continuous steel girder bridge, have been attracting attention because the structure is simple yet provides excellent earthquake resistance. So far, however, this type of structure is still at the stage of experimental adoption for actual bridges. One reason for this is that the reliability of such structures, which are hybrids of steel and concrete, is uncertain.

All previous tests have ascertained that concrete surrounded by steel is able to withstand loads remarkably well, and these results have opened very promising prospects for putting rigid joints which employ reinforced concrete into practical use. This paper describes the basic concept of rigid joints, and reports on static load tests and other tests performed on such joints.

In this paper, the results of close examination and analysis done to clarify the load transfer mechanism of rigidly joined sections are described.

1. まえがき

鋼桁と鉄筋コンクリート橋脚を橋脚頭部で剛結した鋼・RC複合多径間連続ラーメン橋梁形式は、連続鋼桁橋の中間支承が不要であり、かつ、載荷荷重・地震荷重を鋼桁と鉄筋コンクリート橋脚が合理的に分担し、基礎構造を含めて耐震性と経済性に優れた構造である。

近年、この種類の混合構造の研究開発は各分野で精力的に進められており、既に実橋に用いられた2～3の実施例がある¹⁾。筆者らも、以前よりこの構造の研究・調査を進めて、合理的な構造であるとの提案を行ってきた²⁾。

そして、平成5年度から、今まで実用化されている鋼桁・RC橋脚の剛結方式としてPC鋼材を使用してプレストレスを導入するPC剛結方式でなく、現場施工性、経済性に優れた鉄筋コンクリートによる結合（RC剛結方式）の試験・研究を進めていて、その試験の一部を第1報³⁾として報告している。

今回は、平成5年度の試験結果を踏まえて、試験供試体のスケールを幾分大きくしたRC剛結構造の平成6年度実施の試験結果の概要と、平成5年度で得られた成果のうち第1報であまり触れられていないものの概要について報告する。

2. 実験概要

今回の実験も平成5年度の試験と同様で、「RC橋脚より延長した主鉄筋を鋼桁フランジを貫通させ、鋼桁に設けた接合部コンクリートに定着する」という簡単なRC剛結構造の実験である。平成5年度の研究との主な相違は以下の点である。

- ①鋼桁の一方のスパンを短くして、供試体形状をL形に近くした。
- ②鋼桁の桁高を増して、接合部が桁高全高に及ばないようにして実際の構造に近づけた。
- ③平成5年度の成果に基づき、接合部内の帯鉄筋ならびにスタッドの本数を減らした。

(1) 供試体

供試体として合計4体を作成した（供試体記号O、P、Q、R）。図-1に示すように、供試体O～Qは接合部内の構造が異なり、供試体Oは帯鉄筋およびウェブのスタッドを全く用いないもの、供試体Pはウェブのスタッドのみを用いたもの、供試体Qは帯鉄筋およびウェブのスタッドを用いたものである。

また、供試体Rの接合構造は供試体Oと同様であるが、主鉄筋をD25として供試体O～QのD19より太くし、定着長が不足することを端部に定着板を設けること

*1 技術本部 技術開発部次長

*2 技術本部 参与

により補ったものである。

供試体の製作にあたっては、鉄筋を組み込んだ後全体を横にねかせて接合部の片側のコンクリートを打込み、3日後に裏返して反対側の接合部および橋脚部のコンクリートを打込んだ。全てのコンクリートを打込んだ後、供試体を湿布で覆って7日間養生した。

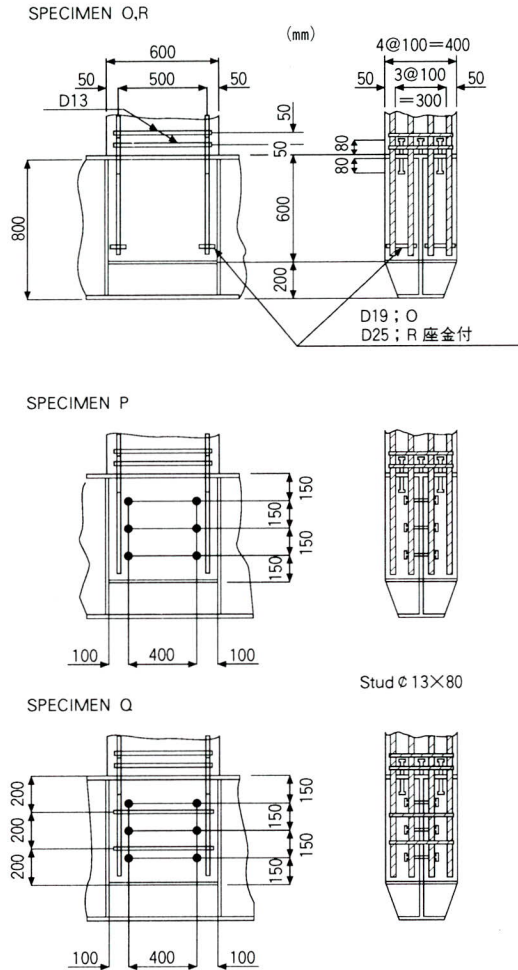


図-1 供試体接合部内構造

(2) 使用材料

供試体に用いたコンクリートは早強セメントを使用し、粗骨材最大寸法20mm、スランプ12cmのレディーミクストコンクリートである。また、鋼桁にはSS400、主鉄筋にはSD345・D19またはD25の異形鉄筋、帯鉄筋にはSD345・D13の異形鉄筋をそれぞれ用いた。使用材料の試験結果は表-1のようであった。

表-1 使用材料試験結果

コンクリート	配合強度	圧縮強度	スランプ
供試体 Q、P、Q	30(kgf/cm ²)	361(kgf/cm ²)	12(cm)
供試体 R	350	415	12
主鉄筋	降伏応力	降伏時歪	弾性係数
D19	4077(kgf/cm ²)	1938(u)	2.1×10 ⁶ (kgf/cm ²)
D25	3786	2320	1.63×10 ⁶

(3) 荷重方法

荷重にあたっては、図-2に示すように実際の構造物とは上下方向を逆にして実験床に固定し、鉄筋コンクリート柱の上部（実際の構造物では、橋脚下端）に水平荷重を荷重した。試験状況を写真-1に示す。

水平荷重は供試体O、P、およびRに対しては静的正負交番荷重とし、また供試体Qに対しては疲労荷重とした。以後、供試体の各部を示すのには図-2の状態をもとにすることとする。例えば、上フランジといえは鉄筋コンクリート柱と接しているフランジのことであるが、実際の構造では下フランジに相当する。

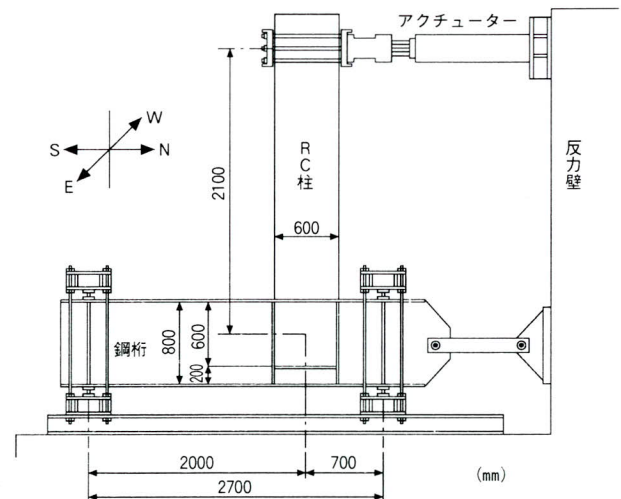


図-2 実験装置と荷重方法

3. 実験結果

(1) ひび割れおよび破壊状況

供試体のひび割れ状況は図-3のようであって、いずれの供試体も、鉄筋コンクリート柱下端の接合部に接す

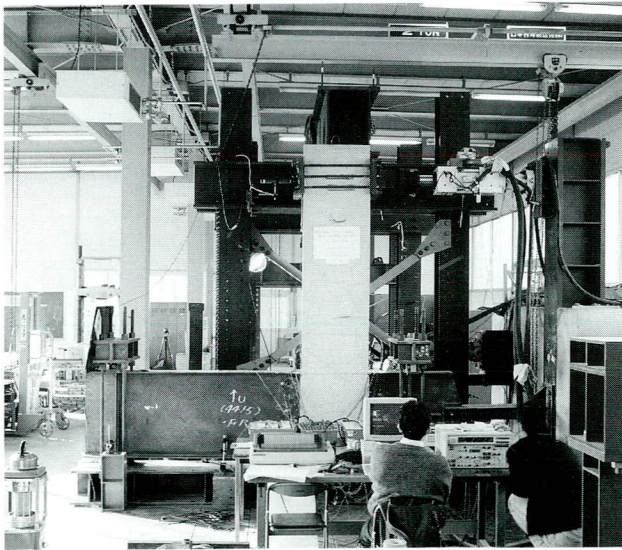


写真-1 試験状況

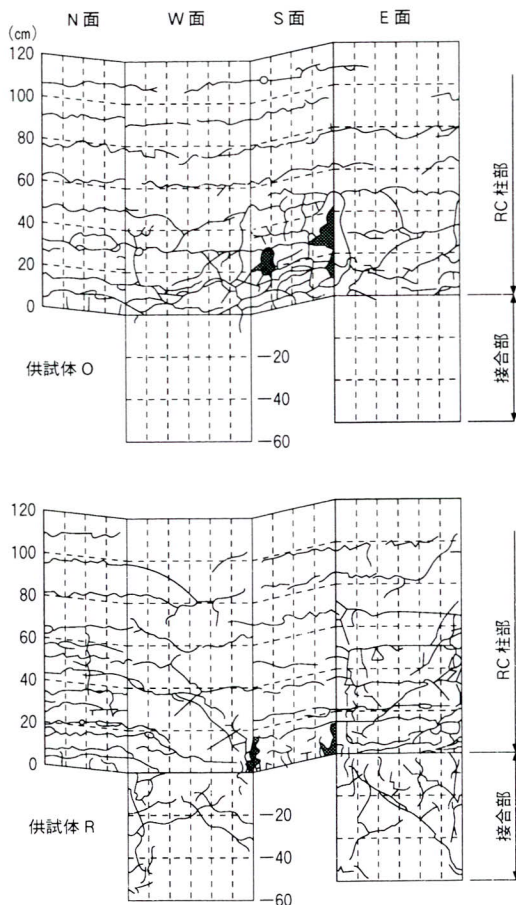


図-3 ひび割れ状況

る断面で主鉄筋が降伏し、圧縮部コンクリートが圧壊する形式で耐荷力を失った。接合部コンクリートには、平成5年度の供試体の場合と同様顕著なひび割れは見られなかったが、供試体 R においては終局に近い荷重段階

で斜め方向のひび割れが発生した。(写真-2) これは、この供試体においては主鉄筋の断面積を大きくしたことにより、他のものに比べて大きい力が接合部に伝達されたためである。供試体 R における引張鉄筋比が約0.9%であることから、この結果は、この程度の鉄筋比までは接合部コンクリートに特別の補強を要しないことを示すものである。静的試験に供した試験体のひび割れ発生荷重、主鉄筋降伏荷重および終局荷重は表-2のようであった。

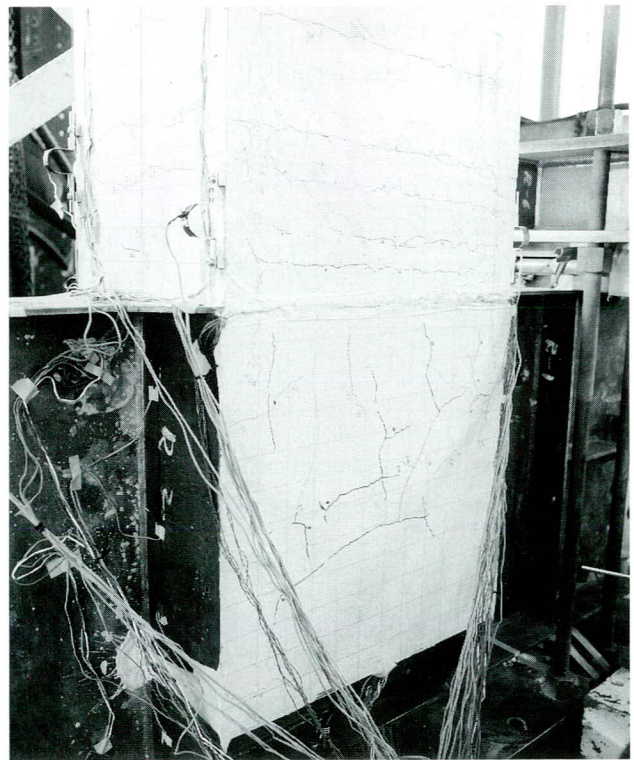


写真-2 ひび割れ発生状況 (供試体 R)

表-2 供試体の各種静的荷重

	Pcr (tf)	Psy (tf)	Pu (tf)	Pay (tf)
供試体 O 正荷重	+2.0	+13.0	+16.8	正荷重時 +11.7
// 負荷重	-2.0	11.5	-16.8	
供試体 P 正荷重	+1.5	+13.5	+16.0	負荷重時 -11.7
// 負荷重	-2.5	11.0	-16.9	
供試体 R 正荷重	+3.5	+22.0	+30.5	+19.2
// 負荷重	-4.0	降伏せず	終局せず	-19.2

Pcr: ひび割れ発生荷重 Psy: 主鉄筋降伏荷重
Pu: 終局荷重 Pay: 計算での主鉄筋降伏荷重

(2) 載荷点水平変位

各供試体の荷重—載荷点水平変位の関係は、**図-4**のようであった。これより下記のことが言える。

- ①主鉄筋降伏荷重までは、荷重—水平変位関係はほぼ直線であり、結合部は剛結とみなすことができる。
- ②供試体OとPの荷重変位関係が一致することから、接合部全体としての挙動にはウェブのスタッドの有無は大きな影響を及ぼしていない。

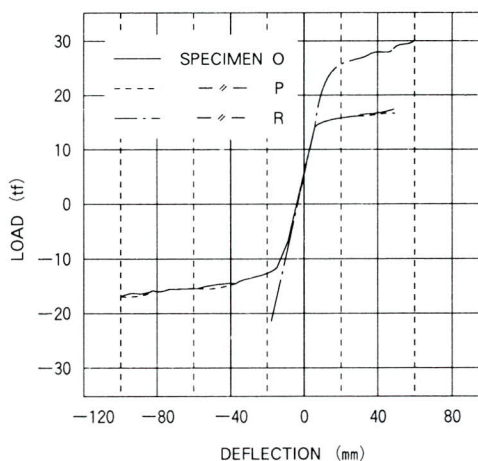


図-4 荷重—載荷点水平変位曲線

(3) 接合部内における主鉄筋応力の変化

接合部内における主鉄筋の応力は、**図-5**のようにおおむね直線的に減少し、コンクリート柱の受け持つ引張力は接合部コンクリートを介して接合部全体に伝達されることが解かる。

(4) 鋼桁上フランジのスタッドの役割

いずれの供試体においても、鋼桁上フランジの上面および下面には、コンクリートが連続していないことに対処することを目的としてスタッドを配置した。スタッドに発生した軸力を計測した結果の一例は**図-6-(1)**に示すようであって、期待どおり軸力を受け持っていることが示された。一般的に上面のスタッドが受け持つ軸力は下面のものよりやや大きく、主鉄筋の降伏直後にスタッドも降伏すると考えられる。また、スタッドには軸力のほかに曲げモーメントも作用しており(**図-6(2)**)、接

合面におけるせん断力の伝達にも寄与していることなども示された。

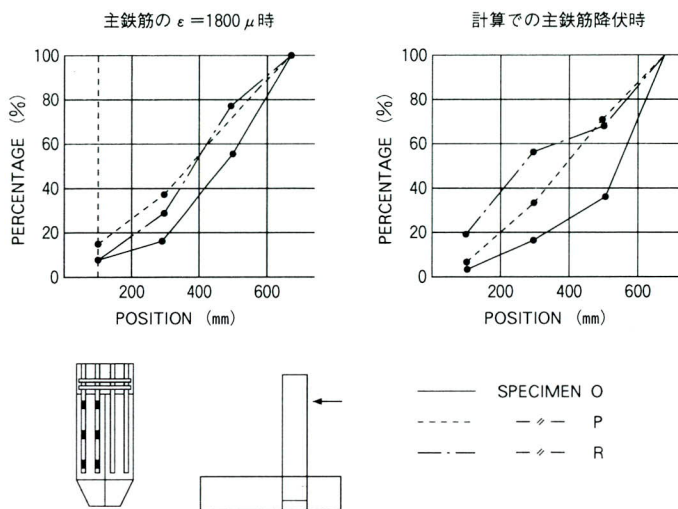


図-5 接合部内に伝わる主鉄筋の応力

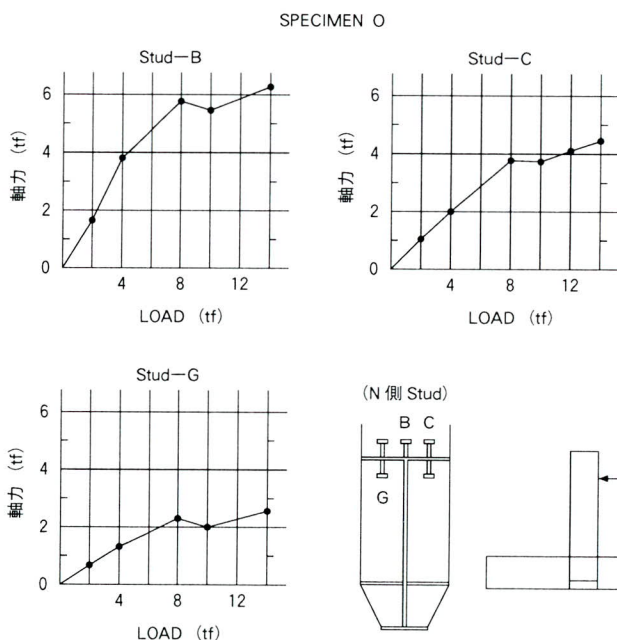


図-6-(1) スタッドに作用する軸力

(5) 接合部スチフナーの挙動

図-7に示すようにスチフナー各部には、値はそれほど大きくないものの、載荷方法に応じたひずみが生じた。ひずみの値は一般に圧縮力を受ける場合に、引張力を受けるより若干大きかった。この結果からだけでは正しい評価はむずかしいが、圧縮力はフランジを介して

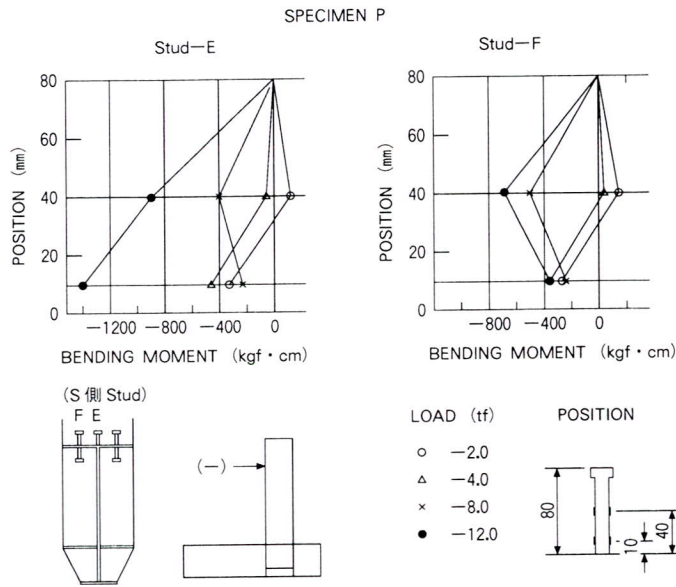


図-6-2) スタッドに作用する曲げモーメント

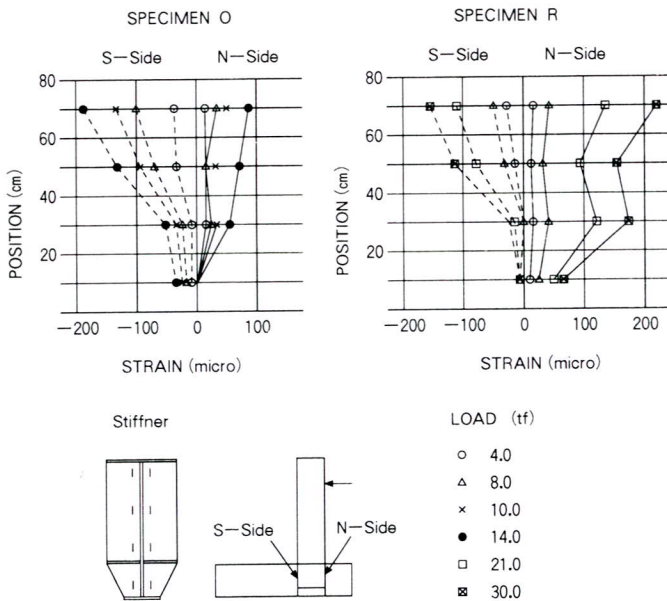


図-7 スティフナーのひずみ

直接的に伝達されるのに対し、引張力は接合部コンクリートに伝えられた後に間接的に伝達されるためと思われる。ただし、供試体 R においては、引張力を受ける場合にも圧縮力の場合と同様な大きさのひずみが生じていた。

これは、この供試体において主鉄筋のひずみが、下方に行っても減少の程度が少なく、定着板によってコンクリートに伝達されていたことと関係があると考えられる。

(6) 接合部内鋼桁ウェブの挙動

接合部内の鋼桁ウェブに生じたひずみの一例を図-8に示す。この図のように、ウェブは荷重が小さい段階では圧縮、引張はほぼ同等のひずみを生じているが、荷重が増加すると圧縮ひずみはそれほど変化しないのに対して、引張ひずみは大きく増加した。これは、コンクリート柱から伝達される圧縮力は主に接合部コンクリートによって受け持たれるのに対し、引張力は最終的には接合部ウェブによって受け持たれることを示すものである。

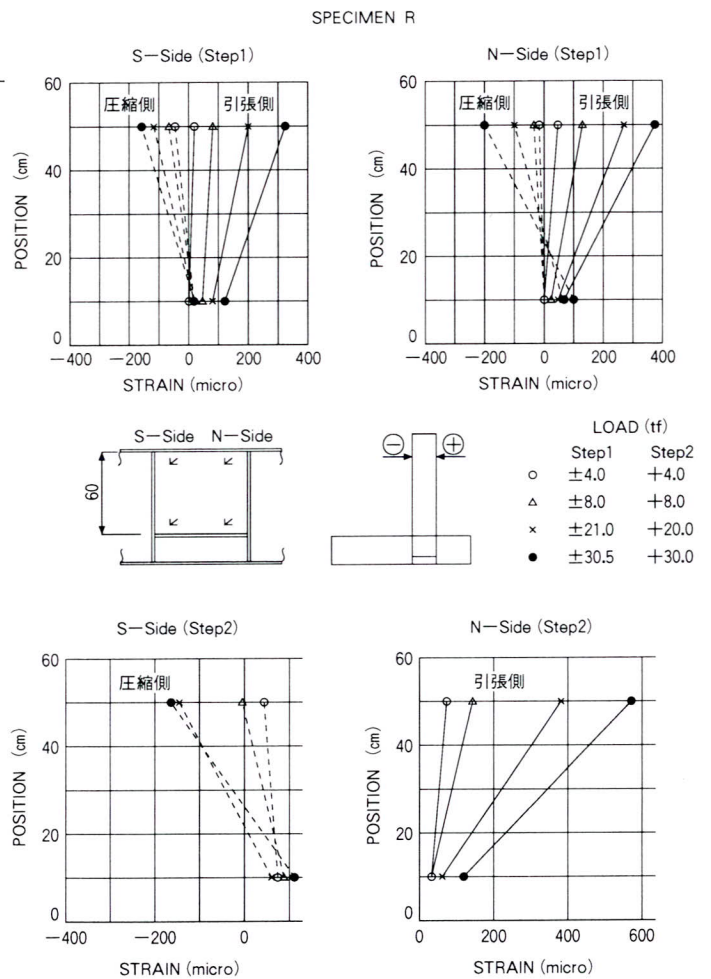


図-8 接合部内部鋼桁ウェブのひずみ

(7) 接合部内ウェブのスタッドの役割

供試体 P に設けたウェブのスタッドに発生した曲げモーメントを図-9に示す。この図のように、スタッドの根元に大きな曲げモーメントが発生し、上方に向かう

とこれが反転して最上部では零となることから、スタッドは明らかにずれに対して抵抗していることが解かる。

載荷点水平変位の項で述べたように、ウェブのスタッドの有無は全体の挙動には大きな影響を与えないが、**図-9**の結果からは、局部的にはこのような役割を果していることを示している。すなわち、接合部コンクリートに伝達された力を分散して鋼桁ウェブに伝える役割を担っているのである。

一方、ウェブに配したスタッドの計測値から計算した軸力は、フランジに配したスタッドの1/6~1/8しか軸力を受けていないことも明らかになった。

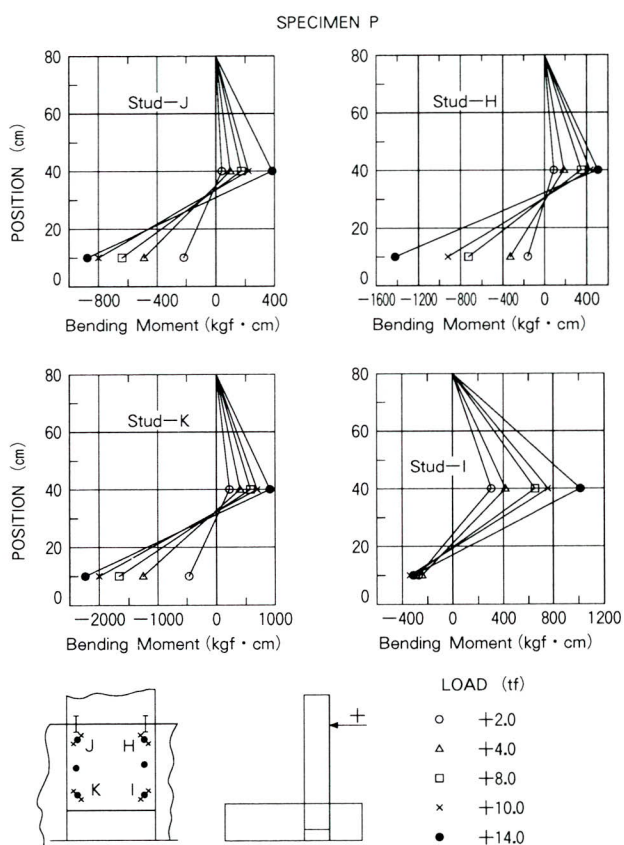


図-9 ウェブスタッドの曲げモーメント

(8) 接合部コンクリートにおける応力の流れ

接合部コンクリートに埋め込んだモールドゲージにより測定した、接合部対角線方向のコンクリートのひずみは、**図-10**のようであった。同図よりコンクリートは柱に近い部分の隅角部で大きな圧縮力を受け、対角線に沿って内部に向うに従って小さな圧縮力となることが解かる。このことは、WCOMRを用いたFEM解析の結果

からもうかがわれる。

このように、接合部の一つの隅角部に伝えられた圧縮力はコンクリートによって対角方向の隅角部に伝えられる。しかし伝達の様子は、平成5年度のT形供試体における明確な圧縮ストラットとは若干異なり、扇形の分布を示すのである。

これは今回の供試体の場合、接合部が鋼桁の全高におよんでいないことと関係が深いと考えられる。

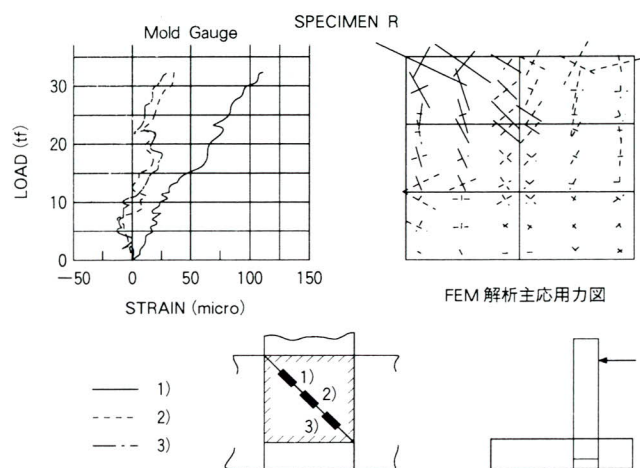


図-10 接合部コンクリートの応力

4. 研究のまとめ

今回（平成6年度）の実験・研究で得られた結果をとりまとめれば以下のようなものである。

- ①今回研究した接合工法も第1報とほとんど同じ接合工法であり、橋脚より延長した主鉄筋をフランジを貫通して接合部コンクリートに定着するという簡単な形式であるが、定着長が確保されれば、降伏に至るまではほぼ剛結といって差し支えない性能を示す。そして、鉄筋比が大きくない範囲では、接合部コンクリートには特別な補強を要しない。
- ②接合部の隅角部の一方には、コンクリート柱からの圧縮力 (C) およびこれと直角方向からフランジからの圧縮力 (Cf) が作用する (**図-11**)。この圧縮力は、合成されて斜め方向の圧縮力 (Cs) となり接合部コンクリートによって受け持たれる。コンクリートに伝達された圧縮力 (Cs) は、接合部が鋼桁の全高におよばない場合、分布幅を広げつつ、対角方向の隅角部に伝達される。

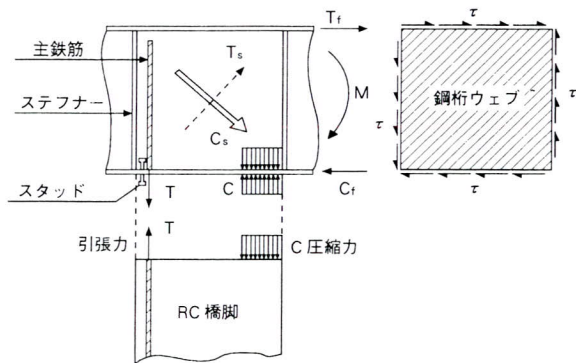


図-11 接合部応力伝達機構図

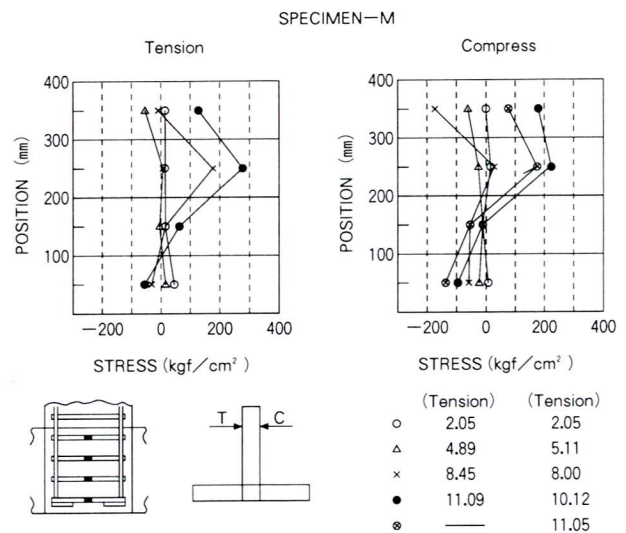
- ③一方、圧縮と反対側の隅角部には、フランジから引張力 (T_f) が伝えられ、これと直角方向から、コンクリート柱の引張力が鉄筋の定着力によって接合部コンクリートを介して伝えられる。これらも合成されて斜め方向の引張力 (T_s) となり、鋼桁ウェブとコンクリートによって受け持たれるが、コンクリートにひび割れが発生した後は、鋼桁ウェブのみによって受け持たれる。
- ④接合部のスチフナーは、フランジとともにコンクリートを取り囲み、この回転を拘束するとともに、コンクリート柱からの力の一部を、圧縮は直接的に、また引張は間接的に負担する。
- ⑤鋼桁下フランジの上下に配したスタッドは、引張軸力を受け、接合部界面に大きなひび割れの発生を防ぐと同時に、接合部にせん断力を伝達する役割もある程度果している。また、圧縮側になるスタッドは、或る程度コンクリートの局部圧壊防止に役立っていると考えられる。
- ⑥鋼桁ウェブにスタッドを配すれば、接合部コンクリートに伝達された力を分散して鋼桁ウェブに伝達する上で効果的である。ただ、接合部のスチフナーおよびフランジの剛性が高い範囲内では、スタッドの有無は全体の挙動に大きな影響を及ぼさない。

なお、供試体全体の挙動は WCOMR を用いた FEM 解析によって、おおむね正しく予測できることが示されている。現在 (平成 7 年度)、この解析により接合部内の細部における応力を解析中であり、これと本実験の結果を合わせれば、接合部の設計法を明確にすることが出来ると考えられる。

5. 第 1 報 (平成 5 年度の研究報告) の追録

平成 5 年度に行なった T 形供試体による試験でも、接合部の性能、荷重の伝達機構などに関しては、ほぼ同様の結果が得られている。ここでは、本文でふれられていない事項について、追録としてその概要を述べる。

①接合部に配した帯鉄筋に生じたひずみは、付図-1 のようであって、信頼のおけるデータとは言い難いが、上部では大きく、下部に行くに従って小さいひずみとなる傾向が示された。おそらく、接合部に伝達される引張力の影響であると思われるが、今回の実験では大きな役割を果しているとは言えない結果が得られた。

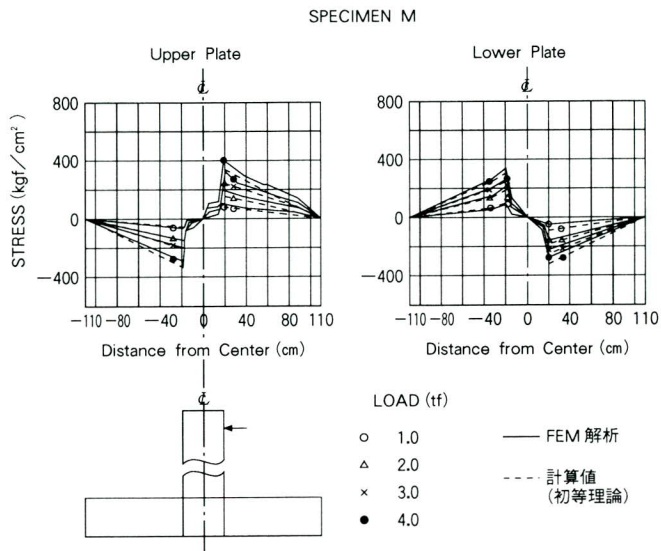


付図-1 帯鉄筋の応力

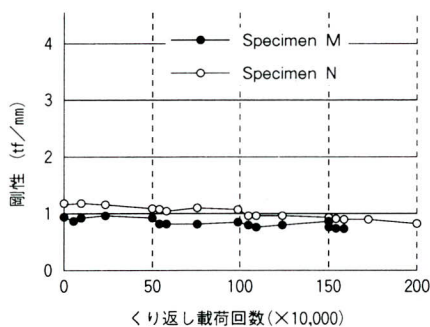
②接合部における鋼桁のひずみ分布は、付図-2 に示すようであって、FEM による解析値あるいは初等梁理論による計算値とほぼ一致した。

③一方の主鉄筋の応力が 900 kgf/cm^2 となる荷重で両振り載荷 50 万回、主鉄筋応力が $900 \sim 1800 \text{ kgf/cm}^2$ となる荷重で片振り載荷 50 万回、荷重を反転して同範囲の片振り載荷 50 万回、さらに一方の鉄筋の主応力が 1800 kgf/cm^2 となる荷重で両振り載荷という疲労実験を行なった。この試験で示された繰り返し回数と供試体剛性との関係は付図-3 のようであって、ごくわずかではあるが繰り返し回数によって剛性が低下することが示された。しかし、接合部各部に添付したひずみゲージによる計測結果によれば、零点移動を除くと繰り返しによって損傷が進行した様子は全く見られなかった。このことより、剛性の低下は鉄筋コンクリート柱の部分に生じたものであり、接

合部は十分な耐疲労性を有していると言える。



付図-2 鋼桁フランジの直応力



付図-3 供試体の剛性

6. あとがき

本研究は前回の試験・研究と同じく、埼玉大学工学部建設工学科および田島橋梁構造研究所との共同研究として、試験は埼玉大学で実施したものです。試験・研究の成果は埼玉大学の町田教授、当時大学院生の劉氏、学部学生の杉山氏および研究所の田島先生のご協力によるものであり、紙上を借りて深謝するしだいです。

今後も継続して本構造形式の研究を深度化する所存であり、設計法についても稿を改めて提案していきたいと考えています。

＜参考文献＞

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：混合構造研究委員会報告書 1991.12
- 2) 鳥越・清水：鋼RC複合ラーメン橋の提案、宮地技報 No.5、1989
- 3) 清水、鳥越：鋼桁とRC橋脚の剛結構造に関する研究（第1報）、宮地技報No.10、1994

1995.8.31受付

グラビア写真説明

明石海峡大橋

93年8月の工事受注から早2年半、補剛桁工事も設計、工場製作の段階から架設へと順次移行しています。全橋で6箇所の大ブロックは阪神・淡路大震災の影響を受け、架設時期がずれましたが当工区の主塔側ブロックをかわきりに、95年6月より架設が始まり10月には無事完了しました。現在は各工区毎4箇所から面材架設が進行中であり、早ければ96年夏には桁が閉合する予定で、明石海峡にその偉容を現すこととなります。本工事はその後、橋面工や各種付属物工事を施工し、98年春には開通の予定です。

(井上)