

栄高架橋北工事における鋼横梁 — R C 柱剛結部の設計

細田 直久¹⁾ 河野 明寛²⁾ 長村 尚武³⁾ 石川 貴雄⁴⁾

昨今、多様なニーズにより複合構造が注目され、施工実績も増えつつある。日本道路公団東京外環自動車道の三郷ジャンクションからの延伸工事においては、鋼横梁と RC 柱とを接合する複合橋脚を有したラーメン構造が採用された。この構造に関しては、類似構造はあるものの、構造規模や接合タイプの相違によりその設計手法は確立されているとはいえず、その都度載荷実験や FEM 解析により評価を行っているのが現状である。

本文では「栄高架橋（鋼上部工）北工事」において行った、FEM 解析に基づく複合橋脚剛結部の設計、および高性能コンクリートの充填実験について報告する。

キーワード：複合橋脚，FEM 解析，高性能コンクリート充填実験

まえがき

年々混雑を極める首都圏の交通事情に対し、さまざまな道路整備が進められている。現在、放射方向については整備が進んでおり、さらに 3 環状（中央環状、外かく環状、圏央道）道路が完成することによるネットワーク効果が期待されているところである。

東京外環自動車道は、関越道の大泉ジャンクションから、途中東北道の川口ジャンクションを経由し、常磐道の三郷ジャンクションまでの 29.6 km が開通している（図-1）。「栄高架橋（鋼上部工）北工事」は、三郷ジャンクションからの延伸工事であり、鋼横梁—RC 柱複合構造が採用された。

この構造では様々な利点が生じる一方で、鋼部材とコンクリート部材との接合部において断面力を相互に伝達する必要がある。合理的な構造を得るためには、断面力が極大となる隅角部に鋼とコンクリートとの接合部を設けることとなる。従っ

てこの部分の安全性の評価が重要となり、今回、FEM 解析を実施し安全性の検証および細部構造の決定を行った。

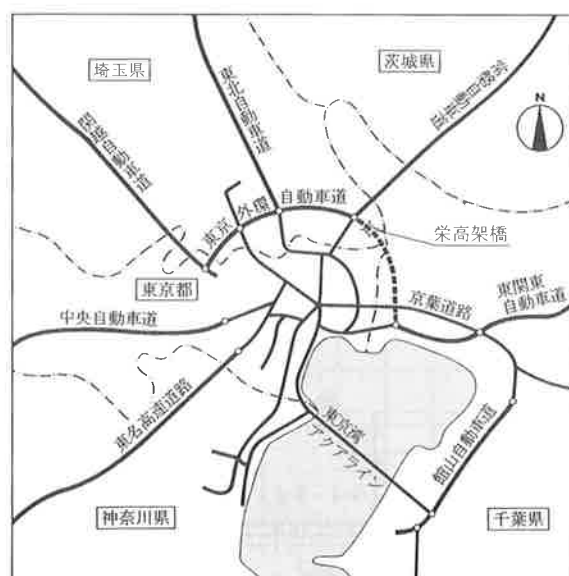


図-1 位置図

1) 橋梁設計部東京設計一課副課長 2), 3) 橋梁設計部東京設計一課 4) 橋梁設計部東京設計二課副課長

1. 工事概要

本工事の概要を以下に、構造一般図を図-2に示す。

工事箇所：埼玉県三郷市栄1丁目～同4丁目

道路規格：第1種第3級A規格

構造形式：5径間連続2主I桁立体ラーメン橋

7径間連続2主I桁立体ラーメン橋

活荷重：B活荷重

橋長：184.0 + 250.1m

支間長：(37.0+41.0)+3 @ 35.5m

3@ 32.2+37.5+43.5+37.5+35.0m

() 内は施工範囲外

有効幅員：10.565+10.565m

床版：PRC床版 厚さ 320 mm

主構造鋼重：2506ton

なお、本工事は駒井鉄工株式会社・株式会社巴コーポレーション共同企業体で受注したものである。

2. 本橋の剛結部の特徴

本橋は、鋼製橋脚と複合橋脚とが混在した連続ラーメン橋である。上部構造は上下線それぞれが主桁間隔の広い2主I桁（主桁間隔 6.0m）であり、支点部において横梁と剛結されている。さらに複合橋脚の横梁は、1本のRC柱と接合された構造となっている。

剛結部の構造（図-3）は鉄筋貫通定着形式を採用しており、剛結コンクリートは鋼製横梁によって密閉されているため、横梁から剛結コンクリー

トおよび脚柱コンクリートへの応力伝達はその拘束効果（支圧力）により行われる。従って、横梁と剛結コンクリートの境界面にはスタッドを配置せずに応力伝達が可能となる。

このような構造に対して下記の問題点が考えられた。

- ① 2方向曲げを受けるため、脚柱コンクリート角部に過大な圧縮応力が発生する。
- ② 支圧力により力を伝達するため、鋼部材には板曲げ応力が発生する。また、下フランジには過大な板厚方向のせん断力が作用する。
- ③ 横梁と剛結コンクリートとの境界面に引張力が作用した場合、離れが生じる。
- ④ 横梁下フランジと脚柱コンクリートとの境界面に引張力が作用した場合、開口が生じる。

そこで本検討では上記の構造形式を採用するに当たって、FEM解析により構造検討を行い、各部材の応力性状などを確認し、実施設計に反映することとした。

3. FEM解析

(1) 解析モデル

栄高架橋（7径間連続ラーメン橋）において、6橋脚の中から（内複合橋脚4脚）RC計算により脚柱コンクリートの圧縮応力度が最大となるP65橋脚を解析の対象として3次元FEM弾性解析を行った。

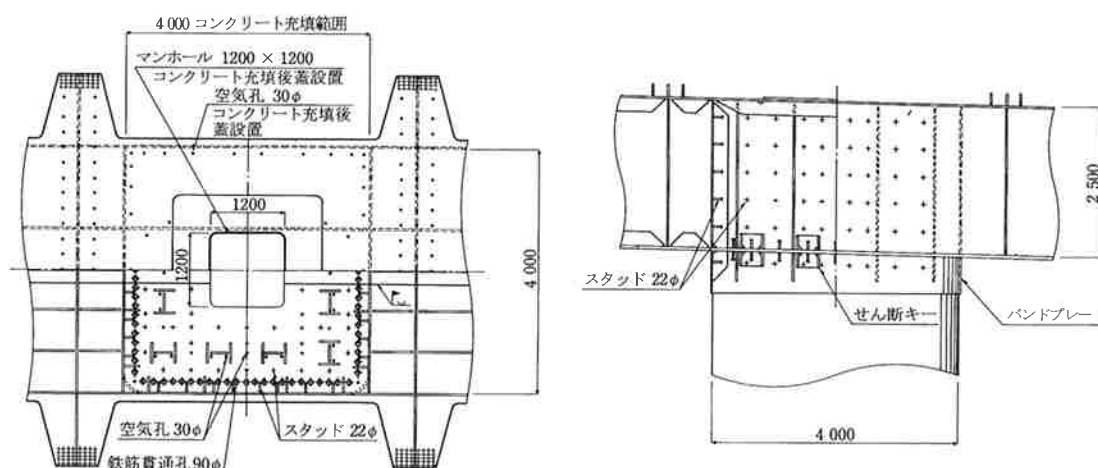


図-3 剛結部詳細図

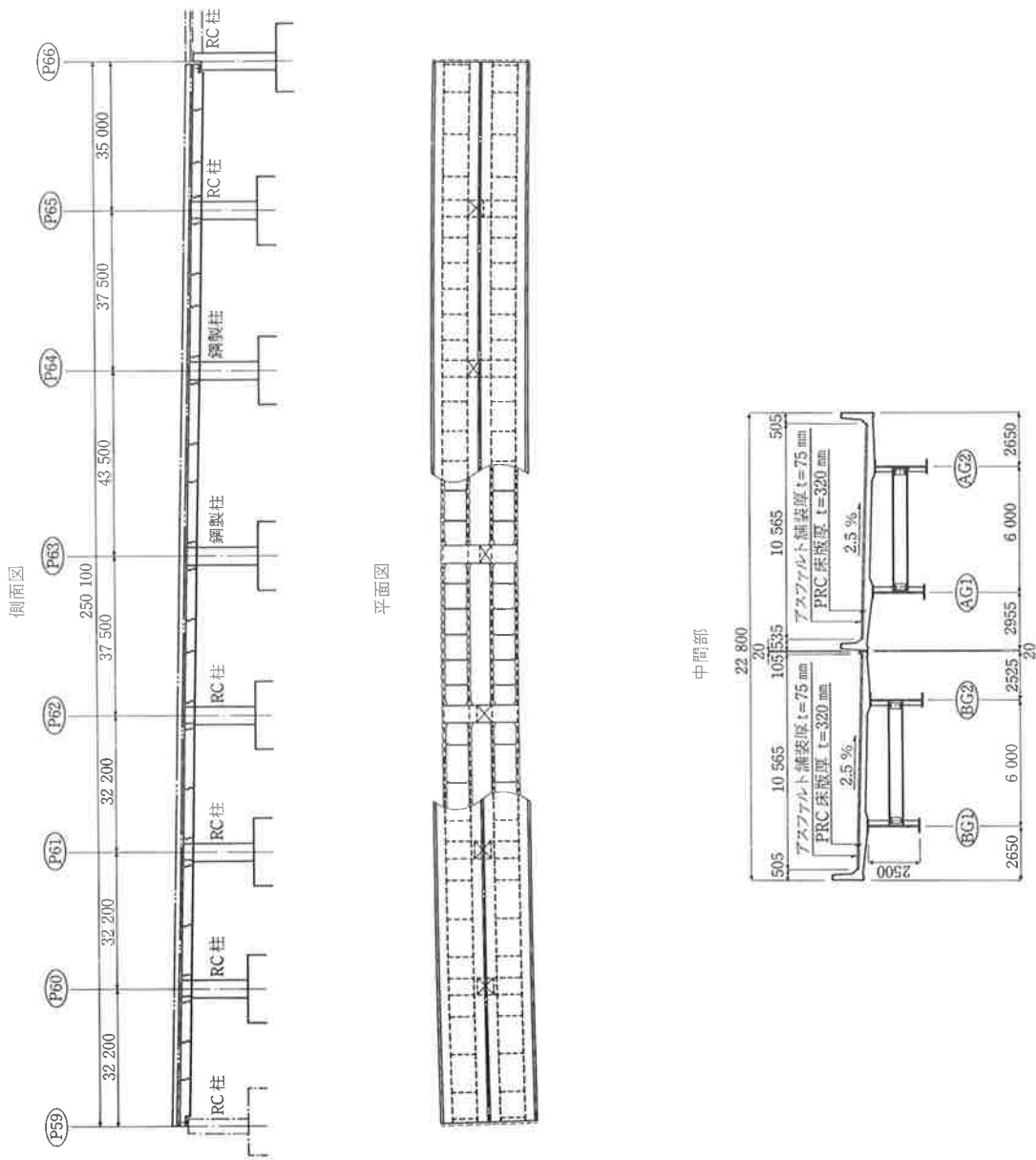


図-2 構造一般図

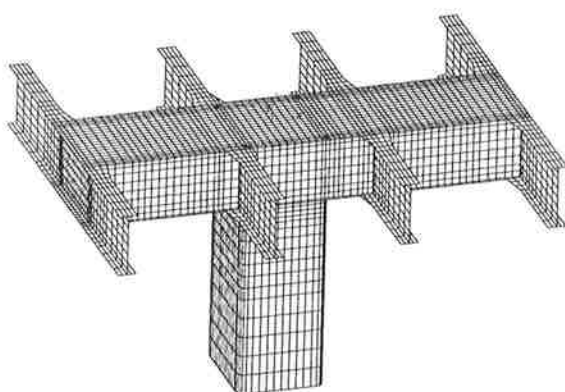


図-4 解析モデル

解析モデルを図-4に示す。使用した要素は、鋼部材はシェル要素、コンクリートはソリッド要素、主鉄筋はビーム要素とした。

荷重は、脚柱コンクリート接合面の圧縮応力度が最大となるケース、および横梁断面決定ケースとし、主桁先端に載荷した。横梁下フランジ部の境界面での断面力（常時換算値）を表-1に示す。

剛結部の横梁とコンクリートとの結合条件は、スタッドを原則として配置しないこと、および付着も考慮しない仮定としたことより、せん断2方向は非拘束とし、垂直方向は拘束とするが境界面に引張力が作用した場合には非拘束とした。

表-1 接合面断面力

		(kN,kN・m)		
		軸 力	面内曲げ	面外曲げ
圧力応力最大ケース	温度時	- 15488	12216	- 30489
横梁断面決定ケース	常 時	- 19791	18316	- 13972

(2) 解析結果

基本的な解析を通じ以下のことがわかった。

- ①脚柱コンクリートの角部に許容値を大きく上回る圧縮応力が発生する。
- ②横梁の上下フランジには比較的大きい板曲げ応力が発生する。また、横梁下フランジには板厚方向にせん断応力が発生する。しかしながら横梁断面は鋼のみを有効とした隅角部として断面決定しているため、応力度は許容値以下となった。
- ③横梁と剛結コンクリート間には部分的に1

mm程度の離れが生じる。

- ④横梁下フランジと脚柱コンクリート間には部分的に0.2 mm程度の開口が生じる。

これらのうち「離れ」、および「開口」については橋脚全体構造の安全性が損なわれる現象ではないため、冗材としてスタッドを450 mmピッチ程度で配置することとした。「脚柱コンクリート角部の圧壊」については対策が必要と考え、この破壊形態に着目し構造検討を行った。

この解決策として、以下の内容でFEM解析を行い、効果的な方法を検討した。

- ①応力の分散をはかるため横梁を3セル構造とする。
- ②脚柱コンクリート角部にゴムを設置する。
- ③矩形の脚柱角部を300Rに形状変更する。
- ④脚柱コンクリート頂部にハンチを設ける。

解析結果を表-2に示す。いずれのケースも応力度は低減されるものの許容値を上回るため、脚柱コンクリート頂部には母材と同厚のバンドプレートを設置し、その拘束効果によりコンクリートの圧縮耐力を向上させることとした。また、弾性解析結果に対し、コンクリートの非線形性を考慮した補正を加えた。結論として、経済的に効果が得られ施工性の良い、③の脚柱角部を300Rに形状変更する案を採用した。補正前のコンター図を図-5に示す。補正後のコンクリート応力度は、常時で19.2N/mm²、温度時で18.3N/mm²となった。

表-2 コンクリート応力の比較

基本構造	3セル	ゴム設備	300R	ハンチ
1.00	0.80	0.78	0.75	0.67

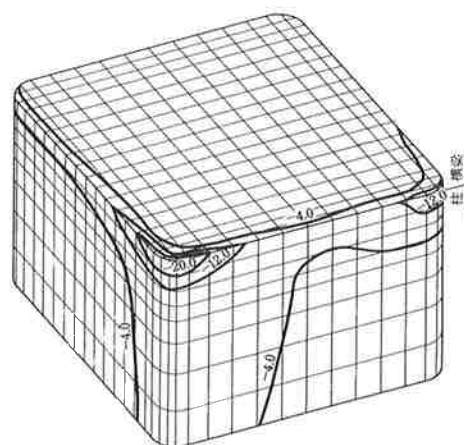


図-5 脚柱コンクリート σ_z コンター図

4. 剛結部の設計

(1) 鋼横梁の断面決定

横梁断面は、鋼製橋脚隅角部のせん断遅れを考慮した断面計算により決定した。また、下フランジ鉄筋貫通孔の位置では断面欠損を考慮した。鋼部材からコンクリートへの応力伝達は支圧力によって行われるため、最大で 63N/mm^2 の板曲げ応力が発生したが、許容値内に収まった。

また、「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」に従い疲労照査を行ったところ、許容値に対し3倍程度の安全性があることがわかった。

(2) 脚柱コンクリート角部の圧縮応力照査

脚柱コンクリートの圧縮応力度について、RC計算による応力度とFEM解析で得られた応力度との比較を表-3に示す。

表-3 応力度比較表

		(N/mm ²)		
		RC計算	FEM解析	比率
圧力応力最大ケース	温度時	7.6	18.3	2.4
横梁断面決定ケース	常時	5.2	19.2	3.7

横梁から脚柱コンクリートへの応力伝達は、横梁ウェブおよびダイヤフラム近傍の、下フランジの剛性の高い範囲で主に行われているのに対し、慣用のRC計算は平面保持が前提であるため比率はかなり大きい値となる。また、2ケースの比率もばらつく。

そこで、解析対象外の橋脚の照査を行うに当たり、FEM解析結果と整合させた簡便な設計計算手法が必要となる。以下に今回使用した手法を、図-6に概念図を示す。

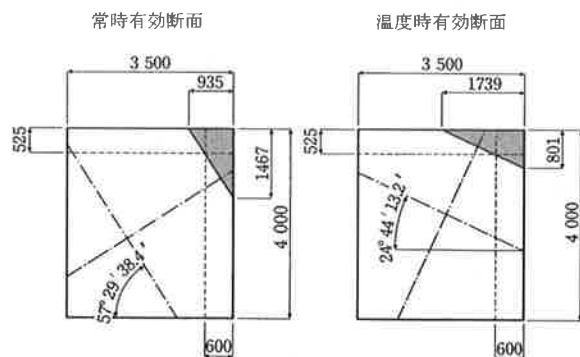


図-6 コンクリートの有効断面

① 2方向曲げを受けるRC断面の中立軸を計算する。

② 横梁ウェブ間隔、およびダイヤフラム間隔を支間とした下フランジの有効幅を、道示II 8.3.4により求める。

③ ②で求めた有効幅内で中立軸の傾きを考慮した脚柱コンクリートの有効断面にてRC計算（コンクリートのヤング係数は道示I 3.3による）を行い、圧縮応力度を算出する。

上記方法とFEM解析で得られた応力度との比較を表-4に示す。なお、道示V 10.2.1および「鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン」では、側方向応力がある場合、コンクリート圧縮強度は向上されることが示されている。従って、バンドプレートの拘束効果を考慮し圧縮強度は通常の2倍とした。また、局部的な応力集中であるため、さらに1.1倍した（ $\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$ のとき $\sigma_a=26.4\text{N/mm}^2$ ）。

なお、この手法は構造規模や断面力性状が類似している場合にのみ有効となるため、適用には注意が必要である。

表-4 応力度の比較

		(N/mm ²)		
		RC計算	FEM解析	比率
圧力応力最大ケース	温度時	20.6	18.3	0.89
横梁断面決定ケース	常時	20.9	19.2	0.92

(3) 剛結コンクリートのせん断応力照査

図-7に示す面に作用するせん断力を解析結果より集計し、剛結コンクリートのせん断破壊に対する照査を行った。この結果、鉄筋比で0.12%以上のせん断補強鉄筋を配置することとした。配筋図を図-8に示す。

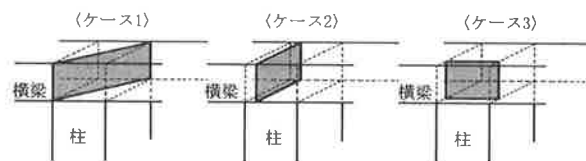


図-7 せん断力抽出面

(4) 脚柱コンクリート角部における割裂破壊の検討

脚柱コンクリート角部には過大な圧縮応力が作用しているため、割裂破壊の危険性がある。本構造では、剛なバンドプレートを設置するため、バ

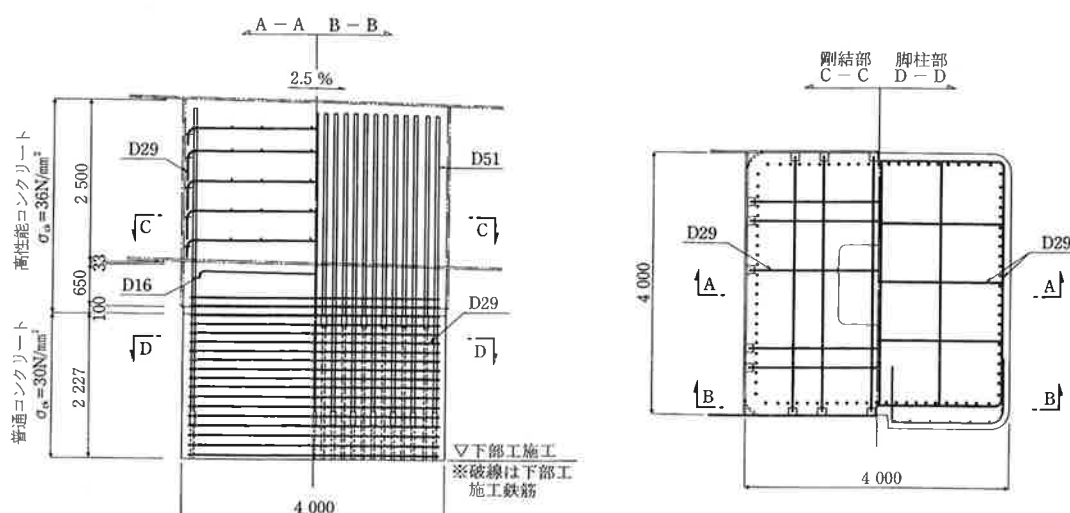


圖-8 剛結部配筋圖

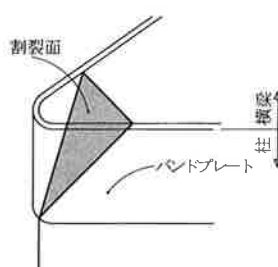


图-9 割裂面

ンドプレート下端付近から 45 ° 方向にコンクリートの割裂面が発生する (図-9)。作用力は、解析で得られた脚柱コンクリート天端の節点反力の合計値として照査を行った。この結果、バンドプレート長が 600 mm 以上あれば、バンドプレート内に帯鉄筋を配置しなくても割裂破壊に対して安全であることがわかり、施工性の向上をはかることができた。

(5) 施工時の照査

横梁ウェブ、ダイヤフラム、およびバンドプレートにはコンクリート打設時の側圧が作用する。充填コンクリートには高性能コンクリートを使用するため、液圧としてこれを求め、はらみがウェブ高の 1/1000 以下となるよう垂直リブを設置した。

5. 高性能コンクリート充填実験

(1) 配合

剛結部へのコンクリート打設は、密閉・狹隘部の施工となるため、コンクリートの閉め固め

表-5 高性能コンクリートの配合

呼び強度 (N/mm ²)	スランプフロー (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)
30	68 ± 5	54	48.3
36	68 ± 5	46	48.6

呼び強度 (N/mm ²)	単位量 (kgf/m ³)					
	水	セメント	石灰石微粉末	膨張剤	細骨材	粗骨材
30	170	285	285	30	731	795
36	170	340	230	30	740	795
呼び強度	高性能AE減水材(%)		AE助剤(%)	分離低減剤		
30	1.20		0.8	2.0		
36	1.25		0.8	2.0		

が不十分となり、品質低下を招くことになる。従って、高い流動性、充填性、材料分離抵抗性を有する高性能コンクリートを採用した。表-5にその配合を示す。

なお試験練りの結果、充填実験は比較的流動性に劣る呼び強度 30N/mm^2 のコンクリートで行った。

(2) 実験体概要

実験体は充填状況を目視確認できるようアクリル製とし、剛結部上フランジ側をモデル化した上層試験体と、下フランジ側をモデル化した下層試験体の 2 体で行った（写真-1）。上下層試験体の諸条件について表-6に示す。

(3) 実験結果および考察

充填性については、コンクリートは型枠隅々まで廻っており問題ないものと考えられる。

フランジ下面のコンクリート面には多くの気

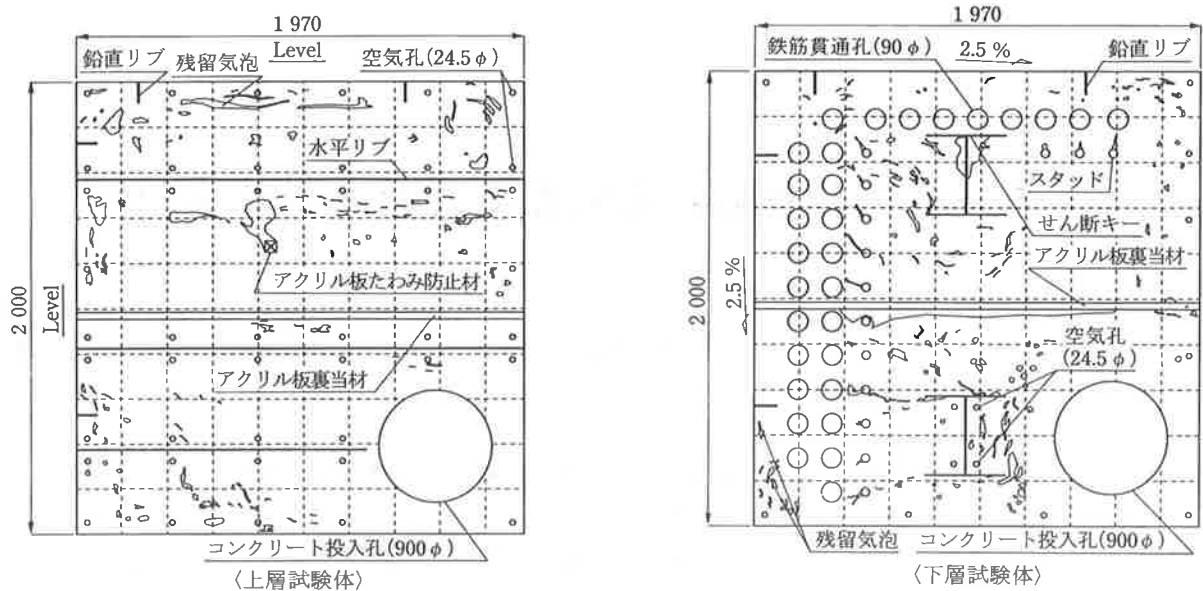


図-10 気泡の発生状況

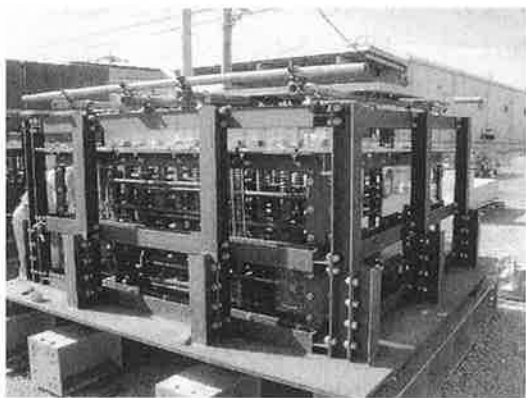


写真-1 下層試験体

表-6 諸条件比較表

	自由落下高さ	フランジ勾配	せん断キー	アンカープレート	スタッド	水平リブ
上層試験体	なし	レベル	なし	あり	あり	あり
下層試験体	50cm	2.5%	350H	なし	なし	なし

泡が認められた（図-10）。本構造では既に述べたように支圧により力の伝達を行うため、できる限り気泡の発生を抑制する必要がある。従って、フランジ、せん断キー、水平リブなどに適切な空気孔を設け、さらにフランジ空気孔（実験時より大きい30φ）から充分コンクリートを排出させた段階で打ち込み完了とする管理を行うこととした。また、上層試験体の方が良好な状態であったため、コンクリートの打設は自由落下なしで行うこととした。

おわりに

栄高架橋（鋼上部工）北工事で採用された複合橋脚剛結部の設計方法および高性能コンクリート

充填実験について報告を行った。本橋は現在架設中であり平成15年3月に竣工となる予定である。なお、設計や実験に際しては日本道路公団東京建設局の方々より多大なるご指導をいただいた。紙面を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領第二集，1998.7.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1996.12.
- 3) 土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン，1989.3.
- 4) 阪神高速道路公団：RC柱－鋼製梁複合橋脚の設計・施工要領（案），1995.7.
- 5) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993.4.
- 6) 佐藤 徹・清水功雄・太田貞次・町田篤彦：複合ラーメン橋の接合部設計法に関する一提案，構造工学論文集，Vol.45A，pp.1431-1438，1999.3.
- 7) 沿岸開発技術研究センター：コンクリートサンドイッチ構造沈埋函の設計と高流動コンクリートの施工，1996.11.