

ドライジョイント・外ケーブル方式のプレキャストセグメント桁の実物大破壊試験

竹林 稔雄^{*1}・カウェラット ディープラサートウォン^{*2}・リョン ユー ワー^{*3}

1. はじめに

バンコク第二高速道路は、第1期および第2期工事区を合わせて約32 kmの長さを持ち、そのほぼ全線が高架橋である。高架橋の全橋面積は約100万 m^2 であり、2つの標準構造形式（箱桁橋（プレキャストセグメント）および合成桁橋（U桁+現場打ちスラブ））からなる。1993年に完成した第1期工事区約20 kmのうち約17 kmがドライジョイント・外ケーブル方式のプレキャストセグメントによる高架橋であり、そこでは約14 500個のセグメントが製作され、1 131 径間に及ぶ高架橋が架設された^{1),2)}。

2年前（1991年）、高架橋の施工開始に先立ち、設計の妥当性を確認するために、実物大の桁（以下、テストスパンと呼ぶ）を架設、設計終局荷重をやや上回る荷重レベルまで載荷し³⁾、その後も継続して計測を続けてきた。今回の試験では、同一桁に対し実際の破壊荷重まで載荷し、その過程での挙動のより詳細な調査を行った。ドライジョイント、外ケーブル方式のプレキャストセグメント桁の挙動の実験的研究はこれまでも行われてきたが^{4),5)}、それらは実寸法ではない縮尺モデルを用いたものであり、著者らが知り得る限りでは、ここで報告する実物大破壊試験はこの種の構造物に関して初めてのものである。

2. テストスパンの概要

テストスパンは、ショートライン・マッチキャスト方式により製作した14個のプレキャストコンクリートセグメントからなる幅10.2 m、全長45.2 m（支間43.25 m）の直線桁であり、4個のゴム支承により単純支持されている（写真-1）。ケーブルはすべて外ケーブルであり、桁端の横桁または約1/4点に位置するデビエーターに定着している。ケーブルは全長を高密度ポリエチレンダクト内に納め、定着部以外ではコンクリートと完全に

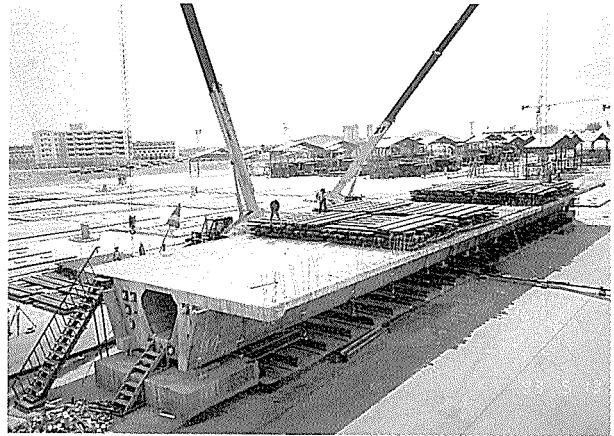


写真-1

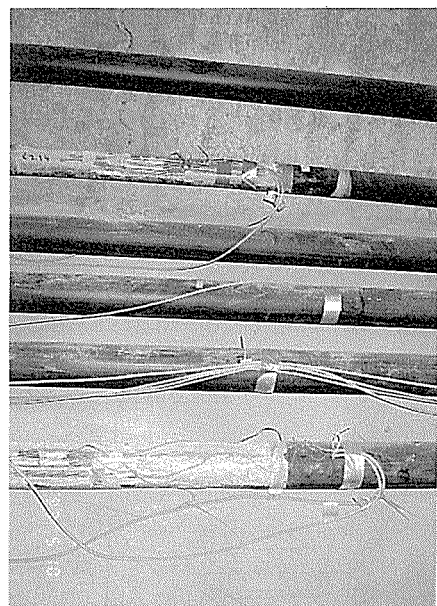


写真-2

縁を切っている。ダクト内の空隙にはケーブル緊張後セメントグラウトを充填している。セグメント継目部はすべてドライジョイントであり、エポキシ樹脂系接着剤は用いず、ウェブ接合面に配した多段せん断キーで作用せ

^{*1} Toshio TAKEBAYASHI : (株)熊谷組 技術開発本部 PC 技術部 (元: バンコク第二高速道路工事所)

^{*2} Kaveerat DEEPRASERTWONG : (株)熊谷組 タイ統括営業所バンコク第二高速道路工事所

^{*3} Yew Wah LEUNG : KUMAGAI-MAEDA-CRABC J.V. (元: バンコク第二高速道路工事所)

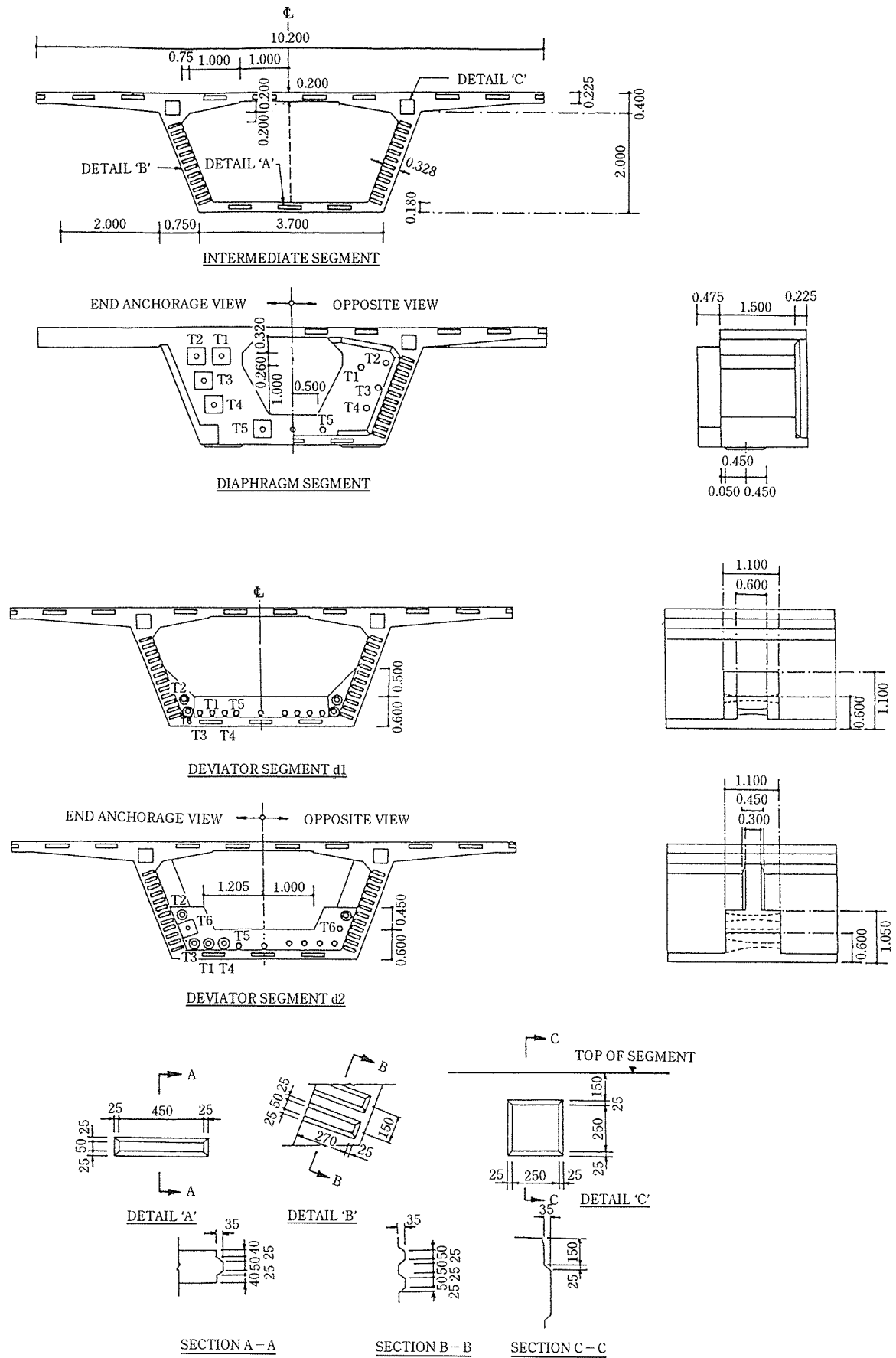


図-1 セグメント形状

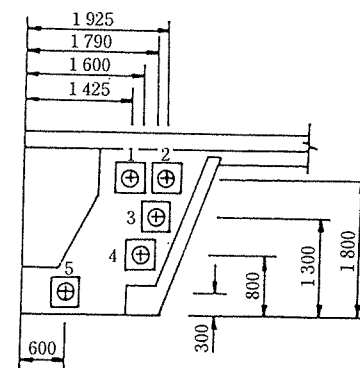
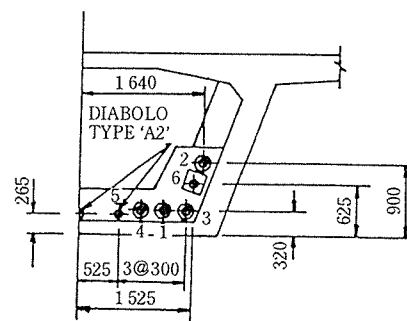
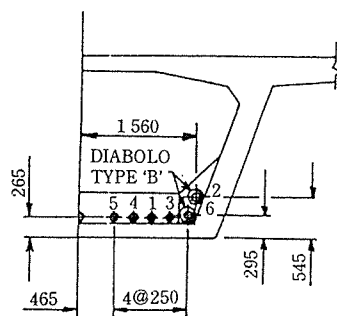
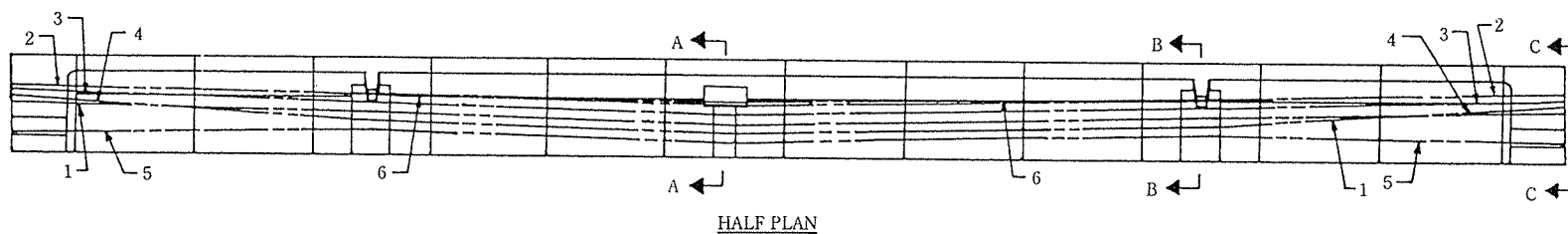
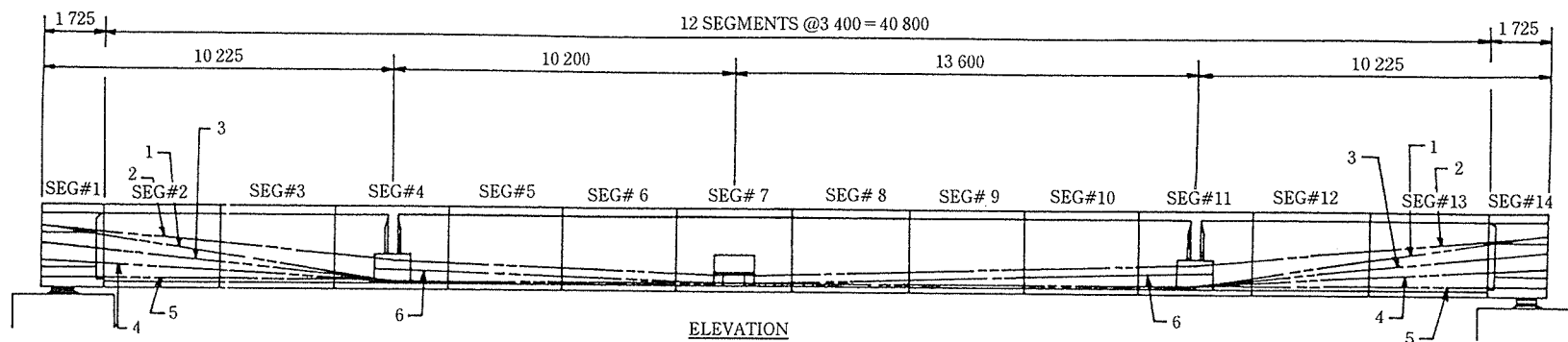


図-2 外ケーブル配置

◇研究報告◇

ん断力に抵抗するように設計している^{6),7),8)}。

テストスパンは、バンコク第二高速道路プロジェクト中で実際に用いられた2車線用桁のプロトタイプであり、横桁部の配筋が若干少ない点、アスファルト橋面舗装および高欄コンクリートが省略されている点以外は本構造物と同じ構造を持っている。設計は、「AASHTO 1983 SPEC.」⁹⁾ および「AASHTO 1989 GUIDE SPEC. FOR SEGMENTAL CONCRETE BRIDGE」¹⁰⁾ に準じて行われている。活荷重は1.3 HS 20-44に27.8 tトラックによる過載荷重(1レーンのみ、11.15 m間隔)を、組み合わせたものである。その他の地域特性を考慮した設計条件は文献¹¹⁾に示されている。

図-1, 2および表-1にテストスパンの構造概要・材料表を示す。

表-1 材 料 特 性

Material	Properties item	Average Figures
Concrete	Compressive strength	55-62 Mpa
	Modulus of Elasticity	43 000 Mpa
Re-bars	Tensile strength	390 Mpa
Tendons	Breaking strength	1 920 Mpa
	Modulus of Elasticity	193 000 Mpa

3. 載 荷 作 業

載荷には、ビレット(長さ4.5 mの鋼角材、平均重量347 kg/ピース)を用いた。ビレットは、計測作業および載荷作業の便を考慮して選んだ8つのエリアに、橋軸方向、橋軸直角方向ともに対称に積み上げた。載荷作業は、2台のクレーンにより、一度に10ピース(5ピース/クレーン)ずつ行った(写真-1)。

載荷開始に先立ち、いったん120ピースのビレットにより仮載荷し、各計測機器の作動チェックを行った。計測データの整理に当たっては、仮載荷用ビレット除去後の各計測機器の読みを0としている。載荷作業は5日にわたって行った。夜間は作業を行わなかったが、ひずみゲージのみは1時間おきに自動読取りを行った。

データの読取りは、当初は120ピースのビレットを載荷するごとに行ったが、事前に予想されたデコンプレッション荷重よりやや少ない荷重である1 560ピースに達した後は、20ピースごとに行った。また、第4, 5日目には破壊が近いため、10ピースごとに桁の安定の確認を行いながら載荷作業を進めた。

4日目には、2 470ピースまで載荷した時点で日没となったが、この時点ですでに予想破壊荷重に達していたことから、夜間の桁の安定を図るため、いったん70ピースを取り除いた後にその日の作業を終えた。桁は5日目の夕方、2 620ピースのビレットを載荷した時点で破壊に至った。表-2に主な載荷通過点を示す。

表-2 載 荷 条 件

Day	Load stage	No. of Billets	Applied Mid-Span Moment (kN-m)
1	No Load	0	0
	Trial Load	120	3 200
	No Load	0	0
	Overnight Load	360	8 600
2	Design service load	1 080	24 600
	Overnight Load	1 320	30 000
3	Observed Decompression Load @ joint 8-9	1 620	36 500
	Observed Decompression Load @ joint 7-8	1 660	37 250
	Design ultimate load (Overnight Load)	1 980	44 600
4	Load to 2470 billets	2 470	54 900
	Unload 70 billets for Safety (Overnight Load)	2 400	53 600
5	(Design ultimate load)/(φ)	2 600	57 700
	Failure load	2 620	58 200

テストスパンは、屋外に設置されたため、ビレットによる荷重に加え、実際の構造物が被るような荷重、すなわち気温変化、直射日光、風、雨などの作用下にあった。これらの荷重の影響は、数箇所データの局部的変動の形で顕著に現れているが、実際には全作業段階において混在している。

4. 載荷前のテストスパン

テストスパンは2年前に設計終局荷重まで載荷し、除荷後も変形状況を断続的にはあるが計測してきた。桁長およびたわみの変化を表-3に示す。

桁の載荷試験前の状況を知るために、コンクリート表面の詳細な目視チェックを行った。ひび割れの状況は2年前と同じであり、ひび割れの伸展あるいは新しいひび割れの発現は見られず、2年前の載荷試験あるいは経年

表-3 1991~1993年におけるスパン中央たわみとスパン長の変化

Dd/mm/yy	ELEV @ J 7-8 (m)	Span length (m)
29/05/91	0.0000	44.237
05/06/91	0.0027	44.239
12/06/91	0.0040	44.231
19/06/91	0.0050	-
26/06/91	0.0073	-
26/07/91	0.0132	44.234
26/08/91	0.0100	-
26/09/91	0.0153	-
26/10/91	0.0152	-
26/12/91	0.0158	-
05/02/92	0.0188	-
06/04/92	0.0203	-
05/06/92	0.0216	-
05/08/92	0.0229	-
05/10/92	0.0243	-
11/11/92	0.0252	-
10/05/93	0.0258	44.230
11/05/93	0.0252	-

変化による損傷は特に認められなかった。

5. 試験結果

5.1 コンクリートひずみ

(1) 曲げ作用に対して

セグメントNo. 8のコンクリートのひずみ変化量を桁中央の曲げモーメントに対してプロットしたものを、図-3, 4に示す。

桁下面に設置したひずみゲージ (No. 59~63) は、荷重の増加とともに、初期圧縮ひずみの解放に応じた引張りひずみの線形的な増加を示している。ジョイント部に設置されたゲージ (No. 60, 63) の引張りひずみは 37 250 kNm の曲げモーメントで、セグメント中央では約 40 000 kNm で、それぞれ水平になっており、これらは初期圧縮ひずみが解放されて 0 になるデコンプレッション荷重とみなすことができる。セグメント中央部は自由端 (ジョイント開口部) から離れているため、デコンプレッションに若干の遅れがあり、両側のジョイントが十分開いて初めて発生している。以下では、便宜上、デコンプレッションが最初に観察された時点の荷重、すなわち桁中央の曲げモーメントが 36 500 kNm をもってデコンプレッション荷重と呼ぶことにする。曲線上に幾つかのひずみジャンプが見られるが、これらは主に載

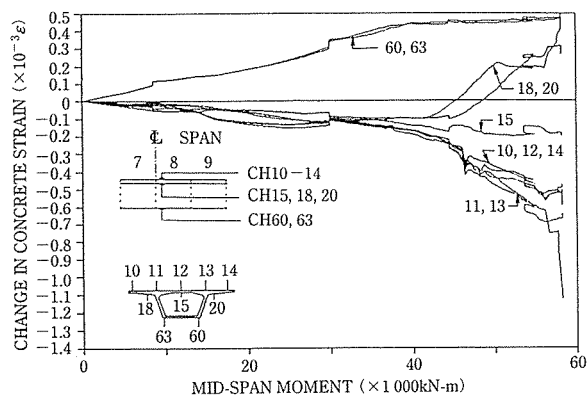


図-3 スパン中央モーメントとコンクリートひずみの関係

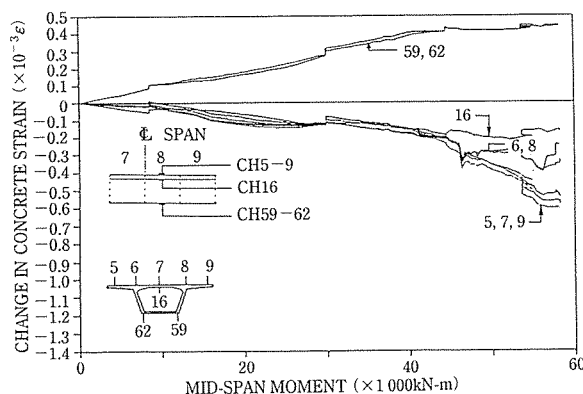


図-4 スパン中央モーメントとコンクリートひずみの関係

荷作業の中断時に対応しており、夜間の温度変化に起因するものと考えられる。

上スラブ上面の圧縮ひずみ (No. 5~14) も、荷重とともに増加している。幾つかのジャンプを含む線形領域を有しているのは、下面のひずみと同様であり、ひずみカーブは、デコンプレッション荷重よりやや遅れて、線形領域から離れていく。桁中央曲げモーメントが約 56 000 kNm に達した時点でわか雨があり、それに対応して顕著な変動がデータ中に見られる。

ウェブ直上での上スラブの圧縮ひずみは、片持ち部やボックス中央でのそれよりも大きく、これは、せん断遅れの影響であると考えられる (図-3 参照)。しかし、この傾向が全側点で等しく見られるのはジョイント開口までであり、その後はセグメント中央部でのひずみの大小関係は逆転する (図-4 参照)。

上スラブ下面のジョイント部に設置したひずみゲージ (No. 15) も上面のゲージと同様の挙動を示すが、ここでは上面のゲージが線形領域から離れていくのに少し遅れて、圧縮ひずみの減少が始まる。中立軸位置が上スラブ中に入り込むのに対応して、ひずみ方向の逆転が生じるためであると考えられる。しかし、セグメント中央部に設置されたひずみゲージ (No. 16) には、方向の逆転は見られず、これは前述の上面のひずみと同様の傾向である。

(2) デビエーター

図-5 は、デビエーター d 1 の横梁の上下面に設置した 3 軸ひずみゲージによる計測結果を示している。デビエーター d 1 では、ゲージ No. 57 がデコンプレッション特性を示している (No. 56 も同様の挙動を示しているが、橋軸方向ではない)。No. 50 および 51 は、ごくわずかのひずみ変化しか示していない。No. 55 および 49 は、それぞれ上下面の引張りおよび圧縮を示しており、梁として挙動していることがわかる。デビエーター d 2 においてもひずみのオーダーは d 1 のものよりも小さいが、同様の傾向を示している。

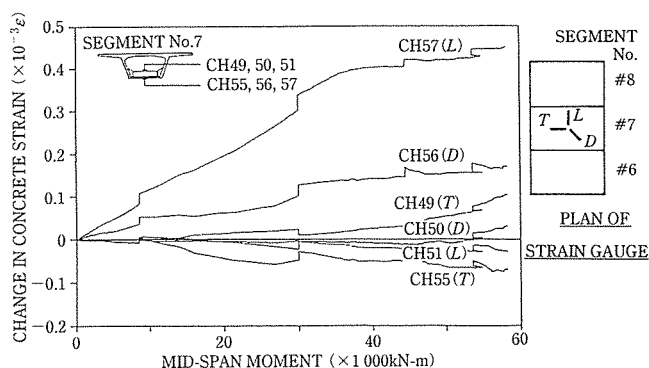


図-5 スパン中央モーメントとデビエーターのひずみの関係

5.2 ケーブルひずみ

ケーブル T 1, T 5 および T 6 のひずみ変化曲線は、温度効果による局部的変化はあるものの、いずれも線形領域および非線形領域に分けることができる。線形領域から非線形領域への移行は、デコンプレッション荷重からやや遅れ、40 000 kNm よりわずかに高い荷重レベルで始まっている。

偏向角の大きいケーブル T 1 は、全荷重段階を通じての桁中央部分 (No. 30, 31, 36, 37) は、桁端部 (No. 26, 27, 42, 43) よりも大きなひずみを示しており (図-6)、ケーブルとデビエーターの間で摩擦が生じているものと考えられる。両計測点のひずみ差は荷重とともに増大していくが、45 000 kNm を過ぎた頃からほぼ一定値となる。

一方、ケーブルがほぼ直線 (偏向角がほぼ 0) で、デビエーターとの摩擦力が 0 に近いケーブル T 5 のひずみは、ケーブル全長にわたって均等に配分されている。これは、ケーブル偏向角が桁のたわみにより増加した載荷最終段階においても変わらない。

ケーブル T 6 のひずみは、当初は T 1, T 5 と同レベルであるが、ジョイントの開口が顕著になるにつれ、他よりも大きくなっていく (図-7)。ケーブル長が短く、同一伸びでも他ケーブルよりひずみが大きくなること

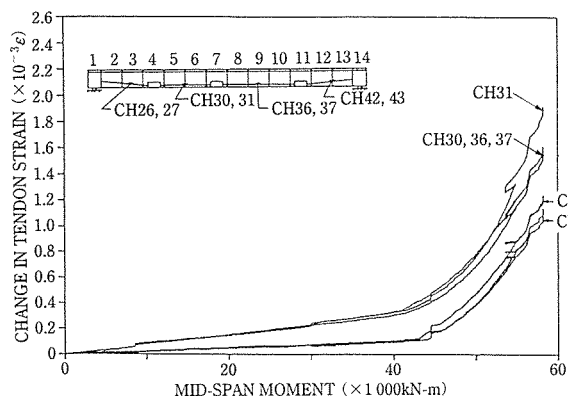


図-6 スパン中央モーメントとケーブルひずみ(T 1 R)の関係

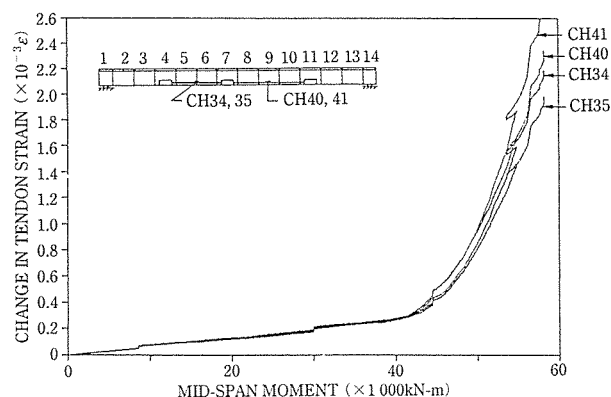


図-7 スパン中央モーメントとケーブルひずみ(T 6 L)の関係

理由であると考えられる。T 6 では 40 000 kNm をやや上回る辺りからデビエーター d 1 を境としてひずみ差が見られるようになる。これはデビエーター d 1 における当初の偏向角 (T 5 より大きい) が桁のたわみとともに増加し、摩擦力が徐々に増加しているためと考えられる。

載荷開始後 3 日目になると、ボックス内ではケーブルのはねる音が断続的に聞こえるようになった。ケーブルひずみの増加に伴い、ストランドとグラウトとの付着が切れる、あるいはストランド相互の配置が変わる際の音であると考えられる。音は 4 日目も続いたが、5 日目の最終日には聞かれなかった。

5.3 たわみ

ジョイント 6-7, 7-8 および 8-9 の位置でのたわみ変化と桁中央部モーメントとの関係を図-8 に示す。たわみは温度効果による局部的変動はあるが、線形的に増加していき、40 000 kNm よりやや小さい荷重で非線形挙動 (剛性の減少) を示し始める。非線形領域では、ジョイント 8-9 (C 点) でのたわみが最大であり、桁中央 (B 点) でのたわみよりも大きい。この非対称性は図-9 に示すたわみ曲線からも明らかであり、デビエーター d 1 の位置からくる非対称なプレストレス荷重に対応して

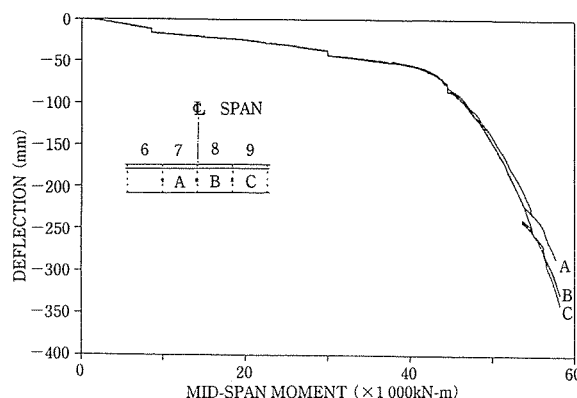


図-8 スパン中央モーメントとたわみの関係

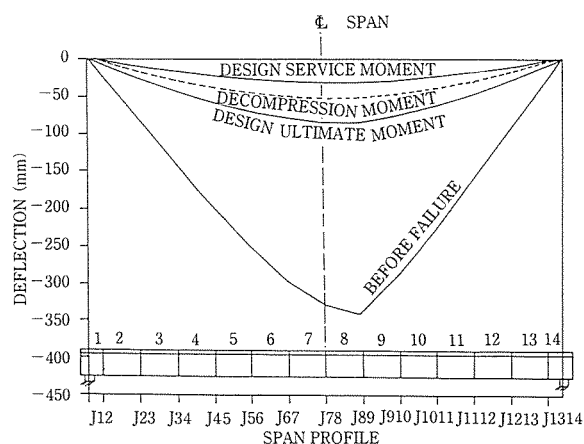


図-9 荷重とたわみ形状の関係

いる。

5.4 ジョイントの開き

ジョイント 8-9 の開きをダイヤルゲージで測定した結果を図-10 に示す。ジョイントの開きは載荷荷重に対し非線形挙動を示し、40 000 kNm よりやや小さい荷重で急増している。載荷の最終日（5 日目）になると各荷重増分ごとに針の動きが止まるまで時間を要するようになってきた。最終段階では全体系が新しい平衡状態に移るのに必要なケーブル張力増分が大きく、それに対応してケーブルの滑り量も大きくなるためと考えられる。写真-3 に破壊直前のジョイント 8-9 の開口状況を示す。

図-11 に各ジョイントの開口量の分布を示す。最大の開口量は桁中央部ではなく、ジョイント 8-9 に発生しており、たわみ形状とも一致している。ジョイントの開口は、桁上に直接置かれたビレットが上スラブ剛性に与える影響下にあり、桁中央部に集中してはいるが、依然 5 つのジョイントに分散して分布している。なお、ジョ

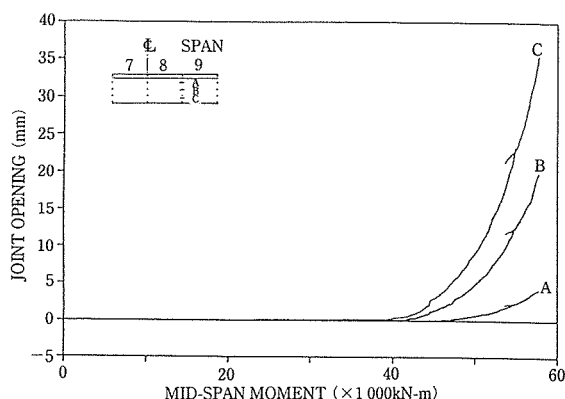


図-10 スパン中央モーメントとジョイント 8-9 の開き量の関係

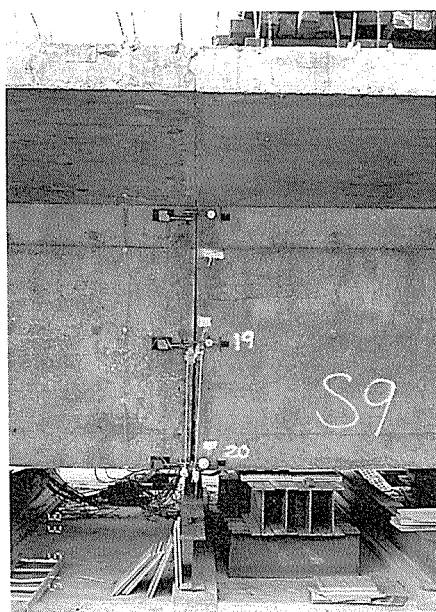


写真-3

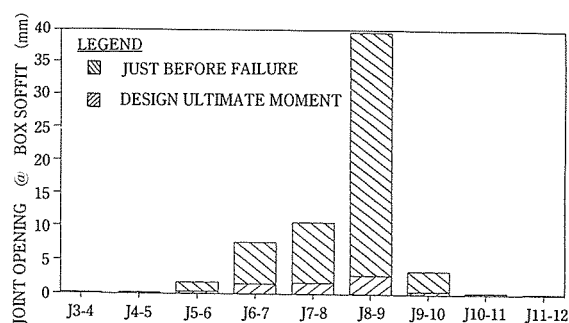


図-11 荷重とジョイントの開き量の関係

イント 3-4, 4-5, 10-11, 11-12 での計測値は小さく、弾性ひずみとの区別が困難であるため、ここでは開口していないとみなした。

5.5 ジョイントの滑り

図-12 にジョイント 1-2 での相対鉛直変位の計測結果を示す。全段階を通じ、荷重と相対変位との間に正の相関関係は見られないうえに、データ中に見られる変動はひずみゲージの読みに見られるような温度変化に起因する小さいオーダー（最大約 0.04 mm）のものであり、滑りが発生しているとは考えられない。

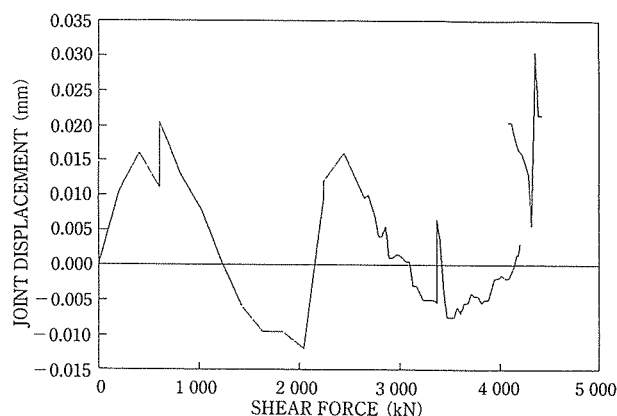


図-12 せん断とジョイント 1-2 の相対鉛直変位の関係

5.6 ケーブルの滑り

ダクト T 1 R のデビエーターにおける移動量を図-13 に示す。40 000 kNm を少し超える荷重レベルまではすべての読みはほぼ 0 で、その後急増している。デビエーター d 2 では、桁端側 (No. 1, 6) と桁中央部側 (No. 2, 5) の移動量に大きな差異が見られるが、デビエーター d 1 では両側 (No. 3, 4) の移動量がよく合致している。

ダクト T 5 L は、T 1 R よりもはるかに小さい約 19 000 kNm ですでに移動の徴候を示し始めている（図-14）。また、全段階にわたって、デビエーター両側でのダクト移動量は合致しており、ダクト全長に伸びが均等に配分されていることがわかる。一方、ダクト T 6 L は、T 1 R に少し遅れ 45 000 kNm から移動量が急増している。

◇研究報告◇

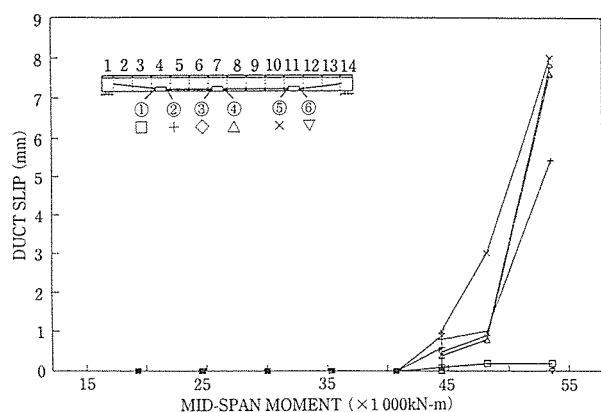


図-13 スパン中央モーメントとダクト移動量の関係 (T 1 R)

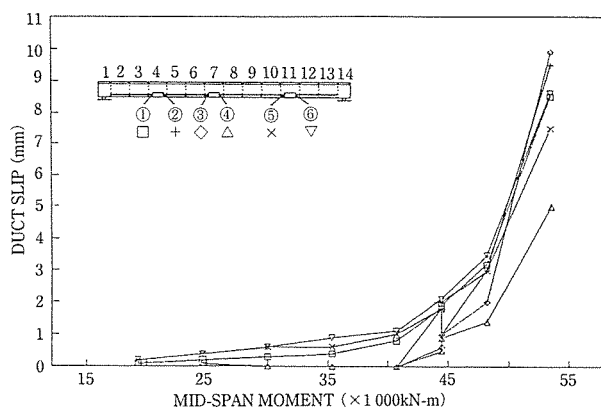


図-14 スパン中央モーメントとダクト移動量の関係 (T 5 L)

これらの計測結果中には、ダクト自身の伸びが混在していると考えられるが、前述のケーブルひずみの計測結果とほぼ対応している。

5.7 ひび割れ

予想された破壊モードは、ジョイント 8-9 での上スラブコンクリートの圧縮破壊であったため、その部分は試験中、目視およびビデオカメラによる詳細なチェックを行った。ひび割れは、まず約 23 000 kNm の荷重下でジョイント 8-9 の切込みに充填した上スラブ防水用エポキシコンクリートに沿って発生した。25 400 kNm でも再度目視チェックを行ったが、新しいひび割れはなく、上述のひび割れの若干の伸展が見られたのみである。載荷の最終段階においても、ビデオカメラにより把握し得た限りでは、破壊の直前まで上述のもの以外に上スラブにひび割れは発見されなかった。

約 45 000 kNm の荷重下で、桁中央部の 4 個のセグメント (No. 6, 7, 8, 9) のウェブ上半部にひび割れが発見された (図-15)。ひび割れはウェブの内外両面に同じパターンで発生しており、完全な貫通ひび割れであった。

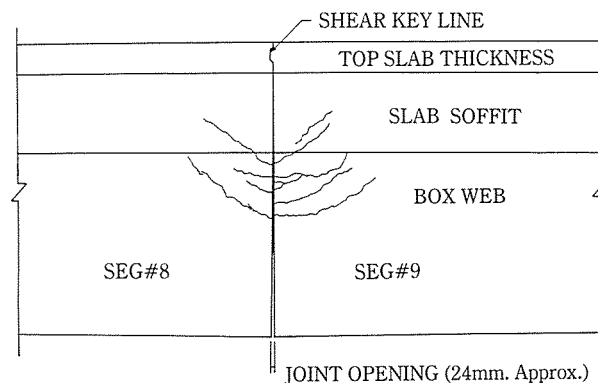


図-15 セグメントに生じたひび割れ (目視観察)

6. 破 壊

最後の 10 ピース (計 2 620 ピース) を所定の場所に置いた直後、テストスパンは目視でも明らかなたわみ増加を生じ、破壊に至った。まず、ジョイント 8-9 の上

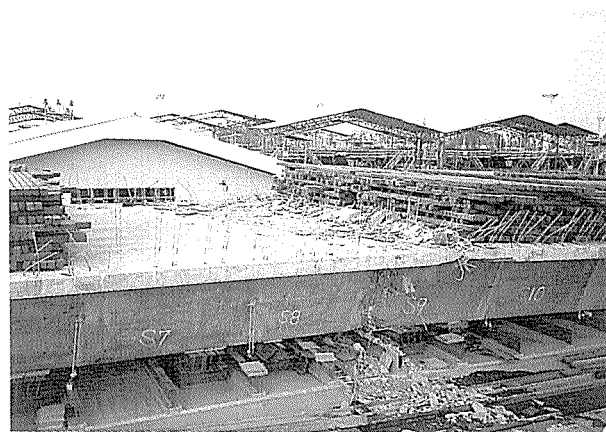


写真-4



写真-5

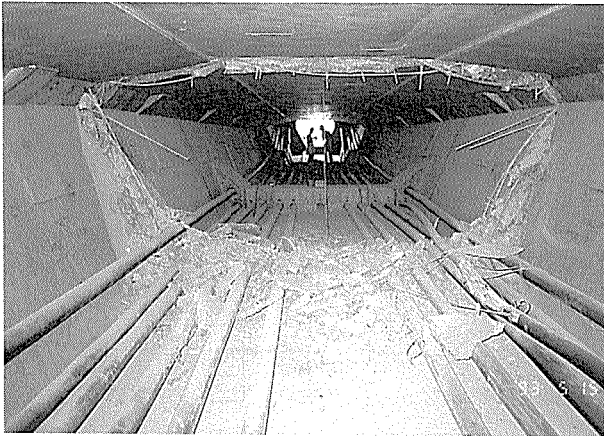


写真-6

スラブコンクリートが音を立てて圧壊、間を置かず爆発音とともに同一ジョイントのウェブおよび下スラブコンクリートの圧壊も続き、一帯は粉塵に包まれた。この過程は数秒の内に起こり、同時に桁は落下した。破壊直後の桁の状況を写真-4, 5 および 6 に示す。

破壊後の桁の調査を行ったが、その主な結果は以下のとおりである。

- 1) 圧縮破壊のために、桁長は Box 全周でほぼ均等に約 50 cm 縮み、圧壊部の鉄筋の何本かは切断され、膨大な量のエネルギーが作用したことを示している。
- 2) 上スラブのうち、上下方向の拘束の弱い部分、すなわちウェブ直上以外では、雄ガイドキー（セグメント No. 9 側）が雌ガイドキー（No. 8 側）を二分しながら破壊している。
- 3) 桁の破壊に伴うジョイント 8-9 でのコンクリートの剝離・ひび割れ状況と図-15 のひび割れとの間には、特に相関関係は認められなかった。
- 4) セグメント No. 11 のデビエーター d 2 で、ケーブルがデビエーターを押し上げ、コンクリートに損傷を与えている部分が 1 箇所発見された。桁が崩壊した際にケーブル偏向角が急変したためと考えられる。そのほかには、横桁あるいはデビエーターに新しい損傷・ひび割れは認められなかった。
- 5) すべてのケーブル定着部でエポキシモルタルによる定着ブロックカバーにひび割れが生じていることが発見された。また、ケーブルにひずみゲージを設置した箇所では、ダクトが部分的に除去されているが、そこではケーブル周囲のグラウトがほとんどふり落とされていた。いずれも、破壊時のケーブルの激しい振動によるものと考えられる。

破壊のメカニズムは以下のように説明できる。ジョイントが大きく開くと同時に、中立軸が上スラブ中で上方移動、その部分のコンクリートの圧縮応力度が終局耐力

に達し、圧縮破壊した。上スラブコンクリートを破壊すると、ジョイント 8-9 でのケーブル張力は平衡の対象を失い、それまで開いていたジョイントを急激に閉合させた。その際の膨大なエネルギーの解放に伴い、ジョイントは完全に圧壊、ヒンジが形成され桁の構造はメカニズムとなり、落下した。

7. 結果のまとめおよび考察

7.1 曲げ作用に対して

各荷重条件下でのジョイント 8-9 における力の釣合い状態をデータから逆算した結果を示した結果を図-16 に示す。ここに、コンクリートおよびケーブルの応力は、それぞれ次のヤング率を用いてひずみから換算した。

・コンクリート： $E_c=43 \text{ kN/mm}^2$ （実測たわみ、振動試験結果および円柱供試体の試験結果より決定）

・ケーブル： $E_p=193 \text{ kN/mm}^2$ （ストランドの引張り試験結果より決定）

なお、外ケーブルとセグメント間には限られた数の接点（横桁およびデビエーター）があるのみで、一般断面上では両者は分離した 2 つのシステムである。したがって、厳密に言えば、1 断面のみを取り出し、そこで両者の幾何的位置関係からそのまま力の釣合いを論ずることはできないが、図-16 では、外ケーブルの等価図心位置がその物理的図心位置に等しいものと仮定し、諸量を算出している。

以下、図-16 を参照しながら、試験中の観察結果のまとめおよび若干の考察を述べる。

(1) 破壊直前までの挙動

- a) 載荷作業開始直前のケーブル張力合力は約 37 000 kN であり、コンクリートのクリープ・乾燥収縮およびケーブルのリラクゼーションにより 2 年前の緊張時（約 42 000 kN）に比べ、約 12 % 減少している。これは設計で仮定したプレストレス力の損失量の約 76 % に相当する。
- b) 設計荷重作用時の最小圧縮応力度は、設計規準¹⁰⁾では 200 psi ($=1.4 \text{ N/mm}^2$) と規定されている。テストスパンの場合、同応力度は約 6 N/mm^2 であり、規準値を十分満足していることが確認された。
- c) テストスパンは、ドライジョイント・外ケーブル方式のプレキャストセグメント桁であるが、作用荷重が小さい間は一体打設された桁と同様の挙動を示した。デコンプレッション荷重を超える荷重下では（複数の）ジョイントが開き始め、その部分のセグメントは未開口部分での接触によってのみ連結された一連の独立したブロックとなり、セグメント内部の応力分布にも変化が生じた。テストスパンは 2 年

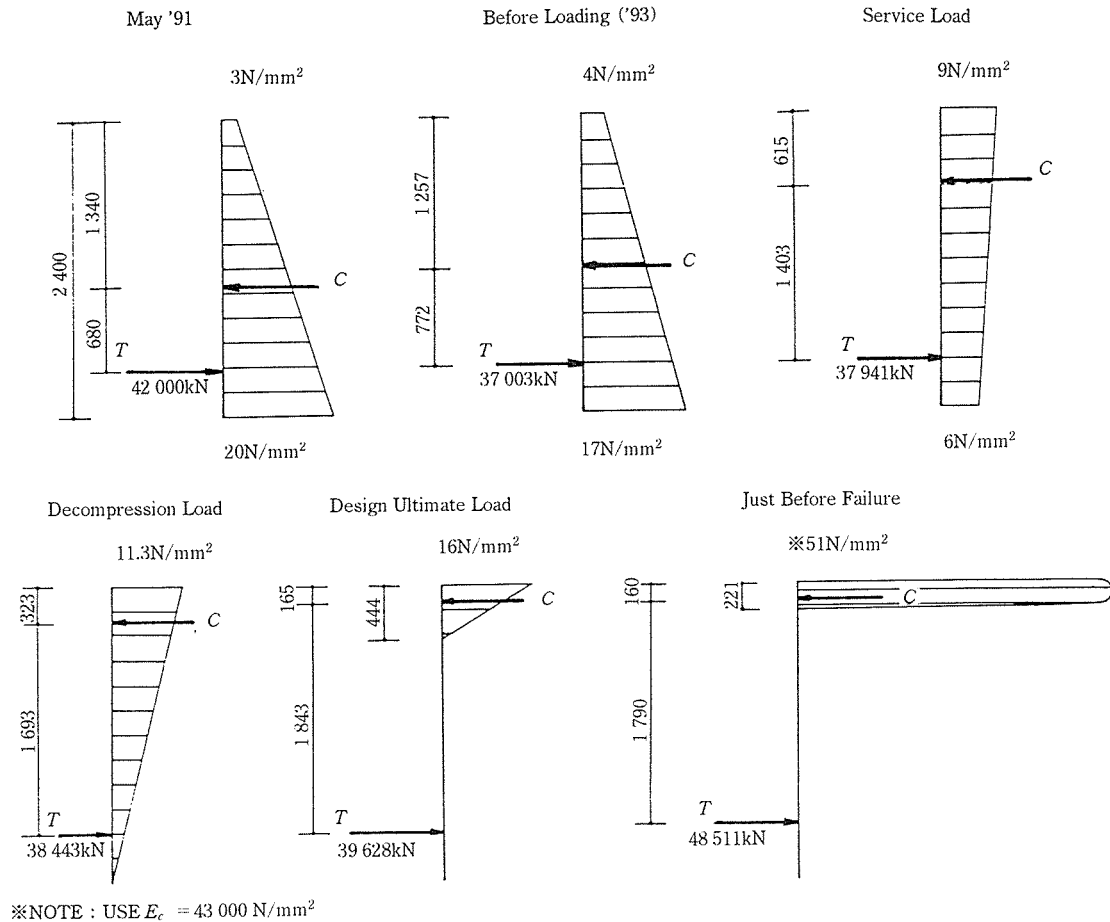


図-16 ジョイント8-9における力の釣合い

前にジョイントの開口・閉合を経験しているが³⁾、今回の試験中その後遺症は特に認められなかった。

- d) 抵抗モーメントの増加は、当初は主に内力のアーム長の増加によるが、中立軸が上スラブ下端に近づくとともにアーム長の増加の影響は減り、ケーブル張力の増加に依るようになった。
- e) デビエーターが桁中央部近くに配置されているため、桁のたわみが直ちにケーブル偏心量の減少に結び付くことはなく、デコンプレッション荷重までは無視し得る程度である。しかし、その後、ジョイント開口量の増大とともにセグメント間の相対的回転角が増すにつれて、桁中央部での偏心量の減少が顕著になった。
- f) 外ケーブルでは、デビエーターとの間に存在する摩擦力のため、荷重の増加とともにデビエーターを境としてケーブル張力の不均衡が発生、不均衡量が摩擦力を上回った場合にはケーブルの滑りが生じ、張力の再配分が行われると言われている。

テストスパンでは、ケーブル T 1 R 中の各自由長部分のひずみ差は荷重とともに増加するが、ケーブルひずみが非線形領域に入っても間もなくほぼ一定

値となった。このひずみ差はジョイント開口により桁中央部の構造特性が変化した後もほぼ一定であり、ここではケーブルは連続的に滑っており、ケーブルとデビエーター d 2 の間には動摩擦力が作用していると解釈される。ひずみ差から推定される摩擦力は、セグメント No. 4 で約 110 kN、セグメント No. 11 で約 210 kN である。T 6 L では滑りの徴候は観察されたが、摩擦力の大きさについては T 1 R ほど明らかではない。一方、T 5 L とデビエーターの間には摩擦の徴候はほとんど見られず、いわゆるアンボンドケーブルとしての挙動を示している。このように、テストスパンでは摩擦力がケーブル偏向角・曲げ半径の関数となっていることが確認できたが、これに加え、ケーブル張力、接触長および偏向部部材の材質（ダクト、デビエーター）なども摩擦力に影響を与えるものと思われる。

設計荷重レベルでのケーブル滑りは、直線に近いケーブル (T 5 L) 以外では認められず、かつ T 5 L においてもごくわずかな滑り量が計測されたのみであった。したがって、この荷重レベルでは摩擦力が卓越しており、設計時にケーブル滑りを考慮する

必要はないと考えられる。

(2) 破壊時(破壊直前)の挙動

- a) テストスパンは、本構造物と同一仕様の材料を用い、かつ同レベルの品質管理下で製作されているため、その終局耐力は本構造物の終局耐力分布内に納まっているものと考えられる。テストスパンの破壊荷重は、設計終局荷重の約 1.18 倍(桁自重を含む)であり、設計に使用した強度低減係数(=0.85)と比較して過大・過少ではなく、桁の曲げモーメントに対する設計は妥当であったと言える。
- b) ジョイント 8-9 における破壊直前の内力のアーム長は、設計終局荷重作用時に比べて逆にやや減少している。ジョイント開口に伴い中立軸位置は上昇しているにもかかわらず、コンクリート圧縮応力合力の作用位置はほとんど動いておらず、逆に大きな桁のたわみおよびジョイント開口に伴うセグメントの回転により、ケーブル偏心量が減少したためである。設計荷重下では問題とならなかったデビエーターの配置が、終局耐力に関しては改善の余地があることを示している。
- c) 破壊荷重近くでは、すべてのケーブルに滑りが発生した。ケーブルの滑りは、クリティカルな断面でのケーブル張力を下げ、中立軸位置を上昇させるため、デビエーターにおけるケーブルの固定度を上げれば、桁の終局耐力を増加させることができると考えられる。
- d) 終局時(破壊直前)における平均ケーブル応力増分は、約 382 N/mm^2 である。設計指針⁹⁾で規定されている応力増分値 103 N/mm^2 (ひずみに換算すると約 0.05 %) は試験データをかなり下回り、非線形領域の始点付近に位置しているに過ぎない(図-6, 7 参照)。この差の原因としては、規準自体の保守性のみならず、全外ケーブル方式のプレキャストセグメント桁の終局時挙動の特徴、すなわちジョイントの開口、大きな桁のたわみ、ケーブル偏心量の減少等が適切に表現されていないことが考えられる。規準どおりに設計した場合、同タイプの構造物ではケーブル量が過大に算出され、外ケーブルの有利性を損なう恐れがある。なお、テストスパンの設計では、規準で示されている値以上の応力増分値 (250 N/mm^2) を用いて終局耐力を算出した。
- e) 破壊直前の全ケーブル応力(スパン中央部)は T 1 R および T 5 L で $1500 \sim 1540 \text{ N/mm}^2$ であるが、T 6 L はこれらとほぼ同一位置にあるにもかかわらず $1680 \sim 1880 \text{ N/mm}^2$ と降伏応力度前後の値となった。ケーブル図心位置でのデコンプレッ

ション荷重後のケーブル張力の増加は、主としてジョイントの開口によるケーブル伸びによるため、全長の短いケーブルのひずみ増加が長いケーブルのものよりも大きくなったためであると考えられる。

- f) 破壊直前にジョイント 8-9 の上スラブコンクリート上面に発生した平均応力度は約 51 N/mm^2 (圧縮ひずみ: 約 0.12 %) となり、セグメント No. 8 および 9 のコンクリートの 28 日強度 (59.7 N/mm^2 および 56.3 N/mm^2) よりやや低いが、拘束を受けている内部の応力はこれよりも高いものと考えられる。

このような状態では、接触部(テストスパンの場合は上スラブ)の剛性および形状(例えば、ガイドキー形状)に起因する応力集中が破壊形態に与える影響が無視できなくなる。これは逆に見れば、詳細部の設計に配慮することで、終局曲げ耐力の増加が可能であることを示唆している。例えば、開口が予想されるジョイントではセグメント端部の配筋を支圧力に抵抗するように設計する、あるいは同部分の端部剛性を平均的に上げ応力集中を防ぐことなどは終局耐力の増加に寄与するものと思われる。

- g) 外ケーブルは設計上アンボンドケーブルとして扱われ、全ケーブルに使用した場合コンクリートのカタストロフィックな破壊につながるため、一般に構造物の靱性の面で問題があるとされている。

曲げ作用に対するテストスパンの破壊形態は、上スラブコンクリートの圧縮破壊およびそれに続く桁全体の崩壊であり、実際に数秒の内に生じるカタストロフィックなものであった。しかし、一方では破壊のかなり前の段階で、ジョイントの開きおよびたわみは容易に目視で捕らえることが十分可能なほど大きくなっていた。したがって、テストスパンのような構造物では、破壊に先行して観察されるジョイントの開きおよびたわみにより、使用者への警告は十分な余裕をもって与えられ、脆性的な最終破壊モードは実際面では問題にはならないものと考えられる。

7.2 セン断作用およびジョイント

- 1) 本載荷試験は曲げ耐力を調べることを主眼としていたため、せん断耐力の照査を目的とした荷重載荷は行わなかったが、結果としてジョイント 1-2 および 4-5 での最大せん断力は設計終局荷重の 97~98 % に達した。同荷重下でもジョイントあるいはウェブコンクリートに何ら不具合が見られなかったことから、設計の妥当性はほぼ実証されたものと考えられる。

テストスパンは分布荷重が載荷された単純桁であ

◇研究報告◇

る。したがって、せん断照査の対象となる断面で大きな曲げモーメントが生じている場合、特にジョイントの開口の可能性のある場合（例えば、連続桁）についてはここでの議論は必ずしも適用されない。

- 2) ドライジョイント方式の場合、セグメント組立時にせん断キー間に空隙が残るため、まず接合面での作用せん断力がコンクリート面の静的摩擦抵抗力を上回った時点である程度の滑りが発生し、その後にせん断キーの機械的噛合いが始まると考えられた⁹⁾。

テストスパンでは、ジョイント部の鉛直方向相対変位は、終始温度変化に起因すると思われるなどらかな変動を示しているのみで、荷重との間に正の相関関係は見られず、ジョイントでの滑りは発生していないと解釈された。これは、載荷開始前にすでに十分な機械的な噛合いがせん断キー間に存在していたためと思われ、その理由としては以下のようなものが考えられる。

- 架設中に桁自重に相当するだけのプレストレスが加えられ桁がそり上がった際、軸方向力がまだ小さく、ジョイントでの摩擦力が小さいため、セグメントが自重によりすでに鉛直方向に滑り、せん断キーは互いに最適位置に納まっている。
- セグメントの断面形状が箱形であるうえに、その接合部全周にわたり多数のせん断キー・ガイドキーが配置されているため、いったん架設が完了した後は拘束度が高い。
- 接合面はマッチキャスト製作されているため、元々の接触度が高いことに加え、プレストレス力による弾性変形により空隙部が縮小、接触度がさらに高まっている。

実際に現場で用いられる架設工法（スパンバイスパン工法）は、テストスパン同様架設中のセグメントの鉛直移動を許容するものである。さらに、ドライジョイントの場合、設計荷重下では全断面で最小 200 psi ($=1.4 \text{ N/mm}^2$) という高い圧縮応力が要求されており、ジョイントが開くことはありえない¹⁰⁾。したがって、設計荷重作用時のジョイントの滑りに対する照査は省略することが可能であると考えられる。

- 3) ジョイント 1-2 および 4-5 でのケーブル張力鉛直成分の変化を表-4 に示す。設計終局荷重までは鉛直成分の増加は無視し得るほど小さく、内ケーブルと同様、考慮する必要はない。しかし、破壊荷重下では、せん断応力を 10 % 程度多く評価する（テストスパンの場合）結果となり、設計はやや安全側となる。

表-4 ジョイント 1-2 と 4-5 におけるせん断力

Joint No.	Load Stage	Selfweight $Q_d(\text{kN})$	Applied Load $Q_a(\text{kN})$
1-2	Before Loading Test	2 557	0
	Service Load	2 557	1 838
	Observed Decompression Load	2 557	2 705
	Design Ultimate Load	2 557	3 369
	Just Before Failure	2 557	4 458
4-5	Before Loading Test	1 255	0
	Service Load	1 255	1 275
	Observed Decompression Load	1 255	1 826
	Design Ultimate Load	1 255	2 244
	Just Before Failure	1 255	2 887

- 4) テストスパン中央部では、開口量の大きいジョイントのウェブ上半部にひび割れが発生した。これはせん断作用によるものではなく、未開口部分に作用する軸方向力およびモーメントにより、開口部端面近傍に引張りが生じたことが原因であると考えられる（外ケーブルとセグメントの接触はジョイントをまたぐ連続的なものではないため、隣接するセグメント間での直接の相互作用はすべてジョイントの未開口部分を介して伝わる）。

通常の使用状態でのジョイント開口量は生じたとしてもわずかであり、端面に発生する引張り応力度は少なく、ひび割れ発生の可能性は低いと考えられる。これは、開口量が少ない時に引張り領域であったはずのウェブ下半部にひび割れが発生しなかったことからわかる。また、載荷中のウェブのひび割れとテストスパンの破壊形態の間には直接の相関関係は見いだされなかった。したがって、テストスパンのセグメント端部ウェブ配筋は、特に上記のようなひび割れを考慮したものではなかったが、実用上問題は無いと考えられる。

7.3 デビエーター

- 下スラブに付けられたデビエーターの横梁が梁として機能し、その端部反力はウェブに沿って流れるという設計上の仮定が妥当であることが計測によって確認された。
- デビエーター d 2 では、荷重載荷に伴うケーブル張力の増加がたわみ増加に伴うケーブル偏向角減少により相殺され、デビエーターへの作用力が載荷荷重に比べてあまり増加しないことが観察された。終局耐力確保の目的で設置されたデビエーター d 1 では元々のケーブル偏向角が小さいため、設計荷重下ではごくわずかな反力しか見られず、破壊時においてもさほど大きな反力は発生しなかった。デビエーターの終局耐力の照査が必要な場合には、ケーブル張力の増加および桁のたわみによる偏向角の変化の

双方をセットにして考えるべきであると言える。

8. おわりに

本試験では、実物大のドライジョイント・外ケーブル方式のプレキャストセグメント桁に載荷し、設計荷重作用時から曲げ破壊にいたるまでの桁の挙動についてデータを求めた。試験は、載荷物として用いたビレットの剛性ならびに温度荷重の影響下で行われたという限界はあるものの、試験を通じて、この種のタイプの桁の一般的挙動および破壊時における挙動についての詳細な情報が得られた。さらに、実構造物の設計内容と試験データを比較することで、設計方法に関する幾つかの定量的情報を得ることができた。

しかし、本報告は主なデータの提示およびそれらに関する若干の考察のみに留まっているため、今後データのより詳細な解析も含めることでさらに多くの情報の抽出を図るとともに、それらをこの種のタイプの桁の実用的な設計方法の提案へと結び付ける必要があると考えている。

謝 辞

最後に、本試験にご協力いただいた Siam Iron & Steel Co., Ltd., SGS (Thailand), Asian Institute of Technology, Jean Muller International, 3 F Consultants および Kumagai Gumi SES Project Management Office の方々に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 白石暢明, 小倉好一, 竹林稔雄: バンコク第2高速道路(第1期工事)の施工, 橋梁と基礎, Vol. 27, No. 5, 1993. 5, pp. 8-14
- 2) Shiraishi, N., Race, D., Short, M. and Kitta, T.: Bangkok Second Stage Expressway-Construction

of the Segmental Viaducts, FIP Symposium '93, pp. 1221-1228

- 3) Takebayashi, T., Deeprasertwong, K., Honda, B. T., Umeki, H. and Kumasaka, T.: Full Scale Testing of a Precast Concrete Segmental Bridge with External Tendons and Dry joints, FIP Symposium '93, pp. 1145-1152
- 4) R.J.G. Macgregor, M.E. Kreger and J. E. Breen, Strength and Ductility of a Tree-span Externally Post-Tensioned Segmental Box Girder Bridge Model, 1990, External Prestressing in Bridges, ACI, pp. 315-338
- 5) Rabbat, B.G. and Sowlat, K.: Testing of Segmental Concrete Girders with External Tendons, 1987, PCI Journal, March-April, pp. 86-107
- 6) Shiraishi, N. and Fox, P. D.: Bangkok Second Stage Expressway-Viaduct Design Overview, FIP Symposium '93, pp. 1123-1130
- 7) Hewson, N.: The Use of Dry joints between Precast Segments for Bridge Decks, Proc. Instn. Civ. Engrs., Civ. Engng., 1992, Nov., pp. 177-184
- 8) 白石暢明, 竹林稔雄, 谷沢次康: バンコク第二高速道路の計画および設計-外ケーブル方式によるプレキャストブロック工法, プレストレストコンクリート, Vol. 34, No. 4, 1992. 7, pp. 42-51
- 9) AASHTO: Standard Specifications for Highway Bridges 13th Edition, 1983
- 10) AASHTO: Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Bridges, 1989
- 11) Takebayashi, T., Kitayama, H., Hewson, N. R. and Fox, P. D.: Bangkok Second Stage Expressway-The Use of External Tendons and Dry Joints with Precast Segmental Construction, FIP Symposium '93, pp. 943-950
- 12) Takebayashi, T., Deeprasertwong, K. and Leung, Y. W.: A Full Destructive Test of a Precast Segmental Box Girder Bridge with Dry Joints and External Tendons, 投稿準備中

【1993年10月13日受付】