

鉄筋コンクリート合成スラブ橋 —新幹線長根橋梁について—

東京大学

国鉄盛岡工務局

国鉄構造物設計事務所

松 本 嘉 司

村 上 温

安 本 修 一

1. ま え が き

東海道新幹線は道路、鉄道との交差はすべて立体交差になっており、この立体交差の大部分が斜角交差である。これは交差する各々の路線の形が重んじられたことによるものである。新幹線工事ではこの斜角立体交差に種々の新工法や新材料が用いられたが、新幹線が現東海道本線を安城—刈谷間で交差角 $27^{\circ}30'$ で乗越える長期跨線鉄道橋など、場所打ち施工が困難な立体交差に採用した鉄筋コンクリート合成スラブ橋のその一つである。この構造はRCプレキャスト桁を並列架設し、その間に場所打ちコンクリートを填充して鉄筋コンクリート構造として一体のスラブを構成する方式である。以下、この鉄筋コンクリート合成スラブ橋の模型実験、設計、施工について報告する。

2. 長根橋梁の計画

長根跨線鉄道橋は安城—刈谷間（東京起点 $313\text{ km } 040\text{ m}$ ）において現東海道線（幅員 13.5 m ）と斜角交差する個所にあり、その設計条件は

- 1) 交差角度が極めて小さい（交差角度 27.5° ）
- 2) 施工中列車の遮断ができず、また、工事中の線路閉鎖間隔が極めて短い（1日列車回数は上下合せて250本、最大列車間隔15分）ため、場所打ち施工が困難である。
- 3) 当橋梁の高さより前後の路盤の施工基面高さが定まる。

などである。これに対して考えられる交差方式としては

- I) スパン 35 m ，斜角 45° の合成桁
- II) スパン 40 m ，斜角 45° のPC桁
（PC桁は所要橋台幅が合成桁より大きいために支間が長くなる）
- III) 直スパン 13 m のRCプレキャスト桁の合成スラブ
- IV) 直スパン 13 m のPCプレキャスト桁の合成スラブ

などがあるが、以上の各案について比較検討してわかったことは

- 1) スパン 35 m の合成桁が最も経済的となるが、これを用いると前後の路盤高が大きくなるため総体的には工費が高くなる。

2) 橋幅を上げた合成スラブの場合、現在線にそって長い橋台を必要とし、また、当該箇所は基礎の支持地盤が深いため杭長が長くなって、下部構造特に杭の工費が高くなるので、工費は比較的高くなる。しかし、この方法によれば、施工基面高さが低くなり、この橋梁前後の土工量が大幅に減り、線路勾配も小さくできるので、総体的にはこの方式が経済的である。

3) 橋幅を上げた場合にP C桁を採用すると橋幅が4.0 mにもなるので、横締めが困難である。また、支間が1.3 mであるからP C桁としては経済的なスパンではない。

以上により、図-10に示すスパン1.3 mのRCプレキャスト桁と中埋コンクリートによる合成スラブが経済的であり、施工も容易であるのでこの構造方式を採用した。この構造の特徴は

1) プレキャスト桁より直角に出した鉄筋によって横方向のつなぎを行なうので、横締め作業が省け、工費の節約になる。

2) 場所打ち施工のさい、プレキャスト桁を型枠として用いるので、桁下を通過する列車を支障しない。したがって、頻繁な交通箇所ではこの形式のスラブ架設は他に比べて有利となることが多い。

3) プレキャスト桁を合成してスラブを構成するので、プレキャスト桁1本当たりの重量は小さい。特に交差角度の小さい立体交差ではプレキャスト桁のスパンを交差される路線に直角にすることによって、そのスパンを小さくし、架設重量を軽減できる。そのため桁架設工事が容易である。

などである。なお、プレキャスト桁をP C桁とし場所打ちコンクリート部にもプレストレスを加える構造も考えられる。この方式によれば上記利点の外に桁高を極めて薄くすることができるが、一般にその工費はかなり高くなる。

3. 鉄筋コンクリート合成スラブの模型実験

(1) 実験の目的

合成スラブ構造は、場所打ちコンクリートに定着した鉄筋の付着および中空のプレキャスト桁と場所打ちコンクリート相互の付着によって荷重を横方向に分布させ、一体のスラブとして働かせようとする構造である。この構造は、横方向の曲げ剛性がスパン方向の曲げ剛性よりも小さいので、一体につくられたスラブに比べて横方向の荷重分配状態がわるく、応力が載荷点に集中することが考えられる。一般にRC一体スラブの設計には等方性スラブの理論が適用されているが、実際には直交異方性スラブとみなされる合成スラブの設計に等方性スラブの理論解を用いた場合、荷重載荷点付近の曲げモーメントをどの程度割増しするかは設計上の問題点である。

また、場所打ちコンクリートに定着した鉄筋の付着およびプレキャスト桁と場所打ちコンクリート相互の付着のみでスラブが一体として働らくかどうか疑問である。新幹線では等軸重の列車荷重が多数回繰返し載荷されるので、設計にあたり軸重を1.25倍割増してこれに対処しているが、このような付着のみによる構造が繰返し荷重にたいしても充分安全であるかどうかを確かめる必要がある。

この実験の目的は以上に述べた合成スラブの荷重分配状態および疲労性状を検討することであった。

(2) 実験の内容

実験は、合成スラブの横方向荷重分布を知るために合成スラブの静試験（ $0-40\text{ t}-0$ ， $0-100\text{ t}-0$ ）と一体スラブの静試験（ $0-19.5\text{ t}-0$ ， $0-85.8\text{ t}-0$ ）を、また、合成スラブの疲労性状を検討するために表-1に示す疲労試験を、荷重をスパン中心に載荷して行なった。

模型RC合成スラブは図-1に示すように $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 3\text{ m}$ の中空プレキャストRC桁10本を併列して試験機の下におき、この位置で中間のコンクリートを施工して一体のRCスラブとしたもので、一体スラブは $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 3\text{ m}$ のRCスラブを試験機の下で施工したものである。図-2・3は合成スラブおよび一体スラブの配筋を示したものである。

合成スラブの疲労試験の荷重載荷は表-1に示す順序で行なった。この繰返し回数は鉄道橋としては 10^6 回の繰返しが必要とされていることから定めたものである。最初の繰返し荷重 20 t は等方性スラブとして求めた曲

げモーメントに対して、引張側のコンクリートを無視して鉄筋コンクリートの理論より求めたこの模型スラブの設計荷重である。また、最小荷重 10 t としたのは、実際の合成スラブ橋の設計荷重のうち約 $1/2$ が死荷重であることから疲労強度を研究するためにはその約 $1/2$ 程度の下限応力を残すのが实际的であると考えたからである。 $10\text{ t}-20\text{ t}$ の荷重を 10^6 回繰返した後でも合成スラブは十分な耐力を示したので、その上限の荷重のみを 25 t （ 5×10^5 回）、 30 t （ 5×10^5 回）、 38 t （ 10^6 回）と上げて疲労試験を行ない、最後は 60 t まで静的荷重を加えた。

静試験における荷重は最高荷重の間を数段階に分けて増加させ、この各段階ごとのスパン中央、 $1/4$ 点の縦方向鉄筋および上面のコンクリートのひずみを測定した。コンクリートのひずみはコンクリート上面にスパン方向と横方向の2方向に貼付したワイヤストレンゲージによって測定し、また、

試験種別	荷重の大きさとくりかえし回数
静試験 A	$0-15^{\pm}0, 0-20^{\pm}0, 0-25^{\pm}0, 0-30^{\pm}0$
疲労試験 I	$10^{\pm}20^{\pm}$ くりかえし回数 100 万回
静試験 B	$0-20^{\pm}0, 0-25^{\pm}0, 0-20^{\pm}0, 0-25^{\pm}0$
疲労試験 II	$10^{\pm}25^{\pm}$ くりかえし回数 50 万回
静試験 C	$0-20^{\pm}0, 0-25^{\pm}0, 0^{\pm}30^{\pm}0$
疲労試験 III	$10^{\pm}30^{\pm}$ くりかえし回数 50 万回
静試験 D	$0-30^{\pm}0, 0-35^{\pm}0, 0-40^{\pm}0$
疲労試験 IV	$8^{\pm}38^{\pm}$ くりかえし回数 100 万回
静試験 E	$0-40^{\pm}0, 0-45^{\pm}0, 0-60^{\pm}0$

表-1 疲労試験の載荷内容

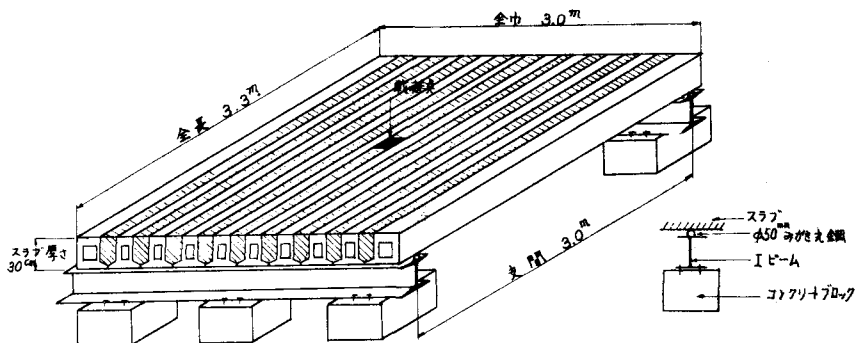


図-1 模型合成スラブ

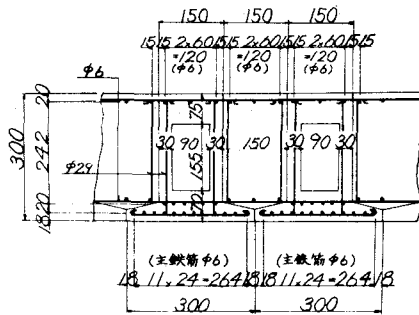


図-2 合成スラブの配筋

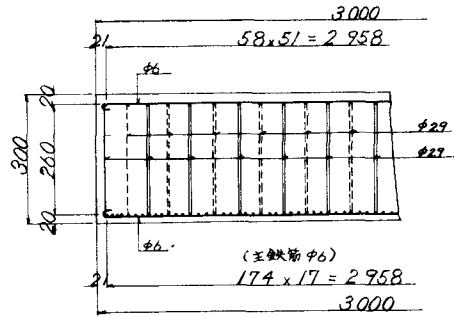


図-3 一体スラブの配筋

鉄筋のひずみはコンクリート施工前にあらかじめ鉄筋に貼付したワイヤストレンゲージによって行なった。また、スパン中央， $1/4$ 点，支承のたわみをダイヤルゲージによって測定した。疲労試験における測定は疲労試験の荷重の繰返しの前後に静試験を行なって疲労の定量的検定を行なうことにしたが，疲労試験を行なっている間にもペンオシログラフでひずみおよびたわみの測定を行なった。

(8) 実験結果および考察

静試験および疲労試験において測定した鉄筋のひずみおよびコンクリートのひずみの値には，ばらつきがあって，合成スラブの荷重の横方向分布および疲労強度を定量的に検討するためのデータとして有用でないものがあるので，ここにはたわみを実験結果としてあげこれにもとづいて問題点を検討する。

1) ひびわれの状態

静試験においても，また疲労試験においても設計荷重20tまではほとんどひびわれの発生は認められなかったが，その後の荷重の増加にともなって下面にひびわれが生じた。静試験における一体スラブ，合成スラブのひびわれはスパン中央ではスパンに直角に発生するが支点到近付くとひびわれの方向は斜めになっていた。疲労試験による合成スラブのひびわれは支点到近い部分までほとんどスパンに直角にひびわれがでており，また静試験では見られないようなスパン方向のひびわれが発生した。また，プレキャスト桁の中空部の隅角部にひびわれが入ったほかワイヤストレンゲージコードの露出している部分にもひびわれが集中した。しかし，これらのひびわれはいずれもスラブの機能を損うものでなく，塑性変形はなかった。この試験では模型スラブの耐力が大きいので完全な破壊状態まで試験することができなかった。

2) プレキャスト桁と中埋部の付着状況

静試験および疲労試験を通じて，プレキャスト桁と中埋部の境界に付着の不足，ずれなどの有害な破壊は何ら認められず，合成スラブは一体化されたスラブと同じような挙動を示した。

3) 合成スラブの横方向荷重分布状態

スラブの横方向における荷重分布状態は，横方向の平均たわみに対する横方向各点のたわみを比較することによって定量的に知ることができる。

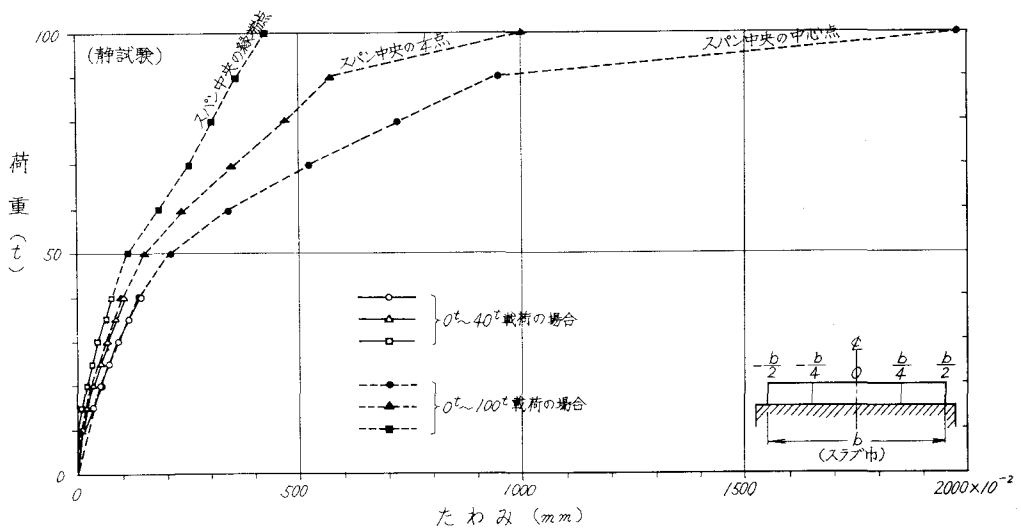


図-4 荷重-たわみ曲線 (合成スラブ)

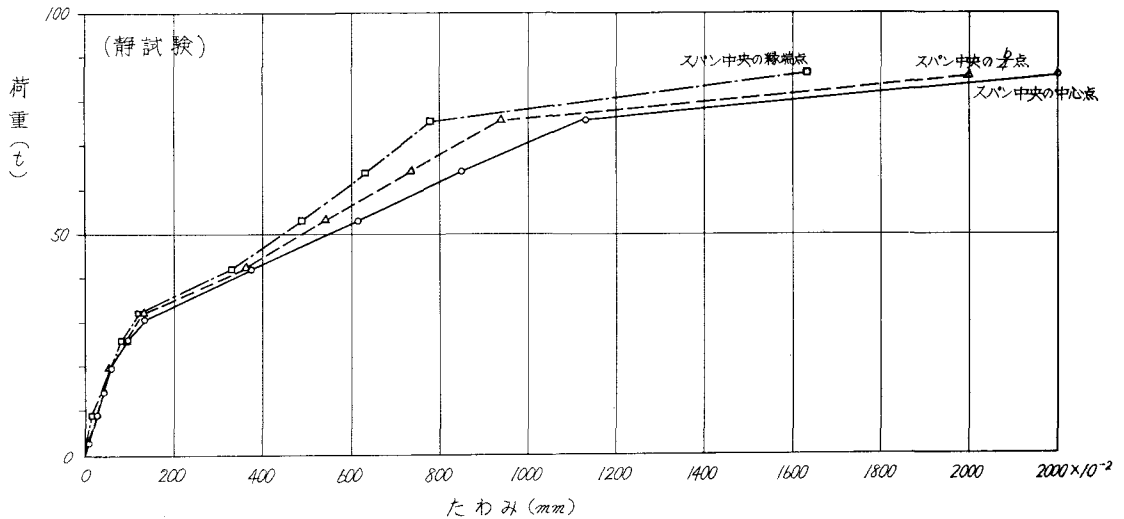


図-5 荷重-たわみ曲線 (一体スラブ)

図-4・5は合成スラブおよび一体スラブの静試験時におけるスパン中央の荷重とたわみの関係を示したもので、たわみは支承の枕下の平均値によって測定値を修正し実たわみを示した。表-2は図-4・5をもとにして、中央点、 $\frac{b}{4}$ 点、縁端点の実測値の平均値に対する各点の実測値の比を表にあらわしたもので、この表から合成スラブおよび一体スラブのいずれも荷重の増加とともに中

中央点の荷重分配値が増加し、荷重が中央点に集中する傾向にあることがわかる。また、合成スラブと一体スラブを比較すると、合成スラブの中央点の荷重配値は、各荷重段階において一体スラブの荷重分配値に比べて大きく、合成スラブが一体スラブよりも荷重分配状態がわるいことを示している。表－３は荷重 0 t－40 t において合成スラブの平均荷重分配値と一体スラブの平均荷重分

表－２ 合成スラブと一体スラブの荷重分配値の比較（静試験時）

荷重 (t)	合 成 ス ラ ブ			一 体 ス ラ ブ *			合成スラブの中央点の値
	中央点	$\frac{b}{4}$ 点	縁端点	中央点	$\frac{b}{4}$ 点	縁端点	一体スラブの中央点の値
10	1.66	1.25	0.417	—	—	—	—
20	1.45	0.968	0.807	—	—	—	—
30	1.32	0.997	0.843	1.05	1.01	0.967	1.25
40	1.26	1.01	0.859	1.09	1.01	0.945	1.16
50	1.33	1.00	0.833	1.13	1.02	0.915	1.18
60	1.35	1.00	0.826	1.16	1.03	0.889	1.16
70	1.45	0.988	0.785	1.21	1.02	0.867	1.19
80	1.53	1.01	0.722	1.20	1.03	0.862	1.28
90	1.61	1.02	0.678	—	—	—	—
100	1.97	1.00	0.511	—	—	—	—

* 一体スラブ 10 t, 20 t 段階では、中央点と縁端点でほとんどたわみの差がみられなかった。

表－３ 荷 重 分 配 値 の 比 較
(たわみ)

位置	中央点	$\frac{b}{4}$ 点	縁端点	合成スラブの中央点の値
				一体スラブ, 理論値の中央点の値
① 合 成 ス ラ ブ	1.29	1.00	0.851	—
② 一 体 ス ラ ブ	1.07	1.01	0.956	1.20
③ 理 論 値 ($B_2/B_1 = 1$, $\nu = 0$)	1.18	1.03	0.880	1.09

配値および等方性スラブのたわみ理論値 (Olsen, Reinitzhuber 氏の一方向スラブの理論解 $B_2/B_1 = 1$, $\nu = 0$ — B_1 : スラブの縦方向の曲げ剛度, B_2 : スラブの横方向の曲げ剛度, ν : ポアソン比) から求めた荷重分配値の比較と合成スラブの中央点の荷重分配値の、一体スラブおよび理論荷重分配値に対する比を示したものであるが、これによれば合成スラブは中央点において一体

スラブに比らべて20%, また等方性スラブの理論値に比らべて約10% 荷重分配値が大きくなっている。ここでは理論値として $B_2/B_1 = 1$, $\nu = 0$ の場合を示したが, $B_2/B_1 = 1$, $\nu = 1/6$, $B_2/B_1 = 0.8$, $\nu = 1/6$ に対する理論値を用いても大差がない。

4) 合成スラブの疲労状態

合成スラブが繰返し荷重の影響をどのようにうけているかは, 繰返し載荷後のたわみの実測値を

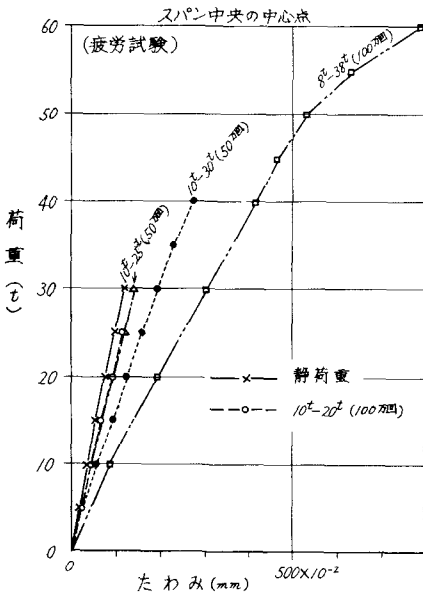


図-6 荷重-たわみ曲線(合成スラブ)

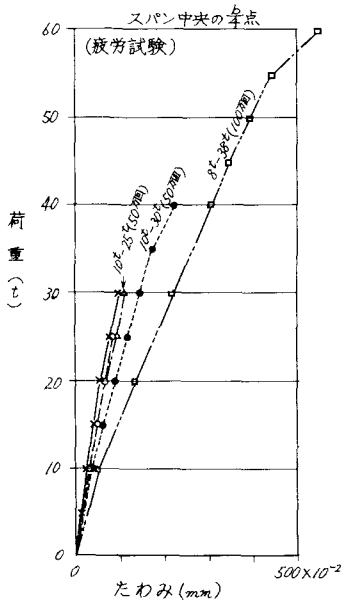


図-7 荷重-たわみ曲線

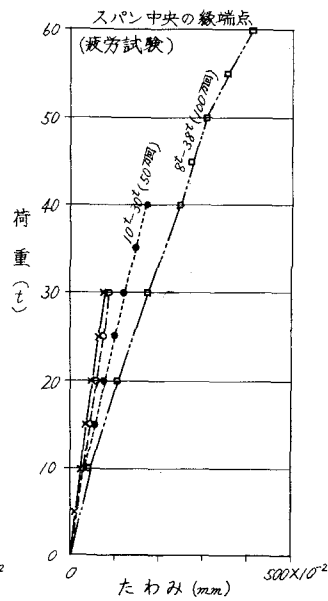


図-8 荷重-たわみ曲線(合成スラブ)

静試験時のそれぞれの実測値と比較することによって知ることができる。図-6, 7, 8 は合成スラブの疲労試験時におけるスパン中央の荷重とたわみの関係を示したものであるが, これをもとにして荷重10t~30tにおいて繰返し載荷後のたわみの実測値の静試験時の実測値に対する比を

表-4 合成スラブの疲労状態
(たわみ)

位置 \ 荷重	10-20 t (10 ⁶ 回)	10 t-25 t (10 ⁵ 回)	10 t-30 t (10 ⁵ 回)	8 t-38 t (10 ⁶ 回)
中央点	1.23	1.26	1.62	2.56
b/4 点	1.12	1.17	1.49	2.12
縁端点	1.17	1.19	1.46	1.99

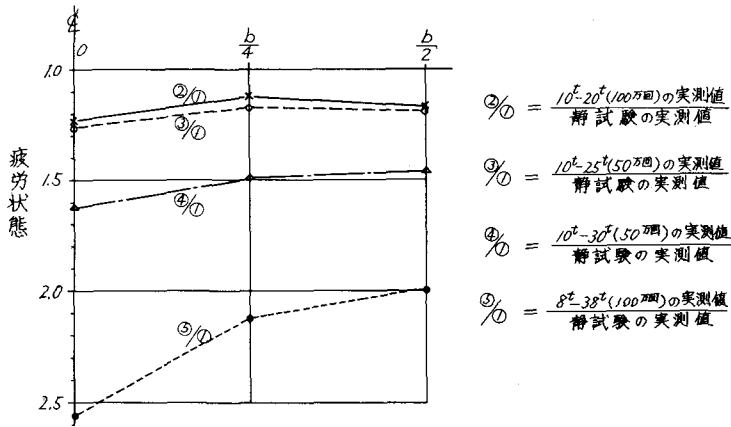


図-9 合成スラナの疲労状態(たわみ)

求めると、表-4のように合成スラブの疲労状態を示すことができる。この表および図-9によれば合成スラブは繰返し荷重およびその回数が大きくなるにつれて、また、荷重載荷点に近付くほど疲労がすすんでいること、

また設計荷重時 10 t-20 t 10^6 回では中央点(荷重載荷点)で約 20%, $\frac{b}{4}$ 点縁端点で 15% 前後疲労していることがわかる。

表-5 は繰返し載荷が合成スラブの荷重分配状態におよぼす影響を示すもので、繰返し荷重および回数が大

表-5 繰返し荷重が荷重分配におよぼす影響

試験位置	中央点	$\frac{b}{4}$ 点	縁端点
静試験	1.29	1.00	0.851
10 t-20 t, 10^6 回	1.36	0.955	0.860
10 t-25 t, 10^5 回	1.36	0.968	0.877
10 t-30 t, 10^5 回	1.39	0.977	0.830
8 t-38 t, 10^6 回	1.46	0.985	0.792

きくなると荷重が中央点(載荷点)に集中し、荷重分配がわるくなる傾向を示している。

(4) 結論

以上の結果から次の結論を得た。

- 1) 横締めしないこのような形式の RC 合成スラブの設計施工は可能であり、プレキャスト桁と中埋部は充分一体として働らく。
- 2) 合成スラブのスパン中央の中心におけるスパン方向曲げモーメントの荷重分配値は、たわみで比較した場合、等方性スラブの理論荷重分配値 ($B_2/B_1=1, \nu=0$) より約 10% 大である。
- 3) 設計荷重 (10 t-20 t 10^6 回) を繰返し載荷後、合成スラブの疲労は 15%~20% 程度である。設計荷重の約 2 倍の繰返し荷重を載荷後、合成スラブの疲労は相当に (150%) 進行しているが破壊にはいたっていない。

4) 合成スラブは一体構造に比して施工の工種が多種にわたるため、設計施工の不注意により、スラブ全体の耐久性を落す可能性が多いので、特に入念な設計施工が望まれる。

4. 鉄筋コンクリート合成スラブの設計

RC合成スラブは図-10および図-11に示す設計とした。プレキャスト桁は耳桁2本、中間桁32本の合計34本で、底幅1.2m、桁高1.1m、桁1本についての重量は約18tである。設計の要領は、

1) 桁の方向は、実際には現東海道線に対して75°の傾斜をしているが、合成スラブはス

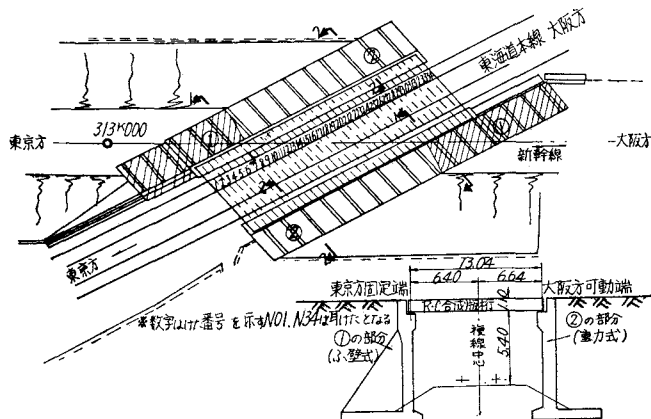


図-10 長根橋梁設計略図

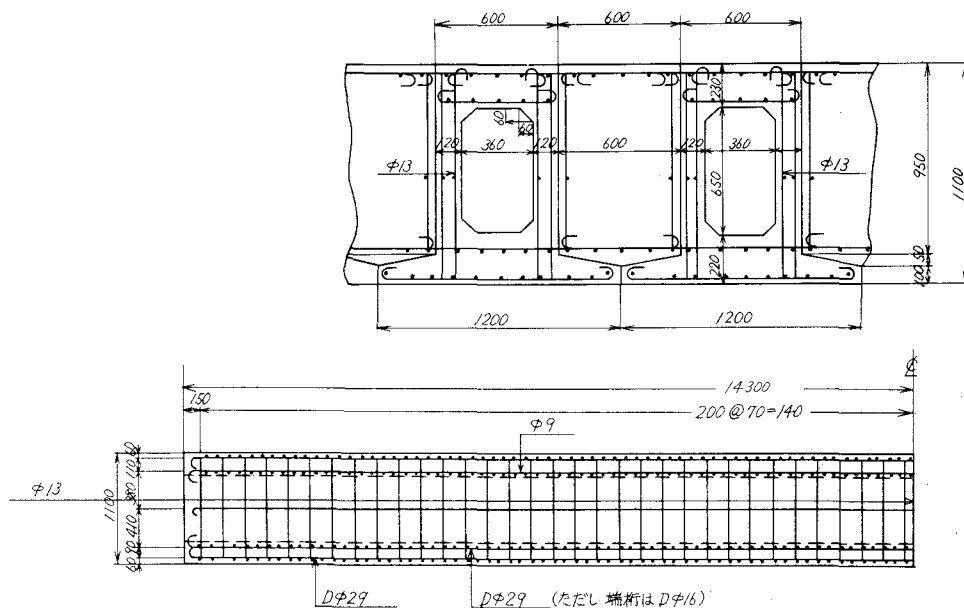


図-11 RC合成スラブの配筋図

パン（1 3.5 m）に比して横幅（4 0.8 m）が大きく、直角スラブとほとんどかわらないため、直角スラブとして設計した。

2) 設計には活荷重合成方式を用い、プレキャスト桁の自重および中埋コンクリートによる荷重にはプレキャスト桁が単純梁として働かし、中埋コンクリート施工後に載荷される軌道重量および活荷重に対しては合成された構造が一体として働らくと考えた。

3) 軌道重量および活荷重による曲げモーメントの計算は、Olsen Reinitzhuber 氏の一方向スラブの理論解による数値表を用いたが、模型実験の結論からスパン方向の曲げモーメントを等方性スラブとして求めた計算値（ $B_2/B_1 = 1$ ， $\nu = 0$ ）の10%増しとした。

プレキャスト桁より直角方向に出すつなぎ筋は架設時には折曲げておき、架設後のばして相互に連結することにしたが、手で折り曲げられる太さとするためDφ16以下の鉄筋とし、間隔を小さくした。

プレキャスト桁および場所打ちコンクリートの上部にはφ13の鉄筋を100mm間隔に配し、さらにその上に打つ均しコンクリートの中に金あみを入れて乾燥収縮によるひびわれを防止した。

沓にはゴム沓（フレシパッド）を使用し、スラブの乾燥収縮などによる水平方向の移動に対処させ、また、地震時における水平力に抵抗させるため橋台の桁座面と桁との間にボルトを埋込んだ。このボルトは常時のゴム沓の変形を拘束しないように桁にボルトより太いパイプを埋込み、ボルトとの間隔にはアスファルト系充填材（アイガス）を充填した。

5. 鉄筋コンクリート合成スラブの施工

鉄筋コンクリートスラブは、RCプレキャスト桁の製作、架設、中埋コンクリート打設の三段階で施工された。

プレキャスト桁の製作は、長根橋梁前後の路盤工事の進行の都合により適当な製作場所がなく、また、鉄筋コンクリート合成スラブははじめての構造で精度の高い製作が望まれたため工場製作とし、現場までトレーラーで運搬することにした。プレキャスト桁は豊田コンクリートKK豊田工場で作成した。製作は一般にPC桁の製作とほぼ同一であるが、次に特記する点をあげると、

1) 型枠は底版、側版ともにメタルフォームで工場で特別に加工したものをを用いており、34本の全桁にたいして転用し、中埋部の型枠はベニヤ板製で埋殺とした。

2) プレキャスト桁のフランジの厚さが薄く、この部分に入る鉄筋のフックは所定の大きさがとれないので、別に鉄筋加工機を作成し、太い鉄筋を小さい半径に曲げて加工した。

3) 締固めは型枠バイブレーターを用いた。バイブレーターの性能は $3/2 \text{ HP}$ ， 3600 R/M で、これを桁長14m300に対して片側3台ずつ、合計6台使用した。フランジ部が薄いので、この部分の締固めが心配されたが、以上のバイブレーター配置で充分よい施工ができた。

4) 使用セメントは小野田早強セメントで、桁はコンクリート打設後1日で型枠を取りはずした。桁はビニールでおおい、 60°C 以下の養生温度で蒸気養生を行なった。

プレキャスト桁の架設にさいしては、桁架設の前に、列車間合を利用して鋼製 I ビームを架設し、両側の橋台にレールを敷きゴライヤスクレーンを設置した。そして図-12、13に示すように運搬したプレキャスト桁を路盤上に組んだサンドル上に仮受けし、横取りしてトロに載せ、運搬レール上手巻ウインチで縦引きして仮設鋼製 I ビーム桁上に運搬しゴライヤスクレーンで横取りして架設した。

34本のプレキャスト桁を全部架設後、中埋部の鉄筋を組み立て、プレキャスト桁の目地にかたね

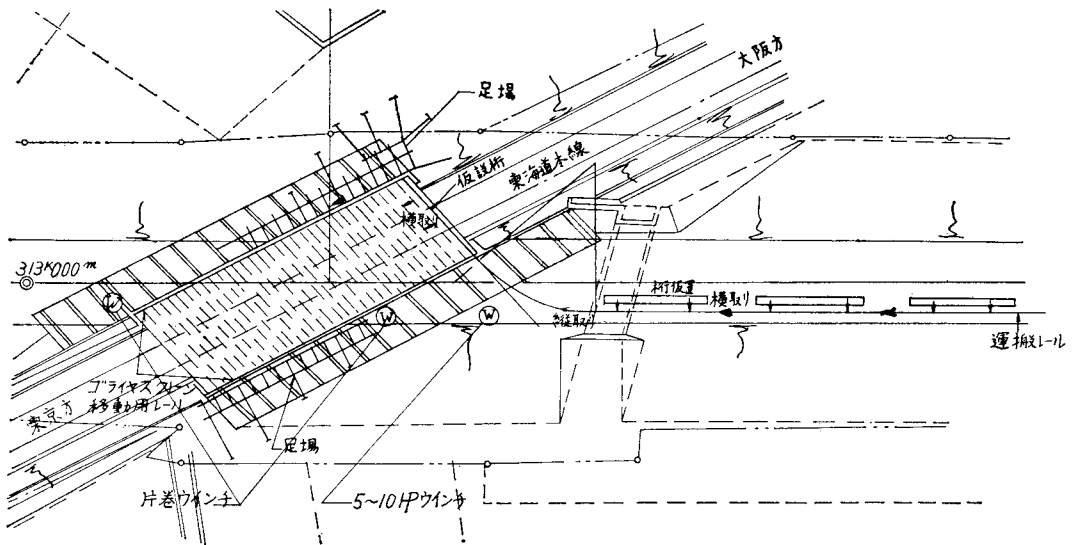


図-12 桁架設段取り図

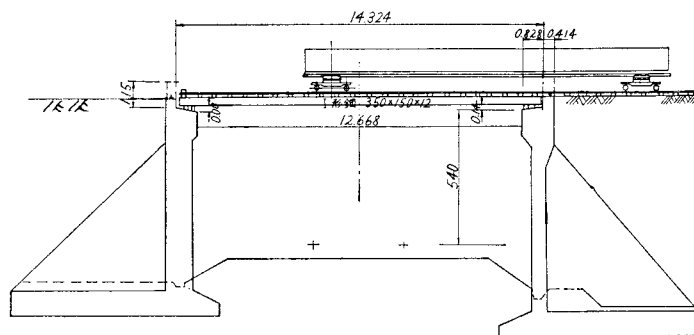


図-13 桁縦取り

りモルタルを詰めて中埋コンクリートのモルタルの漏れを防いでから中埋コンクリートを打設した。

合成スラブ橋の施工には、RCプレキャスト桁の製作（34連）に60日、桁の架設に30日、中埋コンクリートの打設に10日、その他付帯雑工に10日の計110日（3ヶ月20日間）を要しているが、このうち桁の製作をのぞいた現場作業に要した日数は50日である。

本橋梁の施工にあたり、特に気付いた点は

- 1) 東海道線を閉鎖して施工したのは仮設桁の架設時とゴライヤスクレーンの設置時であり、その後は当初の予想どおり東海道線の運行に支障を与えることなく工事を施工できた。
- 2) 桁の据付けはほぼ順調に行なわれたが、桁下面とゴム沓の密着の悪いところがあったので、鉄板を挿入して調整した。沓座モルタルは特に慎重に施工したが、プレキャスト桁とゴム沓の密着については特に注意を要することを感じた。
- 3) 設計時において中埋部内での鉄筋加工およびコンクリートの打ち込み作業が困難であると予想したので、中埋部の幅を60mmとし、ことをすべて中埋めする設計とした。しかし、施工時に中埋部内に人が入って作業することが比較的に容易であったので、この部分に型枠を入れて中空とすることも可能であると考えられる。