

太径HiAmケーブル定着構造に関する研究

A STUDY ON ANCHORAGE OF HiAm-CABLE WITH LARGE DIAMETER

牧野文雄* 小松定夫** 上田浩太*** 西村宜男****

By Fumio MAKINO, Sadao KOMATU, Kohta UEDA and Nobuo NISHIMURA

The HiAm-cable with large diameter has several merits from the aspects of fabrication and maintenance of bridge cables. HiAm 421 with 225 mm diameter which is the largest strand in the world will be used for the Yodogawa bridge in Osaka prefecture. A new type of anchorage structure for such large HiAm tendon has been developed. The anchorage has the large cable holes with 425mm diameter in its compression and tension flanges and the knee braces between the compression flange and the inner webs of main box girder. The structural characteristics concerning the local stress distribution and ultimate strength of the anchorage are studied theoretically and experimentally. The ultimate strength is over about 4 times design load. Nevertheless it is noteworthy to say that the comparatively large stress concentrations are observed near the cable holes of flanges and the main girder webs at the junction of anchor girder. From the test results, several structural improvements are suggested for the final design of structural detail.

1. まえがき

大阪府道八尾-茨木線の淀川横断部に建設される斜張橋(仮称、淀川橋梁)は図-1に示すように、一本の主塔からその両側にそれぞれ8段のケーブルを配し、非対称な3径間連続主桁を有している。本橋の構造上の特徴のひとつはHiAmケーブル(φ7素線のHiAm421と379)の採用で、ケーブルの直径はφ225mmと過去に例のない太径になっている。またケーブルの設計最大張力は962tで、これを1個の大きいソケット(長さ89cm)で受け、定着桁に伝達される。このような太径のHiAmケーブルを使用することにより、数本の細いストランドを束ねてケーブルを構成し定着部でスプレーする一般的な方法に比べて定着桁自体も単純な構造となるが、大きい集中力を支持するための特別な構造が必要となる。そこで各種の定着構造を表-1に示すような力学的特性、製作、架設および経済性の観点から比較検討した結果、太径HiAmケーブルの定着構造としては力の伝達機構が明確でコンパクトな断面で設計できる箱桁定着方式が選定され、この構造形式を対象とした研究を実施することになった。この定着構造は以下のような構造上の特徴を有している。

1) 主桁腹板高3mの制約のもとで、長いソケットの使用が可能となるように、定着桁の桁高は比較的強く抑えられ、従来類例のない箱桁形式が採用された。

2) 定着桁中央のフランジに大きなケーブル貫通孔φ425mmが設けられる。

* 大阪府道路公社前理事長 (〒540 大阪市東区谷町2-1)

** 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

*** 淀川橋梁JV代理人, 松尾橋梁(株) 設計部長 (〒551 大阪市大正区鶴町3-4-18)

**** 大阪大学講師 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

表-1 定着方式の比較

	箱形定着方式	定着ブロック方式	I 桁定着方式	縦桁定着方式 (1)	縦桁定着方式 (2)
定着桁モデル図					
	Section A-A	Section A-A	Section A-A	Section A-A	Section A-A
力学的特性	○	△	△	×	△
製作の難易度	○	○	△	△	△
架設施工性	○	○	○	○	○
経済性	○	×	○	○	△
備考	構造が単純で、桁高がある程度低くすることができ、ねじり抵抗が大きいので、太径ケーブルの定着に有利である。縦シャイブとは湾曲にて連結。	縦シャイブ間隔が狭くて、架設作業に支障がない場合に有利である。塔梁の定着部、補剛トラス内の定着に用いられる。	ケーブルをスプレーサドルで分散して桁に定着する場合に用いられる。太径ケーブルの定着桁としては桁高を大きくする必要があり、製作精度に多少疑問あり。	比較的ケーブル張力の大きいもの定着に用いられる。	ケーブル引込装置が大きいので受桁間隔を広くする必要がある。

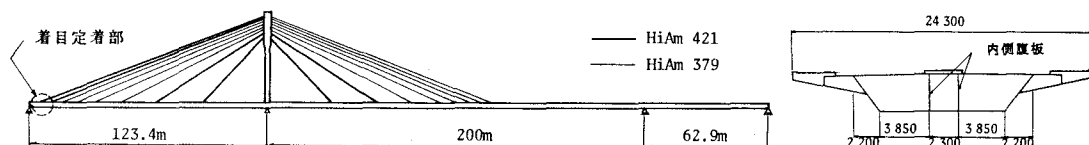


図-1 淀川橋梁一般図

3) 定着桁から主桁腹板へせん断応力を円滑に伝達し、且つ定着桁の強度を向上させるために、定着桁圧縮フランジと主桁腹板の間に図-2に示すハンチが設けられる。

本研究では、以上の特徴を有する定着構造の安全性を確認するために実施した模型実験結果を中心として今後、その経済性と施工性の合理性から使用頻度が増加すると考えられる太径HiAmケーブル定着構造の弾性挙動と極限強度特性を明らかにすることを目的とする。

なお、本橋の使用ケーブルと定着桁の特徴を示すために一面ケーブル斜張橋の定着構造諸元を調べた。¹⁾⁻¹²⁾ 図-3は1定着部当たりのケーブル張力最大値と1ストランド当たりの張力を表わしている。淀川橋梁では1個所の定着桁に作用するケーブル張力は小さいが、ストランドの張力は既存の橋梁で最も大きいKurt-Schmacher (PWS295)の1.5倍になっている。また、図-4は定着桁の支間と桁高比 b/h とフランジの最大垂直応力と腹板の最大せん断応力の比 σ/τ の関係を表わしている。 σ_u は圧縮フランジ、 σ_t は引張フランジの垂直応力を表わしている。形状比 b/h と応力比 σ/τ の間には強い相関性が認められるが、淀川橋梁は特異な値となっている。その理由はフランジのケーブル貫通孔周辺の応力集中に起因している。

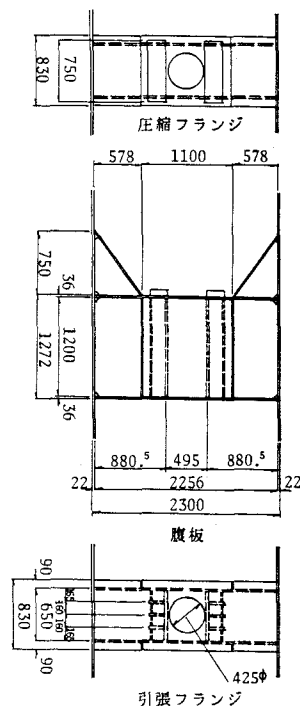


図-2 定着桁

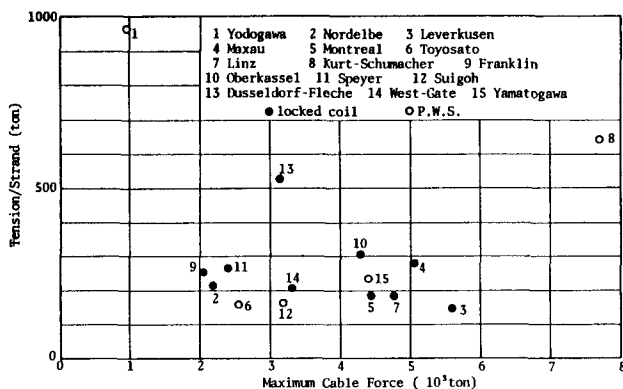


図-3 実橋のケーブル最大張力とストランド張力

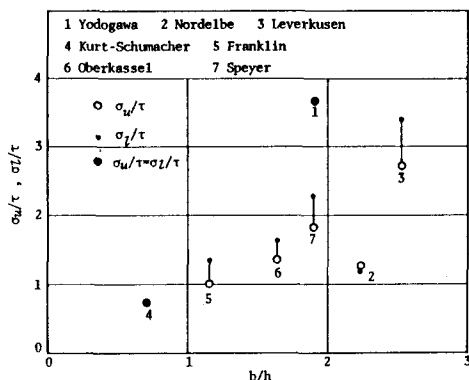


図-4 実橋定着桁の応力比 σ/τ

2. 実験概要

(1) 供試体

着目定着部はケーブル張力の大きい側径間側最上段ケーブルの定着部（図-1）とした。図-5に示すように、定着桁 A-1を含めてダイアフラム D-1～D-4の間のデッキプレート、ボトムプレートと内側腹板によって囲まれた1室箱断面を取出した。

供試体は橋軸を含む鉛直面内に約112度回転させ、ケーブルの引張力の代わりに、定着桁をジャッキにより背後から支圧する載荷方法を採用した。細部構造の忠実な再現を考慮して、供試体の縮尺率は実橋の1/2.5とした。実橋に用いられる鋼種は定着桁に対してSM50YおよびSM53、主桁に対してSM50Yとなっているが、供試体は載荷装置の容量を考慮して全てSS41を使用している。

(2) 載荷装置

図-6に供試体および支持装置の組み立て図を示す。供試体は支持台と支持トラスによって支えられる。これらの支持装置はPC鋼棒によってテストベッドに固定されている。載荷はフレームで支えられた2基の200t油圧ジャッキにより鉛直下向き荷重として与える。

(3) 実験項目

実験は以下の2項目に大別される。

- 1) ケーブル張力の定着桁、主桁腹板、デッキ・ボトムプレートへの分散と、定着桁フランジのケーブル貫

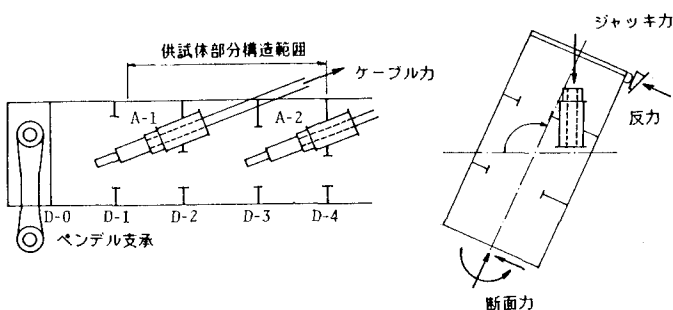


図-5 着目定着部と載荷方向

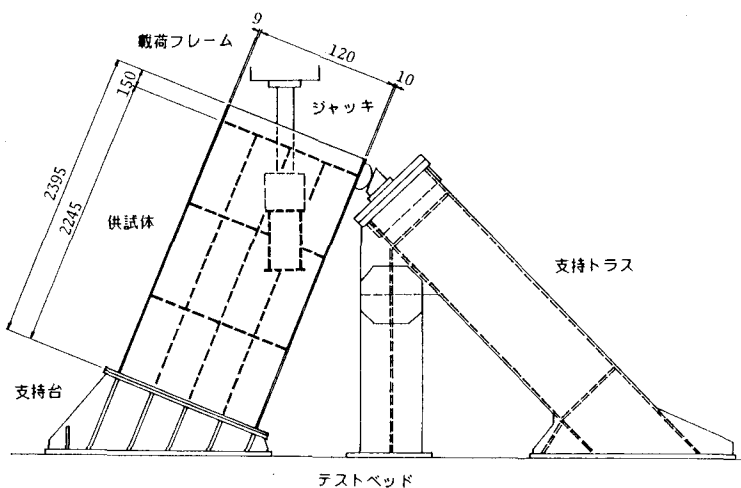


図-6 供試体と支持装置の配置

通孔周辺、定着桁と主桁腹板取付部における局部応力の把握—以下弾性実験と称する。

2) 定着部の極限強度および極限状態における挙動の把握—以下破壊実験と称する。

弾性実験ではケーブル設計張力962tに相当するジャッキ荷重150tを上限とし、荷重系列 0t-50t-100t-150t-0t を3サイクル繰り返し、各荷重レベルにおける供試体各部のひずみと弾性変形を計測する。

破壊実験においては以下の荷重系列により載荷し弾性実験において大きなひずみが観測された部分のひずみを重点的に計測する。

破壊実験荷重系列：0t - 50t - 100t - 150t - 170t - 190t - 330t の間10t ごと、335t 以上 5t ごと。

(4) 測定

ひずみ測定は定着桁42点（単軸34点、3軸18点）、主桁 230点（単軸 128点、3 軸 102点）を対象とした。測定位置およびゲージ番号は図-7および図-8に示す通りである。（-印は単軸ゲージ、○印は3軸ゲージを表わす。）計測は自動静ひずみ計とパーソナルコンピュータを組み合わせて自動化し、データは全てフロッピーディスクに記録した。

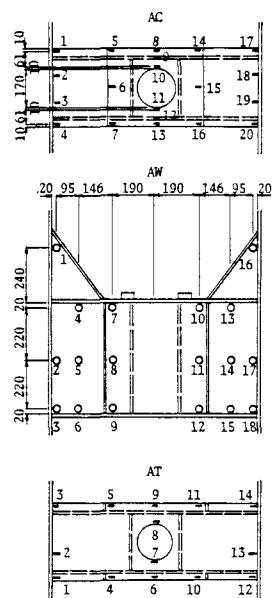


図-7 定着桁のひずみゲージ番号

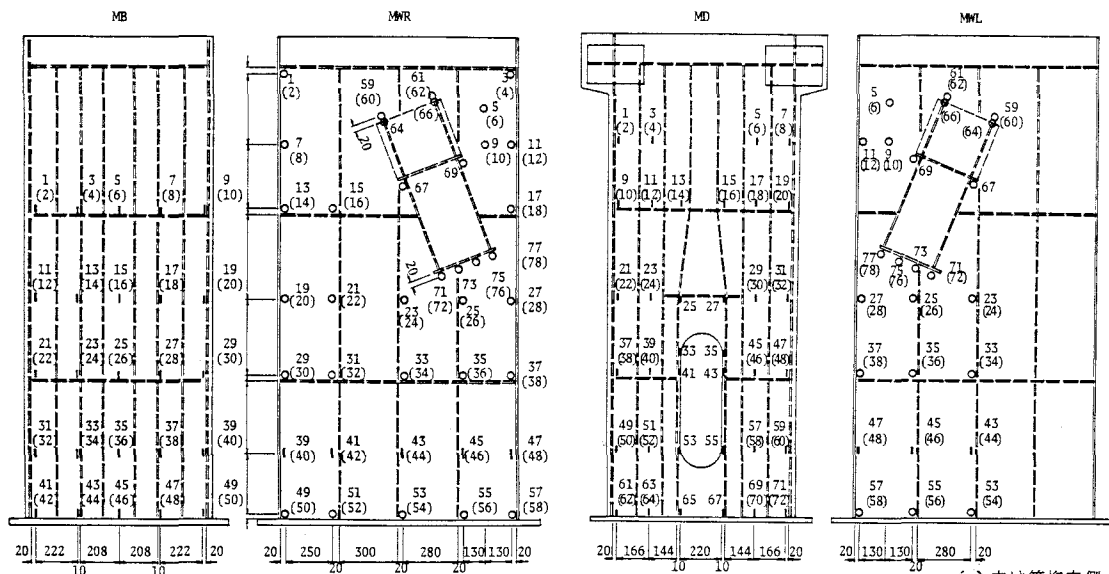


図-8 主桁のひずみゲージ番号

3. 弾性実験結果

本橋の定着部の特徴は前述の如く 1) 定着桁のフランジに大きなケーブル貫通孔（フランジ幅の51%の直径）が設けられていること、 2) 定着桁圧縮フランジと主桁腹板の間に三角形のハンチが設けられていることである。弾性実験では定着桁内および定着桁取り付け部主桁腹板の応力分布を丹念に調べた。また、板曲げを含む有限要素プログラム（NASTRAN）による供試体の弾性解析結果と実験値との比較を行なう。構造の対称性よりモデルの半分を取り出した定着構造モデルの有限要素分割を図-9に示す。定着桁フランジおよび主桁腹板は板曲げを考慮した三角形ないし四角形要素を、その他は平面要素を用いた。要素分割には

局部応力を適切に評価できるよう細心の注意を払った。

(1) 定着桁フランジの応力

図-10 は定着桁中央断面のフランジ垂直応力分布を表わしている。荷重はケーブル設計張力にほぼ対応する150tである。ケーブル貫通孔の近傍における応力集中現象が明確に現われている。実

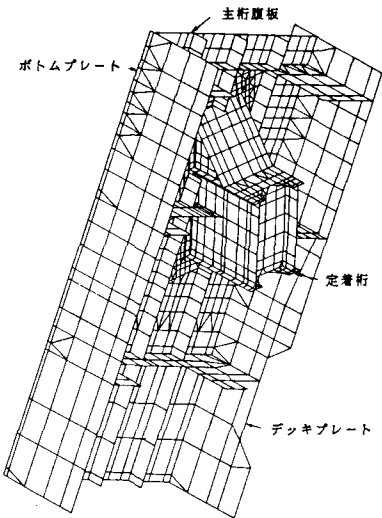


図-9 定着構造モデルの有限要素分割

験値と有限要素解とは引張フランジに関してほとんど一致しているが、圧縮側フランジに関しては実験値はやや低く有限要素解の80%程度になっている。

また、定着桁を両側単純支持とし、且つケーブル貫通孔を控除したフランジ断面に曲げ応力が均等分布すると仮定して、初等理論によって求めたフランジ応力を基準としてケーブル貫通孔近傍の応力集中係数を評価すると、

圧縮フランジ $2454/1200=2.05$
 引張フランジ $2423/1200=2.02$

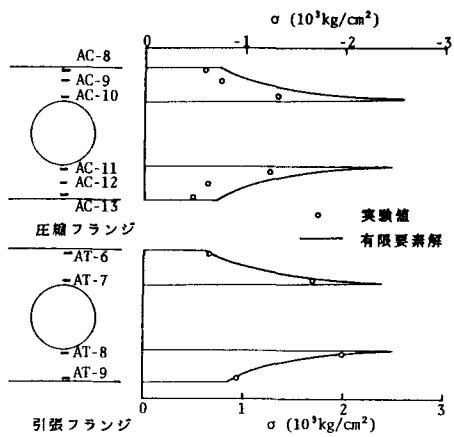


図-10 定着桁フランジの応力分布

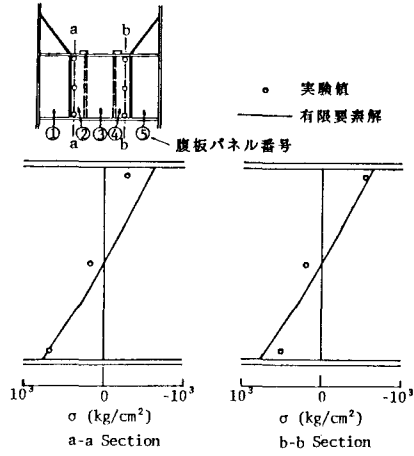


図-11 定着桁腹板の垂直応力分布

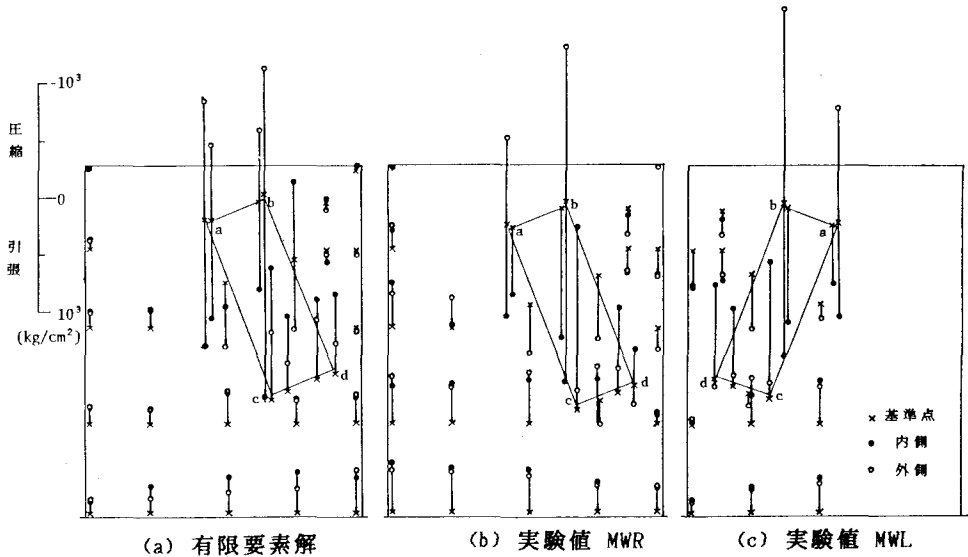


図-12 定着桁取付部周辺の主桁腹板表面の応力分布

となり、ほぼ弾性理論による円孔を有する有限幅の板の応力集中係数と等しい値となっている。¹³⁾

(2) 定着桁腹板の応力

定着桁腹板の応力は、載荷点（荷重受け梁）とハンチ取り付け点の間の腹板パネルNo. 2およびNo. 4について考察する。このパネルには曲げによる垂直応力分布のほかに大きなせん断応力が作用しており、更にハンチの効果によって複雑な応力状態となっている。図-11はこれらの腹板パネルの断面 a-a および b-b に沿った垂直応力の分布を表わしているが、実験値と有限要素解とはほぼ一致している。

(3) 定着桁取り付け部主桁腹板の局部応力

ケーブル力を受けると定着桁の端断面では圧縮フランジは主桁箱断面の内側に、引張フランジは外側に向かって変形する。このような定着桁の弾性変形は取付部近傍の主桁腹板の曲げ変形を引き起こす。図-12は定着桁取付部周辺の主桁腹板表面の主桁軸方向垂直応力の分布を表わしている。実験値は両側の腹板について個々に示したが、有限要素解は対称性の仮定より片側の腹板についてのみ示している。腹板内の応力の分布特性について、実験値と有限要素解とは全般に対応している。定着桁取付部の近傍に於いて大きな板曲げ応力が生じていることが特徴的である。（図中の a, b, c, d）特に点 a および点 b では腹板の内側に大きな引張応力が作用している。この応力は母材 SM 50Y の許容応力度以内ではあるが、腹板と定着桁ハンチのカバープレートが約40度の角度で交わり、溶接施工上片側からのグループ溶接が予定されている。疲労設計の観点からの強度の調査と施工法の検討が重要である。

表-2 破壊実験における挙動の総括

荷重(t)	無次元荷重	主な現象	参照
190	1.242	定着桁腹板パネルNo. 2の降伏と座屈	図-15
200	1.307	定着桁取付部主桁腹板の降伏	MWR60 図-18
210	1.373	定着桁引張フランジの降伏	AT-7 図-14
290	1.865	定着桁圧縮フランジの降伏	AC-10 図-14
350	2.288	定着桁腹板パネルNo. 1座屈	図-15
370	2.418	定着桁引張フランジ全面降伏	図-14
395	2.582	定着桁腹板パネルNo. 4座屈	図-15
415	2.712	最高荷重	

腹板パネル番号は図-11 参照

4. 破壊実験結果

(1) 実験経過の概要

弾性実験においては供試体のどの部分も降伏に達するこ

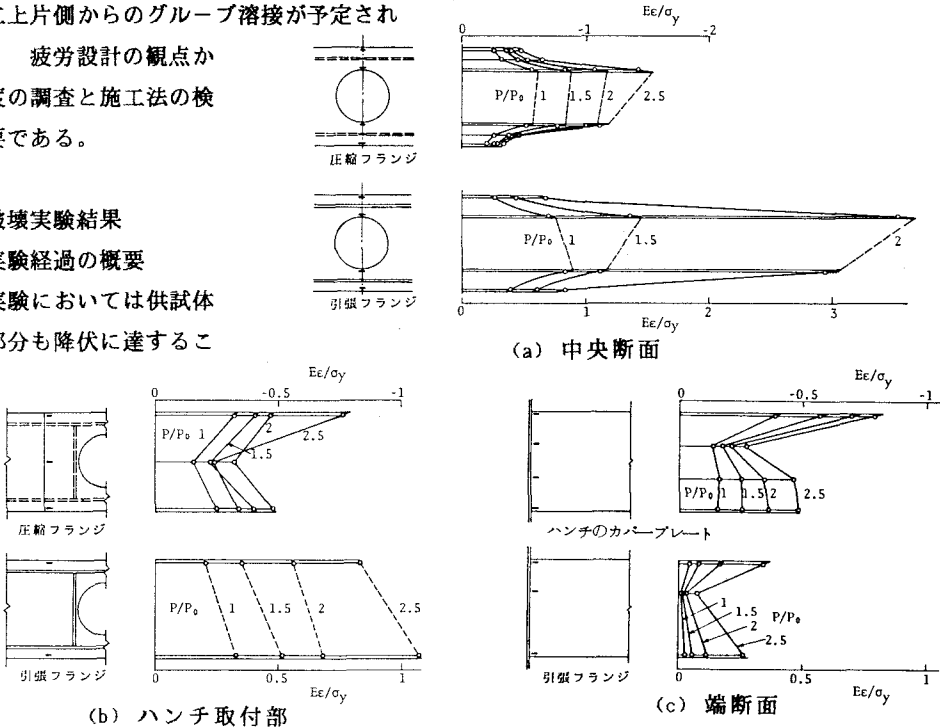


図-13 定着桁フランジの垂直ひずみ分布

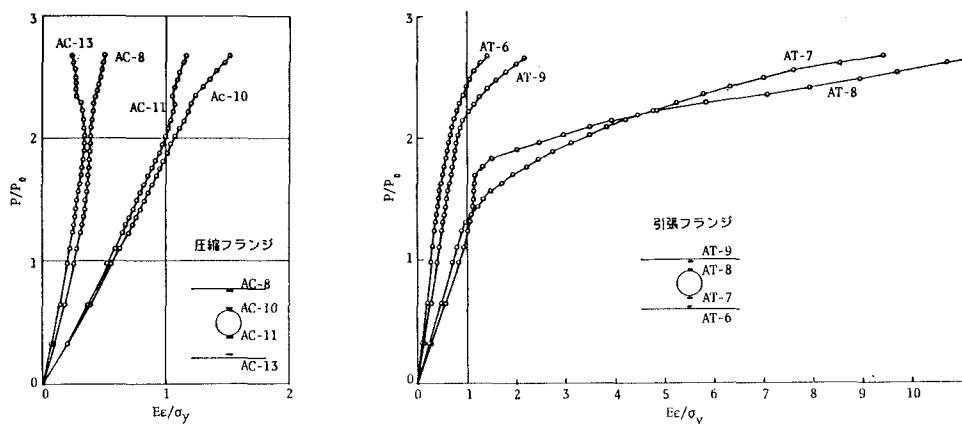


図-14 荷重と定着桁フランジ垂直ひずみの関係

とはなかったが設計荷重を越えて荷重を増加すると前述の応力集中部から塑性化が始まり定着桁内部および定着桁取付部近傍の主桁腹板に逐次塑性域が拡大した。板要素の座屈現象は定着桁の腹板に生じたが、腹板の補剛材・ダイヤフラムの拘束効果のために腹板の変形の増大は抑制され、定着部の強度を減少させることはなかった。供試体の最大荷重415tのレベルでは定着桁のフランジおよび腹板に広範に塑性域が広がり定着桁の変位が増大した。表-2に破壊実験において生じた主な現象とそれらの発生した荷重を総括して掲げた。なお、以下に示すデータについて荷重は設計荷重に相当する $P_0=962/2.5 \approx 153\text{t}$ で除し、またひずみは弾性定数 $E=2.1 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2 (2.06 \times 10^4 \text{ N/cm}^2)$ 、公称降伏応力度 $\sigma_y=2400 \text{ kg/cm}^2 (2.35 \times 10^4 \text{ N/cm}^2)$ を用いて $E\varepsilon/\sigma_y$ と無次元表示する。

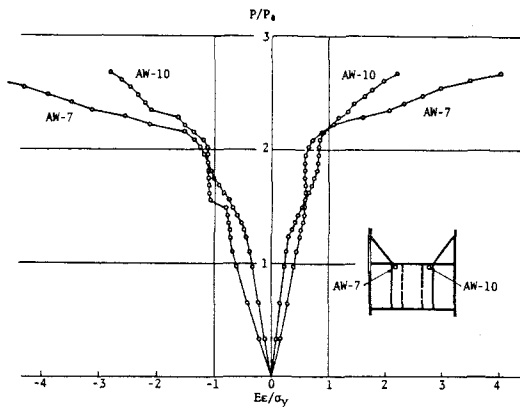
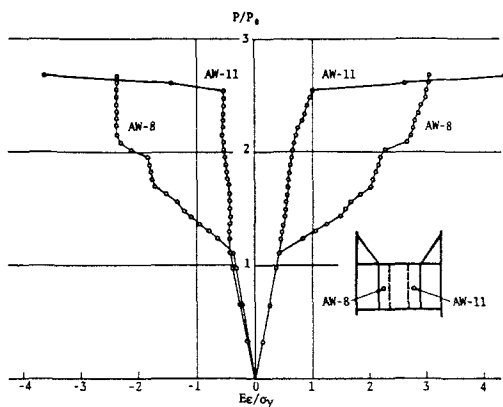
(2) 定着桁フランジのひずみ

図-13 に定着桁フランジおよびハンチカバープレートの垂直ひずみ分布をしめす。また、図-14 には定着桁中央断面におけるフランジ垂直ひずみと荷重の関係をしめす。引張フランジ中央のケーブル貫通孔の周辺応力 (AT-7, 8) は設計荷重の 1.373 倍の荷重レベルで降伏応力を越え、以後、荷重の増加につれ、これらの点のひずみは急増する。同じく中央断面の外側 (AT-6, 9) の垂直応力は設計荷重の 2.418 倍の荷重レベルで降伏応力に達し、中央断面の引張フランジは全面降伏する。一方、圧縮フランジにおいてはケーブル貫通孔周辺において、設計荷重の 1.895 倍の荷重レベルで降伏に達する。これらの点のひずみは降伏後も急増することはない。また断面の外側の点 (AC-8, 13) では最終荷重段階まで降伏に達することなく、荷重の増分に対しひずみ増分が逆転する傾向も現われている。

(3) 定着桁腹板のひずみと変形

定着桁の腹板パネル No. 2 および No. 4 は直接荷重を受ける荷重受け梁 (定着桁内のダイヤフラム) の外側に位置し大きなせん断応力を受ける。図-15 にこれらの腹板パネル内の圧縮側および中央点における主ひずみと荷重の関係を表わしている。腹板パネル No. 2 の中央点 (AW-8) の主ひずみは設計荷重の 1.242 倍の荷重レベルで急増している。AW-8 と対称な位置の腹板パネル No. 4 の中央点 (AW-11) の主ひずみは、弾性域内では AW-8 とほとんど同じ値となっているが、設計荷重の 2.5 倍近くまでは直線的に斬増し、腹板内に塑性域が拡大した後、急激に増加した。これらの腹板パネルの圧縮側の点 AW-7, AW-10 の主ひずみは設計荷重の 2 倍の荷重のレベルから急激に増加している。

図-16 は定着桁腹板内の塑性域の拡がりを代表的荷重レベルについて示している。塑性域は腹板パネル No. 2 および No. 4 から始まり、腹板全域に拡大してゆく様子が分かる。また図-17 は最高荷重を越えて除荷し



た後における定着桁腹板パネルの残留たわみを表わしている。 腹板パネルNo. 2およびNo. 4ではせん断力の影響により生じた定着桁の箱断面の内部への残留たわみが現われているが、中央の腹板パネルNo. 3には有意な残留たわみは生じていない。

4) 定着桁取付部主桁腹板のひずみ

図-18 に定着桁ハンチ上端の主桁腹板の主ひずみと荷重の関係を示す。 弾性実験結果でも示したようにこれらの点のひずみは局所的な板曲げによるもので設計荷重の 1.3 倍程度の荷重レベルから塑性化が始まり荷重の増加につれてハンチのカバープレート上端および定着桁引張フランジとの

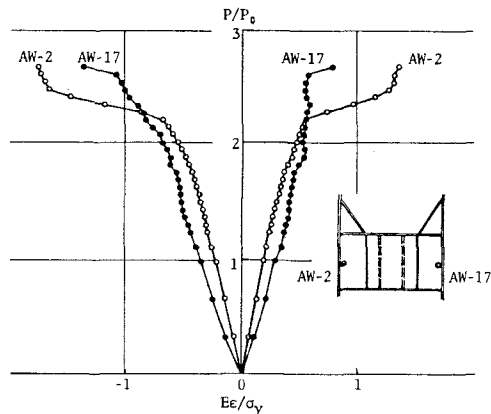


図-15 荷重・定着桁腹板の主ひずみ関係

接合部に沿った主桁腹板に塑性域が広がってゆく。 しかし主桁腹板内の塑性域は定着桁の取付部の極く近傍に限定されており、腹板の全域に拡大することはない。(図-19)

5. 実施詳細設計への提言

現在、淀川橋梁は詳細設計中であり、上述の研究成果に基づいて、実施詳細設計に対して、以下のような提言を行なう。

1) 定着桁ケーブル貫

通孔周辺の応力集中は、定着桁の終局強度を低下させていないが、斜張橋の重要部分であることを考えて、応力集中による局部応力が許容応力度以下となるまでフランジを増厚するのがよい。2) 主桁腹板は定着桁ハンチ先端と取付部において面外曲

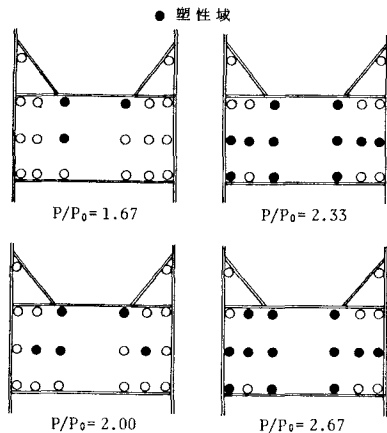


図-16 定着桁腹板塑性域の拡がり

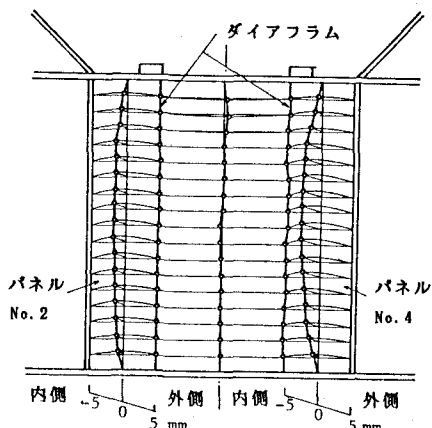


図-17 定着桁腹板パネルの残留変形

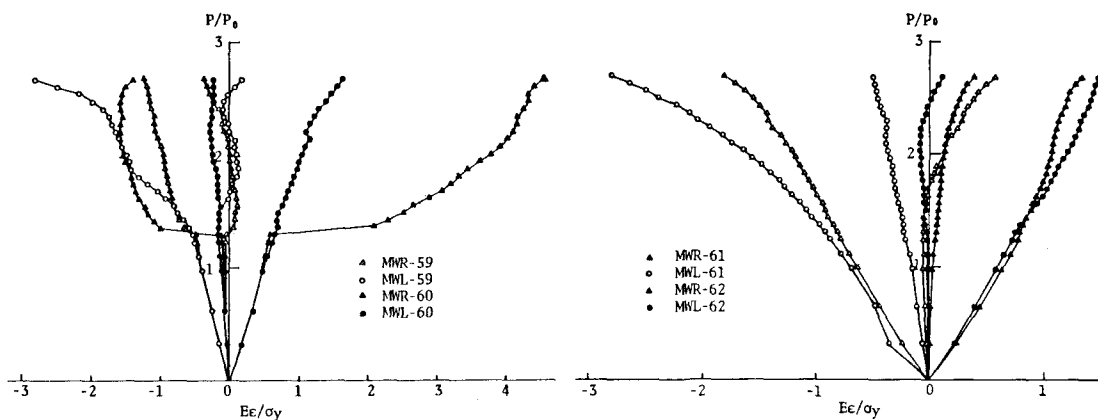


図-18 荷重・主桁腹板の主ひずみ関係（定着桁取付部）

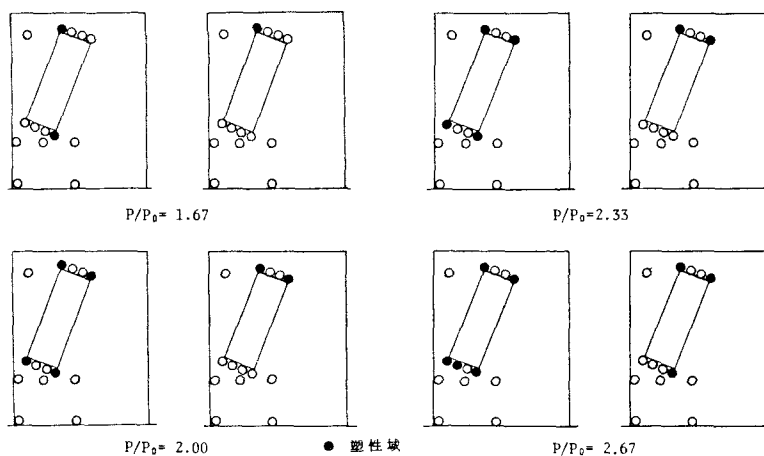


図-19 主桁腹板内の塑性領域の拡がり

げを受け、内面に大きな引張応力が発生することが判明した。これは疲労に対して好ましくない影響を与えると予測できるので疲労設計の観点から十分な検討を追加する。対策としては面外曲げを防止するように主桁腹板の補剛材の配置を適性にする、ハンチの無い構造形式の採用の可否について種々の視点から調査することなどが考えられる。3) 主桁腹板は定着桁フランジ取付部においても面外曲げにより内面に大きな圧縮応力が発生することが判明した。これについては局部応力を低下させるための部分的な補強または補剛を考慮するとよい。これらの提言の主旨に沿って実施設計の定着構造の改善が進められている。

6. 結論

以上、模型実験結果を中心として、太径HiAmケーブル用に新しく開発された定着構造の安全性について考察した。本研究によって得られた結論を要約すると、以下のとおりである。

1) 定着構造の最大荷重は設計荷重の 2.7 倍に達した。供試体の鋼種はSS41であるが、実橋では SM50YおよびSM53であること、構成板要素の座屈現象ではなく断面の塑性化の進行が供試体の極限状態を決定したこ

とから、定着構造の安全率は、さらに実橋と供試体鋼材の降伏応力比だけ向上し、4.0 に達する。本橋のケーブル安全率として 2.5 が採用されているが、定着構造はケーブルの破断まで静的強度発揮できるものと考えられる。

2) 今回の破壊実験で得られた定着構造の大きい静的強度は、定着桁圧縮フランジと主桁腹板の間に設けたハンチの拘束効果によるものと考えられる。

3) 定着桁取付部、とくにハンチ先端部において主桁腹板に大きな局部曲げ応力が発生した。実橋の製作に際してはこの局部応力による疲労クラックが発生しないような疲労設計ならびに溶接施工法の検討が必要となる。

今後、太径HiAmケーブルの使用頻度が増すと考えられるが、その設計に際して本研究の定着構造の力学特性に関する成果が参考となれば幸甚である。なお、この定着構造を対象として局部応力に対する疲労強度を明らかにするための実験が進行中である。その結果については稿を改めて報告したい。

謝辞。本研究を遂行するに際し、便宜を賜った大阪府道路公社、淀川橋梁共同企業体（松尾、三井、横河）の関係各位、並びに実験の実施とデータ整理に協力いただいた大阪大学土木構造研究室の諸君に深甚なる謝辞を表わす。

参考文献

- 1) Heins, C. P., Kano, K.: Anchorage plates for cable-stayed bridges, Computers & Structures Vol. 18, No. 1, 1984.
- 2) Aschenberg, H., Frendenberg, G.: Die brücke über die Norderelbe im Zuge der Bundesautobahn Südliche Umgehung Hamburg, Stahlbau, 32, H8, 1963.
- 3) Daniel, L. L. H., Godesberg, B. und Schumann, H.: Die Bundesautobahnbrücke über den Rhein bei Leverkusen, Stahlbau, 36, H8, 1967.
- 4) 近藤、小松、小林、井上、松川：豊里大橋（斜張橋）のケーブル定着点の設計について、土木学会論文報告集、No. 192, 1971.
- 5) Burgholzer, L., Gara, E. und Schimetta, O.: Die 2. Donaubrücke Linz, Stahlbau, 42, H. 11, 1973.
- 6) Volke, E.: Die Strombrücke im Zuge der Nordbrücke Mannheim-Ludwigshafen (Kurt-Schumacher Brücke), Stahlbau, 42, H4, 1973.
- 7) Beyer, E. und Ramberger, G.: Die Franklinbrücke in Dusseldorf, Stahlbau, 45, H5, 1975.
- 8) Beyer, E., Volke, E., Gottstein, F. und Ramberger, G.: Neubau und Querverschub der Rheinbrücke Dusseldorf-Oberkassel, Stahlbau, 46, H3, 1977.
- 9) Epple, R. B. G., Rossing, E., Schaber, E. und Wintergerst, L.: Die neue Rheinbrücke für die Bundesautobahn bei Speyer, Stahlbau, 46, H. 10, 1977.
- 10) 清水、太田、小山：水郷大橋上部工の設計と施工（上）、橋梁と基礎、12-3, 1978.
- 11) Kahmann, R. und Koger, E.: Die neue Rheinbrücke Dusseldorf-Fleche/Neuss-Uedesheim, Bauingenieur, 54, 1979.
- 12) Roik, K. und Haensel, J.: Die Entwurfsüberarbeitung der West Gate Brücke in Melbourne, Stahlbau, 47, H7, 1979.
- 13) 小松定夫：構造解析学 I，丸善，1982.