I-179　斜張橋のケーブル定着部近傍の応力分布と疲労特性

首都高速道路公団　正員　○山崎 和夫
同　上　正員　安藤 憲一
新構造技術（株）　上阪 康雄
（株）宮地鉄工所　正員　能登 宥愿

1.まえがき

我国では実施例はまだ少いが、今後斜張橋が長大化していくときに、ケーブルの張り方としてマルチ形式の採用が増加するものと考えられる。本報告ではマルチ・ファン形式で中央一面の場合の定着部近傍の応力分布と、マルチ形式であるためにコンパクトな溶接構造とした定着部の疲労特性について考察するものである。

定着部構造は２形式についてＦＥＭ立体解析を行い、１形式を選定する。選定された１形式について静的載荷実験を行い、定着部近傍の応力状況を調べＦＥＭ解析と比較検証する。その検証結果よりＦＥＭ解析，実験結果の妥当性を相互に確認する。疲労試験は試験片ではなく、寸法効果，溶接条件，拘束度等を考慮して実大の構造物模型で定着桁および取付部の細部構造を２種類作り、各１体づつ行った。

2.構造形式の比較選定

定着構造２形式について、慣用設計法で決めた寸法諸元を縮尺1/3に相似させ、ＦＥＭ立体解析を行った。

縦桁形式：　定着桁を連続した縦桁で支持する構造

縦シャイベ形式：　定着桁を縦シャイベで支持し、それを上下フランジで支持する構造

図-1　縦桁形式

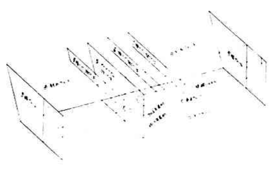
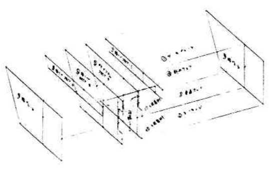


図-2　縦シャイベ形式



1)　解析モデル

構造形は静的実験と対比させるため模型体とし，境界条件は斜引張力の水平分力を中側ウェブで支持し、鉛直分力を定着桁位置のダイヤフラムで支持し、鉛直分力による曲げの影響を除去した。構造は三次元の連続体，要素は三角形，四角形のシェル要素とし、縦リブ等は軸力部材に置換した。外力や境界条件等は全て節点において表示し、荷重は実橋の設計荷重の1/9，85 tonの斜引張力とした。

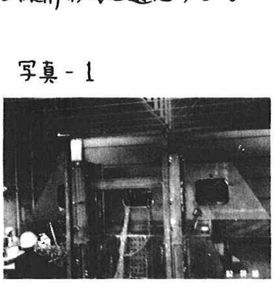
2)　解析結果の比較

縦シャイベ形式の応力は表－1に示すように、デッキプレート，縦シャイベ（縦桁），定着桁とも縦桁形式と比べて、差の大きい位置で２倍位の値となっている。これは、縦シャイベが不連続になっていることに起因していると思われる。また、上下の定着桁の応力分担が縦桁形式でほぼ等しい。以上から縦桁形式を選定する。

表－1

		デッキプレート			縦桁又は縦シャイベ				定着桁	
		孔周辺部	ダイヤフラム近傍		定着桁近傍	デッキプレート近傍			載荷部	リブ
縦桁形式	σx	－496	－145	σx	－621	－325	上定着桁	σx	－947	－1263
	σy	－36	142	σy	－126	－610		σy	－973	－25
	σ1	－24	325	σ1	121	－67	下定着桁	σx	－950	－1287
	σ2	－507	－328	σ2	－868	－868		σy	－1013	－19
縦シャイベ形式	σx	－843	－623	σx	－680	－897	上定着桁	σx	－934	－2203
	σy	－8	152	σy	－316	－569		σy	－948	－240
	σ1	－8	353	σ1	－291	－471	下定着桁	σx	－928	－1213
	σ2	－844	－825	σ2	－705	－994		σy	－887	142

写真－1



3.　静的実験方法

試験体の支持，載荷方法は写真－１に示す。歪ゲージの貼付は模型体を構成する板が薄いこと、溶接量が多いことから、面外変形を考慮して原則として板の裏表とした。

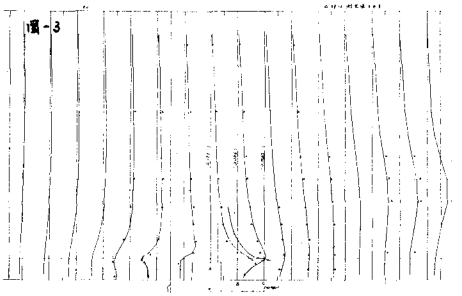
4.　静的実験結果と計算値との比較

実験結果の荷重と応力の関係はほぼ線形となり、荷重の増減による履歴曲線はほぼ重複している。最初にデッキプレートの応力について実験値と計算値を比較し、応力分布，有効幅の考察を行う。橋軸方向直応力（σ_x）の分布は図－3に示すように、縦桁線上付近を変曲点とした分布となっており，実験値とも良く一致している。この分布性状を有効幅によって示す。 有効幅： $B_e=\int \sigma dA/(\sigma_{st}\cdot t)$ 　σ_{st}：縦桁位置のデッキプレート応力

$B_{eA}=0.451$, $B_{eB}=0.764$, $B_{eC}=1.075^m$ 　このせん断遅れ現象は縦シャイベ形式が集中荷重点の性状を示し、縦桁形式より顕著になっている。

表－2.

	縦桁 Pt.307			上定着桁 Pt.30		
	FEM	実験値	実/FEM	FEM	実験値	実/FEM
σ_x	-641	-635	0.99	-314	-314	1.00
σ_y	- 2	92		67	22	
τ_{xy}	-168	-137	0.82	-888	-881	0.99
σ_1	39	117		785	752	0.96
σ_2	-682	-660	0.97	-1032	-1043	1.01
τ_{max}	361	388	1.07	908	897	0.99


図－3

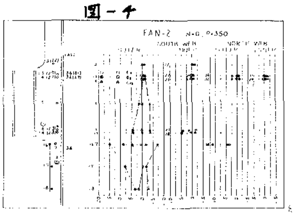
縦桁，定着桁の応力は表－2に示すように実験値と良く一致している。以上より、FEM解析の妥当性が、実験結果の信頼性と相まって確認された。

5. 疲労実験方法

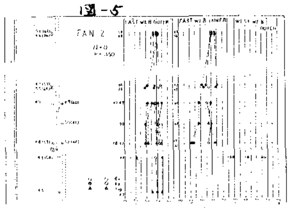
ケーブル定着部は剛度が大きく、拘束により大きな残留応力を生じ、又剛度の急変により強制変位をうけて、或いは鋭い切欠部や溶接欠陥部に応力集中を生ずる等、これらが複合し疲労亀裂が発生することがある。

試験体の形状寸法は2種類各1体である。その特徴及び相違点は、定着桁のウェブとリブが分離（FAN-1）か一体（FAN-2）かにある。定着桁，リブの縦桁への取付部の溶接継手（K形開先）は完全溶込みである。疲労試験の荷重振幅はケーブル設計張力 $T_{max}=715$, $T_{min}=460$, $\Delta T=255^{ton}$ が広い載荷範囲及びその変動で生ずるので、$\Delta T/2$ が供用期間中に繰返回数200万回生ずるとする（安全率は1.2とする)。 $\Delta P=(255/2)\times1.2\fallingdotseq160\,ton$ 　上限荷重は残留応力が大きい場合、平均応力の影響が少いことより、試験機の能力で 350^{ton} とした。載荷は亀裂の発生寿命，亀裂進展速度を明らかにするため、ビーチマーク操作を行った。

図－4



図－5



6. 疲労実験結果と考察

FAN-2の疲労着目部の応力は図－4，図－5に示す通りである。疲労亀裂調査のため外観検査を行った。目視では亀裂は発見されなかったが、磁粉探傷検査で6箇所確認できた。即ち下側リブの底部桁側のまわし溶接部でFAN-1に2箇所FAN-2に3箇所ビードトウ部で発見された。これはまわし溶接部から底部桁まで数cmなので、ビード形状が充分でなかったこと、底部桁フランジに変形を拘束されたことによると思われる（実橋に底部桁はない）。又FAN-1の定着桁下フランジと連結材のまわし溶接部で、2辺を拘束したために疲労亀裂が生じている。これはFAN-2のようにウェブのみに溶接することによって避けられると思われる。ウェブ，リブ，フランジが交差する位置のスカーラップ（R=40）はビード表面を仕上げたこともあって、表面的には疲労亀裂がみられなかったが、最も疲労しやすい箇所である。

写真－2.

7. まとめ

1）FEM解析のモデル化、境界条件が妥当であることが実験から判り、実験結果も信頼できることが判った。
2）デッキプレートの有効幅の性状および孔との関係が把握できた。
3）縦桁形式が縦シャイベ形式より優れていると思われる。
4）供用期間中の交通荷重の繰返載荷に対しては、データは少いが疲労の安全は確認されたといえる。
5）疲労試験体では、スカーラップが少く、リブ断面が滑かに変化しているFAN-2が多少優れている。
6）定着桁の剛性が大きいので実橋製作時、近傍の溶接に疲労上悪い影響を与えないようにする必要がある。