

# 人道橋の振動抑制方法の検討 —利用者の感覚を考慮したドルフィン間人道橋の振動抑制対策工—

山岸 健一\*

## 要 旨

ドルフィン (7,000DWT級 L=143.60 m) 移設において、接岸ドルフィンと綱取ドルフィンとの間にスパン長 26.00 m の人道橋を設けたところ、歩行に伴い不快な揺れを感じる事が判った。その後の調査等により、この揺れは本橋の固有振動数が人の歩調 (2Hz) とほぼ一致していたため、橋と歩行との共振による事が判った。現地実験・ユーザーの方々の感想・計算等を基に、本橋の必要固有振動数を設定し、対策方法の検討を行った。検討の結果、手すりの代わりに鋼管 (φ 114.3mm) を用いたポニートラスとし、本橋の剛性を高めることにより振動を抑制した。本報告は、この振動抑制対策工について説明したものである。

### 1. まえがき

ドルフィンとは、杭、ケーソンなどを基礎とし、バース施設を機能的に集約して分離配置する港湾構造物であり、荷役、接岸、係留施設およびこれらの施設間を結ぶ連絡橋で構成されている。連絡橋の規模、構造については、ドルフィン全体の規模、各施設の配置、連絡橋の目的 (パイプライン、歩車道)、重要度により決定される。

当該ドルフィンは、対象船舶 7,000DWT級、総延長 L=143.60m で、両端に係留のための綱取りドルフィンを設置し、その間に接岸のためのドルフィンを 3 基、内 1 基にセメント圧送のための荷役施設を設け、これら施設を結ぶために、7 本の渡橋および 2 基の渡橋基礎を設けた。渡橋は全て、H 形鋼 2 本を主桁とする単純梁とし、主桁断面は、部材の応力度、および活荷重 (群集荷重および配管荷重) に対するたわみの検討により決定した。問題となった東端の渡橋は、圧送管が無い場合、群集荷重に対するたわみから断面を決定した。架設後、本渡橋において、歩行に伴い不快な揺れが生じることが判明し、振動に対する調査、検討を行った。

歩行者の歩調は、老若男女を問わず、ほぼ 2Hz であり、その偏差はきわめて小さい。このため歩行者が橋に与える力も 2Hz の周期力とみなしてほぼ差支えない。したがって、渡橋の主桁のたわみ振動の固有振動数が 2Hz に近い場合には、たわみ振動の振幅が大きくなり、歩行者に対する不快感を増し、構造物に対しても好ましくない影響を及ぼすことになる。不快感は、人の感覚であり個人差がある。対策検討の段階で、定量的な目標が必要となった。本施設においては、渡橋 7 本中、他の 6 本

は揺れを感じないというユーザーの方々の感覚を取り入れ、目標 (渡橋の必要固有振動数) をこれらの橋より設定した。構造の決定においては、美観も考慮し、経済的かつ供用に支障をきたさない方法を採用した。

### 2. 現状の確認

対策工の検討に当たり、計算および現地試験により現状の確認を行った。

#### 2. 1 計算による確認

渡橋の固有振動数を以下により求めた。検討ケースおよび算定結果を図-1 および表-1 に示す。

$$f = \frac{1}{2\pi} \times \left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 \times \sqrt{\frac{EIg}{W}} \quad (1)$$

f : 渡橋の固有振動数 (Hz)

L : 支間長 (m)

n : 振動モードの次数 (n=1)

EI : 桁の剛度 (tfm<sup>2</sup> = 980Nm<sup>2</sup>)

g : 重力加速度 (9.8m/s<sup>2</sup>)

W : けたの単位長さあたりの重量 (tf=980N)

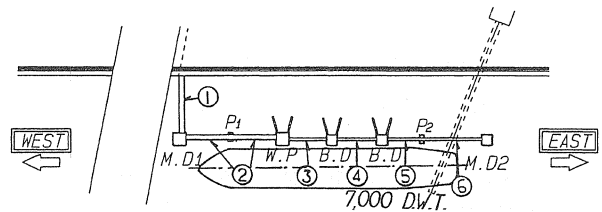


図-1 検討ケース

\*大阪支店

表-1 渡橋の固有振動数 算定結果

L	①	②	③	④	⑤	⑥
L	25.70	19.70	17.35	17.85	14.90	26.40
E	2.1×10 <sup>7</sup>					
I×10 <sup>-5</sup>	201.0	92.8	66.6	66.6	66.6	66.6
W	0.256	0.302	0.206	0.206	0.206	0.206
f	3.02	3.22	4.25	4.02	5.77	1.84

最東端部の渡橋⑥は、固有振動数が1.84Hzと人の歩調(2Hz)に近い値であり、このことが不快な揺れの原因であると考えられた。他の渡橋①～⑤は、いづれも固有振動数が3Hz以上であり、図-2に示す例と比較しても歩行時に揺れないことと一致した。

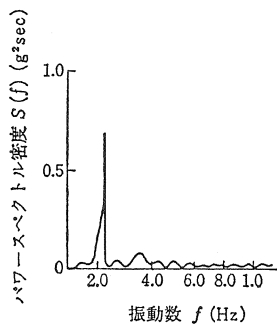


図-2 歩行者のパワースペクトル密度の例

2.2 現地試験による確認

計算値の適合性と対策工への課題を抽出するため、現地で試験を行った。試験内容を以下に示す。

- (1) 渡橋の固有振動数の測定
- (2) 歩行感覚の調査
- (3) 小走り状態での振動数の測定

(1) 渡橋の固有振動数の測定は、対象となる⑥橋が揺れやすいことを利用し、スパン中央に立ち、歩行等により強制振動を与え、一定時間内に本橋の揺れる回数を測定することにより求めた。また、計算の過程において、手すりを連結し、この手すりを含めた渡橋の剛性を求めると、揺れを感じなくなる程度まで固有振動数が高くなることが得られていたため、鋼管パイプにて手すりを連結し、その効果の確認も行った。参考として水準測量により振幅も測定した。

(2) 歩行感覚の調査は、揺れが感覚的なものであることから、実際に使用するユーザーの方々に、本施設を歩行して頂き、その感想をヒヤリングした。

(3) 小走り状態での振動数の測定は、本施設を利用する(離接岸時に綱取り作業を行うために渡る)上で、歩行のみではないとの判断から、小走り状態での人の振動数を求めた。

試験結果を以下に示す。

(1) 渡橋の固有振動数の測定

測定結果を表-2に示す。渡橋の固有振動数は、手すりを結合することによってもあまり変わらずf=1.9Hz程度であった。これは、先の計算結果(f=1.84Hz)とほぼ一致した。

表-2 測定結果

		ケース1	ケース2	ケース3
振 幅 mm	歩行(1人)	20	18	24
	歩行(2人)	12	32	32
	走行(1人)	10	12	14
	強制(1人)	44	50	90
	強制(2人)	164	150	130
固有振動(Hz)		1.89	1.89	1.93

- ケース1：現状(手すり連結なし)
- ケース2：スパン中央部のみ手すりを連結
- ケース3：端部を除いて、全ての手すりを連結

(2) 歩行感覚の調査

- ・おもしろくない。
- ・こわい。
- ・走った感じは歩くより、揺れを感じない。
- ・落ちなければよいのでは・・・。
- ・落ちないというなら怖くない。
- ・最東端部の橋だけ揺れを感じる。

(3) 小走り状態での振動数の測定

走行(小走り)の振動数

- ・体重70kgf(7.1N) 身長160cm f=2.6 Hz
- ・体重80kgf(8.2N) 身長180cm f=2.5 Hz

現地試験の結果、以下のことが判った。渡橋の固有振動数は、計算値と試験値がほぼ一致するが、単管パイプにて手すりを結合しても、効果が得られない(計算上は手すり結合により、f=2.74Hz)。これは、手すり支柱の結合状態および手すりの横ぶれが原因と思われた。

ユーザーの方々の感想より、渡橋⑥の固有振動数を他の6本と同程度(f=3.0Hz)まで上げれば、揺れを感じなくなると判断できた。また、綱取りのため、渡橋を小走りする事を考えると、小走りの振動数が2.5Hz程度であるため、対策工において最低でも渡橋の固有振動数を2.5Hzより大きくする必要があると判断した。

### 3. 対策工の検討

#### 3. 1 対策工の選定

振動抑制対策は、渡橋の固有振動数を変化させ共振域を避ける方法と、減衰性を向上させる方法がある。前者は、質量増加、主桁の補強、スパン途中で支点を設ける等により、後者は、粘性ダンパーを設ける、支承部を改良する等による。

本施設の対策工を選定する上での条件を以下に示す。

- (1) 短期間で施工可能なものであること。
- (2) スパン間に杭等を設けないこと。
- (3) 経済的であること。
- (4) 他の渡橋と、外観が、極端に違わないものであること。

(1) については、当時、既に荷役作業を行っていたため、施工中も人の通行が可能であることが必要であった。

(2) については、本橋の中央部の海底地盤中に、公共下水道管（シールド管φ2,750mm）が埋設されており、杭等の打設は、この下水道管への影響を考慮し、行わないこととした。

(4) については、ドルフィンの延長方向に6本の渡橋が並ぶため、美観を考慮することとした。

検討の結果、対策工として以下の2案を抽出した。

##### ① 渡橋の剛性を高める案

##### ② スパンを短くする案

前者は、手すりを鋼材にて、トラス構造とすることにより、渡橋の剛性を高めるものであった。後者は、接岸ドルフィンの下部に鋼製の受けブラケットを設け、支点を張り出すことにより、スパンを短くするものであった。両者とも、渡橋の固有振動数を変化させ、共振域を避けるものであり、目標振動数は先の試験結果より、 $f=3.0\text{Hz}$  とした。構造の概略検討結果を以下に示す。

渡橋の剛性を高める案については、鋼管（φ110mm程度）を手すりの高さに設け、上弦材とし、既設の主桁を下弦材とするポニートラス構造とすれば、剛性が高まり、固有振動数は、 $f=4.5\text{Hz}$  程度と条件を満たすものとなった。

スパンを短くする案については、スパン長（L）と固有振動数（f）の関係を（1）式により求めると、5.4m短い  $L=20.6\text{m}$  で  $f=3.0\text{Hz}$  が、得られることが判った。これより受けブラケットの構造を決めることができたが、ドルフィンおよび渡橋基礎の外的安定検討を行った結果、渡橋基礎に働く杭頭まわりのモーメントが、渡橋支点が杭から離れることにより、現在の8倍まで増大し、基礎杭に対して不適な偏心力を発現することが判った。

外観上は、上弦材を手すりの高さと同じとする前者

が、大きなブラケットを必要とする後者よりも有利であると判断した。以上より、振動抑制対策工として、鋼管パイプにより剛性を高める案を採用することとした。

#### 3. 2 断面および細部の決定

主構部の部材断面（上弦材および斜材）の決定は、平面骨組解析により行った。斜材は、上弦材が鋼管であることから、溶接等の作業性を考慮し上弦材と同じ鋼管を用いることとした。主構部の最大断面力を表-3に、渡橋の構造を図-3に示す。固有振動数は、 $f=4.47\text{Hz}$  であった。

表-3 各部材の最大断面力

	上弦材 φ114.3×6.0t	斜材 φ76.3×3.2t	下弦材 H-400×400
軸力 (Pmax)	-17.5 tf	4.1 tf -4.0 tf	17.2 tf
曲げモーメント (Mmax)	0.1 tfm	0.0 tfm	5.1 tfm
せん断力 (Smax)	0.1 tf	0.0 tf	1.4 tf

軸力は、正が引張・負が圧縮を表す

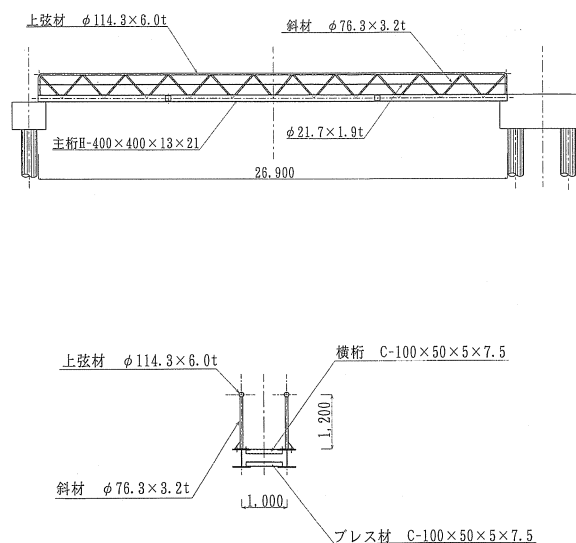


図-3 渡橋側面および断面図

本橋のようにポニートラスとした場合、上弦材を連結しないため、主桁は断面方向に脆い構造となる。手すりを連結して行った先の試験において効果が現れなかったのも、手すりの主桁との連結が横ぶれに対して軟構造であったためと思われる。そこで、横力の検討を(2)式にて行うとともに、安全のため、斜材と主桁の結合部に三角形の鋼板を設け、補強を行うこととした。

$$H = \frac{P}{100} \quad - (2)$$

H：上弦材に作用させる横力 (kgf)

P：上弦材に作用する最大軸方向圧縮力 (kgf)

また、この接合部は、渡橋上での作業を低減し、荷役作業に対してできる限り支障をきたさないために、上弦材および斜材を鋼板にて先に一体とし、渡橋上において下弦材となる主桁にボルトナットにて接合させる構造とした。

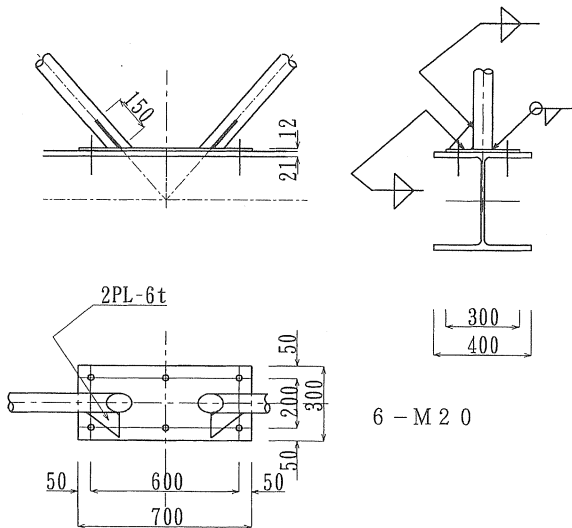


図-4 斜材と下弦材(主桁)の接合

#### 4. まとめ

最東端部の渡橋の固有振動数は、対策前  $f=1.9\text{Hz}$  程度で人間の歩調と一致していたため共振による不快感が生じていた。対策工においては目標固有振動数を小走りが  $f=2.5\text{Hz}$ 、当地点の他の渡橋の固有振動数が  $f=3.0\text{Hz}$  以上であることから、 $f=3.0\text{Hz}$  として剛性を高める案とスパンを短くする案につき検討を行った。

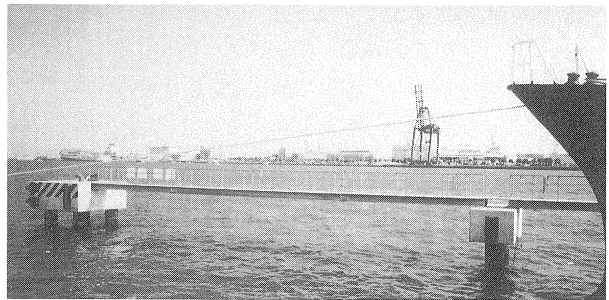


写真-1 着手前の渡橋⑥

スパンを短くする案については、当区間の中央に公共下水道管が埋設されている関係上、杭打設が難しいためドルフィン下部に鋼製ブラケットを設けることとしたが、モーメント力が大きくなること、外観が他の橋と異なることから不適であると判断した。剛性を高める案については、手すりを鋼管によるトラス構造において下弦材となる主桁にボルトナットにて接合させることで  $f=4.5\text{Hz}$  が得られること、および上弦材の高さを他の渡橋の手すり高さと同程度とすることで外観が改善前とあまり変わらないことより本案を適用することとした。

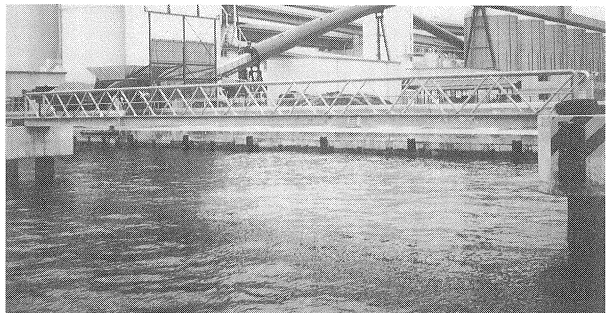


写真-2 完了後の渡橋⑥

実施工においては、現地陸上にて上部トラスを加工し、主桁とトラス部分との接合作業は、陸上に一時渡橋を仮置後、2日間で行い、荷役作業に支障をきたさぬようにした。架設後、歩行時に不快な振動は生じなくなり、無事抑制工を、終了することができた。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説、2-13、pp.35-37
- 2) 土木学会：振動便覧、12.2.3、pp.477-480