(昭和 34 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

上部構造の効きに関する研究 (第 6 報)

正員 八 木 順 吉 *

The Effect of Superstructure on the Strength of Ship

Report No. 6

(Bending Theory of Superstructure Constructed with Horizontally
Corrugated Wall Stiffened by Transverse Frames.)

By Junkichi Yagi, *Member*

Abstract

In the previous paper, the elastic behaviour of the simple superstructure constructed with horizontally and vertically corrugated plates was investigated.

But the horizontally corrugated wall, in general, will have to be stiffened by transverse frames or stiffeners, to maintain sufficient transverse stiffness of the cross section of superstructure against the lateral loads. When the stiffeners are rigidly attached to the every corrugation and the corrugations are restrained from distortion of their cross sections, the merits of the corrugated plates will vanish and the large longitudinal stresses may be transmitted from hull girder.

To find out the construction of the corrugated side wall of the superstructure which has sufficient transverse stiffness and does not transmit the large longitudinal stresses from main hull to the bridge deck, the effects of the stiffener attached to the corrugated wall on the tensile and bending rigidity of the superstructure were researched.

1. 緒 言

第 5 報¹⁾において側壁部に水平波型板を用いた上部構造の曲げについて述べた。ところが水平波型上部構造では、その横方向の剛性を維持せしめるために縦方向の補強材で補強しなければならない。この場合補強材を各波型に完全に結合すれば、各波型の上下方向の相対変位が拘束され、その結果前報で示されたような波板の特性が失われ、従来の平板上部構造と変ることなく、大きな縦応力が伝達される可能性が生ずる。そこで波板の特性を失わずしかも横方向の剛性を充分維持し得るような補強法を検討するため、補強材を有しない場合、一部の波型のみ自由にし、他の波型を補強材に結合させた場合および完全にすべての波型に補強材を結合させた場合の 3 種類の模型について曲げ試験を実施し、理論値と比較した。その結果一部の波型を自由にしておけば、波板の特性を失わず補強効果をあげ得ることが認められた。

2. 水平波型上部構造の曲げ理論

2.1 補強材を有しない場合

第 5 報において補強材のない場合の水平波型上部構造の曲げ理論を導き、実験結果と比較した。その結果両者は大体合致していると見なされる状態であつたが、bridge deck 上では理論値の方がやや大きいようであつた。

この原因について検討してみる。前回に示された重ね梁としての計算では第 1 図 (b) に示される如く、波板を半波長毎に切離し、その各々をそれぞれ独立した梁と見做し、側壁はその面内変形のみが生ずるものと考えた。ところが実際には側壁部は横方向にも変形し得る可能性があり、その計算では側壁の横方向の変形を拘束したことになっているので、その部の剛性を過大に評価したことになり、計算上 bridge deck に実際よりも過大な縦

原稿受付 昭和 34 年 7 月 10 日

* 大阪大学助教授

1) 八木順吉：上部構造の効きに関する研究 (第 5 報) 昭和 34 年 5 月造船協会春季講演会において発表

第1図 水平波型上部構造の横断面

第2図

すなわち

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= T_1 - (C_1\beta^2 + C_2\beta^{-2}), & M_1 &= M_1, \\ N_i &= C_1\beta^i(1-\beta) + C_2\beta^{-i}(1-\beta^{-1}), & M_i &= -e[C_1\beta^i(1+\beta) + C_2\beta^{-i}(1+\beta^{-1})], \\ N_k &= C_1\beta^k + C_2\beta^{-k}, & M_k &= -e_k(C_1\beta^k + C_2\beta^{-k}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし $C_1 = \beta^{-(k-1)}(a+b_k\beta^{-1})(m+n)/\Delta$

$$C_2 = -\beta^{k-1}(a+b_k\beta)(m+n)/\Delta$$

$$\Delta = \beta^{-(k-3)}(b_1+a\beta)(a+b_k\beta^{-1}) - \beta^{k-3}(b_1+a\beta^{-1})(a+b_k\beta)$$

$$\beta = -\gamma - \sqrt{\gamma^2 - 1}, \quad \gamma = b/a$$

$$a = \frac{e^2}{I} - \frac{1}{A}, \quad b = \frac{e^2}{I} + \frac{1}{A}, \quad b_1 = \frac{1}{A_1} + b, \quad b_k = \frac{e_k^2}{I_k} + \frac{1}{A_k} + b, \quad m = \frac{e_1}{I_1} M_1, \quad n = -\frac{1}{A_1} T_1$$

I = 各梁の断面 2 次モーメント, I_1 = 下端の梁の断面 2 次モーメント, I_k = 片舷部についての上端の梁の断面 2 次モーメント, A = 各梁の断面積, A_1 = 下端の梁の断面積, A_k = 片舷部についての上端の梁の断面積, e = 各梁の中性軸からその上下縁までの距離, e_1 = 下端の梁の中性軸からその上下縁までの距離, e_k = 上端の梁の中性軸からその下縁までの距離

一般に $|C_2| \gg |C_1|$ であり, また $\beta < -1$ (矩形波型では $\beta = -2 - \sqrt{3}$) であるので, 下端から数波離れると, その部の引張力および曲げモーメントは上式から判る ように β^{-i} に比例して減少するゆえほとんど 0 となり, したがって bridge deck には一般に縦応力は伝達されないと見なし得る。

上部構造の有効断面積, 有効断面 2 次モーメント等は前報のそれぞれの式において $\xi_b = \xi_t = 1$ とおいた形となる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \text{片舷部についての有効断面積} & A_E = A_1 T_1 / N_1 \\ \text{片舷部についての有効断面 2 次モーメント} & I_E = I_1 (1 + T_2 e_1 / M_1) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

応力が伝達されることになったと考えられる。

そこで第1図(c)に示されるように, 各板を切離し, それぞれ各板が独立した梁として変形するものとする。側壁が曲げ変形した時の各板の変形状態を考えると, 各板はそれぞれ結合部での歪の連続性を維持するために, 面内の引張(あるいは圧縮)および曲げ変形を起すとともに, 面に垂直な撓みを生ずるような曲げ作用および捩り作用も同時に受けることになる。この場合各板の面内の曲げおよび引張剛性と, 面に垂直な撓みを起すような曲げ剛性および捩り剛性とを比較すれば, 後者は前者に比べて一般に微小であるので無視することにする。すると各板に働らく力は第2図(a)に示されるように各切断面では水平剪断力のみを受けることとなり, これを一平面内に展開して考えると, 第2図(b)に示されるような状態となる。この場合最下層の梁の応力状態が与えられると, それより上部の各梁に働らく引張力および曲げモーメントは各梁の結合部での歪の連続性を考慮して前報で示された方法によつて求めることが出来る。各板に働らく引張力 N_i および曲げモーメント M_i は前報の(8)式で与えられる。

2.2 最下層の波型のみ自由で他の波型は補強材に結合されている場合

第3図に示されるように、側壁に剛な垂直補強材が密に取付けられており、最下層の波型だけ直接補強材に結合されており、上下方向に変形し得る場合について考える。

今、上部構造の片舷部を第4図に示される如く、補強材に直接結合されている上下の部分と、その中間の部分の3つの部分に切離して考えると、各切断面には図に示されるように、水平剪断力 T と垂直反力 q とが働らくことになる。補強材の剛性が非常に大きく、したがってそれに結合されている各波型は互に上下方向の相対変位が許されないものと仮定し、各3つの部分はそれぞれ梁理論に従うものとする。

今、中間の部分について梁理論によつて力の平衡を考えると次式が得られる。

$$EI_2 \frac{d^4 y_2}{dx^4} = q_3 - q_2 - e_2 \frac{d^2}{dx^2} (T_2 + T_3) \quad (3)$$

ただし x = 上部構造の中央断面より長さ方向にとつた座標

y_2 = 中間の梁の撓み

E = 上部構造材の弾性係数

I_2 = 中間の梁の断面2次モーメント

e_2 = 中間の梁の中性軸からその上下縁までの距離

T_i = 各梁に働らく水平剪断力で第4図に示される方向を正とする

q_i = 各梁間に働らく垂直反力

一方垂直反力 q_i はその部の Stiffness factor, K_i を用いて次のごとく表わされる。

$$q_2 = K_2(y_2 - y_1), \quad q_3 = K_3(y_3 - y_2) \quad (4)$$

ただし y_1, y_3 = それぞれ下端および上端の梁の撓み

K_2, K_3 = それぞれ下端の梁と中間の梁および上端の梁と中間の梁を単位量だけ上下方向に相対変位せしめるに要する単位長さ当りの力

補強材は剛であるので $y_1 = y_3$ とし (4) 式を (3) 式に代入すれば

$$EI_2 y_2'''' = K(y_1 - y_2) - e_2(T_2'' + T_3'') \quad (5)$$

ただし $K = K_2 + K_3$

一方各梁の接合部での応力の連続条件より

$$\left. \begin{aligned} \frac{N_1}{A_1} + \frac{M_1}{I_1} e_1 &= \frac{N_2}{A_2} - \frac{M_2}{I_2} e_2 \\ \frac{N_2}{A_2} + \frac{M_2}{I_2} e_2 &= \frac{N_3}{A_3} - \frac{M_3}{I_3} e_3 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ただし N_i = 各梁に働らく引張力

M_i = 各梁に働らく曲げモーメントで図の方向を正とする

A_i = 各梁の断面積

I_i = 各梁の断面2次モーメント

e_i = 各梁の中性軸から隣接梁との結合面までの距離

また各梁の引張力 N_i は水平剪断力 T_i との平衡から次のごとく表わされる。

第3図 補強材を有する水平波型上部構造（最下の波型のみ自由）

第4図

$$N_1 = T_1 - T_2, \quad N_2 = T_2 - T_3, \quad N_3 = T_3 \quad (7)$$

各梁の曲げモーメント M_i は梁理論により

$$M_1 = EI_1 y_1'', \quad M_2 = EI_2 y_2'', \quad M_3 = EI_3 y_3'' = EI_3 y_1'' \quad (8)$$

(6), (7) および (8) 式を用いて (5) 式の T_2'' および T_3'' を携みで表わせば

$$E(I_2 + e_2^2 A_2 + 4 e_2^2 A_3) y_2'''' = K(y_1 - y_2) - E(e_1 e_2 A_2 + 2 e_1 e_2 A_3 + 2 e_2 e_3 A_3 y_1'''' - E(e_2 A_2 + 2 e_2 A_3) \varepsilon''_{t1}) \quad (9)$$

ただし $\varepsilon_{t1} = N_1 / A_1 E$

今、側壁下端部の曲率 y_1'' および引張歪 ε_{t1} が長さ方向に一定の場合を考えると (9) 式は次のようになる。

$$y_2'''' = -4 \alpha^4 y_2 + 4 \alpha^4 y_1 \quad (10)$$

ただし

$$\alpha^4 = \frac{K}{4E\{I_2 + e_2^2(A_2 + 4A_3)\}}$$

(10) 式を解き、上部構造の中央断面 ($x=0$) に関して対称なることを考慮して偶関数のみをとれば

$$y_2 = C_1 \cos \alpha x \cdot \cosh \alpha x + C_2 \sin \alpha x \cdot \sinh \alpha x \quad (11)$$

C_1 および C_2 なる常数は垂直反力の積分値が 0 であること、すなわち

$$K \int_0^l (y_1 - y_2) dx = 0 \quad (12)$$

ただし l = 上部構造の半長

および上部構造端における中間の梁の曲げモーメントが次式で与えられること

$$M_2 = -e_2(T_2 + T_3) \quad (13)$$

によって決定される。

常数が定まれば中間の梁の曲率 y_2'' は次のごとくなる。

$$y_2'' = (\Phi_1 \sin \alpha x \cdot \sinh \alpha x - \Phi_2 \cos \alpha x \cdot \cosh \alpha x)(\xi y_1'' + \eta \varepsilon_{t1}) + y_1'' \quad (14)$$

ただし

$$\Phi_1 = \frac{\cos \alpha l \cdot \sinh \alpha l - \sin \alpha l \cdot \cosh \alpha l}{\cos \alpha l \cdot \sin \alpha l + \cosh \alpha l \cdot \sinh \alpha l}, \quad \Phi_2 = \frac{\cos \alpha l \cdot \sinh \alpha l + \sin \alpha l \cdot \cosh \alpha l}{\cos \alpha l \cdot \sin \alpha l + \cosh \alpha l \cdot \sinh \alpha l},$$

$$\xi = 1 + \frac{e_1 e_2 A_2 + 2 e_1 e_2 A_3 + 2 e_2 e_3 A_3}{I_2 + e_2^2(A_2 + 4A_3)}, \quad \eta = \frac{e_2 A_2 + 2 e_2 A_3}{I_2 + e_2^2(A_2 + 4A_3)}$$

また上部の梁の断面積 A_3 としては、その部の shear lag effect を考慮して第 2 報²⁾に示された方法で有効断面

第 5 図

積を求め、近似的にその平均値を用いるか、あるいは midship での有効断面積を用いればよい。 e_3 も同様に有効断面 2 次モーメントに対応したものを使用すべきである。

中間の梁の曲げモーメントが定まれば (6) 式によって各梁の引張力 N_i が定まり、上部構造各部の応力分布が定まる。

なお上部構造の中央断面における縦応力の伝達状態は (14) 式の Φ_2 の大きさに支配されるが、 Φ_2 と αl との関係を図示すれば第 5 図のごとくなり、 αl

> 2.5 では $\Phi_2 \approx 0$ となり、波型の効果は現われず従来の平板上部構造と同程度の縦応力が伝達されることになる。したがって波型上部構造の中央断面における縦応力を減少させるには $\alpha l < 2.5$ でなければならない。

2.3 すべての波型が補強材に結合されている場合

この場合は一般に各波型は上下方向に相対変位を生じないと考えられるので、第 2 報および第 3 報³⁾で示された平板上部構造と全く同様に取扱うことができる。

ただしこの場合の有効断面積の算定に当たっては、shear lag effect は側壁部を一平面内に展開した形について考える必要がある。

2) 寺沢一雄，八木順吉： 上部構造の効きに関する研究（第 2 報），造船協会論文集，第 101 号

3) 寺沢一雄，八木順吉： 上部構造の効きに関する研究（第 3 報），造船協会論文集，第 102 号

3. 箱型船体模型試験結果と計算値との比較

以上述べた計算法による値と実験値とを比較するため、前報で示された長さ 3,000 mm, 幅 400 mm, 深さ 250 mm の箱型主構造に長さ 1,000 mm, 巾 400 mm, 高さ 110 mm の水平波型上部構造を取付けた 3 種類の模型の均一曲げ試験を実施し、各部の歪分布を測定した。前報では板厚 1.6 mm の鋼板で上部構造を作製したが、これに補強材を取付けた場合大きな溶接歪が発生し、信頼性のある実験値が得られ難かつたので、板厚 0.4 mm のブリキ板で水平波型上部構造を作製し、補強材は 0.8 mm のブリキ材をハンダ付けすることとした。

第6図 上部構造模型の横断面

+ Observed Longitudinal Strain
 — Calculated Longitudinal Strain
 0 1 2 3 4×10^{-4}
 Strain

第7図 上部構造模型の曲げ試験結果

第6図に3種の模型の横断面を示す。Model-A は stiffener を有しない場合であり、Model-B は下端の波型のみ自由にし残りの波型に stiffener を取付けたもので、Model-C は Model-B の stiffener にさらに doubling を施し、下端の波型の移動を止めた模型である。波型は何れも巾および高さが 10 mm の正方形波で上部構造は bolt で主構造に取付けられている。

歪を計測した断面は前報と同じく上部構造の中央断面、端部の断面およびその中間の2断面であり、すべての点で板の表裏両面の平均歪を計測した。

第7図～第9図は実験結果と計算値とを比較したもので、第7図は Model-A で stiffener のない場合である。図中 + 印が縦歪の実測値であり、実線が理論値である。側壁部では実験値の方が大きく出ているが、bridge

第8図

第9図

deck および main hull では両者は一致している。側壁下部での両者の不一致は、重ね梁としての計算において板の面内の剛性のみを考慮し、板の面に垂直な撓みを起す変形に対する剛性を無視したためであるが、上部構造の有効性を論ずる場合は、この程度の誤差は余り大きな影響を与えないと思われる。第8図は下端の波型のみ自由である Model-B の実験値と理論値とを比較したもので、主構造は hogging であるが、下端の波型は sagging 状態であり、そのためこの部分で縦歪が急に減少している。したがって補強材を取付けても、この部に上下に変形し得る余地を残しておけば上部構造の縦応力を軽減し得ることが認められる。本模型においては $\alpha l = 1.74$ 、したがって $\phi_2 = 0.31$ であるので、第9図の stiffener を完全に結合させた場合に比べて、bridge deck 上の縦応力は約半分に減少している。第9図はすべての波型に stiffener を結合した場合であり、各波型の上下方向の相対変位がないと仮定した理論値と実験値とを比較したものである。両者はほぼ一致しているが、僅かに実験値の方が小さくなっているのは、stiffener を剛体と仮定したための誤差と考えられる。なお第8図および第9図ともに stiffener に結合された波型においても実験値が左右に交互に少し出入しているのは、計測された断面が stiffener 間の断面であり、この部分でもなお波型の特性であるところの hogging と sagging の繰返し現象が完全に消滅しておらないためであろうと考えられる。

いずれにしてもこの程度の補強を施せば、補強部ではほとんど平板構造と同様な変形を起すことが判る。また第9図に示された結果から考えると、補強材を1波毎にとばして結合するときは上部構造の縦応力は更に減少せしめ得るであろうと思われる。

4. 結 言

以上、補強材を有する場合および有しない場合の水平波型上部構造の曲げ理論式を導き、実験結果と比較してほぼ満足すべき結果が得られた。水平波型上部構造では一般に補強材で横方向の剛性を維持せしめる必要があるが、補強材の取付けに際し、最下層の1波型部を自由にしておけば上部構造に伝達される縦応力を軽減せしめ得ることが判つた。ただしこの場合中央断面でのその軽減量は $\phi_2(\alpha l)$ の大きさに支配され、 $\alpha l > 2.5$ では $\phi_2 \div$ となり応力は減少しない。この補強材の取付法の効果をあげるには $\alpha l < 2.5$ でなければならない。

また自由にしておく波型は側壁の下端に近い程効果が上るわけであるが、1波おきに補強材を結合し、自由な波型を増せばさらにその効果を上げ得ると考えられる。

以上の計算法では、補強材を剛体と見なし、補強材に結合された波型間の相対変位を無視し、また実験においても波型の曲げ剛性に比べてかなり剛な補強材を取付けたので、その部はほぼ平板と同様な変形を生じたが、このような大きな補強材を必要とせず、またその間隔もさらに広くし得る場合には、たとえ完全に補強材を取付けても、その弾性変形のため、拘束度は落ちるので、平板上部構造よりも応力が減少する可能性がある。

終りに本破究に当り終始御指導を賜つた寺沢一雄教授に厚く感謝するとともに、模型試験に協力された助手上田幸雄君および福田広行君に感謝する。