

SWATH선의 최종 횡굽힘강도에 대한 Shear Lag의 영향

박 치 모

조선 및 해양공학과

<요 약>

Shear Lag 현상을 고려하여 SWATH선의 최종 횡굽힘모우먼트를 계산하는 방법을 개발하였다. 종래의 Monohull선이나 Box Girder의 최종 굽힘강도 해석시에는 '변형전 평면이던 단면은 굽힘변형후에도 평면을 유지한다'는 단순한 보이론을 적용하였으나, 본 연구에서는 Shear Lag에 의한 실제의 응력분포의 비율로 단면의 뒤틀림(Warping)이 발생한다는 좀더 합리적인 가정을 도입하여 Shear Lag가 Wide-Flange를 갖는 보의 최종 굽힘강도에 미치는 영향을 고려하는 방법을 개발하였으며, 이를 SWATH Model의 Cross Deck에 적용하였다.

The Effect of Shear Lag on the Ultimate Transverse Bending Strength of SWATH Ship

Park, Chi-Mo

Dept. of Naval Architecture, Shipbuilding and Ocean Engineering

<Abstract>

A calculation method has been developed for the ultimate transverse bending moment of SWATH ship.

In case of the ultimate bending strength analysis of conventional monohull ships and general box girder structures, the hypothesis that plane section remains plane after bending can be employed but not in the case of the structures having wide flange.

본 논문은 1990년도 교육부의 특성학과 교수 해외연수 지원에 따라 이루어진 연구결과임을 밝히며 교육부 당국에 깊은 사의를 표하는 바이다.

For the ultimate bending strength analysis of such structures, a new method which can take into account the effect of shear lag on the ultimate bending strength has been developed by adopting more reasonable assumption that warping distortion of the section takes place in the same way as the actual stress distribution.

Finally, the proposed method has been applied to a SWATH cross deck structure.

1. 서 론

SWATH선이 종래의 Monohull선에 비해 거친 해상에서의 항해성능이 탁월하다는 것은 이미 잘 알려진 바이다. 그러나 지금까지의 SWATH선에 관한 연구는 주로 유체동역학적 분야에 집중되어온 것이 사실이다. 본 연구는 SWATH선의 구조해석을 보다 실제적으로 수행하여 구조설계방법의 개선율도모함을 그 목표로 하고 있다.

SWATH선은 그 기하학적 형상(Fig.1 참고)이 종래의 Monohull선과 근본적으로 다르기 때문에 여러 가지 면에서 전혀 새로운 해석법이 요구되는데, 특히 구조강도상의 측면에서 볼 때 종래의 Monohull선의 구조설계가 주로 보 이론에 근거한 선체 종강도 해석에 의존했던 것에 반해 SWATH선은 측면파(Beam Sea) 상에서의 횡굽힘강도에 취약한 기하학적 특성을 갖고 있어서 이것이 구조설계의 중요한 변수가 되고 있다. 특히 SWATH선의 중요한 단점중의 하나가 같은 배수량을 갖는 Monohull선에 비해 중량이 크다는 사실임을 감안할 때 최소중량설계를 위해서도 좀더 정확한 최종강도해석이 요구된다고 하겠다.

이러한 점들을 고려할 때 SWATH 구조부분중 가장 큰 굽힘모우먼트를 받는 Cross Deck Structure의 최종굽힘강도 해석은, 이제까지 많이 이루어진 Monohull선의 선체 중앙단면에서의 최종굽힘해석(1.2.3.4)

이나 일반적인 Box Girder의 최종굽힘강도 해석(5.6)에 대응되는 중요성을 갖는다고 볼 수 있다. 한편, 최근의 유한요소법을 이용한 SWATH선의 3차원 선형 응력해석결과(7)는 단순 보 이론(Simple Beam Theory)에 의한 응력해석 결과와는 달리 SWATH선의 Haunch부(Cross Deck Structure와 Strut의 연결부)와 Trans. BHD부에 응력집중현상(Stress Concentration)이 두드러진 불규칙적인 응력분포현상이 나타난다는 것을 밝힌 바 있다(Fig.2).

여기서 Cross Deck Structure의 횡 방향으로의 불규칙적인 응력분포 현상은 기하학적 형상에 기인한 응력집중 현상이고, 종 방향으로의 불규칙적인 응력분포 현상은 Shear Lag(Fig.3)에 기인한 것으로 볼 수 있다. 종래의 Monohull선이나 일반적인 Box Girder의 최종 굽힘강도 해석의 경우에는 이와 같은 Shear Lag의 영향이 최종 굽힘강도에 미치는 영향이 그다지 크지 않다는 판단하에 주로 이것을 무시하고 단순 보 이론에 의한 해석을 수행하여 왔으며, Dowling 등(5)은 Box Girder에 대한 실험을 통해 Shear Lag가 Web 근처에서의 응력집중현상을 유발시켜 구조물의 연구 변형이 시작되는 굽힘모우먼트 값을 상당히 떨어뜨려 Box Girder의 설계에 중요한 변수가 되는 것은 사실이나 최종굽힘모우먼트 자체에는 그다지 영향을 미치지 않는 것으로 결론짓고 있다. 그러나 횡격벽(Transverse Bulkhead)의 간격이 큰 SWATH선

의 경우 종래에 흔히 사용되어 오던 Box Girder나 Monohull선에 비해 횡격벽에 가까운 Flange 상에서 Shear Lag에 의한 응력집중현상이 현저하여 최종굽힘모우먼트 계산시 이와 같은 현상이 반영되어야 한다는 필요성에 대한 인식이 최근 SWATH 구조연구자들에 의해 확산되고는 있으나 이것을 고려할 만한 적절한 방안이나 계산결과가 아직까지는 발표되지 않은 실정이며, 현재 단순한 보이론에서 흔히 이용되는 "Euler-Bernoulli의 가정"(굽힘변형전 보의 중립축에 수직이던 평면은 변형후에도 평면은 유지한다)을 그대로 도입한 채 유효폭(Effective Breadth) 개념을 이용하여 Flange의 실제폭을 유효폭으로 감소된 것으로 가정하여 계산하는 방안 정도가 영국 해군연구소(Admiralty Research Establishment)의 구조연구팀에 의해 시도 중에 있으나 그 타당성에 대해서는 그들 스스로도 의문을 표시하고 있으며(8) 본 연구자의 입장에서도 그다지 합리적이고 범용성 있는 방법으로 생각되지 않는다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 "Euler-Bernoulli의 가정"으로부터 벗어난 Shear Lag에 의한 단면의 뒤틀림(Warping) 현상을 그대로 반영시키는 새로운 계산법을 개발한 후, Box Girder에 적용하여 Parametric Study를 통해 Shear Lag가 보의 최종굽힘강도에 미치는 영향의 일반적 특성을 밝히고 또한 DTNSRDC에서 설계한 SWATH-TAGX [Table 1, Fig. 1]의 최종횡굽힘모우먼트 계산에 적용하여 SWATH선의 최종횡굽힘강도에 대한 Shear Lag의 영향을 조사하였다.

2. 해석 방법 및 가정

종래의 Monohull선이나 일반 Box Girder의 최종굽힘모우먼트를 계산하는데 근래에 많이 사용되어온 Beam-Column Approach [2, 3, 4, 6]는 다음과 같이 크게 세 단계로 나누어지는데 이것을 본 연구에서 SWATH선의 횡강도해석에 적용하기 위해 수정한 부분과

함께 단계별로 설명하면 다음과 같다.

단계 1) 해석하려는 단면을 판, 보강판 등의 여러개의 요소로 분할하고 모든 요소는 Frame Space(SWATH선의 경우에는 Longitudinal Girder Space) 만큼의 Span을 갖는 것으로 가정한다 [Fig. 4.5].

단계 2) 각각의 요소에 대해 응력-변형도 관계를 구한다. 이 때 인장을 받는 경우에는 모든 요소의 응력-변형도 관계를 완전탄소성(Elasto-Plastic)으로 가정하고 압축을 받는 경우의 응력-변형도 관계는 각 요소의 종류에 따라 다음과 같이 처리한다.

- Hard Corner부(Web와 Flange가 만나는 부분)의 요소는 완전탄소성으로 가정한다.
- Plate 요소는 탄소성 대변형 해석을 통해 구해야 하는데 본 연구에서는 계산시간을 단축시키기 위해 몇가지 Standard Plate에 미리 계산해 놓고 이로부터 삼각법으로 해당 Plate 요소의 응력-변형도 관계 자료를 구하는 방법(6)을 사용하였다.
- Stiffened Plate 요소는 앞서 구한 Plate의 응력-변형도 관계를 이용하고 Beam-Column에 대한 유한요소 해석을 통해 응력-변형도 관계를 구하는 방법과 Beam-Column의 최종강도와 Plastic Hinge Collapse Mechanism(9)을 이용하는 단순화된 방법이 있으나 본 연구에서는 계산시간을 크게 단축시킬 수 있는 후자의 방법을 도입하였다.

단계 3) 단면에 대한 굽힘해석으로서, 우선 단면의 곡률을 단계별로 증가시키면서 각 요소의 위치에 따른 축변형도 증분을 구한다. 이때 종래의 방법에서는 "Euler-Bernoulli의 가정"을 이용하여 곡률 증분에 중립축으로부터 각 요소까지의 거리를 곱하여 해당요소의

축변형도 증분을 결정하여 왔으나, 본 연구에서는 Shear Lag Effect를 고려하기 위하여 선형탄성 유한요소 해석으로부터 얻어지는 실제의 응력(변형도)분포의 비율로 각 요소의 변형도 증분을 결정하였으며 이와 같은 가정은 소성영역이나 좌굴 이후의 영역에서도 타당성이 있는 것으로 실험 결과 밝혀진 바 있다(5).

다음은 이와 같이 구한 각 요소의 변형도 증분과 단계 2)에서 구한 해당 요소의 응력-변형도 관계로부터 각 증분단계에서의 접선강성(Tangential Stiffness)을 구하여 서로 곱함으로써 각 요소의 응력증분량을 구하고 이와같은 응력증분의 매 증분단계마다 새로 계산된 중립축에 대한 모우먼트를 계산함으로써 곡률 증분에 대한 굽힘모우먼트 증분을 구하게 되고 이들을 누적시켜 나감으로써 곡률-굽힘모우먼트 관계와 아울러 최종굽힘모우먼트 값을 얻게 된다.

2-1. 보강판의 Load-End Shortening 관계

축 압축하중을 받는 보강판의 Load-End Shortening 관계를 얻기 위해 다음과 같은 가정을 도입하였고(9) 이는 Fig.6에 도시되어 있다.

- 1) 축변형도가 최종압축응력(Ultimate Compressive Stress) σ_u 에 대응되는 변형도 ϵ_u 이하일 때는 선형적으로 거동한다.
- 2) 축변형도가 ϵ_u 와 탄성좌굴응력 σ_{cr} 에 대응되는 변형도 ϵ_{cr} 사이에서는 응력값이 σ_u 로서 일정한 값을 갖는다.
- 3) 축변형도가 ϵ_{cr} 이후에서는 응력-변형도 관계로서 Plastic Hinge Mechanism(Fig.7)에 의해 얻어지는 곡선 중 B'C' 부분을 BC로 수평

이동시켜 사용한다.

2-2. Shear Lag를 고려한 단면내의 응력분포

단순한 보 이론에서는 "Euler-Bernoulli 가정"하에 굽힘응력은 중립축으로부터의 거리에 비례하여 Flange와 Web로 이루어지는 형태의 보의 경우 Flange상에서의 응력분포가 일정한 것으로 취급되고 있다. 그러나 순수굽힘하에 놓여 있는 보의 경우를 제외하고는 'Shear Lag'의 영향으로 Flange 상에 길이방향의 뒤틀림(Warping)이 발생하게 되고 Flange상의 굽힘응력분포는 Web와 만나는 점에서 최대값에 달하고 Web로부터 멀어짐에 따라 감소하는 불균일한 상태에 놓이게 된다. 그러나 Wide-Flange 단면에서의 응력분포는 보의 형상과 하중상태 등 여러 가지 요인에 따라 복잡하게 변화하여 해석적인 방법으로 정확하게 추정하기는 거의 불가능한 상태이다(10). 따라서 본 연구에서는 우선 Box Girder와 SWATH Model의 Flange 상의 응력분포를 직선적으로 가정하여 그 기울기를 변화시키면서 응력분포의 불균일한 정도가 최종굽힘모우먼트에 미치는 영향을 조사하였고, 다음 단계로 SWATH-TAGX Model에 대하여는 Sikora 등(7)이 유한요소법에 의한 선형응력해석을 통해 제한한 다음 식을 이용하였다.

$$\sigma = \sigma_{nom}A(mx^c + B) \quad (1)$$

여기서, σ_{nom} 는 단순 보이론(Classical Beam Theory)에 의한 공칭응력(Nominal Stress)이고 나머지 계수 A, B, m, C, x는 Table 2에 정리하였다.

2-3. SWATH Cross Deck 구조의 횡굽힘해석

SWATH Cross Deck 구조의 최종횡굽힘강도 해석을 위하여 Fig.8에 보인 바와 같이 Cross Deck 구조의 종단면으로부터 1개

의 횡격벽(Transverse Bulkhead)을 가운데 두고 양쪽으로 Midbay까지 걸친 부분을 모델로 택하여 곡률-굽힘모우먼트 관계를 계산한다(8).

이와 같이 선택된 부분에 대하여 Shear Lag에 의한 단면의 Warping을 고려하기 위해 변형도 분포는 단성, 탄소성, 좌굴 이후 등 전영역에 걸쳐서 (1)식으로 주어진 탄성응력(변형도) 분포와 같은 것으로 가정한다. 따라서 곡률증분 $\Delta\phi$ 에 의한 종단면 내의 임의점 (y, z)에서의 변형도증분 $\Delta\epsilon$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\epsilon = z \cdot \Delta\phi \cdot A(mx^c + B) \quad (2)$$

한편 응력증분 $\Delta\sigma$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\sigma = E^* \Delta\epsilon = z \cdot E^* \cdot \Delta\phi \cdot A(mx^c + B) \quad (3)$$

여기서 E^* 는 단면을 이루는 각 요소의 응력-변형도 곡선의 기울기로부터 얻어지는 유효 접선강성계수(Effective Tangential Modulus)이다.

굽힘모우먼트의 증분 ΔM 은 단면의 증립축에 대한 응력증분들의 1차 모우먼트들의 합의 형태로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta M = \int_A z \Delta\sigma dA = \int_A z^2 E^* A (mx^c + B) \cdot \Delta\phi \quad (4)$$

3. 수치계산 및 고찰

3-1. Box Girder:Reckling's Model 23(11)

먼저 Shear Lag에 의한 Flange 상에서의 응력분포의 집중현상의 정도가 Box Girder의 최종굽힘모우먼트에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Flange 상에서의 응력분포를 Fig.9와 같이 직선적으로 가정하였다.

Fig.9에서와 같은 직선적인 응력분포가 정상 상태에서 p와 q를 변화시켜 Web 근처의 응력집중현상을 변화시키고 다른 한편으로는 늑골간격(Frame Space)을 변화시키며

계산을 수행하였다. Box Girder Model로는 Reckling's Model 23(Table 3)(Fig. 4)을 택하였으며 최종굽힘모우먼트 및 그에 대응되는 곡률값을 계산하여 Table 4에 수록하였다.

Table 4의 계산결과로부터 크게 다음과 같은 세 가지 사실을 발견할 수 있다.

- 1) 일반적으로 늑골간격이 증가함에 따라 최종 굽힘모우먼트값은 감소하는데 그 감소정도는 Shear Lag가 클수록 심한 것으로 나타나고 있다.
- 2) 늑골간격이 작은 경우에는 Shear Lag에 의한 최종 굽힘모우먼트값의 변화가 거의 없으나 늑골간격이 커질수록 Shear Lag에 의한 최종 굽힘모우먼트값의 감소 현상이 두드러진다.
- 3) 전반적으로 Shear Lag 효과가 커질수록 최종 굽힘모우먼트에 대응되는 곡률값이 증가하는데, 이 현상은 최종 굽힘모우먼트값 자체의 감소현상과는 대조적으로 늑골간격이 증가함에 따라 약화되는 것으로 나타나고 있다.

3-2. SWATH-TAGX Cross Deck 구조모델

SWATH-TAGX Cross Deck 구조의 횡굽힘강도해석을 위해 응력집중현상과 Shear Lag Effect가 상대적으로 크게 나타나는, 종격벽에 인접한 부분의 종단면을 선택하여 Fig.5와 같이 모델링 하였으며 모델의 기하학적, 재료적 특성은 Table 5에 보인 바와 같다.

먼저 Box Girder의 경우와 마찬가지로 Flange(Main Deck와 Wet Deck) 상에서의 응력분포를 직선적으로 가정한 후 그 기울기를 변화시키며 계산하여 보았고, 그 후 Sikora 등(7)이 제안한 (1)식의 응력분포식을 이용하여 최종 횡굽힘모우먼트를 계산하여 이들 결과를 모두 Table 6에 수록하였

다.

Table 6의 계산결과를 살펴보면 Shear Lag Effect를 무시한 경우에도 M_u/M_p 값이 50% 정도의 작은 값을 갖는 것으로 보아 압축을 받는 Main Deck 쪽의 부재치수가 너무 작거나 Longitudinal Girder의 간격이 너무 커서 좌굴강도에 취약한 것으로 평가된다. Shear Lag로 인한 최종 굽힘모멘트의 변화를 살펴보면 직선응력분포의 가정시 가장 응력집중이 심한 경우 21%의 감소를 보이고, Sikora 등 [(1)식]의 응력분포 적용시에는 7%의 감소를 나타내고 있다. 한편, Table 4의 Box Girder에 대한 계산 결과와 비교해 보면 이 경우 Box Girder에서 늑골간격이 상당히 큰 경우에 해당하여 Shear Lag의 변화에 따르는 ϕ_u/ϕ_y 값의 변화가 미소함을 알 수 있다.

4. 결 론

Shear Lag Effect를 고려한 Box Girder의 최종 굽힘강도해석법을 개발하여 Box Girder 및 SWATH-TAGX 모델의 굽힘강도 해석에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 늑골간격이 클수록 Shear Lag 현상에 의한 최종 굽힘강도값의 감소가 큰 것으로 나타나 Shear Lag가 좀더 신중히 고려되어야 할 것으로 판단된다.
- 2) Box Girder의 굽힘에 있어서 늑골간격이 작은 경우 Shear Lag 현상에 의해 최종 굽힘강도값 자체는 감소하지 않으나 소성에 의한 영구변형의 시작점이 낮아지고 같은 최종강도 값에 대응되는 곡률이 증가한다는 사실로 미루어 늑골간격이 작은 경우에도 Shear Lag Effect의 중요성은 경시될 수 없을 것으로 사료된다.
- 3) SWATH-TAGX 모델의 경우 Sikora

등의 응력분포 적용시 Shear Lag에 의한 최종강도 감소량은 7%인 것으로 나타났다.

- 4) Box Girder나 SWATH 모델의 Flange 상의 보강재 치수 및 간격을 횡격벽으로부터의 거리에 따라 변화시키면 더욱 효율적인 굽힘강도를 갖는 단면을 설계할 수 있을 것으로 사료되며 이에 대해서는 추후 좀더 많은 연구가 요구된다고 본다.
- 5) 본 연구에서 Web에서는 굽힘응력분포에 미치는 Shear의 영향이 작을 것으로 보아 무시하였으나 이러한 가정의 타당성에 대해서는 좀더 검토가 필요하다고 생각한다.

Reference

1. J. B. Caldwell, "Ultimate Longitudinal Strength", Trans. RINA, 1965.
2. C. S. Smith, W. C. Kirkwood, J. L. McKeeman, "Evaluation of Ultimate Longitudinal Strength of a Ship's Hull", ARE Report No. AMTE(S)/R671, November, 1977.
3. C. S. Smith and R. S. Dow, "Ultimate Strength of a Ship's Hull under Biaxial Bending", ARE Report No. TR 86204, 1986.
4. S. E. Rutherford and J. B. Caldwell, "Ultimate Longitudinal Strength of Ships : A Case Study", Proceedings, SNAME Annual Meeting, San Francisco, California, October 31-November 3, 1990.
5. P. J. Dowling, F. M. Moolani and P. A. Frieze, "The Effect of Shear Lag on the Ultimate Strength of Box Girders", in Steel Plated Structures, ed. by Dowling, et al. Crosby Lockwood Staples, London, 108-141, 1977.

6. J. S. Lee, "Pre-and Post- Ultimate Behaviour Analysis and Derivation of Strength Model of Rectangular Box Girder" Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Univ. of Glasgow, NAOE-87-27, May 1987.

7. J. P. Sikora and A. L. Dinsbacher, "SWATH Structure : Navy Research and Development Applications", Marine Technology, Vol. 27, No. 4, July 1990.

8. A. G. Stirling, G. L. Jones and J. D. Clarke, "Development of a SWATH Structural Design Procedure for Royal Navy Vessels", Int. Conf. on SWATH Ships and Advanced Multi-hulled Vessels, paper 19, London, November 1988.

9. 양박달치 · 이주성, "이중선각구조 선박의 최종굽힘강도와 피로강도에 대한 안전성 평가", 대한조선학회 논문집, 제 29권 제1호, 1992.

10. O. F. Hughes, Ship Structural Design- A Rationally-Based, Computer-Aided, Optimization Approach, John Wiley & Sons, 1983.

11. "Nonlinear Structural Response", ISSC Report of Committee II. 2, Paris, 1979.

Table 1. Principal Dimensions for the SWATH TAGX

| | |
|---------------------------|--------|
| Displacement, Δ (tons) | 4000.0 |
| Overall Length(ft) | 282.0 |
| LBP(ft) | 282.0 |
| Maximum Breadth(ft) | 82.0 |
| Box Length(ft) | 238.0 |
| Box Overall Breadth(ft) | 48.0 |
| Box Height(ft) | 11.0 |
| Box Clearance(ft) | 12.0 |
| Depth to Weather Deck(ft) | 44.5 |
| Draft at DWL(ft) | 21.5 |

Table 2. Design Algorithms for Stress Distribution. $\sigma_{nom}A(mx^c + B)$

| Coeff. | A | B | C | m |
|---|---------------------|------------------|---|-----------------------------|
| Main Deck | $0.83 + 2.80(b/s)$ | $0.58 - 0.194y$ | 2 | $0.41 - 0.625 \sqrt{y}$ |
| Wet Deck | $1.83 + 6.114(b/s)$ | $0.276 - 0.187y$ | 2 | $0.716 - 0.754 \sqrt[3]{y}$ |
| *b : Transverse BHD Spacing *s : Breadth of SWATH *x : Normalized transverse variable which is 0 at center line and 1 at longitudinal bulkhead *y : Normalized longitudinal variable which is 0 at transverse bulkhead and 1 at midbay | | | | |

Table 3. Details of Reckling's Model 23[11]

| Breadth(B) : 600.0 mm Height(H) : 400.0 mm Transverse Spacing(L) : 500.0 mm | | | | | | | |
|---|---------|------------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------------------|--------------------|---------------|
| Properties Components | Plate | | | Stiffener | | | |
| | t mm | E N/mm ² | σ_Y N/mm ² | Scantling mm | E N/mm ² | σ_Y N/mm | Spacing mm |
| Compression Flange | 2.5 | 210000 | 246.0 | 30.0x2.5x 20x2.5L | 210000 | 246.0 | 85.7 |
| Tension Flange | 2.5 | 210000 | 246.0 | 30.0x2.5x 20x2.5L | 210000 | 246.0 | 85.7 |
| Web | 2.5 | 210000 | 246.0 | 30x2.5 FLAT | 210000 | 256.0 | 100.0 |
| Total Sectional Area | | | | | 6875.0 mm ² | | |
| Elastic Neutral Axis from Midplan of Bottom Plate | | | | | 198.75 mm | | |
| Plastic Neutral Axis from Midplan of Bottom Plate | | | | | 198.75 mm | | |
| Moment of Inertia | | | | | 193.1 m ² -mm ² | | |
| Plastic Bending Moment | | | | | 266.3 KN-m | | |

Table 4. Ultimate Bending Moment Values of Box Girder for Various Frame Spacings and Degrees of Shear Lag (M_u/M_p)

* Figures in Parentheses is φ_u/φ_Y . φ_Y : Curvature Corresponding to the First Yield

* Stress Distribution on Flange : $\sigma = \sigma_{nom} \cdot S$

| Shear Lag (S) F/S (mm) | No Shear Lag | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 1.0 | 0.8+0.4y | 0.6+0.8y | 0.4+1.2y | 0.2+1.6y | 2y |
| 100 | 0.896 (0.92) | 0.906 (0.92) | 0.915 (0.92) | 0.923 (0.98) | 0.898 (1.20) | 0.889 (1.80) |
| 300 | 0.878 (0.54) | 0.853 (0.62) | 0.847 (0.74) | 0.845 (0.92) | 0.816 (1.16) | 0.796 (1.78) |
| 500** | 0.845 (0.52) | 0.837 (0.54) | 0.794 (0.72) | 0.783 (0.88) | 0.769 (0.98) | 0.705 (1.72) |
| 700 | 0.827 (0.52) | 0.792 (0.54) | 0.768 (0.72) | 0.737 (0.82) | 0.734 (0.94) | 0.670 (1.66) |
| 900 | 0.809 (0.52) | 0.766 (0.48) | 0.726 (0.54) | 0.696 (0.56) | 0.649 (0.58) | 0.627 (0.60) |
| 1100 | 0.734 (0.48) | 0.729 (0.46) | 0.668 (0.50) | 0.619 (0.50) | 0.601 (0.52) | 0.576 (0.52) |

** Frame Space of Reckling's Model 23 : 500 mm

Table 5. Details of SWATH-TAGX Cross Deck Structure Model

| Breadth (Trans. BHD Spacing) | | | 26 ft | | | | |
|--------------------------------------|---------|--------------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|---------------|
| Height of Cross Deck Structure | | | 12 ft | | | | |
| Frame Spacing(Long. Girder Spacing) | | | 8 ft | | | | |
| Properties Components | Plate | | | Stiffener(T - Section) | | | |
| | t in | E psi | σ_y psi | Scantling in | E psi | σ_y in | Spacing in |
| Compression Flange (Main Deck) | 0.2813 | 29.6x 10 ⁶ | 34000 | 3.95x0.17x 3.94x0.204 | 29.6x 10 ⁶ | 34000 | 24 |
| Tension Flange (Wet Deck) | 0.3438 | 29.6x 10 ⁶ | 34000 | 7.92x0.272x 5.605x0.440 | 29.6x 10 ⁶ | 34000 | 24 |
| Web (Trans. BHD) | 0.2500 | 29.6x 10 ⁶ | 34000 | 3.95x0.17x 3.94x0.204 | 29.6x 10 ⁶ | 34000 | 24 |

Table 6. Ultimate Transverse Bending Moment Values of the SWATH-TAGX Model (Sagging Condition)

| Shear Lag(S) | No Shear Lag 1.0 | Linear Stress Distribution S=p-qy | | | | | Sikora's Distribution |
|--------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|--------------------------|
| | | 1.2-0.4y | 1.4-0.8y | 1.6-1.2y | 1.8-1.6y | 2.0-2.0y | A(m+B) |
| M_u/M_p | 0.517 | 0.502 | 0.498 | 0.469 | 0.439 | 0.408 | 0.481 |
| φ_u/φ_y | 0.90 | 0.82 | 0.82 | 0.80 | 0.86 | 1.06 | 0.99 |
| $\frac{(M_u)_{S.L.}}{(M_u)_{N.S.L}}$ | 1.0 | 0.97 | 0.96 | 0.91 | 0.85 | 0.79 | 0.93 |

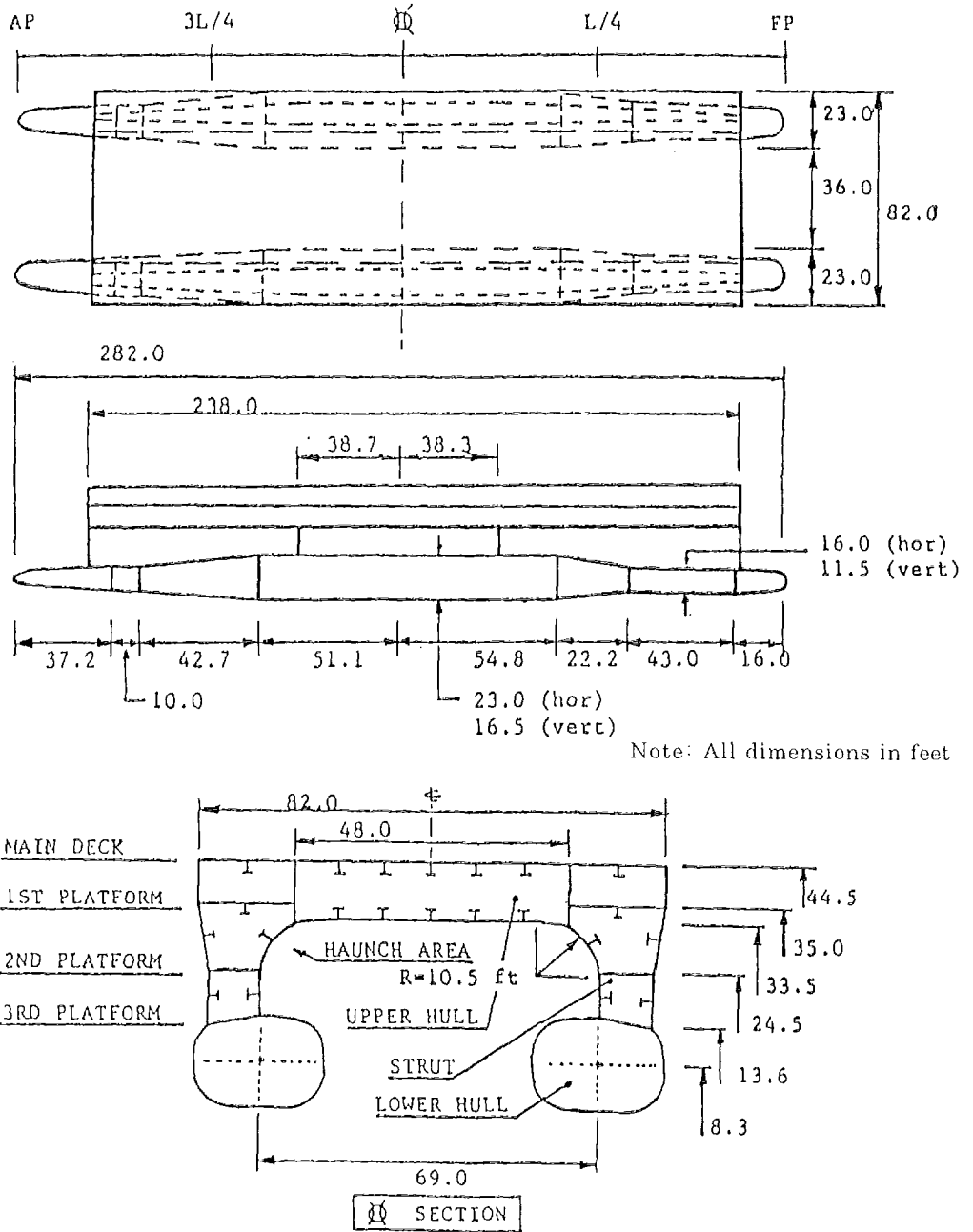


Fig. 1. Geometry and Principal Dimensions for the SWATH-TAGX

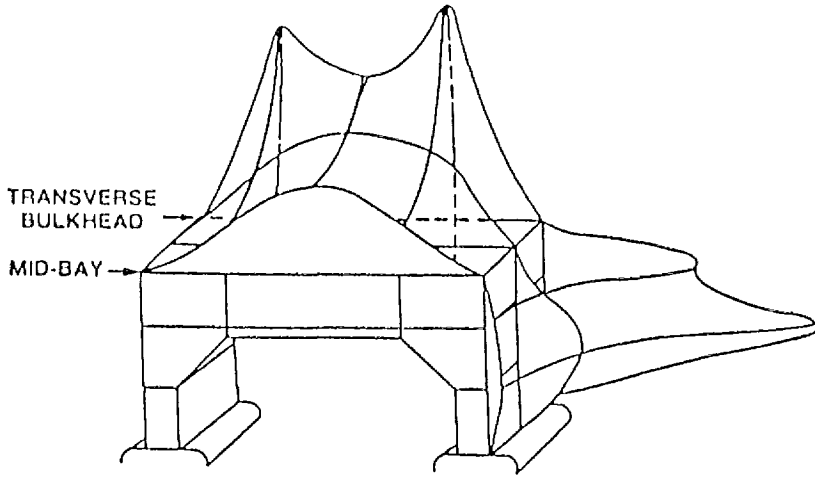


Fig. 2. Transverse Stress Distribution

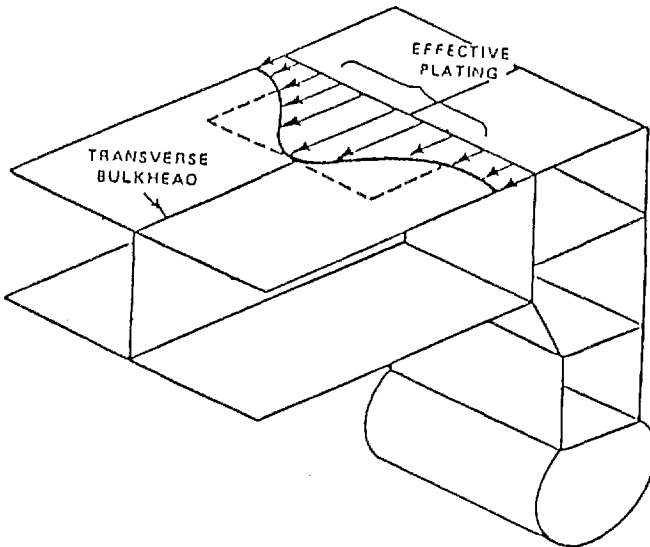


Fig. 3. Transverse Stress Profile due to Shear Lag on Main Deck at the Region of Intersection of Main Deck and Long. BHD

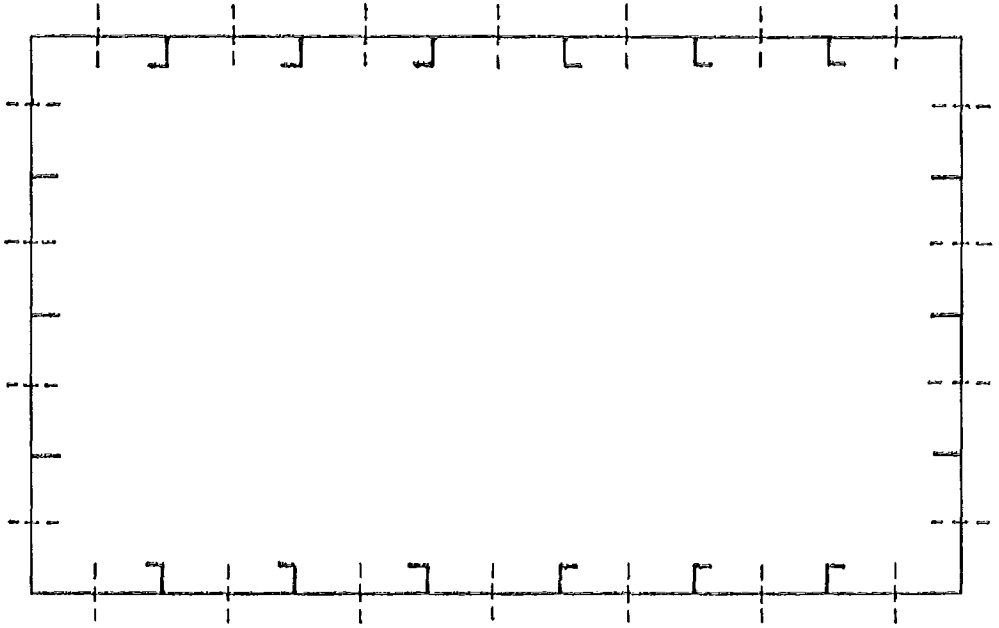


Fig. 4. Discretization of Model 23 Tested by Reckling

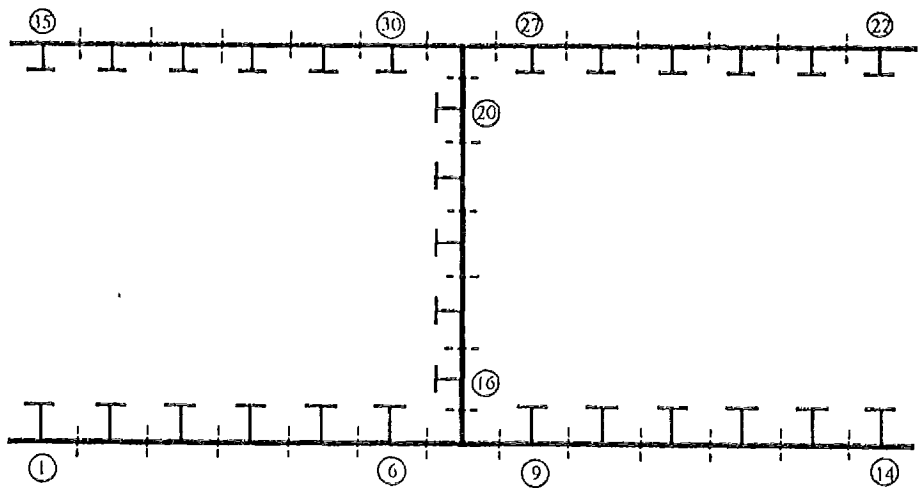


Fig. 5. Discretization of SWATH-TAGX Transverse Bending Strength Model

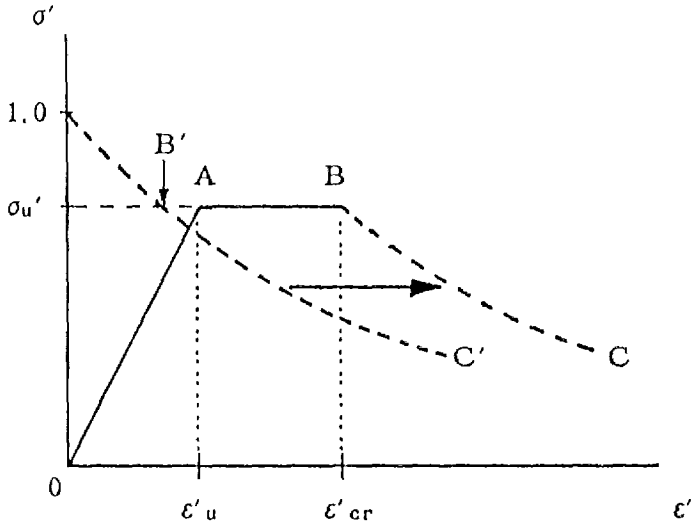


Fig. 6. Postulated Load-end Shortening Curve

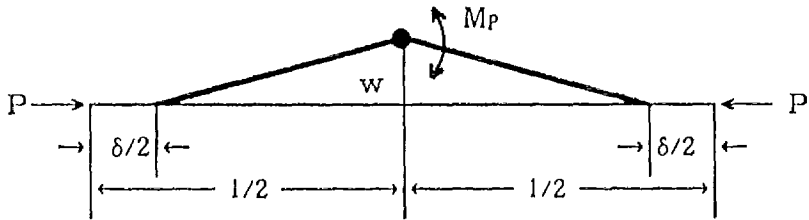


Fig. 7. Concept of Plastic Hinge Mechanism

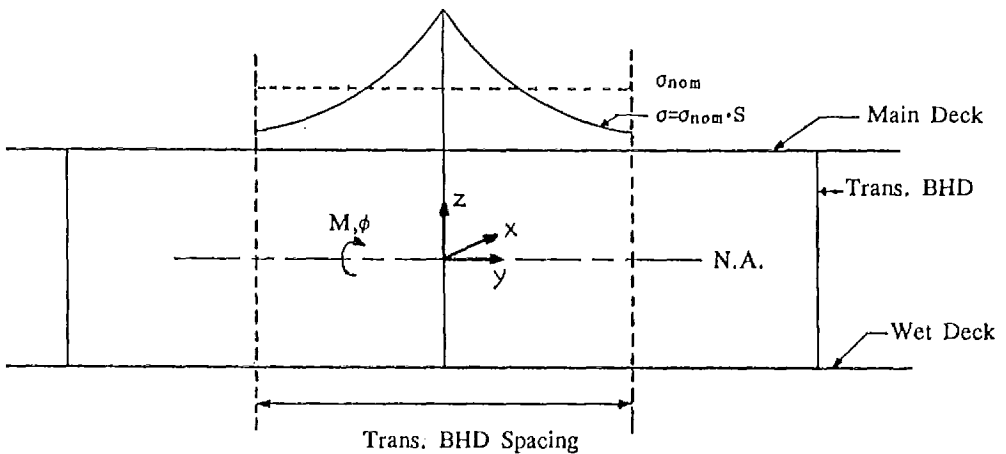


Fig. 8. Modelling for the Ultimate Trans. Bending Analysis and Coordinate System

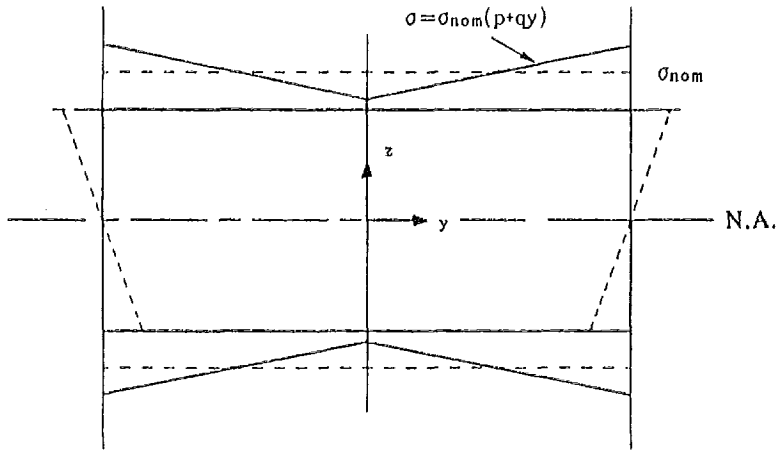


Fig. 9. Assumption for the Stress Distribution in the Box Girder Section