

(9) 新しい形鋼を用いた合成床版橋の構造特性並びに設計法

○ 佐藤 政勝 ※¹ 石 渡 正 夫 ※²

1. まえがき

圧縮応力を主としてコンクリートで、引張応力を鋼材で分担させた鋼コンクリート合成構造は、材料の特性を活かした合理的な構造物であり、従来から土木、建築分野で用いられているが、近年、騒音、振動、腐食対策や維持管理の容易さが再認識されて共に、その適用分野の拡大や応用技術の発展が最も期待されている。そこで、筆者らはコンクリート複合用鋼材の開発の一環として、その上下フランジ外面に横ふし突起を有する突起付H形鋼を開発し、Fig.1に示すように、この新H形鋼のウェブ中心線で切断した突起付T形鋼（Deformed Flange T-shapes、DFTと略称）を底鋼板に溶接した閉断面鋼箱桁に膨張コンクリートを充填した新形式合成床版橋を実用化した。

新形式合成床版橋では、上フランジの横ふし突起がずれ止めの役割を果たすためスタッドを不用とし、また、底鋼板は永久型枠にもなるためコンクリート打設施工が省力化され、工期も著しく短縮できるほか従来の橋梁形式に比べて、その桁高比を小さくすることができるなどの特長を兼備しているが、本橋のような合成床版橋は全く新しい形式の橋梁であり、設計・施工指針が十分とは言えない。

ここでは、等分布線荷重載荷による曲げ破壊実験並びに集中荷重の繰返し載荷による高サイクル疲労実験を実施し、終局時における鋼桁部と床版コンクリートの一体性やその耐荷力並びに弾性域における床版構造性を明らかにし、合成床版橋に対して提案した本設計計算方式の妥当性について確認したうえで、合成床版橋の設計指針を明らかにし、この指針に基づいた道路橋設計例を示した。

2. 本橋の特長

(1) フランジ上面の横ふし突起によって、コンクリートと鋼床版の一体化を図るため、スタッドなどのずれ止めを用いる必要がない。このため、上フランジ面からコンクリート上縁までのコンクリートかぶりを薄くすることができる。

(2) 膨張コンクリートを全充填するため、床版の曲げ剛性が高く、活荷重によるたわみが小さい。

(3) 底鋼板を型枠として使用でき、鋼桁本体が十分な鋼性を有しており、コンクリート打設時における型枠および支保工を必要とせず、経済的である。

(4) 鋼桁の架設、コンクリートの打設施

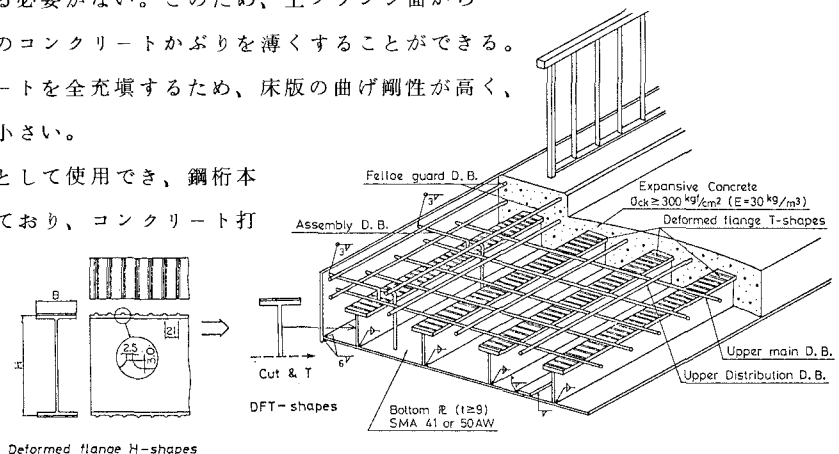


Fig.1 Built-up Process of Composite Slab Bridge With DFT

※¹ 川崎製鉄㈱・構造技術研究所・主任研究員、 ※² 同・土木技術部・主査

工が簡易でかつ、安全に作業ができ、
工期も著しく短縮できる。

(5) 本橋の支間に対する桁高比は、
Fig.2に示すように、支間10~24mの
道路橋では1/30以下であって、従来の
橋梁形式の桁高比より著しく低い。

(6) 耐候性鋼板 (SMA 50W)
を用いることにより再塗装などの維持管
理費を低減できる。

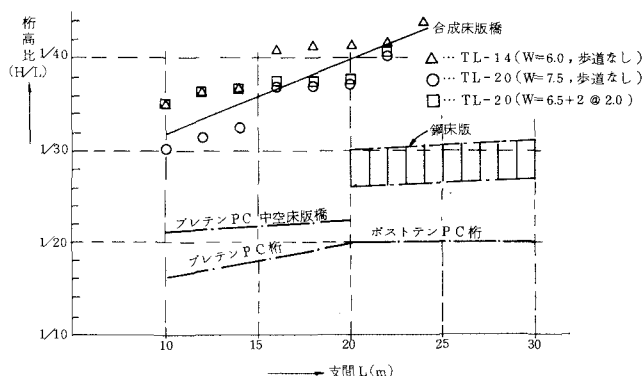


Fig.2 Relation between H/L and Span Length(L)

3. 構造設計計算法と終局耐力算定法

3.1 断面応力および水平せん断応力 (付着応力) の計算

鋼材のコンクリートとの付着が十分に得られ、終局時においても両者が一体であれば、一般には、
コンクリートの引張応力を無視し、圧縮コンクリートを弾性係数の比 n を用いて、鋼と等値な断面に
置き換えた換算断面方式に基づいて合成部材の応力は求められる。

断面一次モーメントの均り合う面が中立軸であり、
コンクリート上縁から中立軸までの距離 X は、

$$\frac{B \cdot X^2}{2n} + A_s (X - g_s) = 0 \quad \text{から} \quad (1)$$

$$X = \frac{n \cdot A_s}{B} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot B \cdot g_s}{n \cdot A_s}} \right) \quad (2)$$

から求められる。

ここで、

B : 主桁 (突起付T形鋼) の間隔 (cm)

A_s : 鋼桁部の断面積 (cm^2)

g_s : コンクリート上縁から鋼桁部の重心位置までの
距離 (cm)

n : 鋼のコンクリートに対する弾性係数比

次に、鋼に換算した合成床版の中立軸に関する断面
二次モーメントは次式で与えられる。

$$I_i = \frac{B \cdot X^3}{3n} + I_s + A_s (g_s - X)^2 \quad (3)$$

また、曲げモーメント M_ℓ を受ける合成床版の応力度は次式で計算できる。

$$\sigma_c = -\frac{M_\ell}{n \cdot I_i} X, \quad \sigma_{sl} = \frac{M_\ell}{I_i} y_{sl} \quad (4)$$

ここで、 σ_c 、 σ_{sl} はそれぞれコンクリート上縁応力および底鋼板下面の応力である。

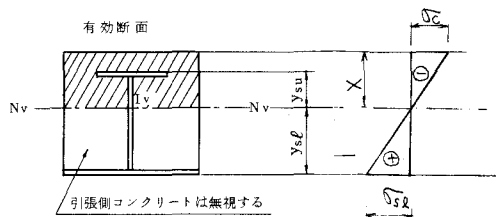


Fig.3 Symbols in working stress design

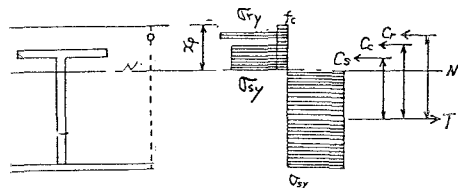


Fig.4 Stress Diagrams in Ultimate Strength for Composite Slab Bridge

上フランジ部の突起によって水平せん断力を伝達するものとする、上フランジ突起部に生じるせん断応力（または、付着応力） τ_d は次式で与えられる。

$$\tau_d = \frac{Q_c}{I_i \cdot b_f} \cdot S_d \quad (5)$$

ここで、 Q_c は鋼に換算したコンクリート圧縮側の断面一次モーメント、 b_f は上フランジ幅、 S_d は作用せん断力である。

3. 2 終局耐力の算定式

仮定および記号

- (i) 鋼材とコンクリートの応力分布を長方形とし、コンクリートの強度を f_c 、鉄筋及び鋼材の降伏点をそれぞれ σ_{ry} 、 σ_{sy} とする。
- (ii) コンクリートの引張抵抗を無視する。
- (iii) コンクリート断面積より鋼材断面積を控除しない。
- (iv) コンクリート圧縮縁から中立軸までの距離を X_p 、終局曲げモーメントを M_u とする。
- (v) f_c に設計基準強度 σ_{ck} の 85%、 σ_{ry} 及び σ_{sy} にはそれぞれ規格降伏点を用いた計算値を基本耐荷力 P_{u1} とし、 f_c に圧縮強度 σ_{ck} の 85%、 σ_{ry} 及び σ_{sy} に引張試験による降伏点を用いた計算値を最大耐荷力 P_{u2} とする。

X_p 及び M_u の算定式

X_p は次式の軸方向における力の釣り合いから求めることができ

$$\sum A_i \cdot \sigma_i = 0 \quad (6)$$

X_p が求まると、 M_u は中立軸周りの抵抗曲げモーメントとして次式で表わされる。

$$M_u = \sum A_i \cdot \sigma_i \cdot x_i \quad (7)$$

ここで、 x_i は中立軸から各部材断面積 A_i の重心位置までの距離である。

載荷荷重に対する最大抵抗曲げモーメント M_{uc} は、 M_u から自重による曲げモーメント M_d を差引き修正した値であり、支承位置から載荷点までの距離を L_p とすれば、最大耐力 P_{uc} は次式で与えられる。

$$P_u = \frac{2M_u}{L_p} \text{ or } P_{uc} = \frac{2M_{uc}}{L_p} \quad (8)$$

フランジ突起部に必要な最大付着応力 τ_{bu} は原理的に式 (5) と同じである。ただし、式 (5) において Q_c に相当する量がコンクリート圧縮力であり、 I_i に相当するが、 $\sum A_i \cdot \sigma_i \cdot x_i$ 即ち M_u である。

$$\tau_{bu} = \frac{B \cdot X_p \cdot f_c}{M_u \cdot b_f} \cdot S_u \quad (9)$$

中央対称 2 点載荷の合成梁における τ_{bu} は次式で与えられる。

$$\tau_{bu} = \frac{B \cdot X_p \cdot f_c}{M_u \cdot b_f} \cdot \frac{P_u}{2} = \frac{B \cdot X_p \cdot f_c}{L_p \cdot b_f} \quad (10)$$

4・合成床版橋の載荷実験※1

弾性域における床版構造特性および終局時における両者の一体性及耐荷力を検証する目的で、静的曲げ破壊実験を実施した(載荷実験Ⅰ)。次に、繰返し載荷荷重下における合成床版の疲労特性を調査する目的で、新たに合成床版供試体を製作し、高サイクル疲労試験並びに静的曲げ破壊実験を実施した(載荷実験Ⅱ)。

4・1 供試体

載荷実験Ⅰの合成床版橋供試体の断面形状は、Fig.5に示すように、板厚12mmの底鋼板に突起付T形鋼 $199 \times 248 \times 9 \times 14$ を40mm間隔で縦方向に溶接し、上フランジの中間にD13異形鉄筋を配置し、その版厚31mmとした。Fig.6に示すように、載荷実験Ⅱの合成床版橋では、床版厚の薄肉化、経済性を図るため、その版厚を21mmに、底鋼板の厚さを8mmとした。

両供試体とも、粗骨材の最大寸法は25mm、水セメント比は47%とし、その呼び強度が300 kgf/cm^2 および350 kgf/cm^2 のレディー・ミクスコンクリートをそれぞれ載荷実験Ⅰの供試体および載荷実験Ⅱの供試体に使用した。なお、乾燥収縮によるコンクリートのひび割れ発生の防止のため30 kg/m^3 の膨張性セメント混和材(デンカCSA#20)を外割で添加した。

4・2 実験の結果および考察

載荷実験Ⅰ

床版橋の支間中央に集中荷重24^{tf} 載荷した時の支間中央における軸方向応力の分布をFig.7に示す。ここで、実測値は直角ひずみゲージのひずみ値から求めた応力であり、計算値は等方性の版理論に基づいて作用曲げモーメントを求め、次にn値を用いてコンクリートを鋼と等値な断面に置換えに、いわゆる換算断面方式により算出したものである。実測値が計算値にほぼ等しく、かつ巾員全体に荷重が分配されており、本床版橋に対する等方性版理論および換算断面方式による設計計算法の妥当性が確認された。

次に、2点集中等分布線荷重載荷した時の支間中央断面における荷重とひずみの関係を示したFig.8から、底鋼板の計算応力が引張計容応力度14 kgf/mm^2 に相当する荷重段階 P_{ds} までは、実測値と計算値がほぼ等しいこと、コンクリートの曲げ圧縮極限ひずみが従来のRCやSRC梁のそれよりも大きい3600 μ であること、最大耐荷力がAASHTOの応力分布を用いた軸方向力の釣り合いから求めた基本耐荷力242^{tf}の1.18倍に相当する283.0^{tf}であること、終局時においても鋼桁とコンクリートが一体であることなどが確認された。

載荷実験Ⅱ

床版橋の支間中央に1点集中載荷した時の載荷直下における底鋼板の応力と繰返し回数の関係をFig.9に示す。初期載荷において荷重16^{tf}までは、コンクリートの引張応力も考慮し、全断面有効とした換算断面方式による計算値にほぼ等しいが、それ以後では、実測値はコンクリートの引張応力を無視した計算値に漸次接近する。下限を2^{tf}、上限を30^{tf}に設定した繰返し載荷に対しては、初期載荷における残留応力が若干増加するが、繰返し載荷による応力振幅の増加は観察されず、繰返し回数360万回に対してほぼ一定の値であった。

※1 参考文献 土木学会・年次学術講演概要集 第37回1-120 (PP.239)および第38回1-228 (PP.455)

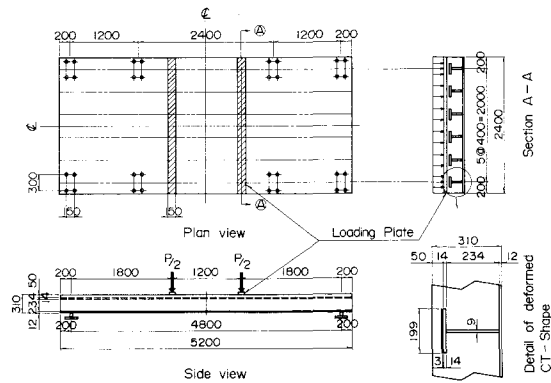


Fig. 5 Dimensions and Loading arrangement of composite slabs

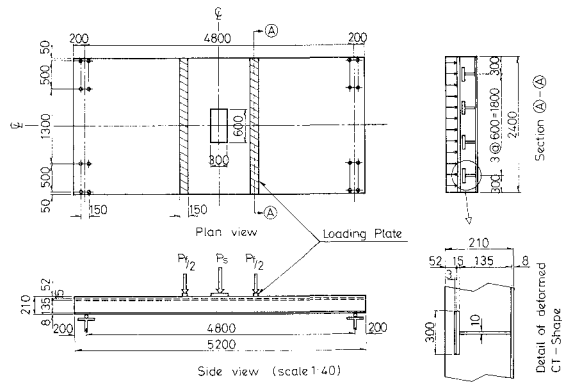


Fig. 6 Dimensions and loading arrangement of composite slab specimen

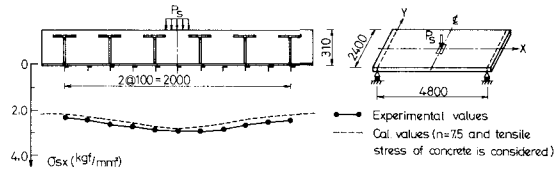


Fig. 7 Tensile stress distribution at the midspan for slab's test

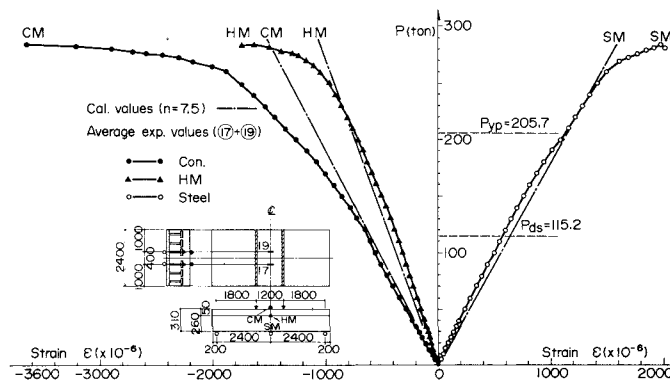


Fig. 8 Load-strain curves at midspan section for composite slab

5・設計基本要領

5・1 設計指針

荷重：活荷重による断面力の算出は、道路橋示方書（道示）Ⅲ・6.4に基づくものとする。すなわち、活荷重による支間中央における設計曲げモーメントは、歩道部分に 350 kg/m^2 の等分布荷重を、車道部分にL荷重の主載荷荷重を全幅に載荷したときの全荷重を各主桁が均等に負担するものとする。

衝撃係数*i*：道示工表2.1.7における鉄筋コンクリート橋に対する式を適用する。すなわち、

$$i = \frac{7}{20 + L} \quad (\text{L 荷重を使用する場合}) \quad i = \frac{20}{50 + L} \quad (\text{T 荷重を使用する場合})$$

主要材料：底鋼板は耐候性鋼板（SMA 41W、50W）、突起付T形鋼はSM50Yの使用を原則とし、床版コンクリートには、設計基準強度 σ_{ck} が 270 kgf/cm^2 以上とし、単位混和材量が 30 kg/m^3 の膨張コンクリートを使用する。

主桁断面の決定：断面応力計算は、道示Ⅱ・9章 合成桁に基づいて計算する。すなわち、鋼桁と床版コンクリートの死荷重は鋼桁のみで負担し、コンクリート打設以後の死荷重（合成後死荷重）並びに活荷重は完全合成とした合成断面で負担するものとして式(4)を用いて計算する。版のコンクリートのクリープによる応力の変化量および乾燥収縮による応力度はそれぞれ道示Ⅱ・式（解9.2.3）および式（解9.2.9）に基づいて計算し、応力度の照査を行う。

水平せん断応力：フランジ上面の突起に生じる水平せん断応力は、式(5)を用いて計算する。なお、フランジ上面突起部における許容付着応力度は異形鉄筋の許容付着応力と同一とする。

活荷重たわみの許容量：活荷重によるたわみの許容量 δ_a は $L/600$ 以下とする。

5・2 道路橋標準設計例

巾員構成が車道巾6m、地覆0.5mの2等橋、巾員構成が車道巾7m、地覆0.6mおよび車道巾6.5m、歩道巾2m、地覆0.4mの1等橋の3ケースについて、支間10～24m（間隔は2m毎）に対応した道路橋用合成床版橋を設計した。これらの合成床版橋における桁高比は、Fig.2に示すように、 $1/30$ 以下で、支間20m前後では $1/37$ 以下である。

6・あとがき

本合成床版橋は鋼板桁あるいはプレストレスト、コンクリート橋に比べて、その桁高を著しく低く押えることができることから、中小河川の改修に伴う架替用橋梁や跨線橋用として注目を集め、昭和57年秋に本格的な販売を開始して以来、既に40件以上の設計依頼を受けている。まだ日の浅いことから、施工が完了したものは、一丁目橋、駒形堂橋およびトンネル構造の頂板に用いた合成床版橋（写真1参照）の3橋であるが、本年度中には、あと4橋程予定している。今後は、斜橋、曲線橋などに対応した設計・施工指針を整備すると共に、適用支間の拡大を図った新しい形式の合成床版橋の開発研究を促進する予定であり、合成床版橋の発展を期待する。

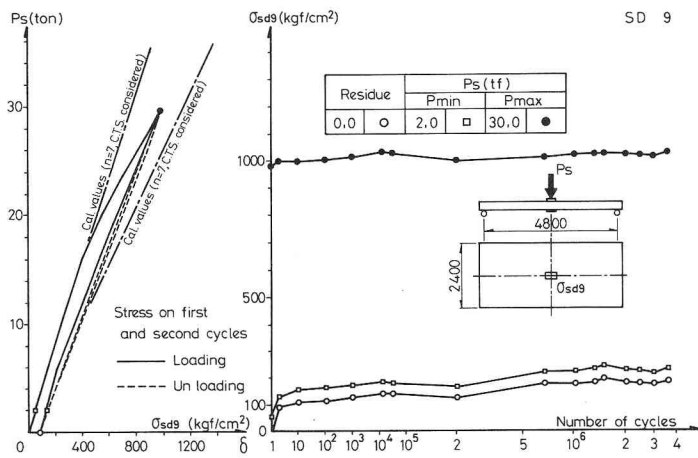


Fig. 9 Relation between number of cycles and steel stress at center span

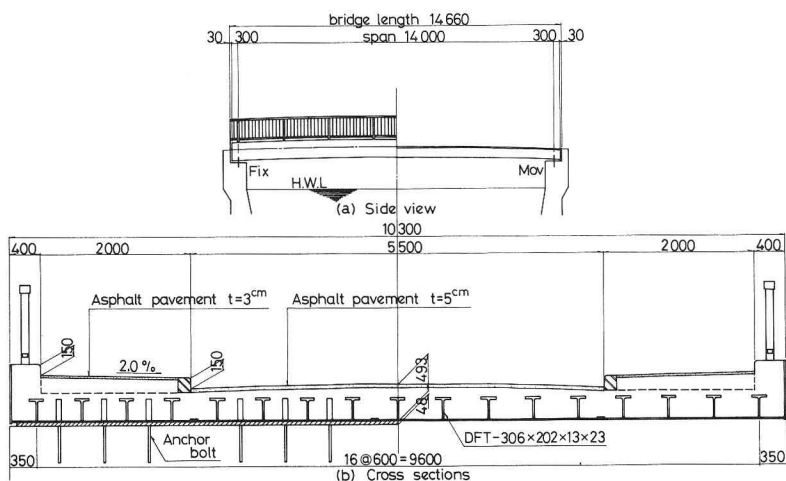
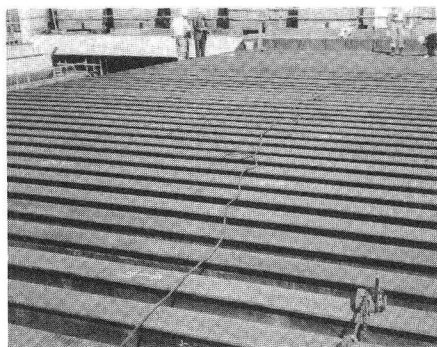
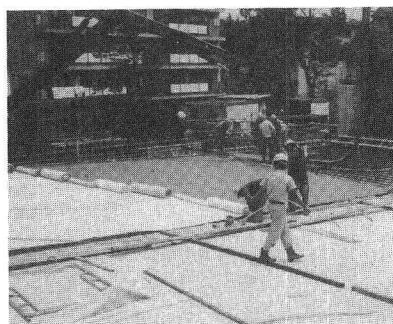


Fig.10 Dimensions of composite slab bridges with deformed flange H-shapes



鋼桁部の架設状況



床版コンクリートの打設状況

写真1 東京都計画道路放36号線トンネル頂板に用いた合成床版橋

Structural Characteristics and Design Method of Composite Slab Bridges using Deformed Flange T-shapes

by Masakatsu SATO^{*} and Masao ISHIWATA^{**}

A new form of H-shapes which has lateral protrusions on the outer surface of flanges was developed for use in steel-concrete composite structures. The composite slab bridges using deformed flange T-shapes, that made by cutting the new H-shapes at the web center line have been used for road bridges since 1982 in Japan.

The composite slab bridge can greatly lower the girder height (height/span length ratios of less than 1/30) compared with conventional bridges and, because of its simple construction, is advantageous in lowering the total construction cost including manufacture, erection, concreting and facility work.

In this paper, the mechanical behaviors of the new-type composite slabs have been confirmed which include the structural characteristics of the slab in repeated loading by conducting a high cycle fatigue test and the ultimate strength of the slab bridges by the static bending rupture test. Then the design methods for sectional stress and ultimate strength on the new slab bridges were proposed.

As a result of experiments and numerical calculations, following point were obtained.

- (1) Sectional-area stress can be obtained by a design calculation method based on the isotropic slab theory and converted sectional-area formula.
- (2) The steel girder and concrete retain a single-unit construction even at the ultimate stage owing to the lateral protrusions on the flange.
- (3) The ultimate strength can be calculated numerically from the value of maximum resistance bending moment round about the neutral axis in plastic zone.
- (4) It has been confirmed that the slab can satisfactorily withstand 3.6 million times of repeated loading of $30t_f$ each, which corresponds to three times as great as T-load for the "Highway Bridge Specification".

Currently the composite slab bridges made of deformed flange T-shapes and bottom steel plate are designed in conformity to these calculated method and constructed for practical services.

* Chief Research Engineer, Structure Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.

** Senior Engineer, Engineering Division, Kawasaki Steel Corp.