

(6) 正曲げモーメントを受ける合成2主桁無補剛腹板の弾塑性挙動に関する解析的研究

Analytical Study on Elasto-plastic Behavior of Composite Plate Girder with Large Web Aspect Ratio and Web Depth-to-thickness Ratio under Sagging Bending Moment

大垣賀津雄*, 安川義行**, 稲葉尚文**, 長井正嗣***

Kazuo Ohgaki, Yoshiyuki Yasukawa, Naofumi Inabe, Masatsugu Nagai

* 工博 川崎重工業(株) 鉄構BC 技術総括部 橋梁・水門技術部 (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島8)

** 日本道路公団 関西支社 建設第2部 構造技術課 (〒530-0003 大阪市北区堂島1-6-20 堂島アバンザ)

***工博 長岡技術科学大学教授 工学部 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

This paper describes analytical study on elasto-plastic behavior of plate girders under sagging bending moment in composite 2-I-girder bridges. Under the condition that aspect ratio of the web is 3.0, the following parameters, such as the thickness of the flange and web plates and the ratio of the upper edge stress to lower edge stress are chosen and the ultimate strength of the girder is examined. From this study, the ultimate bending strength of the composite girder is defined and the interaction formula between bending moment and shear is also presented.

Key words: elasto-plastic analysis, composite plate girder, ultimate bending strength, aspect ratio, web depth-to-thickness ratio, stiffening design

1. はじめに

近年、連続合成2主桁橋の一連の開発研究が進められ、また合理的な橋梁構造形式として認識され、関係各所で建設が活発に行われている。一方、合成構造については性能照査型設計法の提案に向けた研究が始められ、今後、設計計算例などを含めた基準の整備が行われるものと考えられる。

筆者らは、合成2主桁橋の腹板少補剛設計に関する研究を行ってきた¹⁾²⁾。その設計法を照査するため、鋼桁および床版をモデル化して、弾塑性有限変位理論によるパラメトリック解析を実施した。これは、限界状態設計法を念頭において、本構造の正曲げモーメント載荷状態、および曲げとせん断の組合せ載荷状態における終局強度、塑性領域分布などを確認するために実施した。

まず、前死荷重相当の初期応力分布を持たせてモデル化し、床版と合成させたモデルに正曲げモーメント荷重を漸増させる解析を行った。本結果により、腹板の幅厚比や前死荷重応力の存在にかかわらず、腹板がほぼ全塑性状態で終局強度を評価できることを確認した。また、フランジと腹板の幅厚比、および弾性域での応力勾配をパラメータとして、正曲げモーメント作用下における弾塑性有限変位解析を実施した。この結果により、腹板少補剛設計を適用する際の応力勾配規定を評価した。

また、正曲げモーメントとせん断力の組合せ荷重状態における弾塑性解析を実施し、曲げとせん断を受ける合成桁の終局強度相関曲線について評価を行った。

本文は、性能照査型設計法の移行に際して、合成桁橋を対象に、腹板の少補剛設計法確立のため、正曲げモーメント載荷時の終局強度評価法を提案する研究報告である。

2. 解析パラメータと解析条件

2.1 解析パラメータ

主要な解析パラメータは以下の通りである(図-1参照)。

α : アスペクト比(垂直補剛材間隔 a /腹板高さ h)

R : 幅厚比パラメータ

$$R = \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_y}{k\pi^2 E}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、
 σ_y : 降伏点
 σ_{cr} : 弾性座屈応力
 b : フランジの突出幅 (R_f の場合)
 腹板高 (R_w の場合)
 t : 板厚
 k : 座屈係数
 E : ヤング係数
 ν : ポアソン比

R_f : 上フランジの幅厚比パラメータ ((1)式で $b=(b_u-t_w)/2$)

R_f' : 拘束を考慮した上フランジの幅厚比パラメータ
 (R_f の座屈係数 $k_f=0.425$ を $k_f=2.31$ に見直し)

R_w : 腹板の幅厚比パラメータ ((1)式で $b=h$)

A_w/A_f : 腹板と上フランジの断面積比

A_w/A_f' : 拘束を考慮した腹板と上フランジの断面積比

ψ : 応力勾配(上下フランジの応力比) $\psi = \sigma_u / \sigma_l$

M_y : 初期降伏モーメント

M/M_y : 曲げモーメント荷重載荷比率

Q_u : 終局せん断力

Q/Q_u : せん断荷重載荷比率

ここに、解析パラメータに関連する記号は、以下の通りである。

$k_r = 0.425$ (フランジ3辺単純支持の座屈係数)

$k'_r = 2.31$ (フランジ3辺固定支持の座屈係数)

$k_w = 23.9$ (腹板4辺単純支持の上下フランジ対象断面の座屈係数)

上下フランジ非対称断面の純曲げに対して、

$$k_w = 23.9(0.316 + 0.34\phi) / (3 - \phi)$$

また、 $\phi = (\sigma_u - \sigma) / \sigma_u$ となるが、本解析では $\phi = 2.0$ 以上 ($\psi = 1.0$ 以下) を対象としているので、安全側にここでは23.9を採用した。

n : ヤング係数比

A_f : フランジの断面積

A_f : 拘束を考慮したフランジ等価断面積 $\sqrt{2.31 / 0.425} A_f$

A_w : 腹板の断面積

2.2 解析モデル

上述の解析パラメータを考慮に入れた計算対象モデルは、表-1に示す通りである。

(1) 純曲げ载荷パラメータ解析

同表に示す通り、CASE-1~28は純曲げ载荷のパラメータ解析であり、アスペクト比 α は3.0で一定として、フランジの幅厚比パラメータ R_f は0.15と0.60の2種類、腹板の幅厚比パラメータ R_w は1.0と1.6の2種類、腹板とフランジの断面積比 A_w/A_f は1.5と2.0の2種類、さらに応力勾配 ψ (腹板の上下縁の応力比) は-1.0、-1.4、-1.8、-2.2の4種類を

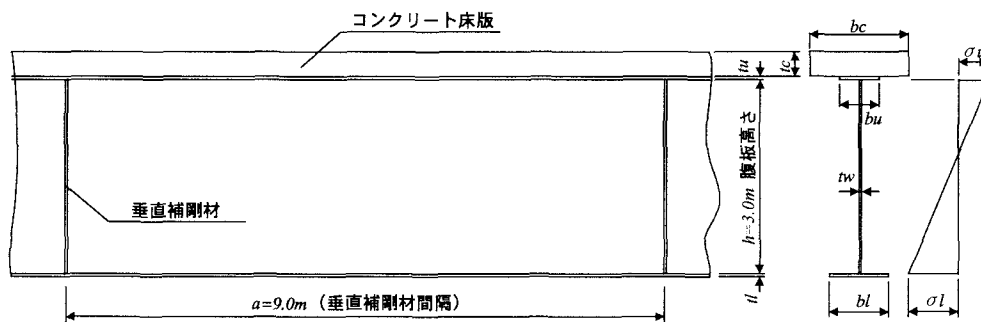


図-1 解析対象構造

表-1 解析モデル

解析モデル	α	R_f	R_w	A_w/A_f	ψ	M/M_y	Q/Q_y	備考
CASE-1	3.0	0.15	1.0	1.5	-1.8	1.0	0	純曲げ
CASE-2	3.0	0.15	1.6	1.5	-1.8	1.0	0	"
CASE-3	3.0	0.60	1.0	1.5	-1.8	1.0	0	"
CASE-4	3.0	0.60	1.6	1.5	-1.8	1.0	0	"
CASE-5	3.0	0.15	1.0	2.0	-1.8	1.0	0	"
CASE-6	3.0	0.15	1.6	2.0	-1.8	1.0	0	"
CASE-7	3.0	0.60	1.0	2.0	-1.8	1.0	0	"
CASE-8	3.0	0.60	1.6	2.0	-1.8	1.0	0	"
CASE-9	3.0	0.15	1.0	1.5	-2.2	1.0	0	"
CASE-10	3.0	0.15	1.6	1.5	-2.2	1.0	0	"
CASE-11	3.0	0.60	1.0	1.5	-2.2	1.0	0	"
CASE-12	3.0	0.60	1.6	1.5	-2.2	1.0	0	"
CASE-13	3.0	0.15	1.0	1.5	-1.4	1.0	0	"
CASE-14	3.0	0.15	1.2	1.5	-1.4	1.0	0	"
CASE-15	3.0	0.15	1.4	1.5	-1.4	1.0	0	"
CASE-16	3.0	0.15	1.6	1.5	-1.4	1.0	0	"
CASE-17	3.0	0.60	1.0	1.5	-1.4	1.0	0	"
CASE-18	3.0	0.60	1.2	1.5	-1.4	1.0	0	"
CASE-19	3.0	0.60	1.4	1.5	-1.4	1.0	0	"
CASE-20	3.0	0.60	1.6	1.5	-1.4	1.0	0	"
CASE-21	3.0	0.15	1.0	1.5	-1.0	1.0	0	"
CASE-22	3.0	0.15	1.2	1.5	-1.0	1.0	0	"
CASE-23	3.0	0.15	1.4	1.5	-1.0	1.0	0	"
CASE-24	3.0	0.15	1.6	1.5	-1.0	1.0	0	"
CASE-25	3.0	0.60	1.0	1.5	-1.0	1.0	0	"
CASE-26	3.0	0.60	1.2	1.5	-1.0	1.0	0	"
CASE-27	3.0	0.60	1.4	1.5	-1.0	1.0	0	"
CASE-28	3.0	0.60	1.6	1.5	-1.0	1.0	0	"
CASE-29	3.0	0.15	1.6	1.5	-1.4	0.8	0.4	組合せ
CASE-30	3.0	0.15	1.6	1.5	-1.4	0.5	0.7	組合せ
CASE-31	3.0	0.15	1.6	1.5	-1.4	0	1.0	純せん断

組合せたモデルである。

同表中、応力勾配 ψ は図-2 に示すように、合成前の前死荷重応力状態と、合成後の後死荷重+活荷重応力状態を重ね合わせた設計上の応力勾配である。すなわち、非合成状態での初期内力と、合成後の増加応力を重ね合わせた応力状態である。

表-1 に示した CASE-1~28 は純曲げ载荷のパラメータ解析であり、そのモデルは図-3 に示すように、対象パネル中央で対称の境界条件を設けるとともに、鉛直方向と面外方向に可動とした。また対象パネル右側には剛なダミー部材を取り付け、その床版端部の右上端部において鉛直方向を固定とし、さらに剛なダミーフレーム右端下端において鉛直上向きに漸増荷重 P を载荷することによって、対象パネルに純曲げモーメントを与え、終局状態まで荷重 P を漸増させて計算した。

(2) 曲げとせん断の組合せ载荷

一方、CASE-29~31 は曲げとせん断の組合せ载荷、もしくは純せん断载荷の解析であり、曲げとせん断の相関強度を確認するものである。アスペクト比 α は 3.0 として、フランジの幅厚比パラメータ R_f は 0.15、腹板の幅厚比パラメータ R_w は 1.6、腹板とフランジの断面積比 A_w/A_f は 1.5、さらに応力勾配 ψ は 1.4 の構造モデル (CASE-16 と一致) を

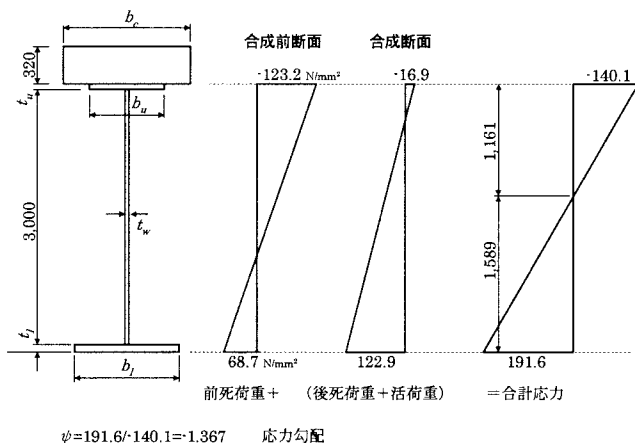


図-2 応力勾配 ψ

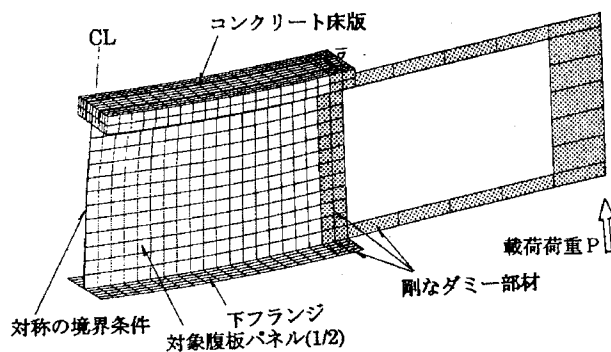


図-3 純曲げ解析モデル

対象とする。構造モデルは図-4 に示す通り対象パネルの左端鉛直ラインに剛な梁要素を入れて、A点で6自由度のうちA点回りの面内回転 θ_y のみを自由とする。また右端鉛直ラインにも剛な梁要素を入れて、B点では6自由度のうち鉛直方向のみを可動とする。

荷重入力方法については、図-5 に示す通り、A点に曲げモーメント M を载荷し、一方、B点にはせん断力 Q を载荷する。このとき、せん断力 Q を载荷することにより、パネルの右側ほど大きくなるような2次モーメントが生じるの

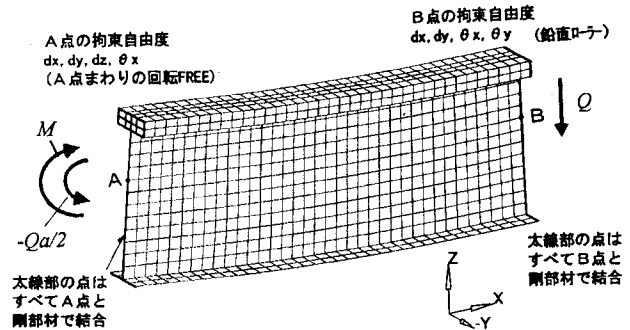
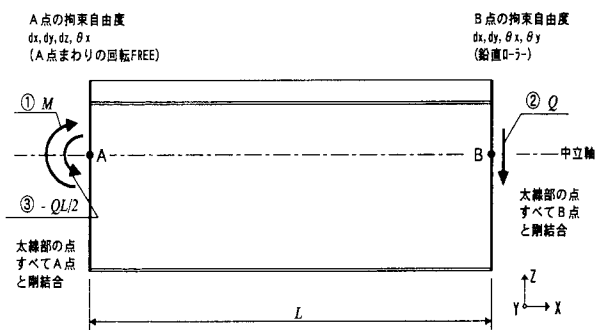
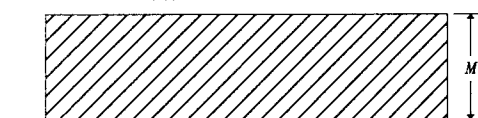


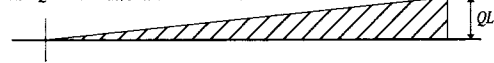
図-4 曲げとせん断の組合せ载荷モデル



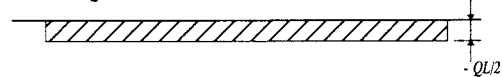
① 曲げモーメント M を A 点に载荷



② せん断力 Q を B 点に载荷 (曲げモーメント発生)



③ 調整モーメント $-QL/2$ を A 点に载荷



合計载荷曲げモーメント ①+②+③



载荷せん断力 Q

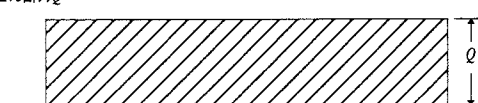


図-5 曲げとせん断の組合せ载荷荷重入力方法

で、A点にその半分をキャンセルするような調整モーメントを逆載荷する。ここで、載荷荷重は曲げ M/M_r とせん断 Q/Q_u の組合せ比率を、それぞれ表-1 に示した通りとし、その一定比率で漸増させるものとした。

フランジの降伏や腹板の座屈後は中立軸A、B点が移動すること、応力勾配が一定でなくなることが考えられるが、この解析モデルの支持条件等は、その点を考慮できていない。このような解析のモデル化については、もう少し検討の余地がある。

2.3 材料特性

この弾塑性有限変位解析は、4節点シェル要素で板厚方向に5層分割したモデルを用いた。鋼材の応力-ひずみ関係は完全弾塑性とし、Mises の降伏条件を用いた。また合成桁コンクリートの圧縮側の応力-ひずみ関係は、一般に図-6 に示すようなトリリニア型曲線でモデル化される。しかしながら、本解析において重要なパラメータである応力勾配 ψ を一定に保つため、すなわち、弾塑性の荷重ステップ解析における中立軸の変化を極力生じさせないために、図-2 に示した本解析における見かけ上の床版の材料特性を、図-7 に示すような鋼材とのヤング係数比 ($n=7$) を一定にしたバイリニア型曲線で定義した。このようなモデル化については、2.5 節において、合成桁全体をモデル化した弾塑性有限変位解析を行い、その安全性を確認している。また、コンクリートの引張側の応力-ひずみ関係は、Tension Stiffening の影響を見込むものとした。

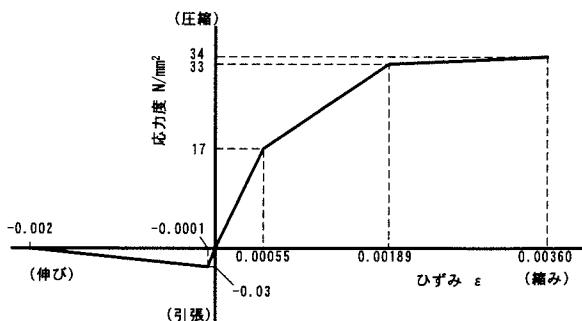


図-6 トリリニア型応力-ひずみ曲線

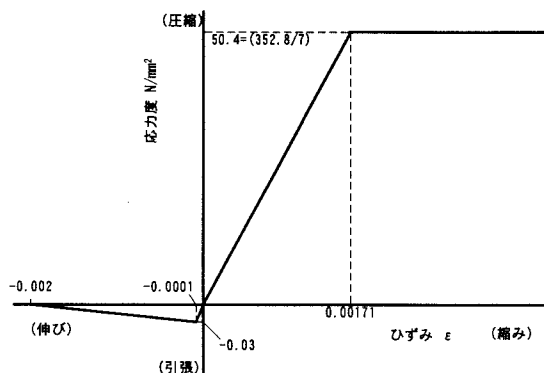


図-7 バイリニア型応力-ひずみ曲線

2.4 初期不整

別途腹板のアスペクト比 $\alpha=1$ 程度の非合成桁に対し残留応力の影響を検討した結果では、残留応力を考慮すると終局耐力が若干低下する場合や、耐力に達する変位が多少大きくなる場合があることなどを確認しているが、これらの結果から、今回対象としているような寸法諸元の鋼 I 断面では、残留応力が終局強度評価に与える影響はさほど大きくないと考えられるので、本解析において残留応力は考慮しないこととした。

また腹板の初期たわみとして、図-8 に示す通り、腹板パネル面外方向に最大 12mm ($h/250$, h : 腹板高さ) の sin 半波形を仮定した。

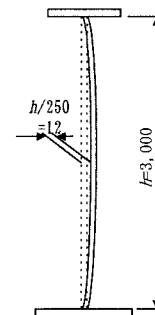


図-8 腹板の初期たわみ

2.5 合成桁の終局耐力に関する予備解析

前死荷重を想定した初期内力保有状態から、広い床版を持つ合成桁の終局耐力を計算する。合成前状態での初期内力としては、図-9 のように下フランジ断面のほうが大きい。ため、中立軸が腹板中央より低い位置にある。実橋の設計応力状態を調査し、腹板の圧縮応力が大きく、圧縮領域が広いような状態を想定し、その応力状態を断面の各要素に強制入力する。

次に、1主桁分の床版をソリッド要素でモデル化し、上フランジと剛結合する。このような合成後の断面を持つ桁に純曲げモーメントを載荷し、終局状態まで荷重を漸増させる。鋼桁材料は $\sigma_y=352.8\text{N/mm}^2$ の完全弾塑性であり、床版のコンクリート材料は、図-6 に示すようなトリリニアの応力-ひずみ関係でモデル化した。

解析モデルの寸法諸元は、表-2 に示す4ケースである。解析結果の終局荷重 P_u および弾性限界荷重 P_e を表-3 にまとめて示す。また断面計算から逆算出できる下フランジの初期降伏荷重を、同表に合わせて示す。同表に示す通り、腹板が薄いモデルである CASE-102, CASE-104 でも、下フランジが初期降伏するまで腹板が座屈して強度低下することはない。また図-10,11 に示す通り、初期降伏後もむしろ全塑性状態に近づくような挙動を示し、耐力も増加していることがわかる。

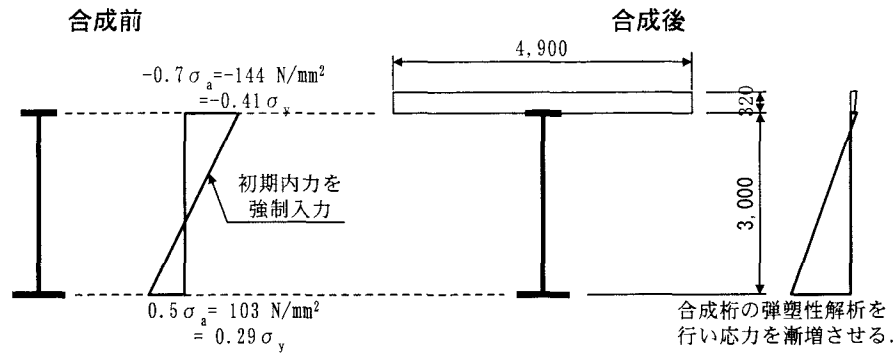


図-9 合成桁の初期内力入力方法と解析モデル

表-2 合成桁の解析モデルの寸法諸元

解析モデル	α	R_f	R_w	A_w/A_f	ψ	a mm	hw mm	b_u mm	t_u mm	b_l mm	t_l mm	t_w mm	b_c mm	t_c mm	σ_y N/mm ²
CASE-101	3.0	0.15	1.0	1.5	-1.0	9000	3000	503	45.5	1200	61.4	26.7	4900	320	352.8
CASE-102	3.0	0.15	1.6	1.5	-1.0	9000	3000	396	36.2	1200	54.2	16.7	4900	320	352.8
CASE-103	3.0	0.60	1.0	1.5	-1.0	9000	3000	993	23.1	1200	60.7	26.7	4900	320	352.8
CASE-104	3.0	0.60	1.6	1.5	-1.0	9000	3000	783	18.3	1200	53.7	16.7	4900	320	352.8

表-3 合成桁の終局強度解析結果

解析モデル	初期応力 N/mm ²	残存応力 N/mm ²	降伏荷重 Py kN	FEM弾性限界 Pe kN	FEM終局強度 Pu kN	Pe/Py	Pu/Py
CASE-101	103	250	15,562	15,435	20,531	0.99	1.32
CASE-102	103	250	12,848	12,720	16,072	0.99	1.25
CASE-103	103	250	15,161	14,680	20,404	0.97	1.35
CASE-104	103	250	12,573	12,662	15,964	1.01	1.27

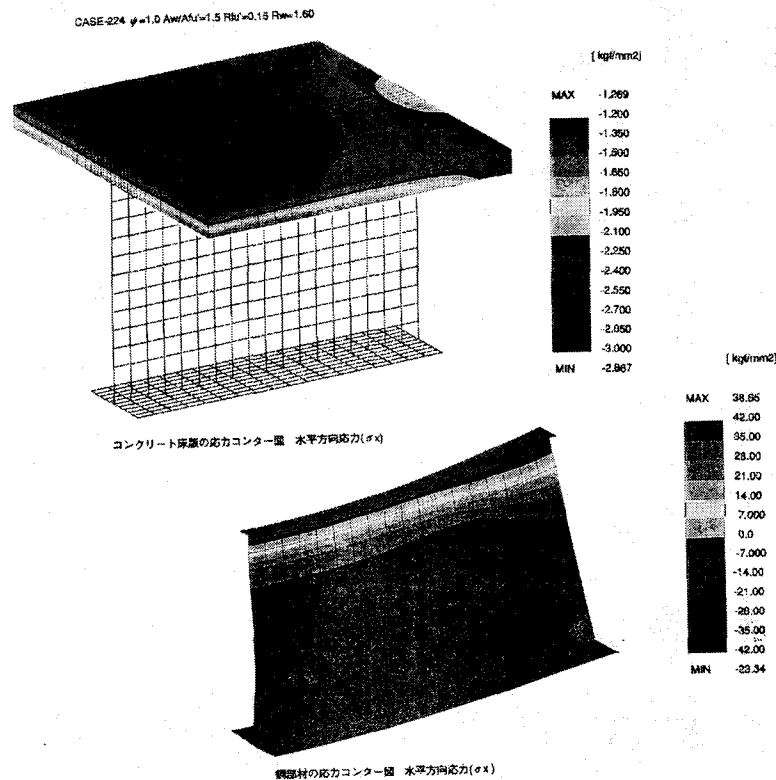


図-10 合成桁の終局応力状態

以上のことから、応力勾配 ψ （中立軸）を一定に保ったパラメータ解析を行っておけば、通常の合成桁の実態と多少異なるが、腹板が座屈するような応力状態等も安全側に評価できる。すなわち、表-1 に示したパラメータ解析を、図-7 に示すような応力ひずみ曲線を有する床版でモデル化するならば、安全側の評価を下すことができる。

3. 解析結果と考察

3.1 純曲げ载荷パラメータ解析

曲げに関するパラメータ解析結果を表-4 に示す。同表中 P_u は解析結果の終局荷重を示す。 P_u/P_y は初期降伏荷重で無次元化した終局強度である。また終局強度 P_u/P_y について、

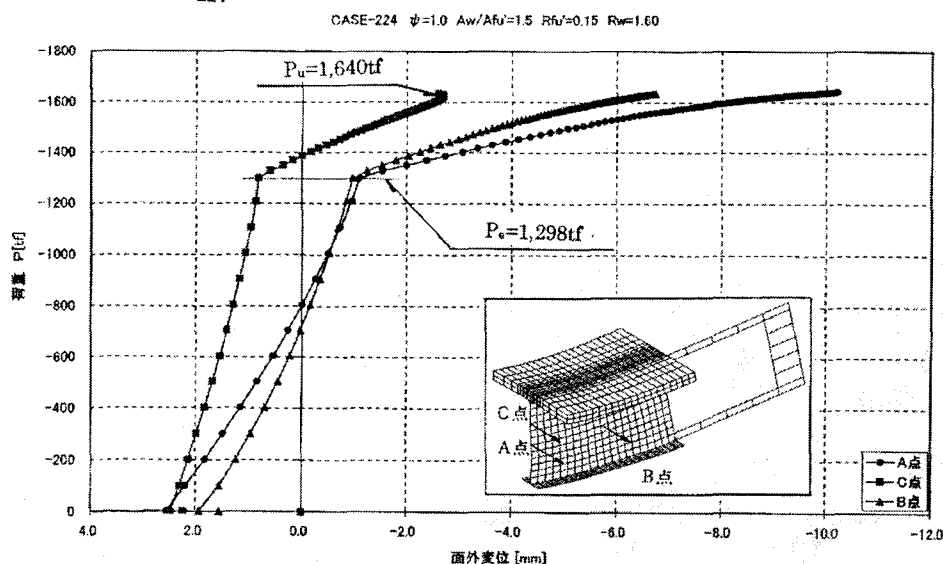


図-11 合成桁の弾塑性解析結果

表-4 曲げ強度に関するパラメータ解析結果

解析モデル	α	R'_f	R_w	A_w/A'_f	ψ	M_y kNm	P_y kN	P_u kN	M_u/M_y P_u/P_y
CASE-1	3.0	0.15	1.0	1.5	-1.8	49,892	9,976	13,201	1.31
CASE-2	3.0	0.15	1.6	1.5	-1.8	43,571	8,712	11,025	1.26
CASE-3	3.0	0.60	1.0	1.5	-1.8	48,873	9,771	13,112	1.35
CASE-4	3.0	0.60	1.6	1.5	-1.8	42,973	8,595	10,976	1.29
CASE-5	3.0	0.15	1.0	2.0	-1.8	46,138	9,232	12,377	1.33
CASE-6	3.0	0.15	1.6	2.0	-1.8	41,317	8,261	10,535	1.27
CASE-7	3.0	0.60	1.0	2.0	-1.8	45,266	9,055	12,299	1.36
CASE-8	3.0	0.60	1.6	2.0	-1.8	40,680	8,134	10,535	1.31
CASE-9	3.0	0.15	1.0	1.5	-2.2	38,828	7,762	11,358	1.45
CASE-10	3.0	0.15	1.6	1.5	-2.2	34,731	6,948	9,418	1.35
CASE-11	3.0	0.60	1.0	1.5	-2.2	37,906	7,585	11,250	1.48
CASE-12	3.0	0.60	1.6	1.5	-2.2	34,065	6,811	9,339	1.38
CASE-13	3.0	0.15	1.0	1.5	-1.4	67,208	13,446	15,709	1.17
CASE-14	3.0	0.15	1.2	1.5	-1.4	63,024	12,603	14,592	1.16
CASE-15	3.0	0.15	1.4	1.5	-1.4	60,015	12,005	13,779	1.15
CASE-16	3.0	0.15	1.6	1.5	-1.4	57,781	11,554	13,171	1.14
CASE-17	3.0	0.60	1.0	1.5	-1.4	66,032	13,210	15,641	1.20
CASE-18	3.0	0.60	1.2	1.5	-1.4	62,005	12,397	14,876	1.21
CASE-19	3.0	0.60	1.4	1.5	-1.4	59,133	11,829	13,994	1.20
CASE-20	3.0	0.60	1.6	1.5	-1.4	56,928	11,388	13,103	1.17
CASE-21	3.0	0.15	1.0	1.5	-1.0	98,578	19,718	18,747	0.96
CASE-22	3.0	0.15	1.2	1.5	-1.0	91,816	18,365	17,111	0.94
CASE-23	3.0	0.15	1.4	1.5	-1.0	86,936	17,385	15,700	0.91
CASE-24	3.0	0.15	1.6	1.5	-1.0	83,310	16,660	14,837	0.90
CASE-25	3.0	0.60	1.0	1.5	-1.0	97,079	19,414	18,738	0.99
CASE-26	3.0	0.60	1.2	1.5	-1.0	90,523	18,101	17,277	0.98
CASE-27	3.0	0.60	1.4	1.5	-1.0	85,819	17,160	15,945	0.95
CASE-28	3.0	0.60	1.6	1.5	-1.0	82,242	16,444	14,818	0.92

ψ や A_w/A_f および R_f , R_w と関連づけて考察すると以下のことがいえる。

- ① フランジと腹板の断面積比 A_w/A_f を, 1.5 から 2.0 に変化させても, 終局強度に影響を与えない。
- ② 無次元化終局強度と応力勾配 ψ は相関があり, 応力勾配が小さくなるほど, すなわち, 中立軸が上がるほど, 無次元化した終局強度は大きくなる。
- ③ 腹板の幅厚比パラメータ R_w を 1.0 から 1.6 に大きくしても, 無次元化した終局強度は1割程度の低下にとどまる。
- ④ フランジの幅厚比パラメータ R_f を変化させても, R_w が一定であれば, 無次元化した終局強度はほとんど変化しない。

上述の②で述べた通り, 無次元化終局強度と応力勾配 ψ は相関があると考えられるが, 今回解析したデータすべてをプロットすると, 図-12に示す通りとなる。同図から, 安全側にデータの下限値を押さえても, 応力勾配 ψ が1.2程度より小さければ, 終局強度 P_u/P_y は1.0を確保することができる。

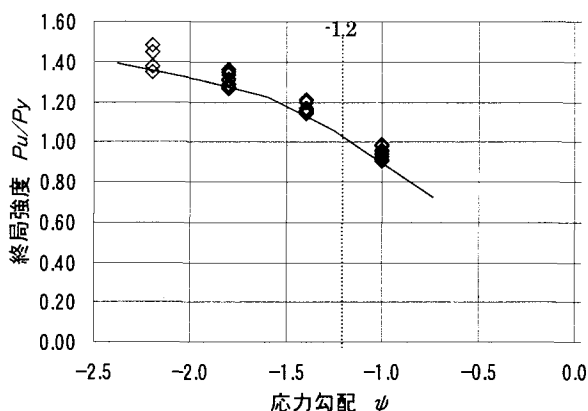


図-12 応力勾配と終局曲げ強度の関係

3.2 曲げとせん断の組合せ載荷

曲げとせん断を受ける場合の終局強度の計算結果を, 表-5にまとめて示す。CASE-29～CASE-31の構造諸元は, 純曲げの載荷ケースのCASE-16と一致させており, 曲げとせん断載荷比率を変化させている。CASE-31は純せん断の載荷ケースである。また, これらの結果について, 曲げとせん断の終局強度相関関係をプロットすると図-13に示す通りである。

同図中, 横軸は, 初期降伏モーメント M_y で無次元化した終局曲げ強度であり, 縦軸は以下のBasler^{4,5)}の算出式によるせん断強度 Q_{UB} で無次元化した終局せん断強度である。同図から, 終局強度の計算結果は, 円(2次)式を用いなくても4次式で安全側にあることがわかる。このことから, (2)式に示した曲げとせん断を受ける腹板パネルの相関強度式で, 安全性を照査することができる。

$$(1.7M/M_y)^4 + (1.7Q/Q_{UB})^4 \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

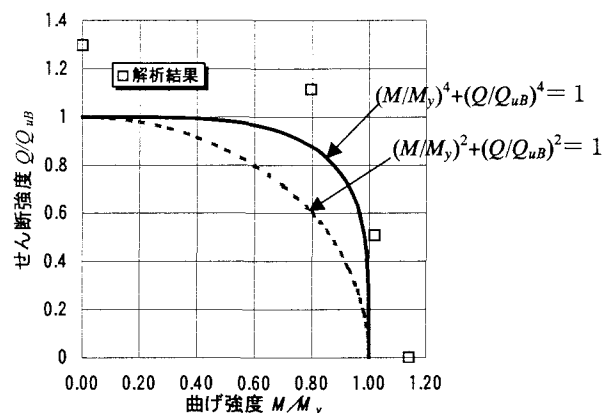


図-13 曲げとせん断を受ける合成桁の終局強度相関曲線

表-5 曲げとせん断を受ける場合の終局強度

解析モデル	M_y kNm	せん断 座屈係数 k	弾性座屈応力			終局せん断強度		
			σ_e N/mm ²	τ_c N/mm ²	τ_y N/mm ²	Q_{UB}/Q_p	τ_u N/mm ²	Q_{UB} kN
CAESE-16	57,781	5.78	5.76	33.2	203.6	0.393	80.0	4,008
CAESE-29	57,781	5.78	5.76	33.2	203.6	0.393	80.0	4,008
CAESE-30	57,781	5.78	5.76	33.2	203.6	0.393	80.0	4,008
CAESE-31	57,781	5.78	5.76	33.2	203.6	0.393	80.0	4,008

解析モデル	載荷比率		載荷荷重		終局荷重		相関評価	
	M/M_y	Q/Q_{UB}	M kNm	Q kN	M_u kNm	Q_u kN	M_u/M_y	Q_u/Q_{UB}
CASE-16	1.0	0.0	57,781	0	65,836	0	1.14	0.00
CASE-29	0.8	0.4	46,227	1,607	58,702	2,038	1.02	0.51
CASE-30	0.5	0.7	28,890	2,803	45,844	4,467	0.80	1.11
CASE-31	0.0	1.0	0	4,008	0	5,204	0.00	1.30

$$\frac{Q_{uB}}{Q_P} = \frac{\tau_{cr}^e}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1 - \frac{\tau_{cr}^e}{\tau_y}}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに,

Q_P : 全塑性せん断力, $Q_P = \tau_y \times A_w$

τ_y : 降伏せん断応力, $\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3}$

τ_{cr}^e : せん断弾性座屈強度

$$\tau_{cr}^e = k_s \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{h} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに,

h : 腹板高さ, t_w : 腹板厚

E : ヤング係数, ν : ポアソン比

α : アスペクト比, $\alpha = a/h$,

k_s : せん断応力度に対する座屈係数

$$\left. \begin{aligned} k_s &= 5.34 + 4.00(1/\alpha)^2 & : (\alpha \geq 1) \\ k_s &= 4.00 + 5.34(1/\alpha)^2 & : (\alpha \leq 1) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

4. まとめ

4.1 研究成果

以上の解析検討から得られた知見を以下に整理する。

- ① 死荷重相当の初期応力分布を有する合成桁に正曲げモーメント荷重を漸増させる解析を行った結果、腹板の幅厚比や前死荷重応力の存在にかかわらず、腹板がほぼ全塑性状態で終局強度を評価できることが明らかとなった。
- ② 合成桁のフランジと腹板の幅厚比および応力勾配をパラメータとして、正曲げモーメント作用下における弾塑性有限変位解析を実施した。この結果、応力勾配 ψ が 1.2 程度より小さければ、下フランジの応力は降伏点に達することができる。
- ③ 正曲げモーメントとせん断力の組合せ荷重状態における弾塑性解析を実施し、曲げとせん断を受ける合成桁の終局相関強度曲線について評価し、(2)式で安全であることを確認した。

4.2 今後の課題

本研究は合成桁腹板の少補剛設計に関する解析的研究を

紹介したものであり、有益な情報を与えている。しかしながら、以下の点に関しては、今後の課題として更なる研究を行いたいと考えている。

- ① 本研究では終局状態として、下フランジの降伏点を採用しているが、今後、もう少し塑性状態を考慮した終局限界強度を定義するなどの研究を行う必要がある。
- ② 常時荷重に対する作用曲げモーメントについては、合成前と合成後における各荷重に対するフランジの発生曲げ応力度を重ね合わせた値から評価することとしている。このように設計では応力度を基準とした照査になるので、煩雑であると思われる。今後、より簡易で理解しやすい手法を確立することが望まれる。
- ③ せん断の限界強度については、Basler^{4),5)}の算出式(3)を基準としているが、アスペクト比 α が小さいときに危険側になるケースがあるなどの点で、今後、研究の余地がある。本研究では α が 3.0 の無補剛腹板を対象として研究していることや、正曲げモーメントが小さくせん断力が大きい場合を対象としていないこと等に注意する必要がある。

本文が性能照査型設計法の移行に際して、合成桁橋腹板の少補剛設計法確立のため、その限界状態設計上の参考資料になれば幸いである。本研究を進めるに際し、大阪大学西村宣男教授にご指導ご助言頂きました。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 大垣賀津雄, 川口喜史, 磯江暁, 高橋昭一, 川尻克利, 長井正嗣: 合成 2 主桁橋の鋼主桁補剛設計に関する実験的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.44A, pp.1229~1239, 1998.3
- 2) 八部順一, 磯江暁, 大垣賀津雄, 久保拓也, 作川孝一, 川口喜史: 連続合成桁腹板の少補剛設計法に関する研究, 川崎重工技報 137 号, pp.84~89, 1998.4
- 3) 土木学会鋼構造委員会: 座屈設計ガイドライン, 土木学会鋼構造シリーズ 2, 1987.10
- 4) Basler, K.: Strength of Plate Girders in Shear, Jour. of Structural Division, ASCE, Vol.87, No. ST7, Oct., 1961, pp.151~180
- 5) Basler, K.: Strength of Plate Girders under Combined Bending and Shearing, Jour. of Structural Division, ASCE, Vol.87, No. ST7, Oct., 1961, pp.181~197