

SWスラブ橋の開発的研究

Developmental study of steel reinforced wooden slab bridge

北海道大学院工学研究科
北海道土木設計(株)
(株)エーテック
(株)シビル設計コンサルタント

名誉員 渡辺 昇 (Noboru Watanabe)
正員 青木雅人 (Masato Aoki)
正員 和田隆宏 (Takahiro Wada)
正員 渡辺 治 (Osamu Watanabe)

1. まえがき

木製の床版の上面と下面を鋼板や鉄筋で補強した床版を「SWスラブ」(Steel reinforced Wooden slab) または「鋼補剛木床版」という。

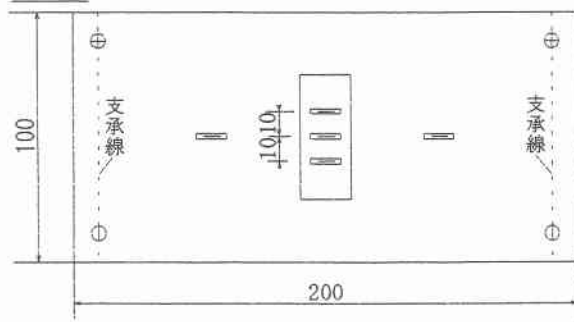
その試験体3体を製作し、北海道大学開発科学実験所において、その載荷実験を行い、良好な結果を得たので報告する。また、その成果を踏まえて、山口県美東町に「SWスラブ橋」の実橋「ほうべん橋」が、平成13年春に、世界で初めて竣工したので報告する。

2. SWスラブの室内載荷実験について

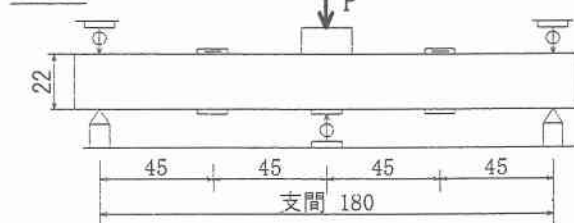
2.1 試験体と実験方法

試験体は図1に示すような寸法で、木床版の材料は、北海道産のカラマツのLVL (Laminated Veneer Lumber) である。荷重Pを載荷し、支間中央の鉛直たわみはダイヤルゲージで、各点のひずみはストレンゲージで測定した。支点位置にもダイヤルゲージを設置し、支点沈下の補正を行った。3体の試験体の横断面図を図2に示す。試験体No. 1は鋼で補強しない木床版であり、試験体No. 2は上下面をD10の異形鉄筋で補強したものであり、試験体No. 3は上下面を4mmの鋼板で補強したものである。木床版と鋼材とはエポキシ樹脂接着材で工場接着した。

平面図

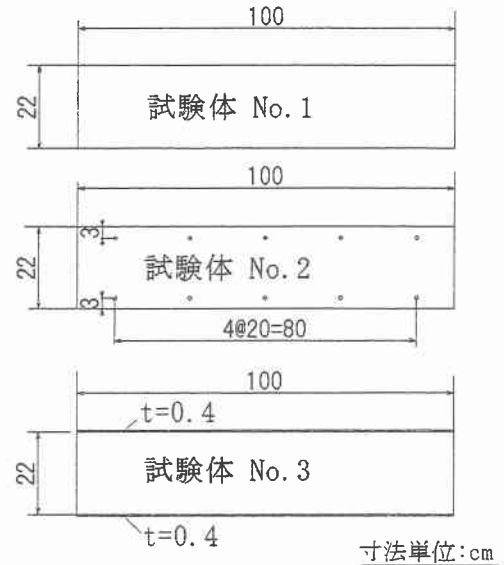


側面図



寸法単位:cm

図1: 測定ゲージと載荷実験方法



寸法単位:cm

図2: 3体の試験体の横断面図

2.2 理論解析

荷重Pのときの曲げモーメント図、せん断力図、たわみ図が図3である。

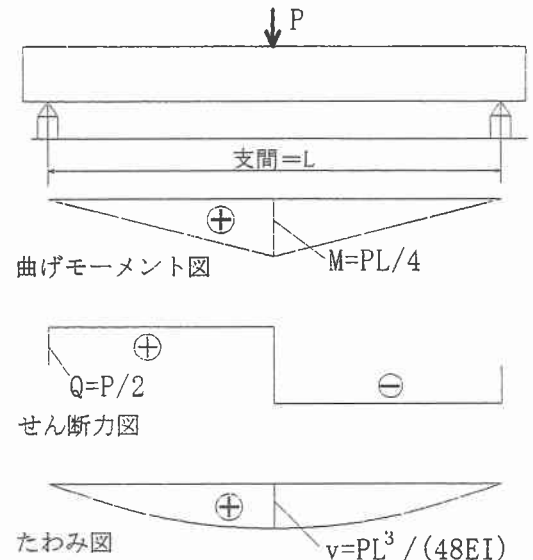


図3: 断面力図とたわみ図

カラマツのLVLのヤング係数: $E_W = 1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

鋼のヤング係数: $E_S = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

$n = E_S / E_W = 21$ として、以降、理論解析する。

(1) 試験体No. 1の解析

断面 2 次モーメント : $I = 100 \times 22^3 / 12 = 0.89 \times 10^5 \text{ cm}^4$

曲げ剛性 : $E_W I = 1 \times 10^5 \times 0.89 \times 10^5 = 0.89 \times 10^{10} \text{ kgcm}^2$

図 3 において、 $P = 10 \text{ トン} = 1 \times 10^4 \text{ kg}$ として解析する。

支間中央の曲げモーメント :

$$M = 1 \times 10^4 \times 180 / 4 = 4.5 \times 10^5 \text{ kgcm}$$

支点から支間中央への範囲のせん断力 :

$$Q = 1 \times 10^4 / 2 = 5 \times 10^3 \text{ kg}$$

支間中央のたわみ :

$$v = 1 \times 10^4 \times 180^3 / (48 \times 0.89 \times 10^{10}) = 0.14 \text{ cm} = 1.4 \text{ mm}$$

支間中央の下フランジのLVLの引張ひずみ :

$$\epsilon_W = 4.5 \times 10^5 \times 11 / 0.89 \times 10^{10} = 556 \times 10^{-6}$$

支間中央の下フランジのLVLの引張応力度 :

$$\sigma_W = \epsilon_W E_W = 556 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^5 = 56 \text{ kg/cm}^2$$

中立軸についての断面 1 次モーメント :

$$S = 100 \times 11 \times 5.5 = 6050 \text{ cm}^3$$

中立軸のLVLのせん断応力度 :

$$\tau_W = QS / Ib = 5 \times 10^3 \times 6050 / (0.89 \times 10^5 \times 100) = 3.4 \text{ kg/cm}^2$$

(2) 試験体No. 2の解析

断面 2 次モーメント :

$$I = 100 \times 22^3 / 12 + 0.71 \times 5 \times 8^2 \times 2 \times (21 - 1) = 0.98 \times 10^5 \text{ cm}^4$$

曲げ剛性 : $E_W I = 1 \times 10^5 \times 0.98 \times 10^5 = 0.98 \times 10^{10} \text{ kgcm}^2$

図 3 において、 $P = 10 \text{ トン} = 1 \times 10^4 \text{ kg}$ として解析する。

支間中央の曲げモーメント :

$$M = 1 \times 10^4 \times 180 / 4 = 4.5 \times 10^5 \text{ kgcm}$$

支点から支間中央への範囲のせん断力 :

$$Q = 1 \times 10^4 / 2 = 5 \times 10^3 \text{ kg}$$

支間中央のたわみ :

$$v = 1 \times 10^4 \times 180^3 / (48 \times 0.98 \times 10^{10}) = 0.12 \text{ cm} = 1.2 \text{ mm}$$

支間中央の下フランジのLVLの引張ひずみ :

$$\epsilon_W = 4.5 \times 10^5 \times 11 / 0.98 \times 10^{10} = 505 \times 10^{-6}$$

支間中央の下フランジのLVLの引張応力度 :

$$\sigma_W = \epsilon_W E_W = 505 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^5 = 51 \text{ kg/cm}^2$$

中立軸についての断面 1 次モーメント :

$$S = 100 \times 11 \times 5.5 + 0.71 \times 5 \times 8 \times (21 - 1) = 6618 \text{ cm}^3$$

中立軸のLVLのせん断応力度 :

$$\tau_W = QS / Ib = 5 \times 10^3 \times 6618 / (0.98 \times 10^5 \times 100) = 3.4 \text{ kg/cm}^2$$

(3) 試験体No. 3の解析

断面 2 次モーメント :

$$I = 100 \times 22^3 / 12 + 100 \times 0.4 \times 11.2^2 \times 2 \times 21 = 3.0 \times 10^5 \text{ cm}^4$$

曲げ剛性 : $E_W I = 1 \times 10^5 \times 3.0 \times 10^5 = 3.0 \times 10^{10} \text{ kgcm}^2$

図 3 において、 $P = 10 \text{ トン} = 1 \times 10^4 \text{ kg}$ として解析する。

支間中央の曲げモーメント :

$$M = 1 \times 10^4 \times 180 / 4 = 4.5 \times 10^5 \text{ kgcm}$$

支点から支間中央への範囲のせん断力 :

$$Q = 1 \times 10^4 / 2 = 5 \times 10^3 \text{ kg}$$

支間中央のたわみ :

$$v = 1 \times 10^4 \times 180^3 / (48 \times 3.0 \times 10^{10}) = 0.04 \text{ cm} = 0.4 \text{ mm}$$

支間中央の下フランジのLVLの引張ひずみ :

$$\epsilon_W = 4.5 \times 10^5 \times 11 / 3.0 \times 10^{10} = 165 \times 10^{-6}$$

支間中央の下フランジの鋼板の引張ひずみ :

$$\epsilon_S = 4.5 \times 10^5 \times 11.4 / 3.0 \times 10^{10} = 171 \times 10^{-6}$$

支間中央の下フランジのLVLの引張応力度 :

$$\sigma_W = \epsilon_W E_W = 165 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^5 = 17 \text{ kg/cm}^2$$

支間中央の下フランジの鋼板の引張応力度 :

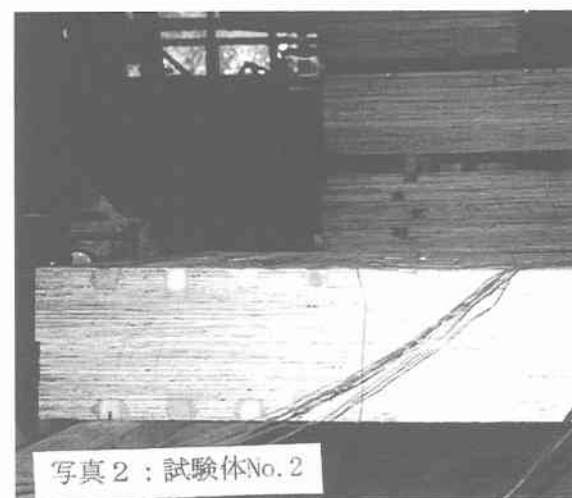
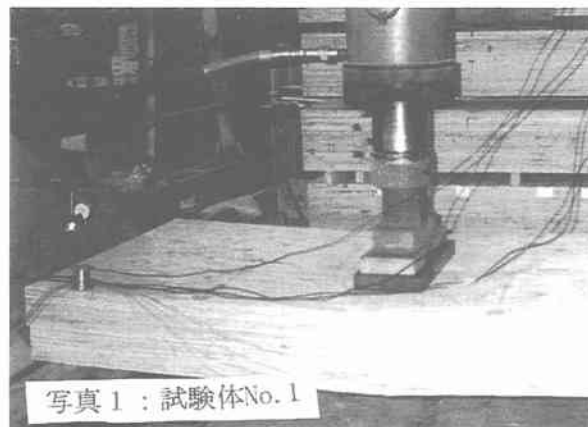
$$\sigma_S = \epsilon_S E_S = 171 \times 10^{-6} \times 2.1 \times 10^6 = 359 \text{ kg/cm}^2$$

中立軸についての断面 1 次モーメント :

$$S = 100 \times 11 \times 5.5 + 100 \times 0.4 \times 11.2 \times 21 = 15458 \text{ cm}^3$$

中立軸のLVLのせん断応力度 :

$$\tau_W = QS / Ib = 5 \times 10^3 \times 15458 / (3.0 \times 10^5 \times 100) = 2.6 \text{ kg/cm}^2$$



2.3 荷重実験の考察

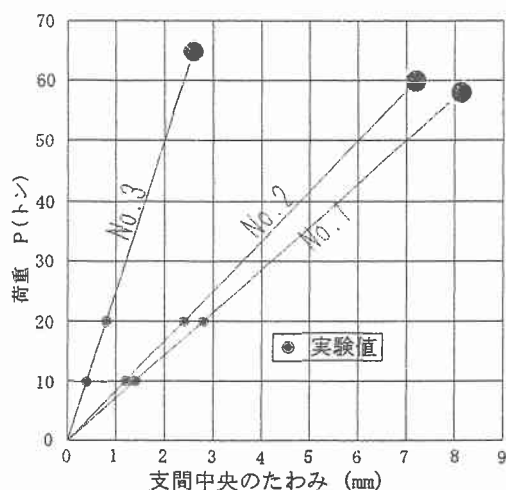


図4：荷重-たわみ図

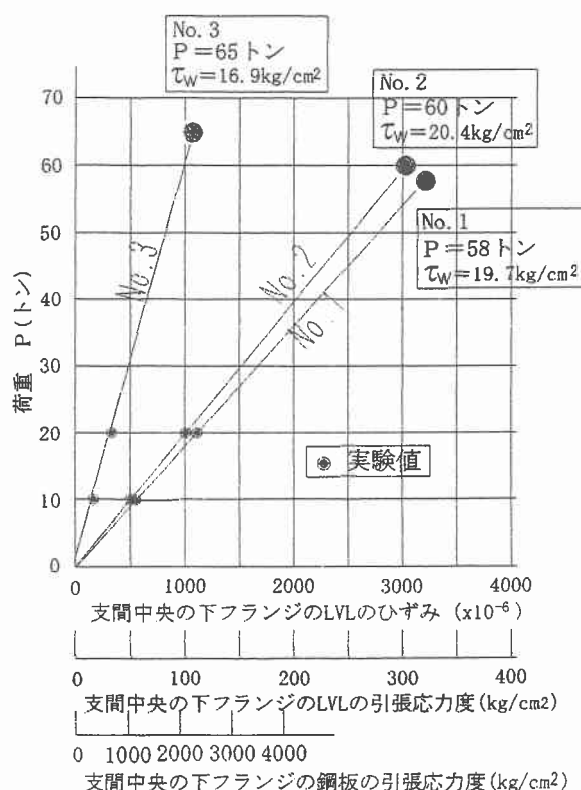


図5：荷重-応力度図

荷重-たわみ図を図4に、荷重-応力度図を図5に示す。
次の考察が得られた。

- 1) 理論解析値と実験値はよく一致した。
- 2) 試験体No. 3は試験体No. 1にくらべて約3倍の曲げ剛性があった。上・下面の補剛鋼板を厚くすればするほど、この倍率はさらに増加する。
- 3) 図5に見られるように、3体の試験体は約P=60トン、せん断応力度 $\tau_w = 20\text{kg/cm}^2$ で、LVLの床版の腹部中央面でせん断破壊した。すなわち、写真1.2.3に見られるように、木床版の腹部の中央面全体に水平にせん断亀裂が発生し、床版が真っ二つに割れている。
- 4) SWスラブの設計にあたっては、LVLなどの木材のせん断耐荷力に留意しなければならない。

3. ほうべん橋について

3.1 ほうべん橋の製作・架設・荷重試験

山口県美東町の「ほうべん橋」は、支間3.12m、車道幅員4m、全幅員5.2mのSWスラブ橋であり、図6に横断面図を示す。15cmx15cmの断面の杉の角材を34本並べて木床版とし、その上面と下面に、厚さ6mmのリブつき鋼板をエポキシ樹脂接着剤を用いて工場接着したものである。

なお、リブ鋼板の断面は6mmx50mmで、45cmの間隔で配置している。



図6：ほうべん橋の横断面図

ほうべん橋の発注は山口県美東町役場耕地課、工場製作は美東町の山本鉄工所、架設・施工は美東町の(株)藤川が行った。

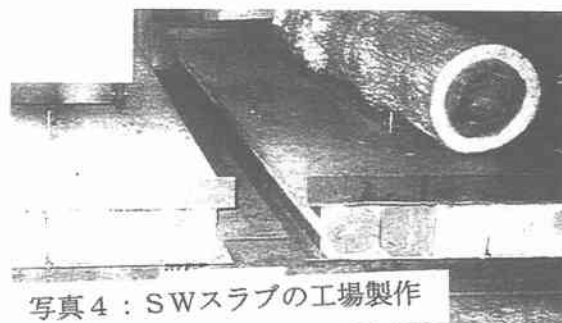


写真4は山本鉄工所の工場内において、リブつき鋼板と杉の角材とを、エポキシ樹脂接着剤を用いて工場接着して、SWスラブを製作しているところを示す。杉の角材は現地の美東杉の間伐材である。リブつき鋼板は厚さ6mmの耐候性鋼板である。エポキシ樹脂接着剤は(株)大鹿振興の2液反応硬化型のオーシカダイントE-126を用いた。接着作業後、写真4のように、丸太をのせて加圧した。接着作業後約40時間で、所定の接着強度に達した。



写真5は、SWスラブのクレーンによる現場架設を示す。本橋は全幅が5.2mであるから、全幅を縦に2分割して、工場から現場にトラックで運搬した。現場架設は一日で終了した。すなわち、本橋はプレハブ式橋梁である。

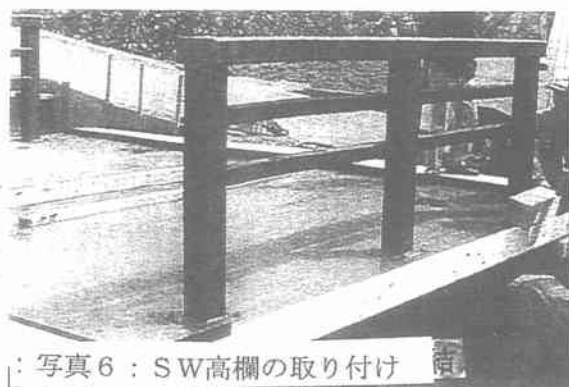
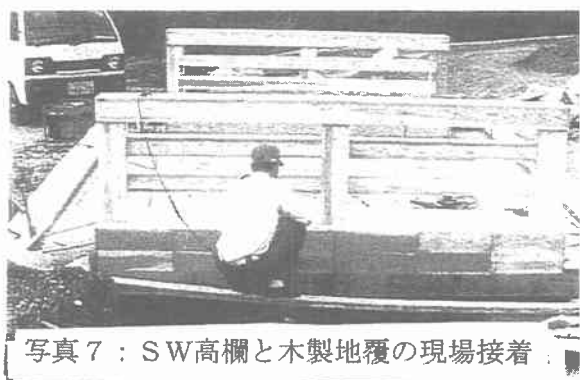


写真6は、SWスラブの上鋼板の表面のスタッドボルトに、SW高欄の角形鋼管を現場連結したところを示す。



その後、写真7のように、美東杉のラミナー（単板）を角形鋼管に現場接着し、さらに、木製地覆ブロックを上鋼板の上に現場接着した。



本橋竣工後、写真8のように、碎石積載トラック（25トン）による載荷試験で、中央で3mmのたわみを実測、本橋が所定以上の強度をもっていることを確認した。

3.2 25トントラック載荷時の応力解析

杉材のヤング係数： $E_W = 0.7 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

鋼のヤング係数： $E_S = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

$n = E_S / E_W = 30$ として、以降、理論解析する。

断面2次モーメント：

$$I = 520 \times 15^3 / 12 + 520 \times 0.6 \times 7.8^2 \times 2 \times 30 \\ + 5 \times 0.6 \times 5^2 \times 13 \times 2 \times (30 - 1) = 1.34 \times 10^6 \text{ cm}^4$$

曲げ剛性： $E_W I = 0.7 \times 10^5 \times 1.34 \times 10^6 = 0.938 \times 10^{11} \text{ kgcm}^2$

支間3.12m=312cmの中央に $P = 25 \text{ トン} = 2.5 \times 10^4 \text{ kg}$ のトラックを載荷するとする。

支間中央の曲げモーメント：

$$M = 2.5 \times 10^4 \times 312 / 4 = 1.95 \times 10^6 \text{ kgcm}$$

支点から支間中央への範囲のせん断力：

$$Q = 2.5 \times 10^4 / 2 = 1.25 \times 10^4 \text{ kg}$$

支間中央のたわみ：

$$v = 2.5 \times 10^4 \times 312^3 / (48 \times 0.938 \times 10^{11}) = 0.17 \text{ cm} = 1.7 \text{ mm}$$

支間中央の下フランジの杉材の引張ひずみ：

$$\epsilon_W = 1.95 \times 10^6 \times 7.5 / 0.938 \times 10^{11} = 156 \times 10^{-6}$$

支間中央の下フランジの鋼板の引張ひずみ：

$$\epsilon_S = 1.95 \times 10^6 \times 8.1 / 0.938 \times 10^{11} = 168 \times 10^{-6}$$

支間中央の下フランジの杉材の引張応力度：

$$\sigma_W = \epsilon_W E_W = 156 \times 10^{-6} \times 0.7 \times 10^5 = 11 \text{ kg/cm}^2$$

支間中央の下フランジの鋼板の引張応力度：

$$\sigma_S = \epsilon_S E_S = 168 \times 10^{-6} \times 2.1 \times 10^6 = 353 \text{ kg/cm}^2$$

中立軸についての断面1次モーメント：

$$S = 520 \times 7.5 \times 3.75 + 520 \times 0.6 \times 7.8 \times 30 \\ + 5 \times 0.6 \times 5 \times 13 \times (30 - 1) = 93288 \text{ cm}^3$$

中立軸の杉材のせん断応力度：

$$\tau_W = QS / Ib = 1.25 \times 10^4 \times 93288 / (1.34 \times 10^6 \times 520) \\ = 1.7 \text{ kg/cm}^2$$

4. あとがき

SWスラブ橋の特長は次のとおりである。

- 1) 地元の杉の間伐材を有効利用できるので、地元の木材業に貢献できる。
- 2) 地元の小規模な鉄工所でも製作できるので、地場産業に貢献できる。
- 3) コンクリート橋は将来産業廃棄物になるが、SWスラブ橋の鉄と木は将来リサイクルできる。
- 4) コンクリート橋は現場施工中に手抜き施工が行われることがあるが、SWスラブ橋はプレハブ橋であるから、手抜き施工は起こらない。
- 5) コンクリート橋は重くてもろいが、SW橋は軽くて強いので地震に対し有利である。
- 6) コンクリート橋にくらべて、架設などの施工が簡単で速く、上部工事費が安い。
- 7) 外観が木橋であるから、人と自然にやさしい。