

合成木材のグラウンドアンカー受圧板への適用に関する研究

Investigation on the application of synthetic timbers to passive pressure plates for ground anchors

青柳計太郎¹・丸山久一²

¹正会員 工修 株式会社 銭高組 土木本部 (〒102 東京都千代田区一番町 31)

²正会員 工修 Ph.D. 長岡技術科学大学 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

A synthetic timber, one of FRP, consists of the rigid foamed urethane resin reinforced with continuous long glass fibers. This study was carried out to apply this synthetic timber for passive pressure plates. This paper presents the test results on the flexural behavior of beams made of synthetic timbers and comparison between analytical values calculated with FEM and test results. Passive pressure plates of synthetic timbers were installed on the cut-slope surface. It was confirmed that flexural deformation of passive pressure plates on the soil foundation can be simulated with FEM.

Key Words : Synthetic Timber, Passive Pressure Plate, FEM, Orthotropic Material

1. はじめに

FRP (Fiber Reinforced Plastics: 繊維強化プラスチック) は高性能、多機能性を有する工業材料として、自動車、航空機、レジャー用品、住宅等に幅広く活用されている。土木建設分野においても、近年 FRP の用途開発が活発に行われている。^{1) 2)}

本研究は FRP の一種である合成木材、すなわち、硬質発泡ウレタン樹脂とガラス長繊維からなる複合材のグラウンドアンカー受圧板への適用について検討したものである。

ここに、グラウンドアンカー受圧板とは法面安定、地滑り抑止用アンカー工には不可欠な構造物である。アンカーを斜面に確実に定着し、アンカーの機能を長期にわたって保持するための構造物である。現在、この受圧板は斜面の状況、アンカー力の大きさ、施工条件等に応じて、場所打コンクリート、吹き付けコンクリート、プレキャストコンクリート等が採用されている。

法面アンカー工の場合には、施工が高所、急傾斜で作業スペースが狭い施工条件で行われることが多く、受圧板についても、施工時の安全性の向上、省力化、工期短縮に応える技術が望まれている。

筆者らはこのニーズに応える技術として、合成木材の特性を活かした軽量、高強度で耐食性に優れた受圧板の実用化研究を進めている。合成木材は天然木材の代替として開発されたものであり、外観は木材の風合いがあり、天然木材と同等以上の強度、剛性があり、耐食性に優れさらに、吸水性が極めて小さく、耐薬品性、絶縁性、保温性に優れている。また、素材の加工性が良いことから、2次製品の製作が容易である。その用途も水処理施設、

車両船舶、水産養殖、プラント施設、レジャースポーツ施設、住宅建築等に幅広く活用されている。特に、構造部材としては合成まくらぎとして用いられており、最近、15 年経過した合成まくらぎの構造性能に関する調査結果が報告されている。³⁾ こうした調査結果からも、合成木材は今後土木構造物として幅広い活用が期待できる。

本論文では、最初に合成木材を用いた受圧板の概要について述べる。続いて、合成木材からなる積層梁の曲げ試験の結果と FEM による変形解析結果の比較について述べる。さらに、実際の切り土法面に設置された実大受圧板の変位実測値と FEM 解析値の比較検討結果について報告する。

2. 合成木材を用いた受圧板の概要

合成木材は図-1 に示されるように、モジュール状態で均等に分散したガラス長繊維と独立した気泡によりなるウレタン樹脂発泡体により構成される。その物理的な性質は独立気泡の発泡倍率とガラス長繊維の含有量に左右される。現在、製品化されている合成木材は比重 $\gamma=0.40, 0.50, 0.74$ の 3 タイプがある。本受圧板には合成まくらぎに使用されている $\gamma=0.74$ の合成木材を用いる。

合成木材はガラス繊維により一方向にのみ補強されているため、力学的な特性はガラス繊維の方向と繊維直角方向とは異方性を示す。従って、これを構造部材として使用するには、使用目的に応じてガラス繊維の方向を考慮した使い方をしなければならない。

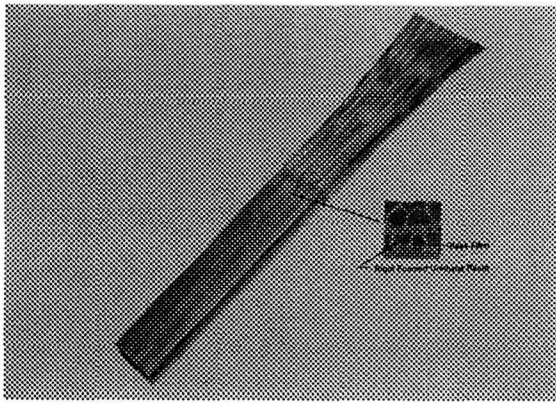


図-1 合成木材

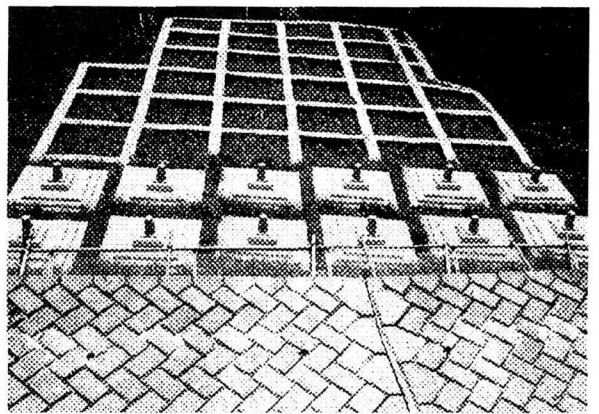


図-3 法面に設置された受圧板

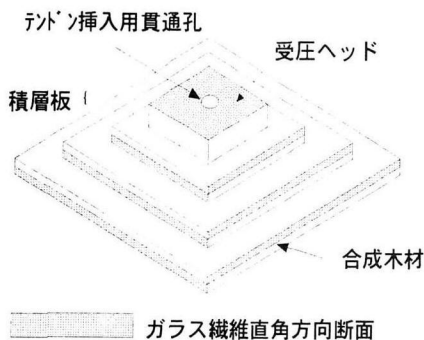


図-2 合成木材により形成された受圧板の概念図

図-2 に合成木材を用いて形成された受圧板の概念図を示す。同図に示されるように本受圧板は積層板と受圧ヘッドにより構成される。積層板はアンカ緊張力を地盤に均等に分布させるための板である。従って、十分な曲げ耐力と剛性が必要とされる。受圧ヘッドはアンカ緊張力が鋼製支圧板を介して直接作用するため、高い支圧強度が必要となる部分である。

合成木材は工場で幅 60cm の長尺材として生産される。この長尺材は原木と呼ばれている。ここでは原木の厚さは 30mm のものを使用する。原木を所定の長さに切断し、ガラス繊維の方向が互いに直交するように上下に接着し、2 方向に強化された厚さ 60mm の板を形成する。この板の縦、横の寸法を変えて 2～4 段接着することにより、同図に示すような階段状の積層板となる。

受圧ヘッドはガラス繊維の方向を鉛直方向とする。所定の長さに切断した合成木材の切片を相互に接着してブロックを形成し、積層板に接着する。なお、合成木材相互の接着には全てエポキシ樹脂が用いられる。このようにして製作された受圧板の使用例を図-3 に示す。

受圧板に合成木材を使用することによるメリットは受圧板の重量が大幅に軽減できることである。例えば、設計アンカ力が 500 kN の場合には本受圧板の重量は 2.5 kN 程度に

なる。従来のプレキャストコンクリート受圧板に比べてと約 1/10 の軽量化が図られる。受圧板の軽量化により、運搬、設置作業も容易になり、作業性の向上、工期の短縮が図られ、施工上のメリットは大きい。

3. 合成木材からなる積層梁の曲げ試験

3. 1 試験の目的

本試験の目的は次の 2 点である。

①積層板の断面は合成木材のガラス繊維方向面とガラス繊維直角方向面が交互に積層して構成される。積層する順序は直交する 2 方向で異なるため、それぞれの方向で異なった曲げ性状を示すと考えられる。本試験では受圧板の直交 2 方向の断面を模擬した積層梁により、それぞれの基本的な曲げ性状を明らかにする。

②合成木材の構造特性については合成まくらぎに関する実験的な研究が行われている。^{4) 5)} しかしながら、本素材に関する解析的な研究は報告されていない。ここでは、合成木材を直交異方性弾性体と仮定した FEM 解析値と試験結果を比較検討する。

3. 2 試験概要

(1) 試験体

積層梁試験体の形状を図-4 に示す。表-1 に試験体の名称と寸法の一覧表を示す。積層梁の幅 B は全て $B=300\text{mm}$ とした。ここではガラス繊維方向が長辺方向になる層を X 層、短辺方向になる層を Y 層と呼ぶ。試験体名が XY で示される積層梁の断面は X 層が下側、Y 層が上側になるように構成されている。YX は層の順序が XY と逆になる。表中の試験体名の数字は積層板の段数を示す。試験体名の末尾に S が付けられた試験体は中段の板が上、下段とは接着されていないことを示す。受圧ヘッドのガラス繊維方向は鉛直である。この受圧ヘッドは積層部上段と接着

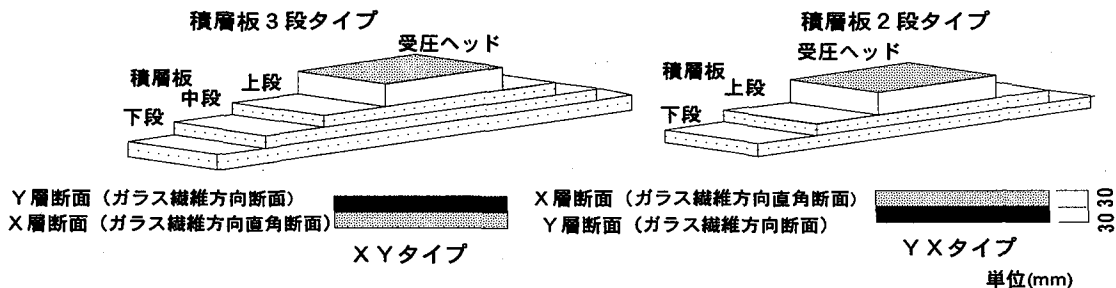


図-4 積層梁試験体の形状

表-1 試験体寸法

試験体名	受圧ヘッド (長さ×幅×高さ)	積層板 (長さ×幅×高さ)		
		上段	中段	下段
2-XY	550x300x90	950x300x60		1250x300x60
2-YX				
3-XY				
3-YX	500x300x90	800x300x60	1200x300x60	1600x300x60
3-XYS				
3-YXS				

(mm)

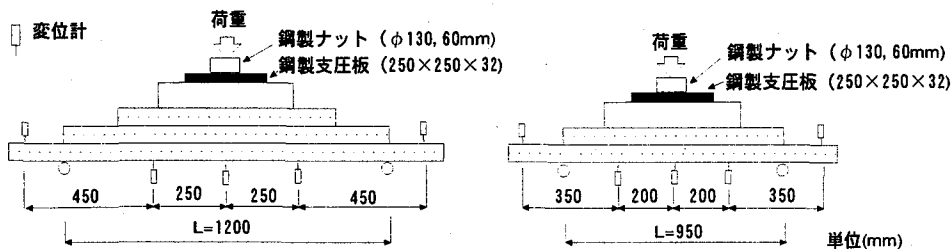


図-5 曲げ試験方法と変位計位置

している。

(2) 試験方法

曲げ試験の方法を図-5に示す。曲げパンLは積層板3段の試験体はL=1,200mm、積層板2段の試験体はL=950mmとした。載荷方法は実際のアンカ定着部に近似させて、受圧ヘッド上に高さt=32mm、辺長l=250mmの正方形の鋼製支圧板を置き、径Φ=130mm、高さt=60mmの円柱ナットを介し、圧入機を使用して載荷した。

測定項目は荷重と積層梁の変位である。この時の変位計のセット位置を同図に示す。また、破壊に至るまでのひび割れの進展状況を目視により観察した。

(3) 試験結果

図-6に全試験体のひび割れパターンを示す。本試験では積層梁の破壊様式は次の4パターンに分けることができる。

① 2-XY、3-XYに見られるパターンである。初期ひび割れはX層に挟まれたY層に斜めひび割れが発生し、荷重の増大に伴い斜めひび割れの数が増える。終局はX層にガ

ス繊維に沿った水平方向のひび割れが発生し、耐力が急激に低下し破壊した。

② 2-YX、3-YXに見られるパターンである。初期ひび割れは①と同様、X層に挟まれたY層に斜めひび割れが発生する。荷重の増大に伴いY層に曲げひび割れの発生を伴い、変形のみ増大して終局に至った。

③ 3-XYSに見られるパターンである。低い荷重レベルから変形が進み、上段X層にガラス繊維に沿った水平ひび割れが発生し、急激に耐力が低下して破壊した。Y層には斜めひび割れも曲げひび割れも見られない。

④ 3-YXSに見られるパターンである。各段のY層に曲げひび割れのみが発生し、著しく変位が増大して終局に至る。

全ての試験体に共通して言えることは次の4点である。

① X層の曲げひび割れは見られない。② Y層に発生した斜めひび割れはX層に進展しない。③ 接着面で剥離は見られない。④ 受圧ヘッドにひび割れは発生しない。

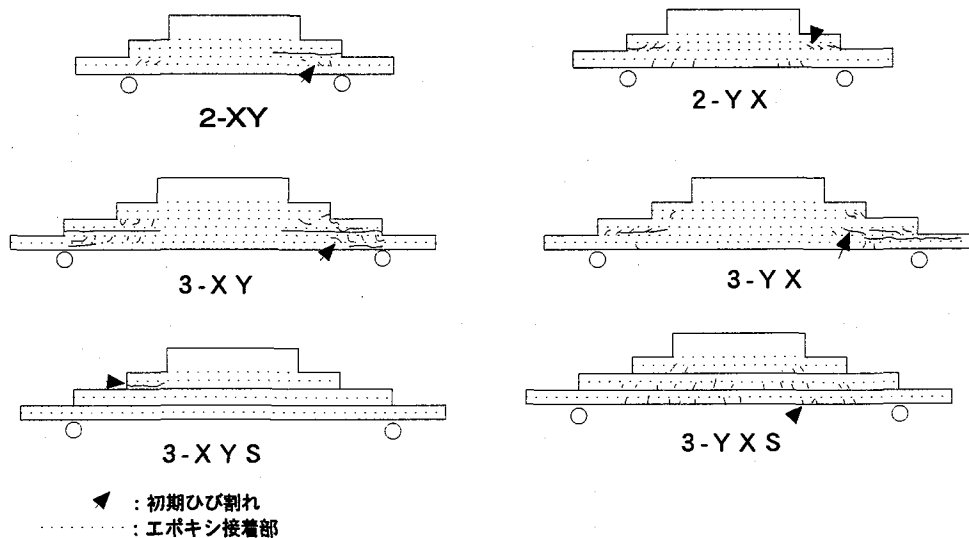


図-6 試験体のひび割れパターン

表-2 試験結果一覧表

試験体名	ひび割れ発生時						終局荷重時				
	Per (kN)	Mcr (kN・m)	Qcr (kN)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr}/L	Per/ δ_{cr} (kN/mm)	Pu (kN)	Mu (kN・m)	Qu (kN)	δ_u (mm)	δ_u/L
2-XY	233	56	117	20.5	0.02	11.4	268	64	134	32.8	0.03
2-YX	139	33	70	13.2	0.01	10.5	201	48	101	46.6	0.05
3-XY	244	73	122	19.4	0.02	12.6	294	98	147	40.0	0.03
3-YX	177	53	89	17.9	0.01	9.9	208	62	104	70.3	0.06
3-XYS	158	47	79	92.8	0.08	1.7	171	52	86	99.5	0.08
3-YXS	49	15	25	27.9	0.02	1.8	142	43	71	126.7	0.11

Per : ひび割れ発生時荷重

Mcr : ひび割れ発生時最大曲げモーメント

Qcr : ひび割れ発生時せん断力

Pu : 終局時荷重

Mu : 終局時最大曲げモーメント

Qu : 終局時せん断力

L : スパン長

δ_u : 終局時スパン中央位置の変位

δ_{cr} : ひび割れ発生時スパン中央位置の変位

次にひび割れ荷重、終局荷重及び初期剛性、変形性能について述べる。表-2 に試験結果の一覧表を示す。この表に見られるように、積層板が2段、3段ともにXYタイプの梁がYXタイプの梁に比べて、ひび割れ荷重Per、終局荷重Puともに大きく、断面の構成が積層梁の曲げ性状に影響を与えている。

積層梁のひび割れ発生までの剛性をひび割れ発生荷重とスパン中央の変位との比 Per/δ_{cr} で見ると、2-YXの剛性は2-XYの92%で層の構成の差異が剛性に与える影響は小さい。一方、3-YXは3-XYに比べて79%に低下している。曲げモーメントが大きくなると断面構成が初期剛性に与える影響は大きい。3-XYSの初期剛性は3-XY、3-YXのそれぞれの初期剛性に対して13%、17%にまで低下している。合成木材相互の接着が梁全体の剛性に与える影響は大きく現れている。

3-XY、2-XY、3-XYSはX層に水平ひび割れが発生し、耐力が急激に低下した。図-7に見られるように水平ひび割

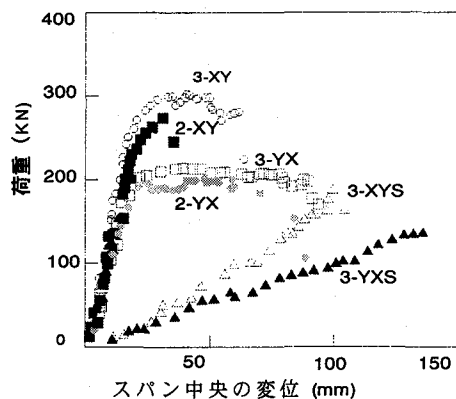


図-7 荷重とスパン中央の変位の関係

れ発生後の変形性能は小さい。3-YXS、2-YX、3-YXはY層にひび割れは生じるが、X層には曲げひび割れも斜めひび割れも生じることはなく、変形性能も十分ある。

(4) FEMによる曲げ変形の解析

試験体の弾性変形を FEM により解析する。ここでは合成木材を直交異方性弾性体と仮定する。FEM 解析における直交異方性弾性体のひずみ-応力の関係は一般に (1) によって表される。

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\nu_{12} & -\nu_{13} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{21} & \frac{1}{E_2} & -\nu_{23} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{31} & -\nu_{32} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、
i,j=1,2,3 (1:ガラス繊維方向 2,3:ガラス繊維直角方向)
 σ_i :直応力 E_i :ヤング係数
 ϵ_i :直ひずみ G_i :せん断弾性係数
 ν_{ij} :ポアソン比 $\nu_{ij}E_i=\nu_{ji}E_j$ (2)

τ_i :せん断応力、 γ_i :せん断ひずみ
(τ_1, γ_1 :1面2方向、 τ_2, γ_2 :2面3方向、 τ_3, γ_3 :3面1方向)

(1) 式中の弾性定数の値は以下のようにして推定した。
ガラス繊維方向のヤング係数 E_1 とガラス繊維直角方向のヤング係数 E_2, E_3 の値は図-8 に示される JISZ2101 木材の曲げ試験の結果から求めた。ここでは $E_2=E_3$ とし、試験結果の平均値 $E_1=8600\text{N/mm}^2$ 、 $E_2=E_3=620\text{N/mm}^2$ とする。ポアソン比は $\nu_{12}=\nu_{23}=\nu_{31}=0.25$ と仮定する。 ν_{21} 、 ν_{32} 、 ν_{13} の値は (2) より得られる。せん断弾性係数 G_1, G_2, G_3 の値は図-9 に示されるせん断試験から得られた荷重-変位曲線と図-10 に示す FEM 解析モデルによりせん断弾性係数を仮定したパラメータスタディを行い、実験値に一致するせん断弾性係数の値を用いる。この FEM 解析には前記のヤング係数とポアソン比を用いた。ここでは、 $G_1=G_3=400\text{N/mm}^2$ 、 $G_2=180\text{N/mm}^2$ とした時に実験値と良く一致した。

図-11 に積層梁の二次元 FEM 解析例を示す。ここでは鋼製支柱板も含めたモデルとした。なお、3-YXS と 3-YXS の解析モデルは接触面で2節点を設け、それぞれの鉛直方向の変位が同じになるように拘束した。水平変位は自由とした。

図-12 に全ての試験体について FEM 解析値と実験値の比較を示す。同図に示されるように 3-YXS を除けば、実験値と解析値は比較的良く一致している。3-YXS の解析モデルは曲げひび割れの発生を考慮していないため、弾性定数の値が大きく評価されていることによるものである。この傾向は 3-YX、2-YX にも見られる。

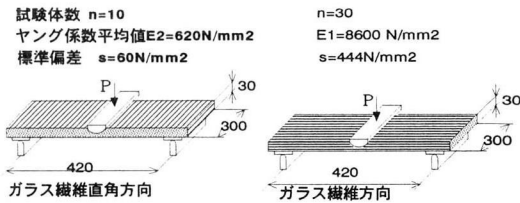


図-8 合成木材の曲げ試験法

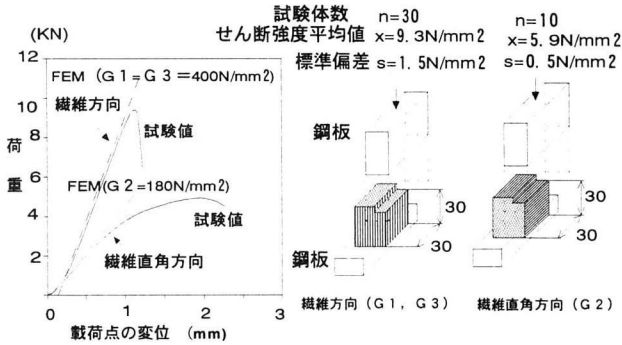


図-9 合成木材のせん断試験法

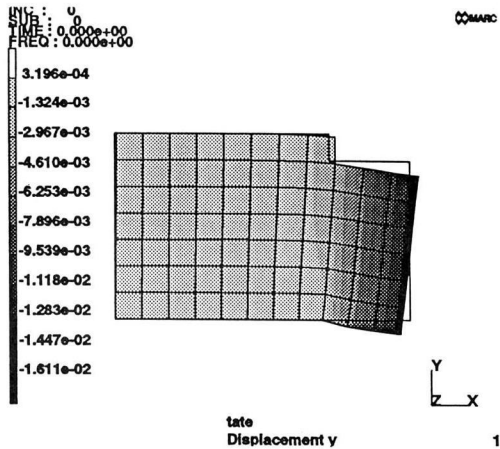


図-10 せん断試験のFEM解析モデル

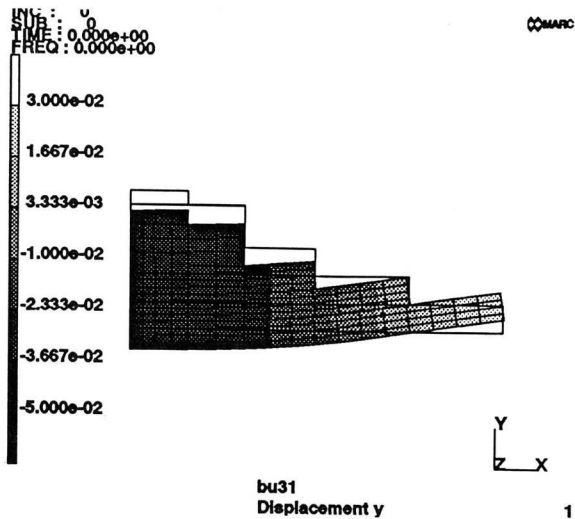
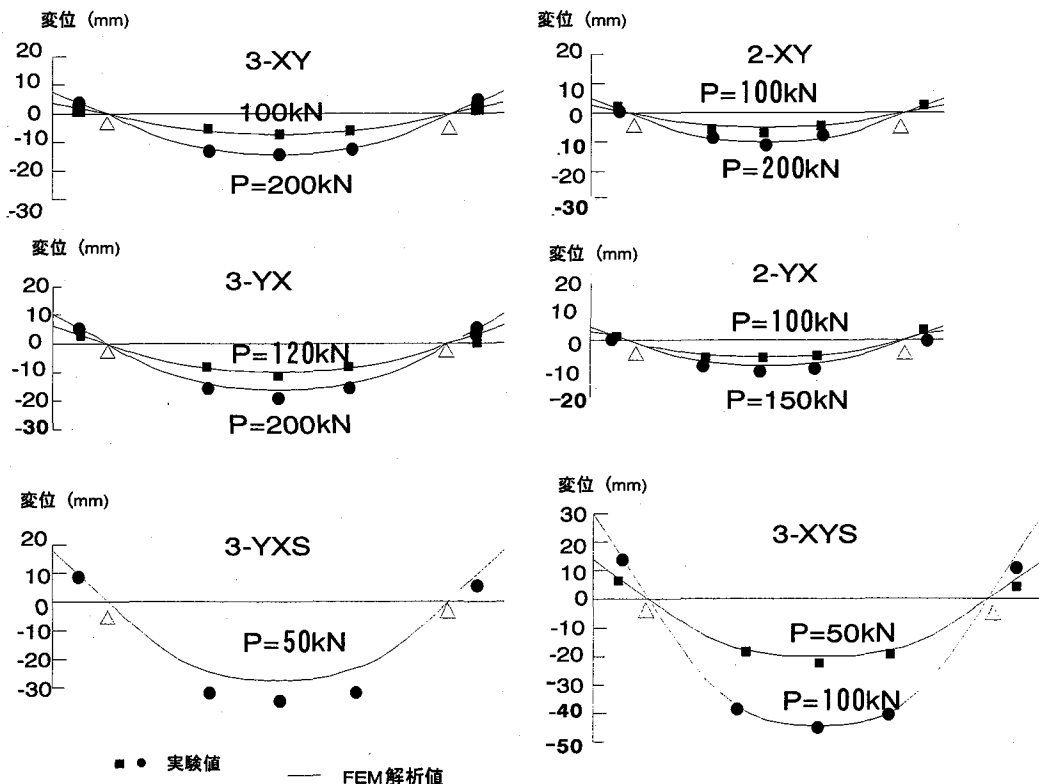


図-11 積層梁の2次元FEM解析



4. 切り土法面上の実大受圧板の変位実測値と FEM 解析値の比較

4.1 目的

従来のコンクリート製受圧板は剛体として設計されている。しかし、合成木材からなる受圧板は板としての剛性がコンクリート製のものに比べて小さくなるため、本受圧板を設計するには、地盤の剛性を考慮して解析する必要がある。

切り土法面の場合には上載土が除去されたことによる応力解放や表層部の劣化等の影響により、一般の基礎地盤の剛性とは異なることが考えられる。

室内試験の結果から、合成木材を異方性弾性体と仮定した FEM 解析が有効であることを確認した。この結果を踏まえて、切り土法面に設置された実大の受圧板に70kN-緊張力が作用した時の変位実測値と FEM 解析値を比較することにより、地盤の剛性を考慮した解析法について検討する。

4. 2 試験体と測定方法

地盤は火山噴出物が堆積した地盤で、切土法面勾配は 1 : 1.2 である。この地盤に地滑り抑止用の「グランド・アンカー」が施工された。図-13 に「グランド・アンカー」の概要を示す。この

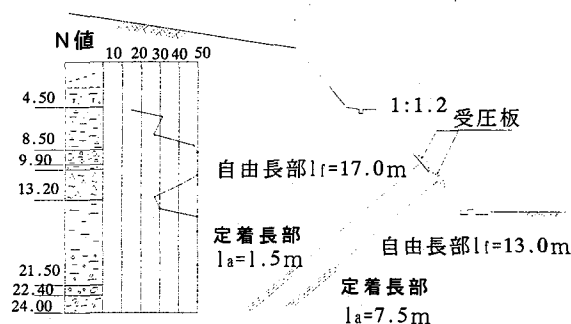
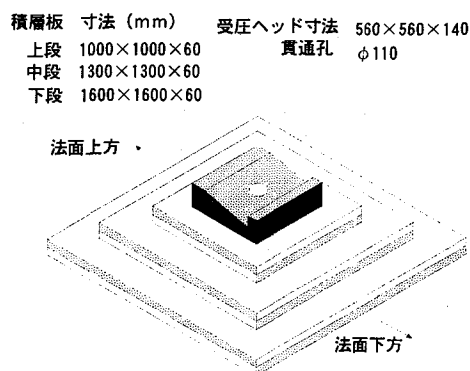


図-13 グラウンド・アンカ-の概要



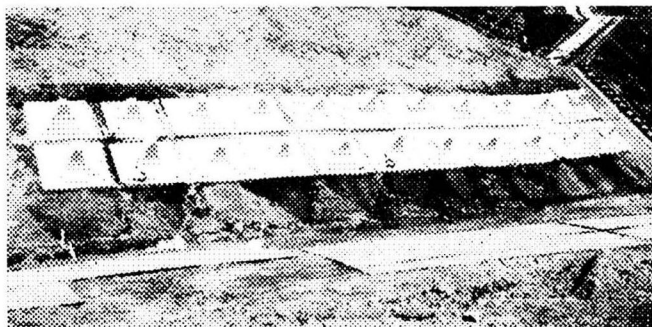


図-15 試験法面

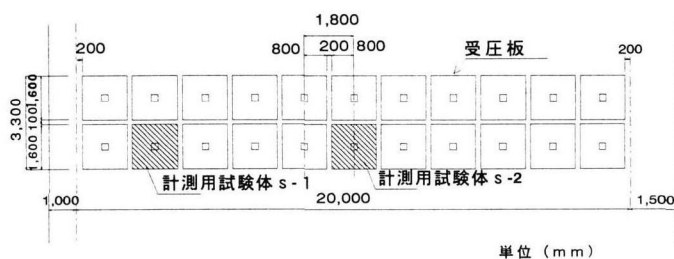


図-16 受圧板配置図と計測用試験体

時の受圧板の形状・寸法を図-14 に示す。ｱﾝｶｰ軸線と受圧板とは 10° の偏心が生じるため、受圧ヘッドの上面は切り欠き加工してある。積層板は曲げ引張下縁のガラス繊維の方向は法面の上下方向である。図-15、図-16 に受圧板の配置図を示す。上、下段にそれぞれ 11 体づつ計 22 体配置した。図-16 に示される S-1、S-2 の 2 体についてｱﾝｶｰ緊張時の受圧板の変位を測定した。図-17 に変位計の位置を示す。ｱﾝｶｰ緊張力 P はロードセルを用いて測定した。最大荷重 $P=600\text{kN}$ まで載荷し、 $P=400\text{kN}$ で定着した。図-18 に計測状況を示す。

図-17 変位計設置位置

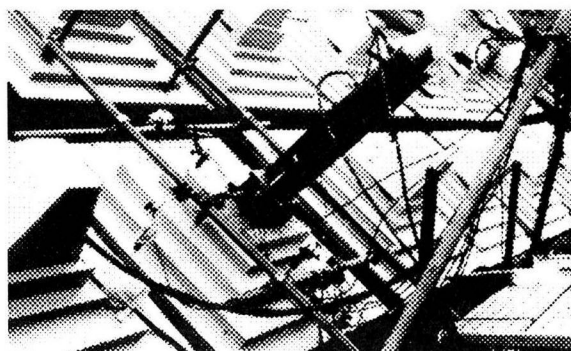


図-18 計測状況

4. 3 FEM解析値と変位実測値との比較

実大受圧板の FEM 解析モデルを図—19 に示す。ここでは合成木材を 3 次元直交異方性弾性体と仮定する。弾性定数の値は室内実験での積層梁の解析で用いた以下の値とする。

$$E_1=8600\text{N/mm}^2, \quad E_2=E_3=620\text{N/mm}^2$$

$$G_1 = G_3 = 400 \text{ N/mm}^2, \quad G_2 = 180 \text{ N/mm}^2$$

$$\nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{31} = 0.25$$

地盤はバネでモデル化する。バネ定数の値は地盤反力係数の値をパラメータとして、実測値との比較により推定する。図-20 に解析値と変位実測値の比較を示す。ここに、解析値は S-1 については垂直方向地盤反力係数 $K_v = 40 \text{ N/cm}^3$ 、せん断地盤反力係数 $K_s = 10 \text{ N/cm}^3$ 、S-2 はそれぞれ $K_v = 10 \text{ N/cm}^3$ 、 $K_s = 4 \text{ N/cm}^3$ とした仮定した時の変位を示す。

実測値と解析値は良く一致しており、本切り土法面に

おける表層地盤の剛性を推定することができた。

5. おわりに

本研究により以下のような知見が得られた。

- ①積層梁の曲げ試験の結果から、合成木材のガラス繊維方向面とガラス繊維直角方向面の積層順序の違いにより、ひび割れパターン、剛性、ひび割れ発生荷重、終局耐力に差異が生じる。
- ②合成木材のガラス繊維方向と平行したひび割れが生じると急激な破壊を示す。
- ③合成木材のガラス繊維直角はガラス繊維方向に比べて、曲げひび割れ、斜めひび割れともに生じやすい。
- ④合成木材のガラス繊維方向は曲げひび割れが発生することはない、変形性能も優れている。

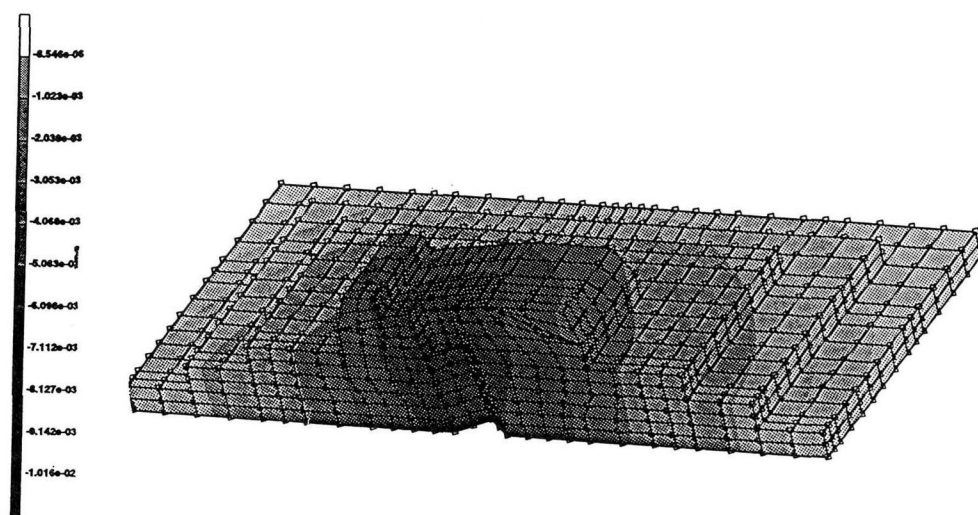


図-19 3次元FEM解析結果 (S-1 500kN 載荷時の変形)

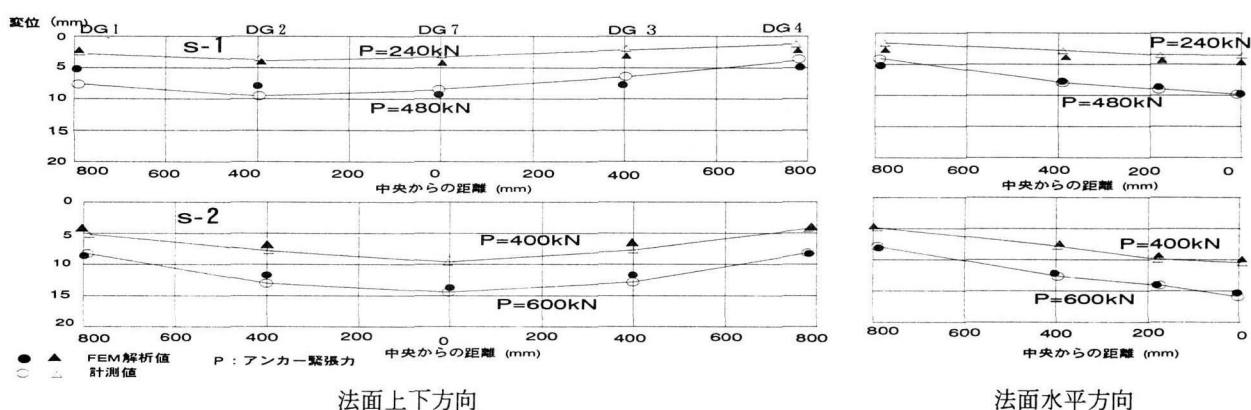


図-20 計測値と解析値の比較

- ⑤ 積層梁の曲げ変形解析には、合成木材を直交異方性弾性体と仮定した FEM 解析が適用できる。
- ⑥ 表層地盤を弾性バネ定数を適切に設定できれば、3次元 FEM 解析により、地盤上の受圧板の弾性変形を解析できる。

本研究により合成木材を用いたグラウトアンカ受圧板を設計するための基礎資料を得ることができた。今後、さらに合理的な設計法を確立するためには、次のような課題が残されている。

- (1) 合成木材の直交 2 方向についての曲げ強度、せん断強度を明らかにする。
- (2) 合成木材のひび割れ発生メカニズムを解明するとともに実用的な設計法の提案
- (3) 各種表層地盤に対する地盤反力係数の評価
- (4) アンカ緊張力が持続して作用している場合のクリープ性状と合成木材の耐久性を明らかにする。

最後に本研究を進めるにあたり御指導、御協力を頂いた関係者の皆様に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用, コンクリートライブラリー 72
- 2) EL-Bad 編：ADVANCED COMPOSITE MATERIALS IN BRIDGES AND STRUCTURES, 1996, 8
- 3) 長藤敬晴、阿部則次：合成まくらぎ 15 年の経験 鉄道総研報告 1997, 2
- 4) 清水敬二、松村弘：繊維強化発泡高分子による合成まくらぎの開発 鉄研速報 1981
- 5) 長藤敬晴、吉田弘、坂本健一：合成まくらぎの実用性能、鉄研速報、1987

(1998年9月18日受付)