Thickness-Recovery Behavior of Long Pile Tufted Artificial Turf for Static Loading

KIMURA Hirokazu^{a,*}, YAMAMOTO Takanori^a, YASUDA Masahiro^b,
DOHI Kohichi^b, MATSUOKA Toshio^c, MATSUMOTO Yo-ichi^d

^aTechnology Research Institute of Osaka Prefecture, 2-7-1 Ayumino, Izumi, Osaka 594-1157, Japan

^bMizuno Co., Ltd., 1-12-35 Nankoh Kita Suminoe, Osaka 559-8510, Japan

^cMie Prefecture Industrial Research Institute, 5-5-45 Takajaya, Tsu, Mie 514-0819, Japan

^dShinshu University, 3-15-1 Tokida, Ueda, Nagano 386-8567, Japan

Received 29 October 2009; accepted for publication 11 March 2010

Abstract

Thickness-recovery behaviors of tufted artificial turf with long pile for static loading were examined. A novel thickness gauge with circular presser foot of 82mm diameter and capable of measuring thickness to an accuracy of 0.01 mm at standard pressure of 0.10 kPa was designed for tufted artificial turf with long pile. Static loading tests were carried out by using an equipment improved static loading machine as defined in ISO 3416. The static loading equipment was capable of applying a pressure of 50 kPa through a steel square pressure foot of 120mm×120mm. Experiments were conducted using samples - tufted artificial turfs with long pile of five types - to determine characteristics on thickness loss and recovery behaviors for static loading. Thickness-recovery behaviors obtained from each sample were able to use an approximation with exponential equation and apply the simplest Voigt element model. Retardation times calculated from a Voigt element equation considering thickness loss after prolonged - recovery period of 24 hours - indicated rational results.

Key Words: Tufted artificial turf with long pile, Thickness-recovery behavior, Static loading test

静的荷重に対するタフテッドロングパイル人工芝の厚さ回復挙動

木村裕和^{a,*}, 山本貴則^a, 安田雅宏^b, 土肥弘一^b, 松岡敏生^c, 松本陽一^d

^a大阪府立産業技術総合研究所, ^b美津濃株式会社, ^c三重県工業研究所, ^d信州大学繊維学部

1. 緒言

人工芝には複数の種類があり、一般住宅用途からスポーツ用途に至るまで様々な分野で展開されている [1]。スポーツの分野では、野球、テニス、フィールドホッケー、アメリカンフットボールやサッカーなどの競技場で利用されている [2]。これらの中でもサッカーグラウンドにおける人工芝の導入は比較的最近のことであり、粗ゲージ、粗ステッチのタフテッドロングパイル人工芝が開発されて以降である。国内では、2000年にJリーグの川崎フロンターレ練習グラウンドに導入されたのが最初とされている。

サッカーグラウンド用のタフテッドロングパイル人工芝の製造方法は、一般的なタフテッドカーペットと本質的に同じであるが、施工時には芝葉（以下、パイルという）の間に砂やゴムチップなどの充填材を基部から上に 35mm～55mm 程度詰めるため、パイル長は 55mm～75mm 程度に設計されている。これは、通常のタフテッドカーペットの 10 倍以上もの長さである [3]。また、砂やゴムチップなどを充填しやすくする目的からゲージは 3 インチ間に 4 本程度、ステッチはインチ当たり 3 本～7 本程度とかなり疎に作られている。

タフテッドロングパイル人工芝は、施工後にはかなり過酷な作用が加えられる。したがって、高い水準の物理的、機械

* 連絡先：大阪府立産業技術総合研究所 594-1157 和泉市あゆみ野 2-7-1,
E-mail: hiro@tri.pref.osaka.jp, Tel: +81-725-51-2728, Fax: +81-725-51-2639

的耐久性が要求される。さらに、エクステリア製品としての側面を有するため、外観維持性や染色堅ろう性などにも優れた性能が必要となる。

サッカーグラウンドに施工するロングパイル人工芝を対象とした試験方法や品質規格には、財団法人日本サッカー協会（JFA）が制定した検査実施マニュアルがある。JFA では、独自の試験評価方法を制定しており、それぞれの試験項目に対して基準値が設定されている [4]。試験評価方法には、製品検査（ラボテスト）とピッチ公認検査（フィールドテスト）がある [5]。砂または充填材を挿入した状態のロングパイル人工芝の機械的、物理的性能はラボテストで評価される。試験評価項目は、耐久性－耐摩耗性、耐候性、衝撃吸収性、垂直変形性、トラクション（方向転換時のグリップ力）、靴底の滑り性、垂直反発高さ、バウンド時速度の 8 項目である。フィールドテストには、人工芝敷設前の下地に対する下部構造特性評価ならびに人工芝敷設後に行われる選手に対する特性試験とボールに対する特性試験が定められている [5]。

しかし、このマニュアルには、最も基本的な評価項目の一つであるパイル厚さの測定方法や静的荷重による厚さ減少ならびに除重後のパイル回復性に関する試験方法は見当たらない。これはタフテッドロングパイル人工芝に特有のゲージ、ステッチの設定と極めて大きなパイル長に原因があるものと考えられる。すなわち、ロングパイル人工芝には通常のタフテッドカーペットに用いる厚さ測定器の適用が困難であるためと考えられる。

そこで、今回、サッカーグラウンドに施工されるタフテッドロングパイル人工芝に適用できる厚さ測定方法について検討するとともに静的荷重による厚さ減少ならびに除重後のパイル回復挙動を調べ、測定方法の妥当性を検証した。

2. 実験

2.1 試料

実験には、サッカーグラウンドに施工されている 5 種類のタフテッドロングパイル人工芝を供した。試料の明細を Table 1 に示した。

試験片として、Fig.1 に示したように試料を長さ 210mm、幅 150mm、高さ 85mm（外寸）、厚さ 2mm の透明アクリル樹脂製直方体ケースに入れ、サッカーグラウンドに施工されている状態と同様に基部から約 40mm の厚さまでゴムチップ充填材を挿入したものを用いた。

Table 1 Details of samples.

Symbol of Sample	Filament Material	Type of Filament	Pile Length (mm)	Gauge (dm ⁻¹)	Stitch (dm ⁻¹)	Pile Weight above the backing (g/m ²)
A	Polyethylene	Mono Filament	60	5.25	19.7	1500
B	Polyethylene	Sprit Yarn	65	5.25	14.2	1200
C	Polyethylene	Mono Filament	65	5.25	23.6	1600
D	Polyethylene	Mono Filament	70	5.25	25.6	1750
E	Polyamide	Mono Filament	65	5.25	12.2	1100

2.2 タフテッドロングパイル人工芝用厚さ測定器と測定条件

JIS の繊維製床敷物の厚さ測定方法には、面積が 300mm² ～ 1000mm² の範囲内の円形平滑平面加圧子を備え、試験片に 2.0 ± 0.2kPa の圧力（初荷重）を垂直方向から加えることができ、測定範囲が 0mm ～ 25mm で、0.1mm 以上の精度を有する測定器が規定されている [6]。しかし、タフテッドロングパイル人工芝は、Table 1 に示したようにタフト密度が粗く、パイルが長いため、JIS に規定の厚さ測定器の円形平滑平面加圧子がパイル間に沈み込み、測定は不可能である。

そこで、加圧子の面積を広げ、初荷重を下げパイル間に加圧子が侵入することなく、再現性の高い測定条件を検討した。複数の大きさの加圧子を厚さ 1mm のポリエチレン製プレートから切り出して作製し、予備実験を行ったところ、直径 82mm の加圧子が、すべての試料に対して安定であり、再現性の高い測定が可能であった。なお、この加圧子では厚さ測定時の初荷重は 0.10kPa になる。また、JIS に規定された最大ストローク 25mm のダイヤルゲージでは、パイル長に対するストロークが短く、操作上問題がある。そこで、50mm ストロークのダイヤルゲージを備えた直径 82mm の加圧子を備えたタフテッドロングパイル人工芝用厚さ測定器を試作し、測定を行った。なお、厚さ測定の基準面は、測定器の加圧子を充填材の最表面に一致させ、その位置を 0mm に設定し、厚さは、基準面から使用面に露出しているパイル層を計測した。

2.3 静的荷重試験

ISO 3416 に規定されている繊維製床敷物の静的荷重による厚さ減少試験方法の長時間・重荷重による厚さ減少試験機 [7] を改良し、タフテッドロングパイル人工芝用静的荷重試験機を試作した。静的荷重試験用圧縮子は 120mm × 120mm の大きさの鋼製の平滑平板を用い、圧力は 50kPa とした。また、試料の全厚さに対応させるために試験機本体の位置を 45mm 高くした。試作機側面の外観写真および静的荷重による厚さ減少試験時の写真を Fig.2 に示した。

Fig. 1 Specimen of tufted artificial turf with long pile.

Fig. 2 Static loading equipment for tufted artificial turf with long pile. Photograph of side face of equipment (a). Photograph of applying a pressure of 50 kPa through a square pressure foot (b).

実験は、50kPa の応力を 24 時間加えた後、除重し、2 分、5 分、10 分、20 分、30 分、40 分、50 分、60 分および 24 時間経過後の厚さを測定した。実験結果は厚さ減少率で表した。厚さ減少率は、式 (1) によって算出した。

$$\text{厚さ減少率 (\%)} = [(t_0 - t) / t_0] \times 100 \quad (1)$$

ここに、 t_0 : 試験前のパイル層の厚さ (初期厚さ) (mm), t : 除重後所定時間経過時のパイル層の厚さ (mm) である。なお、試験は、1 試料につき 3 枚の試験片で行い、平均値を算出した。

また、厚さの測定および実験は、 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, $65\%\text{RH} \pm 5\%\text{RH}$ の恒温恒湿室で実施した。

3. 結果と考察

Table 2 には、静的荷重試験の全測定結果を示した。各試料の初期厚さの範囲 (最大値 - 最小値) は、試料 A で 2.56mm, B が 3.67mm, C が 3.86mm, D では 4.41mm, E で 2.07mm であり、パイル層厚さにバラツキが認められる。これは、ロングパイル人工芝製品が天然芝を模倣したものであり、パイル面が必ずしも均一に刈り揃えられていないことに加え、充填材を挿入したために生じたものと考えられる。

Fig.3 にはポリエチレン製の、Fig.4 にはナイロン製の試料の除重後 60 分までの厚さ回復挙動を示した。よこ軸に除重後 60 分までの各所定経過時間を、たて軸に厚さ減少率をとり、各試験片から得られた測定値と平均値をプロットした。物理的作用に対する繊維製床敷物のパイル厚さは、指数関数的に回復することが古くから知られている [8] が、Fig.3 および Fig.4 から、タフテッドロングパイル人工芝のパイル層も指数関数的な厚さ回復挙動を示していることがわかる。そこで、除重後 60 分経過後までの各試料の平均値を最小二乗法により指数関数で近似し、算出した決定係数 (r^2) を図中に記載した。各試料から得られた決定係数は 0.845 ~ 0.974 の

Table 2 Data of thickness loss obtained from all specimens.

Data obtained from sample A									
Specimen	Initial thickness (mm)	Thickness loss for recovery periods after removing static loading (%)							
		2min	5min	10min	20min	30min	40min	50min	60min
No.1	23.35	50.9	46.8	42.5	37.5	29.0	20.2	19.5	18.8
No.2	21.92	57.3	48.5	40.7	30.0	26.1	22.0	19.4	15.4
No.3	24.48	60.1	52.3	48.1	36.0	27.7	24.8	24.2	21.3
Mean	23.25	56.1	49.2	43.8	34.5	27.6	22.3	21.0	18.5

Data obtained from sample B									
Specimen	Initial thickness (mm)	Thickness loss for recovery periods after removing static loading (%)							
		2min	5min	10min	20min	30min	40min	50min	60min
No.1	25.88	62.7	55.3	49.1	44.1	42.0	28.0	28.6	25.2
No.2	27.75	62.0	58.5	55.1	50.0	44.5	41.2	40.0	37.7
No.3	24.08	67.5	60.7	55.7	48.6	43.0	36.5	36.0	29.4
Mean	25.90	64.1	58.2	53.3	47.6	43.2	35.2	34.9	30.7

Data obtained from sample C									
Specimen	Initial thickness (mm)	Thickness loss for recovery periods after removing static loading (%)							
		2min	5min	10min	20min	30min	40min	50min	60min
No.1	26.23	12.1	11.4	9.5	6.8	8.0	6.4	6.2	6.1
No.2	22.96	15.7	7.5	6.8	5.7	4.4	4.4	3.5	3.5
No.3	26.85	9.5	8.6	8.1	6.9	7.5	5.6	5.9	5.3
Mean	24.01	12.4	9.2	8.1	6.5	6.6	5.5	5.2	5.0

Data obtained from sample D									
Specimen	Initial thickness (mm)	Thickness loss for recovery periods after removing static loading (%)							
		2min	5min	10min	20min	30min	40min	50min	60min
No.1	32.45	28.1	21.2	15.6	13.3	11.7	10.9	9.3	8.6
No.2	30.92	23.3	16.0	11.2	7.6	6.9	5.8	4.9	4.8
No.3	35.33	20.1	14.5	10.5	8.0	6.9	6.8	6.3	5.3
Mean	32.90	23.8	17.2	12.4	9.6	8.5	7.8	6.8	6.2

Data obtained from sample E									
Specimen	Initial thickness (mm)	Thickness loss for recovery periods after removing static loading (%)							
		2min	5min	10min	20min	30min	40min	50min	60min
No.1	21.28	56.3	54.0	42.4	23.1	18.3	7.7	6.6	5.6
No.2	23.35	59.1	55.3	30.1	20.9	16.5	16.5	16.7	12.3
No.3	23.32	51.2	31.4	15.7	11.1	8.7	7.7	7.7	7.0
Mean	22.65	55.5	46.9	29.4	18.4	14.5	10.6	10.3	8.3

範囲にあり、両者間には極めて高い相関性が認められる。したがって、タフテッドロングパイル人工芝の厚さ回復挙動は、指数関数で近似できるものと考えられる。

Fig.3 に Sample A で示した試料 A の除重直後の厚さ減少率は 50% ~ 60% であるが、除重後 20 分経過後には 30% ~ 40% 程度まで回復している。その後、回復速度はやや低下し、60 分経過後には 20% 前後になっている。試料 B では、試験終了直後の厚さ減少率が 60% ~ 70% と大きく、60 分経過後に 30% ~ 40% 程度になる (Fig.3 Sample B)。試料 A に比べると、回復速度は遅いと思われる。Fig.3 Sample C の試料 C では除重直後の厚さ減少率が 10% ~ 16% 程度の範囲であり、これはかなり強靱な試料である。しかし、60 分経過しても厚さは完全に回復するわけではなく、平均で 5% 程度の歪みが残存している。試料 D は、除重直後の厚さ減少率が 20% ~ 30% の範囲にあり、10 分間程度で 10% ~ 15% 程度に回復し、除重 60 分経過後には 5% ~ 10% の厚さ減少率を示している (Fig.3 Sample D)。同一のパイル素材にもかかわらず除重所定時間経過後の厚さ減少挙動は、かなり異なっている。除重直後の厚さ減少率は、小さい方から順に、試料 C, D, A, B となる。この結果と Table 1 に示した試料の構造との関連

Fig. 3 Relationship between recovery periods (min) and thickness loss (%) of tufted artificial turfs with long pile made of polyethylene.

をみれば、厚さ減少率の小さい試料 C および試料 D は、単位面積当たりのパイルの質量がそれぞれ 1600g/m^2 、 1750g/m^2 であり、今回用いた試料の中では大きい。また、ステッチ数も多く、単位面積当たりのパイル数が多い。これによって、静荷重が長時間加わっても、圧縮歪みが少なかったものと考えられる。試料 A および B は、試料 C、D と比較すれば、単位面積当たりのパイル質量やパイル本数が少なく、これが測定結果に影響を及ぼしたものと考えられる。

Fig.4 に示したパイル素材がナイロンの場合は、ポリエチレン製の人工芝試料に比べれば、除重後初期の回復性が高い。試験片によってバラツキはあるものの平均値では、除重直後の厚さ減少率が 50% 台であったものが、10 分経過後には 30% 付近にまで回復している。その後、回復速度は低下するが、60 分後には 8% 程度にまで回復している。除重後 60 分で、厚さ減少率が単位面積当たりのパイル質量が大きく、パイル数の多いポリエチレン製の試料 C および試料 D と同程度の水準にまで回復している。

なお、Table 2 に示した 24 時間経過後の厚さ減少率をみれば、24 時間経過後に残留している歪みは、大きい方から試料 B、A、C、D、E の順になっており、長時間経過後の厚さ回復性はナイロン素材が優れているといえる。ナイロンは、低い弾性率と小変形での高い弾性回復性を有し、耐屈曲性に優れた性質がある。上述の実験結果は、ナイロンそのものの物性による影響が反映したものと考えられる。なお、試料 E の単位面積当たりのパイル質量は 1100g/m^2 、ステッチ $12.2/\text{dm}$ と今回実験に用いた試料の中では最もパイル層のボリュームが小さい。したがって、より圧縮回復性の高い人工芝を作製する手段として、パイル素材にナイロンを選択し、ステッチや単位面積当たりのパイル質量を増加させることが有効であると推察される。

ところで、一般に高分子物質の変形挙動は、粘弾性モデルを用いて説明される [9]。繊維製床敷物の圧縮変形挙動についても粘弾性力学モデルによる表現が試みられている [10]。そこで、ロングパイル人工芝の静荷重に対する厚さ減少挙動に対して最も簡単なフォークトモデルを適用してみた。

Fig. 4 Relationship between recovery periods (min) and thickness loss (%) of tufted artificial turf with long pile made of polyamide.

フォークト要素にあっては、除重直前の厚さ減少率を ε_0 とすれば、応力を取り除いた以降の厚さ減少率 (y) は式 (2) で表される。

$$y = \varepsilon_0 \cdot \exp(-T/\tau) \quad (2)$$

ここで、 T は除重経過時間、 τ は遅延時間である。Fig.3 および Fig.4 に示した結果および決定係数からタフテッドロングパイル人工芝の厚さ回復挙動は式 (2) によって説明ができる可能性がある。しかし、除重 24 時間経過後も厚さは完全に回復せず、タフテッドロングパイル人工芝には長時間経過後も残留歪み (厚さ減少率) が存在する。そこで、長時間経過後の残留歪みを y_0 とおき、式 (3) を考える。

$$y - y_0 = \varepsilon_0 \cdot \exp(-T/\tau) \quad (3)$$

ここで、 y_0 の値に除重 24 時間経過後の厚さの減少率を代入して、改めてタフテッドロングパイル人工芝各試料の除重後 60 分経過までの各所定時間ごとの厚さ減少率のデータを式 (3) で近似させ、一致性を検討した。さらに、各試料の遅延時間 τ を式 (3) により求めた近似式から算出した。その結果を Table 3 に示した。Fig.3 および Fig.4 に記入した 60 分経過までのデータのみで近似した決定係数に比べ、すべての試料において決定係数が増加し、0.909 ~ 0.980 の範囲となった。24 時間経過後の厚さの減少率を考慮することによって指数関数での近似性が、より向上している。また、遅延時間 (τ) は、数値の大きいものの順に B, A, C, D, E となっている。パイル素材がナイロンの試料 E の遅延時間が最も小さく、試料 B の 2 倍以上の速度で厚さが回復することになる。また、同一素材のポリエチレン製試料を比較すれば、厚さ減少率の小さな試料 C および試料 D の遅延時間は 30 分程度であり、回復性は比較的高いといえる。物理的、機械的作用に対するタフテッドロングパイル人工芝の厚さ回復性を遅延時間で評価することの可能性が示唆された。

今後、人工芝試料の厚さ回復性について式 (3) を用いて評価することや y_0 の値を除重 24 時間経過後の厚さの減少率とすることならびに厚さ回復性を遅延時間で評価することの妥当性について、さらに検討を加える予定である。

Table 3 Regression functions and coefficients of determination (r^2) of each sample calculated from equations $y - y_0 = \varepsilon_0 \cdot \exp(-T/\tau)$, and retardation time (τ) obtained from this equation.

Sample	Regression function calculated from equations $y - y_0 = \varepsilon_0 \cdot \exp(-T/\tau)$	Coefficient of determination (r^2)	Retardation time (τ) (min)
A	$y = 47.414 \cdot \exp(-0.0249T)$	0.980	40.16
B	$y = 49.340 \cdot \exp(-0.0179T)$	0.980	55.87
C	$y = 6.5676 \cdot \exp(-0.0308T)$	0.928	32.47
D	$y = 14.885 \cdot \exp(-0.0310T)$	0.909	32.26
E	$y = 43.853 \cdot \exp(-0.0392T)$	0.938	25.51

4. 結 言

JIS の繊維製床敷物試験方法に規定の厚さ測定器をベースにタフテッドロングパイル人工芝用厚さ計測器を作製した。また、ISO に規定の長時間・重荷重による厚さ減少試験機を改良し、タフテッドロングパイル人工芝用静的荷重試験機を試作した。

5 種類のタフテッドロングパイル人工芝を用いて、静的荷重による厚さ減少試験を行い、厚さの回復挙動を検討した。ポリエチレン製のタフテッドロングパイル人工芝を比較したところ単位面積当たりのパイル質量やパイル本数の多い試料が静的荷重に対する厚さ回復性は良好であった。パイル素材としてはナイロン製の試料の方が除重後の初期回復速度は速い。

なお、タフテッドロングパイル人工芝の静的荷重に対する厚さは、指数関数的に回復するが、除重後 24 時間経過しても歪み (厚さ減少率) は残留した。そこで、タフテッドロングパイル人工芝の厚さ回復挙動に対して、最も単純なフォークトモデルを適用し、24 時間経過後の厚さ減少率を考慮した指数関数を導出した。その結果、すべての試料で極めて良好な近似結果が得られ、このモデルが適用できることがわかった。また、各試料の遅延時間 (τ) を求めたところ、合理的な数値が得られ、タフテッドロングパイル人工芝の厚さ回復性を遅延時間で評価することの可能性が示唆された。

References

- [1] Japan Carpet Manufactures Association (2004) "Shinpan Carpet Hand Book", pp157-158, Japan Carpet Manufactures Association
- [2] Japan Carpet Manufactures Association (2008) "Nihon carpet kougyoushi", pp186-187, Japan Carpet Manufactures Association
- [3] SENSYU Sikimono (2009) "Sports Surface -Safety Turf, Safety Sand, Safety Pure", p2, SENSYU Sikimono
- [4] Japan Football Association (2007) "JFA Long pile jinkoushiba - Kensajiishi Manual 4th edition", pp5-20, Japan Football Association
- [5] Japan Football Association (2007) "JFA Long pile jinkoushiba pitch - Kounin ni kansuru guide book 3rd edition", pp10-13, Japan Football Association
- [6] JIS L 1021-3 (2007) "Textile floor coverings - Part 3: Determination of thickness", pp2-3
- [7] ISO 3416 (1986) "Textile floor coverings - Determination of thickness loss after prolonged, heavy static loading", pp1-3
- [8] J.L.Beadle (1971) Textile Institute and Industry, **9**, 37-41
- [9] Saitou N (1978) "Introduction to Polymer Physics", pp254-262, Shokabo
- [10] Horino T, Yabunaka T, Morikawa M (1970) J Text Mach Soc Japan, **23**, T264-T272