モードⅠ・モードⅡ組合せ応力負荷の下での 建築材料の破壊†

佐 藤 清*

Fracture of Building Materials under Mixed Modes I and II

by

Kiyoshi SATO*

Fracture under mixed Modes I and II was investigated experimentally on MDF (medium density fiberboard) and DuPont Corian. The experimental results were compared with various fracture criteria hitherto proposed in the literature. The fracture criterion obtained for MDF follows approximately the criterion by Amestoy *et al.*, and the one obtained for DuPont Corian follows approximately the maximum stress criterion and the criterion by Amestoy *et al.* On the other hand, the direction of crack growth obtained for MDF and DuPont Corian do not follow any of these criteria.

Key words: Mixed modes I and II, Fracture criterion, Direction of crack growth, MDF, DuPont Corian

1 緒 言

実際の機械、構造物などに存在する切欠きやき裂は一般に複雑な負荷条件下（すなわち、混合モード負荷条件下）にある。したがって、その安全性を評価するためには、モードⅠ負荷ばかりでなく、モードⅡおよびモードⅠとモードⅡの混合モード負荷条件下での破壊条件を明らかにする必要がある。

モードⅠとモードⅡの混合モード負荷条件下における破壊に関しては、種々のクライテリオンが^{1)~9)}提案されている。また、多くの実験的研究結果も^{1), 8), 10~26)}報告されている。しかしながら、これらの実験結果は材料により異なり、一つのクライテリオンによって一義的に規定されないのが現状であり、真の破壊のクライテリオンを導くには、今後、多種類の材料について、系統的かつ詳細な実験的研究を行う必要がある。

更に、現在までのところ、モードⅠとモードⅡの

混合モード負荷条件下における破壊の実験的研究は金属^{13), 21)~23), 25)}および高分子材料に関するものが大部分であり、その他の材料に関する報告は乏しい。

そこで、本報では建築用材として用いられている中質ファイバーボード（MDF）およびインテリア素材として用いられているデュボンコリアンを用いて、モードⅠからモードⅡにわたる混合モード負荷条件下における破壊について実験的研究を行い、その結果と従来提案されている破壊のクライテリオンとを比較した。

2 材料および実験方法

供試材は野田合板(株)製の中質ファイバーボード（MDF）（針葉樹タイプと熱帯広葉樹材タイプの2種類、板厚 15 mm）および市販のデュボンコリアン（MMA 樹脂含有強化無機材、板厚 13 mm）である。また、両者の機械的性質は Table I のとおりである。

Table I. Mechanical properties.

Material	Specific gravity	Moisture content (%)	Tensile strength (MPa)	Bending strength (MPa)	Young's modulus in bending (MPa)	Internal bond strength (MPa)
Hardwood type fiberboard	0.65	8.0	12.3(//) 12.1(⊥)	19.6	2942.0	0.78
Softwood type fiberboard	0.60	8.0	13.4(//) 13.2(⊥)	19.6	2942.0	0.78
DuPont Corian	1.80		27.6	62.1		

// : Parallel to length of sheet.

⊥ : Perpendicular to length of sheet.

† 原稿受理 平成元年11月6日 Received Nov. 6, 1989

* 正 会 員 東北大学工学部 仙台市青葉区荒巻字青葉, Faculty of Engineering, Tohoku University, Aramaki-aoba, Aoba-ku, Sendai

Fig. 1. Specimen shape and dimensions (in mm).

試験片は Fig. 1 に示すような形状、寸法の CTS 試験片である。なお、MDF とは木材繊維、その他の植物繊維から生産される板状製品で比重 0.40～0.80 のものをいう。本実験に用いた MDF はほぼ等方性材料とみなせる。

また、試験片の厚さ B は MDF が 15 mm、デュボンコーリアン（以下、コーリアンと記す）が 13 mm

Fig. 2. Device for the introduction of superimposed normal and shear loads into a specimen.

Fig. 3. Loading device with test specimen.

である。試験片は初期き裂長さ a と試験片幅 W の比、 a/W が 0.5 になるように仕上げた。

混合モード負荷試験は Fig. 2 に示す治具を Fig. 3 に示すように試験機に取付けたチャックにピンによって取付けて行った。ピン穴の位置を変えることにより、試験片にモードⅠ、モードⅡおよびモードⅠとモードⅡの混合モード負荷を与えることができる。混合モード負荷試験は容量 9.8kN の引張圧縮試験機（Shinkoh TCM 1000 型）を用い、一定のクロスヘッド速度（0.2 mm/min）で行った。なお、負荷試験は室温で行った。また、実験に用いた試験片の個数は MDF の場合は 1 条件につき 4 個であり、コーリアンの場合には 1 条件につき 2 個である。

応力拡大係数は次式を用いて計算した。²⁴⁾

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{WB} \cdot \frac{\cos \alpha}{1 - \left(\frac{a}{W}\right)} \sqrt{\frac{0.26 + 2.56\left(\frac{a}{W-a}\right)}{1 + 0.55\left(\frac{a}{W-a}\right) - 0.08\left(\frac{a}{W-a}\right)^2}} \quad (1)$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{WB} \cdot \frac{\sin \alpha}{1 - \left(\frac{a}{W}\right)} \sqrt{\frac{-0.23 + 1.40\left(\frac{a}{W-a}\right)}{1 - 0.67\left(\frac{a}{W-a}\right) + 2.08\left(\frac{a}{W-a}\right)^2}} \quad (2)$$

ここで、 P : 荷重、 W : 試験片幅、 B : 試験片の厚さ、 a : き裂長さ、 α : Fig. 2 に示した角度 α 。

3 実験結果および考察

本実験では、き裂材を用いずに、切欠き材（切欠き幅 0.3 mm）を用いた。切欠き厚は厚さ 0.2 mm の jewel saw により入れ、切欠き先端は特別に処理を行わなかった。この切欠き材について、少し考えてみたい。著者は以前に、MDF およびコーリアンについて、破壊じん性に及ぼす切欠き先端半径の影響を実験的に調べた。その結果、MDF の場合には、破壊じん性は、切欠き先端半径 ρ が 1.5 mm 以下では、切欠き先端半径 ρ の影響をほとんど受けない²⁷⁾、また、コーリアンについても、破壊じん性は、切欠き先端半径 ρ が 0.5 mm 以下では、 ρ の影響をほとんど受けないことが分かった²⁸⁾。それ故、本実験で用いた切欠き材（切欠き幅 0.3 mm）は、き裂材と見なしてもよいと思われる。したがって、以下、き裂材と見なして検討を進める。

混合モード負荷試験を行った試験片の破面写真を Fig. 4、Fig. 5 および Fig. 6 に示す。破面写真中の a はモードⅠ、 g はモードⅡ、 $b \sim f$ はモードⅠとモードⅡの混合モード負荷によるものである。これより、

Fig. 4. Broken compact tension shear specimens of softwood type fiberboard (a: Mode I, b~f: mixed mode, g: Mode II).

Fig. 5. Broken compact tension shear specimens of hardwood type fiberboard (a: Mode I, b~f: mixed mode, g: Mode II).

b ~ g の場合には、き裂はせん断方向に対して、ある角度傾いて成長していることが分かる。

MDF およびコーリアンにおける応力拡大係数 K_I と K_{II} との関係を示したのが Fig. 7 である。図より明らかなように、針葉樹タイプの MDF の値が熱帯広葉樹材タイプの MDF およびコーリアンの値よりも大きい。針葉樹タイプの MDF の K_I , K_{II} が、熱帯広葉樹材タイプの値よりも大きいのは、針葉樹材の繊維が熱帯広葉樹材の繊維よりかなり長いため、繊維間の絡みが多くなるのが原因と思われる。また、コーリアンの

Fig. 6. Broken compact tension shear specimens of Corian (a: Mode I, b~f: mixed mode, g: Mode II).

Fig. 7. The relationships between K_I and K_{II} in fracture under mixed Modes I and II.

K_I , K_{II} が MDF の値よりも小さいのは、コーリアンの曲げ強度は MDF の曲げ強度よりも大きい、コーリアンは、MDF よりもかなりぜい性的であることによるためと考えられる。

Fig. 8, Fig. 9 および Fig. 10 はそれぞれ針葉樹タイプ MDF, 熱帯広葉樹材タイプ MDF, およびコーリアンにおける K_I/K_{Ic} と K_{II}/K_{Ic} との関係を示す。また、各図には従来提案されている種々のクライテリオン^{1)-5), 9)}による計算結果を併せて示しておいた。これらの図から分かるように、MDF の実験結果は Amestoy らによるクライテリオン⁹⁾にほぼ近く、コーリアンの実験結果は Maximum stress criterion および Amestoy らによるクライテリオンにほぼ近い。

また、混合モードの破壊条件は経験的には次式でも

Fig. 8. The relationships between K_{II}/K_{IC} and K_I/K_{IC} in fracture under mixed Modes I and II. The curves were calculated based on various criteria hitherto proposed in the literatures. (Softwood type fiberboard).

Fig. 10. The relationships between K_{II}/K_{IC} and K_I/K_{IC} in fracture under mixed Modes I and II. The curves were calculated based on various criteria hitherto proposed in the literatures. (Corian).

表される。

$$\left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^u + \left(\frac{K_{II}}{K_{IC}}\right)^v = 1 \quad (3)$$

これに関しては、従来報告されている実験結果をみると、 u および v の値は材料により異なった値となっている。MDF およびコーリアンにおける K_I/K_{IC} と K_{II}/K_{IC} との関係を示すと、それぞれ Fig. 11, Fig. 12 および Fig. 13 のようになり、MDF は両タイプ共式 (4) で、コーリアンは式 (5) で近似的に表せる。

$$\frac{K_I}{K_{IC}} + \left(\frac{K_{II}}{K_{IC}}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

$$\frac{K_I}{K_{IC}} + \left(\frac{K_{II}}{K_{IC}}\right)^{1.7} = 1 \quad (5)$$

従来の実験および本実験によって得られた u および v の値を、比較のため、Table II に示す。本実験の結果について見ると、MDF の結果は、PMMA²⁴⁾ についての結果と同じであるが、コーリアンの結果は、従来の実験結果とは異なっている。式 (3) の関係については、今後、多種類の材料について詳細な実験を行い、検討を行うことが必要である。

つぎに、各応力拡大係数比、 $K_{II}/(K_I + K_{II})$ における

Fig. 9. The relationships between K_{II}/K_{IC} and K_I/K_{IC} in fracture under mixed Modes I and II. The curves were calculated based on various criteria hitherto proposed in the literatures. (Hardwood type fiberboard).

Fig. 11. K_I/K_{IC} versus K_{II}/K_{IC} for softwood type fiberboard under mixed mode loading.

Fig. 12. K_I/K_{IC} versus K_{II}/K_{IIC} for hardwood type fiberboard under mixed mode loading.

Fig. 13. K_I/K_{IC} versus K_{II}/K_{IIC} for Corian under mixed mode loading.

破壊角（き裂の成長方向：本実験では切欠き先端から約 2 mm 位までのき裂の成長から成長方向を測定した）を示したのが、Fig. 14, Fig. 15 および Fig. 16 である。なお、これらの図には、従来提案されているモードⅠとモードⅡの混合モード負荷での、破壊の種々のクライテリオン^{1)~3), 9)}から導かれている、き裂の成長方向の計算結果も併せて示しておいた。図から明らかなように、両タイプの MDF およびコーリアンの実験によるき裂の成長方向のクライテリオンは、従来のクライテリオンのいずれにも従わない。この原因については今後、検討する予定である。

4 結 論

針葉樹と熱帯広葉樹材タイプの中質ファイバーボードおよびコーリアンについて、同一形状の切欠き材を

Table II. u and v values.

Material	u	v	K_{IIC}/K_{IC}	Researcher
4340 steel	1	1	1.09	R. C. Shah
0.04% carbon steel	2	2	0.83	T. Yokobori <i>et al</i>
Graphite	1.6	1.6	1.09~1.16	H. Awaji and S. Sato
Plaster	1.6	1.6	1.14	"
Marble	2.0	2.0	1.13	"
PMMA	1	2	0.93	H. A. Richard
Hardwood type fiberboard	1	2	0.81	Present work
Softwood type fiberboard	1	2	0.80	"
DuPont Corian	1	1.7	0.86	"

Fig. 14. The direction of crack growth as a function of $K_{II}/(K_I + K_{II})$ of the stress intensity factor. (Softwood type fiberboard).

用い、モードⅠとモードⅡの混合モード負荷試験を行った結果、次のことが分かった。

(1) 本方法で得た MDF の破壊のクライテリオンは Amestoy らによるクライテリオンに近いが、コーリアンの破壊のクライテリオンは Maximum stress criterion および Amestoy らによるクライテリオンに近い。

(2) MDF およびコーリアンによる、モードⅠとモードⅡの混合モード負荷の下でのき裂の成長方向のクライテリオンは、従来のクライテリオンのいずれにも従わない。

（平成元年 9 月 27 日 第 5 回破壊力学シンポジウムにて講演）

参 考 文 献

- 1) F. Erdogan and G. C. Sih, J. Basic Engng., 85, 519 (1963).

Fig. 15. The direction of crack growth as a function of $K_{II}/(K_I + K_{II})$ of the stress intensity factor.

(Hardwood type fiberboard).

Fig. 16. The direction of crack growth as a function of $K_{II}/(K_I + K_{II})$ of the stress intensity factor. (Corian).

- 2) G. C. Sih, "Mechanics of Fracture", Vol. 1, G. C. Sih ed., XXI (1973) Noordhoff Int. Pub., Leyden.
- 3) M. A. Hussain, S. L. Pu and J. Underwood, ASTM STP 560, 2 (1974).
- 4) D. Broek, "Elementary Engineering Fracture Mechanics", p. 329 (1974) Noordhoff Int. Pub., Leyden
- 5) K. F. Fischer and H. Goldner, Int. J. Fract., **17**, R3 (1981).
- 6) J. Tirosh, Engng. Fract. Mech., **9**, 607 (1977).
- 7) R. J. Nuismer, Int. J. Fract., **11**, 245 (1975).
- 8) G. Di Leonardo, Int. J. Fract., **15**, 537 (1979).
- 9) M. Amestoy, H. D. Bui and Van K. Dang, Proc. Int. Conf. Fract. V, Cannes, p. 107 (1981).
- 10) E. M. Wu, J. Appl. Mech., **34**, 967 (1967).
- 11) L. P. Pook, Engng. Fract. Mech., **3**, 205 (1971).
- 12) J. G. Williams and P. D. Ewing, Int. J. Fract. Mech., **8**, 441 (1972).
- 13) R. C. Shah, ASTM STP 560, 29 (1974).
- 14) A. F. Liu, AIAA Journal, **12**, 180 (1974).
- 15) S. T. Chiu and A. F. Liu, ASTM STP 590, 263 (1976).
- 16) J. G. Williams and M. W. Birch, ASTM STP 601, 125 (1976).
- 17) 上田幸雄, 池田一夫, 矢尾哲也, 青木 満, 吉江 崇,

- 白倉貴雄, 日本造船学会論文集, No. 139, 240 (1976).
- 18) A. de S. Jayatilaka, I. J. Jenkis and S. V. Prasad, ICF4, Waterloo, Vol. 3, p. 15 (1977).
- 19) H. Awaji and S. Sato, J. Engng. Mat. Tech., **100**, 175 (1978).
- 20) C. W. Woo and C. L. Chow, "Fracture Mechanics in Engineering Application", G. C. Sih and S. R. Valluri Eds., 387 (1979) Sijthoff & Noordhoff, Leyden
- 21) T. Yokobori, I. Maekawa, A. T. Yokobori, Jr., K. Sato and Y. Ishizaki, Proc. Int. Symp. on Absorbed Specific Energy and Strain Energy Density Criterion, G. C. Sih, et al. Eds., p. 45 (1981).
- 22) 横堀武夫, 横堀寿光, 佐藤 清, 面谷 信, 日本機械学会論文集, A-48, 707 (1982).
- 23) T. Yokobori, A. T. Yokobori, Jr., K. Sato and M. Omotani, Engng. Fract. Mech., **17**, 75 (1983).
- 24) H. A. Richard, Proc. Int. Conf. on Application of Fracture Mechanics to Materials and Structures, Freiburg, p. 309 (1983).
- 25) 坂田 勝, 青木 繁, 岸本喜久雄, 滝沢正和, 筑後 浩, 日本機械学会論文集, A-51, 2129 (1985).
- 26) 佐藤 清, 木材学会誌, **34**, 828 (1988).
- 27) 佐藤 清, 木材学会誌, **34**, 955 (1988).
- 28) 佐藤 清, 未発表.