

論文 コンクリートの混合モード破壊に及ぼすモードII成分の影響

中村成春*1・橘高義典*2・上村克郎*3

要旨：本研究は、モードIから混合モードに至る段階的な境界条件下における混合モード破壊試験を行い、モードII成分がコンクリートの混合モード破壊挙動に及ぼす影響について検討した。また、2次元静弾性境界要素法により混合モード破壊におけるひびわれ進展性状について考察した。その結果、モードII成分が強まると破壊は脆性的になり、最大荷重及び見かけの剛性は高まるものの、不安定破壊が生じやすくなることが示された。また、ひびわれの進展が開始すると破壊変形モードが変化し、モードI成分が卓越するとひびわれ方向が変化しにくくなり、直進する傾向にあることが示された。

キーワード：混合モード破壊、ひびわれ、荷重変位曲線、応力拡大係数、境界要素法

1. はじめに

近年、コンクリートの破壊あるいはひびわれの進展問題の解明に破壊力学的手法を応用する研究が多く行われているが、そのほとんどはモードI（引張）破壊を対象としている。一方、実RC構造物におけるコンクリート部の破壊は、一般にモードIとモードII（せん断）が組み合わさった混合モード破壊になる場合が多く、コンクリートの混合モードでの破壊性状の把握は極めて重要である。特に、せん断力等の急激な荷重作用を受けるRC部材においては、コンクリート母材の破壊挙動が混合モード破壊となるため、そのメカニズムの解明ならびに評価方法の確立は、部材の安全性の観点から最も重要なテーマである。このような、コンクリートの混合モード破壊問題を解明するための問題点として、①コンクリートの混合モード破壊におけるひびわれの進行は、モードI破壊の直線的な進展とは異なり、曲折・分散しながら進展し破壊形態が複雑になる、②混合モード破壊試験は、各研究者により種々の方法が提案されているが、一般化されていない、③混合モード破壊試験においては、境界条件の差異により破壊変形モードが異なることから試験結果の統一的な評価が難しい、④ひびわれ進展の予測及び数値解析方法に関し、コンクリートに適応した合理的な方法が確立されていない、等が指摘できる[1]。これらの諸問題を解決するためには、まず基本的に、モードI, II負荷の組み合わせが系統的で明確な境界条件下における混合モード破壊試験を実施し、実際のコンクリートの混合モード破壊挙動を十分に把握する必要があると考える。これを基に、コンクリート材料に適切な破壊力学パラメータ、破壊クライテリオン、数値解析での材料構成則等が求められる。

本研究では、混合モード負荷状態を線形破壊力学的手法を適用することよりモードI, II成分に分離・評価し、モードIから混合モードに至る段階的な境界条件下における混合モード破壊試験を実施することで、モードII成分がコンクリートの混合モード破壊挙動に及ぼす影響について検討する。また、境界要素法を活用することより混合モード破壊におけるひびわれ進展経路ならびにひびわれ進展時の破壊変形モード等のひびわれ進展性状について考察する。

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科生産・情報工学専攻, 工修(正会員)

*2 東京都立大学助教授 工学部建築学科, 工博(正会員)

*3 関東学院大学教授 工学部建築学科, 工博(正会員)

2. 混合モード負荷状態での応力拡大係数による構成成分分離・評価方法

ひびわれ先端近傍の応力場は、線形破壊力学によるとモード I, II に対応する応力成分が独立に定義され、その重ね合わせにより表示される [2]。従って、混合モード負荷状態は、負荷応力とひびわれ寸法・形状との関数として示される応力拡大係数 K_I , K_{II} によりその構成成分を分離・評価できる。 K_I , K_{II} の決定は、2次元境界要素弾性解析 (BEM 解析) による変位外挿法 [3] を適用した。これは、ひびわれ先端の極座標系を図 1 に示すように定義し、周囲の節点から各 K_I , K_{II} を求め、 $r \rightarrow 0$ へ外挿することより、応力拡大係数を求める手法である。同一座標上のひびわれ上下面 ($\theta = \pm \pi$) の相対変位 Δu_1 , Δu_2 と K_I , K_{II} との間には、次式の関係がある [3]。

$$\Delta u_i = \frac{u_i(\theta = \pi) - u_i(\theta = -\pi)}{2}; \quad i=1, 2 \quad (1)$$

$$K_I = \frac{E^*}{4} \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \Delta u_2 \quad (2)$$

$$K_{II} = \frac{E^*}{4} \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \Delta u_1 \quad (3)$$

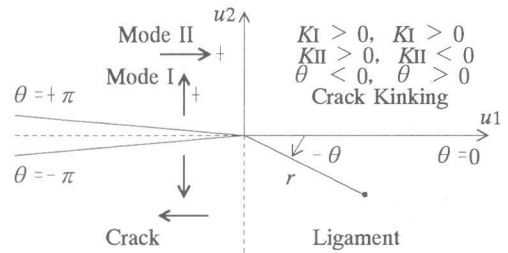


図 1 ひびわれ先端の極座標系

ここで、平面歪み: $E^* = E / (1 - \nu^2)$, 平面応力: $E^* = E$ であり、 E はヤング率, ν はポアソン比を表す。また、BEM 解析プログラムは、文献 [3] に示されている FORTRAN プログラム例を参考に、以下の点を考慮し N88-BASIC により作成した。すなわち、①要素は 2 次のアイソパラメトリック要素を用いた、②領域分割法を適用した、③外挿には最小 2 乗法を適用した、④解析モデルは等方均質弾性体と仮定した、⑤集中荷重は分布力に置換した、等に留意した。

3. 線形破壊力学に基づくひびわれ進展シミュレーション方法

コンクリートの破壊過程においては、主ひびわれの周囲に多数の微細ひびわれが発生・累積し、広範囲の破壊進行領域 (FPZ) が形成される。このため、一般規模の実 RC 構造物では、ひびわれ先端近傍の塑性変形が無視できず、小規模降伏条件が前提となる線形破壊力学的手法の適用は困難である。しかしながら、弾性変形が増大し、ひびわれが開始する初期においては、試験体のひびわれ進展方向、進展挙動等は、線形破壊力学的手法によっても定性的に推定できるものと考えられる。

図 2 に線形破壊力学的手法に基づくひびわれ進展解析フロー図を示す。解析方法は、①材料物性 (ヤング率, ポアソン比) ならびに境界要素データを入力し、② BEM 解析の実行により、単位荷重 $P = 1$ の変形挙動を求め、式(1)からひびわれ相対変位 Δu_1 , Δu_2 を決定する、③式(2)及び式(3)から応力拡大係数 K_I , K_{II} を決定する、④与えられた破壊クライテリオン (後述の式(4)及び式(5)) に基づき、ひびわれ進展方向 θ ならびに破壊開始に必要な荷重比率を決定し、⑤限界荷重値 P_c ならびにその時の解析モデルの全変形量を決定する、⑥ここで、ひびわれ先端部を求められた進展方向に、ひびわれ進展長さ Δa だけ進展させ、解析モデルの境界要素データを作成し直す、⑦以上より、ひびわれが進展した時点の新たな境界要素データが求められることになり、ひびわれ進展終了まで再入力を繰り返すことで、ひびわれ進展解析が可能となる。

破壊クライテリオンは、Erdogan and Sih [4] による $\sigma\theta$ クライテリオンを適用した。ひびわれは常に最大周方向応力の方向 θ_c に進展し、破壊はその方向に直角な方向の応力拡大係数が破壊靱性値 K_{Ic} に達した時に開始する。ひびわれ進展方向を式(4)に、ひびわれ発生基準を式(5)に、ひびわれ屈曲条件を図1中に示す。式(4)から K_I は常に正で、負の K_{II} に対し θ は正となり、正の K_{II} に対し θ は負となる。

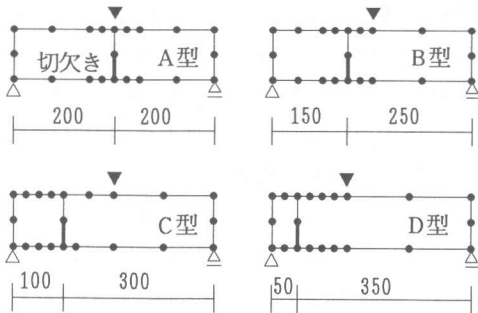
$$K_I \sin \theta_c + K_{II}(3 \cos \theta_c - 1) = 0 \quad (4)$$

$$\cos \frac{\theta_c}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta_c}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_c \right] \geq K_{Ic} \quad (5)$$

4. 実験概要

本研究では、混合モード下におけるモード I, II 成分の組み合わせを明確にし、モード I 破壊試験と比較するため、切欠き梁 3 点曲げ試験に準じ切欠き梁非対称型 3 点曲げ試験とした。図3に荷重方法、試験体寸法と切欠き深さ、及び BEM 解析の要素分割を示す。A ~ D 型の切欠き位置での引張とせん断の比が異なり、モード I 負荷から段階的に各種混合モード負荷が実現できる。

表1に実験の要因と水準を示す。混合モード負荷はモード I 負荷を含めて4水準とし、粗骨材有無による差異及び圧縮強度3水準による差異を検討した。表2にコンクリートの調合条件及び性質を示す。セメントは普通ポルトランドを用い、低 W/B では高性能 AE 減水剤及びシリカフェームを混入した。骨材は鬼怒川産川砂と最大寸法 15mm の青梅産硬質砂岩砕石を用いた。試験体数は1条件3体とし、材齢 12 週 20℃水中養生とした。強度特性は関連 JIS に従い、 K_{Ic} は応力拡大係数ハンドブック [5] から求め、破壊エネルギー GF は RILEM 試験法 [6] に準じて求めた。



試験体せい及び幅 100, 切欠き長 50, 単位mm
境界節点数 60点, 境界要素数 30個

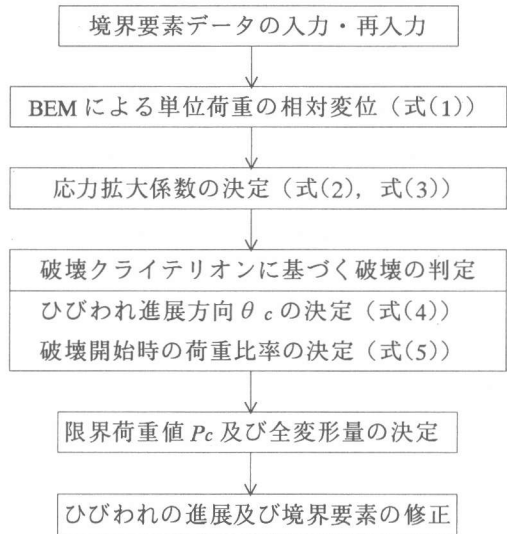
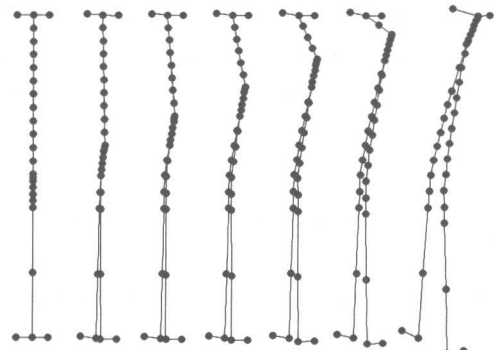


図2 ひびわれ進展線形解析フロー図



ひびわれ進展に伴うひびわれ先端部の要素分割

図3 混合モード負荷方法及び BEM 解析での要素分割パターン

表 1 実験の要因と水準

Factors	Levels
Mixed-mode type	A (Mode I), B, C, D
Specimen type	Mortar, Concrete
W/B* %	15, 25, 54

*Water blended-powder ratio ; $W/B=W/(C+SF)$

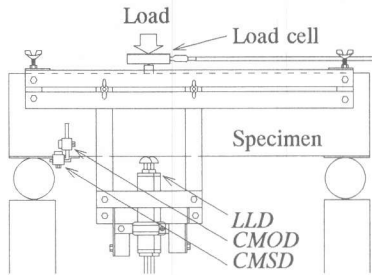


図 4 非対称型 3 点曲げ試験概要

図 4 に非対称型 3 点曲げ試験概要を示す。A ~ D 型の変位計測を統一的行うため、変位計ホルダー部を水平に移動可能とした。ロードセルから荷重 P を、変位計から荷重線変位 LLD を、クリップゲージから切欠き肩口の開口変位 $CMOD$ 及びずれ変位 $CMSD$ をそれぞれ計測した。また、試験後に試験体表裏のひびわれ進展状況を 5mm 方眼に記録し、ひびわれ経路図を作成した。

5. 実験結果及び考察

図 5 に非対称型 3 点曲げ試験から測定された各 P - LLD 曲線の平均化曲線結果を示す。a ~ c 図がモルタル (M シリーズ) を、d ~ f 図がコンクリート (C シリーズ) を表す。荷重状態がモード I 荷重の A 型から混合モード荷重の B, C, D 型の順に変わるにつれ、最大荷重点以後の軟化特性の測定が困難になり不安定破壊が顕著に見られる。一方、 C シリーズ (特に $C54$) では、比較的軟化が現れており、粗骨材の存在が不安定破壊を抑制していることがわかる。

図 6 に各試験体表裏のひびわれ進展経路を相加平均した平均化経路結果を示す。図中の初期ひびわれ発生角度 θ_{obs} は、切欠き先端原点と Y 方向に 5mm 進展した第 1 点の成す角度と、原点と 10mm 進展した第 2 点の成す角度との平均値として求めた。荷重状態が A から B, C, D 型の順に θ_{obs} は増加し載荷方向に進展するが、C, D 型では第 2 点付近を境に屈折角度が多少 Y 方向に傾き、載荷方向よりずれる湾曲が見られる。一方、巨視的には直線的な経路と見なすこともできる。

図 7 に非対称型 3 点曲げ試験から求められた各種破壊パラメータを示す。a 図に P - LLD 曲線下の見かけ剛性 S (最大荷重の 1/2 までの範囲にある測定値を基に最小 2 乗法により算定) を、b 図に単位投影破断面積当たりの破壊仕事量 Γ (系の外部から成された仕事と破壊時に試験機が蓄えた弾性変形エネルギーとの和 [1]) を示す。荷重状態が A から B, C, D 型の順に、 S はすべての試験体で増加するが、 M , C シリーズ間の差異は明確には見られない。一方、 Γ は、荷重状態が A ~ D 型の順に増加する ($C25$, $C54$) が、軟化特性が計測されにくい M シリーズ及び $C15$ では不安定破壊の発生に伴い、 Γ は減少する傾向にある。

表 2 コンクリートの調合条件及び性質

Type	Unit weight kg/m ³						SF C%	S.P. Cwt%
	W	C	SF	S	G	A		
M15	154	1122	280	777	-	112	20	8.0
C15	103	746	186	517	891	75	"	"
M25	207	818	91	1217	-	41	10	2.3
C25	138	545	61	808	891	27	"	"
M54	335	615	-	1217	-	-	-	-
C54	222	409	"	808	894	"	"	"

Type	f_c MPa	f_t MPa	E GPa	ν	KIc MPa√m	GF Nm/m ²
M15	103	5.5	35.5	0.22	1.02	17.5
C15	110	4.3	39.1	0.21	0.93	124.4
M25	94	7.0	37.7	0.24	0.78	62.6
C25	77	6.4	36.9	0.20	1.08	165.0
M54	51	4.2	26.3	0.24	0.66	68.5
C54	45	3.8	31.5	0.19	0.78	151.5

W;water, C;cement, SF;silica-fume, S;sand, G;gravel, A;admixture

SF-C%;percentage of silica-fume's mixing

S.P.-Cwt%;percentage of admixture's mixing

f_c ;compressive strength, f_t ;tensile splitting strength

E ;young's modulus, ν ;poisson's ratio

KIc ;fracture toughness of mode I, GF ;fracture energy of mode I

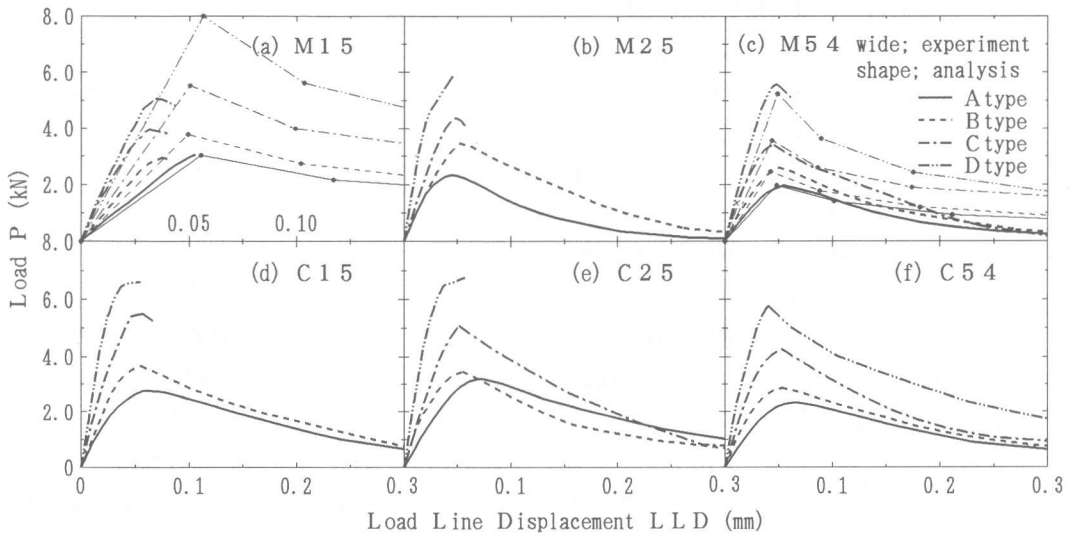


図5 荷重-荷重線変位曲線

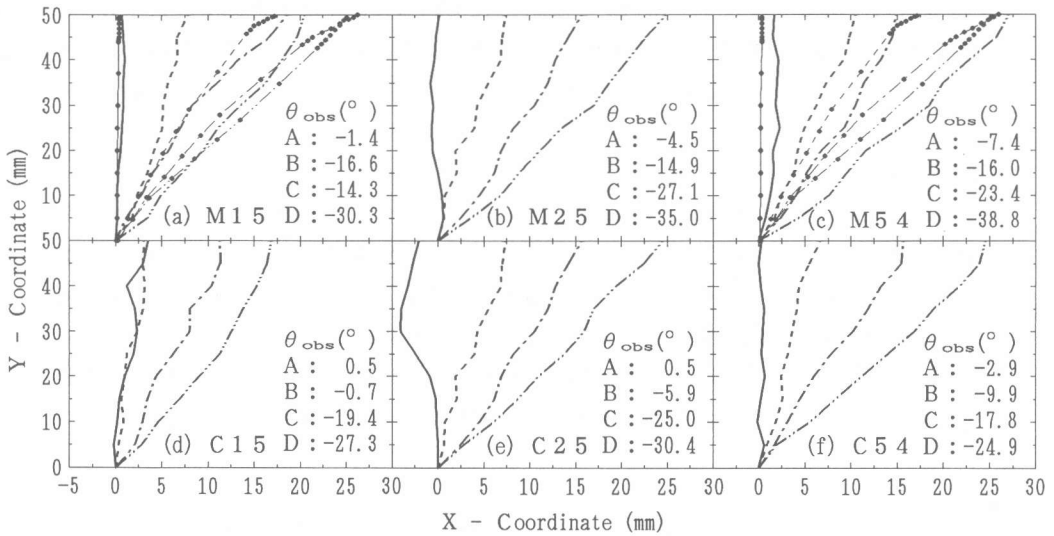


図6 ひびわれ進展経路及び初期ひびわれ角度

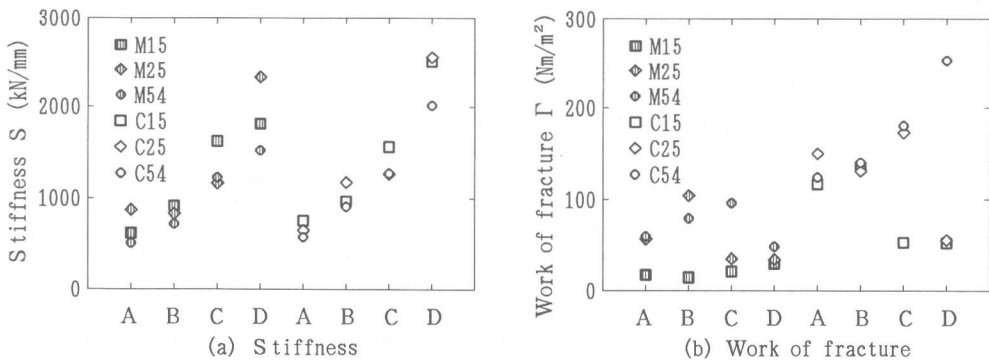


図7 破壊力学パラメータ

6. ひびわれ進展解析結果及び考察

図8にBEM解析より求められた破壊変形モード比 (K_{II}/K_I) とひびわれ進展長さとの関係を示す。ひびわれ進展長さ Δa は 10mm 一定とし、材料物性値は表2中のデータを用いた。ひびわれ発生前の破壊変形モード比より、負荷状態がモードI 負荷のA型からB, C, D型の順に変わるとつれ、モードII成分が強く作用している。しかしながら、破壊が進み変形量が増してくるとモードII成分の作用が低減し、モードI成分が卓越する傾向にある。

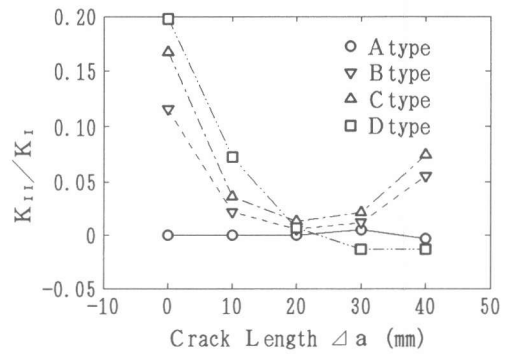


図8 破壊変形モード比とひびわれ進展長さ

また、図5、図6中にひびわれ進展解析から求められたM15, M54のP-LLD曲線ならびにひびわれ進展経路を細線で示す。図5中のM15, M54のP-LLD曲線において、モードII成分が強まると最大荷重及び見かけ剛性が高まることが示された。特にM54は、負荷状態にかかわらずP-LLD曲線の巨視的な挙動が実験値と一致している。しかしながら、M15では、剛性は一致するものの最大荷重値は異なり、B, C, D型の順に実験値との差が大きくなる。一方、図6中のひびわれ経路においてB, C型で実験値との差が大きいが、巨視的には載荷方向に直進する傾向にある。進展時にモードI成分が卓越し、ひびわれ方向が変わりにくくなったためと思われる。

7. 結論

段階的に混合モード負荷条件下での破壊試験を行い、モードII成分がコンクリートの混合モード破壊挙動に及ぼす影響について検討した結果、本研究の範囲で以下が明らかになった。

- (1) モードII成分が強まると破壊は脆性的になり、最大荷重及び見かけの剛性は高まるものの、軟化特性の測定が困難となり、不安定破壊が生じやすくなる。
- (2) 線形破壊力学に基づくひびわれ進展解析結果によれば、ひびわれ進展が開始すると破壊変形モードが変化し、モードI成分が卓越するとひびわれ方向が変化しにくくなり直進する。

謝辞

実験にご協力頂きました、(株)中研コンサルタント宇都宮技術センターの皆様、金子和人氏(宇都宮大学技術官)、当時卒論生の酒井龍一氏(西松建設)、野田直彦氏(ビルダーズヤード)、菊池政人氏(日本国土開発)ならびに大須賀秀明氏(安藤建設)に感謝致します。

参考文献

- [1] 中村成春, 橋高義典, 上村克郎: 高強度コンクリートの混合モード破壊に及ぼす粗骨材の影響 ブラジリアンディスク型混合モード破壊試験による吸収エネルギーの評価, 日本建築学会構造系論文集, 第469号, pp.25-35, 1995.3
- [2] 岡村弘之: 破壊力学と材料強度講座-1 線形破壊力学入門, pp.19-25, 培風館, 1976.5
- [3] 結城良治, 木須博行: 境界要素法による弾性解析, 培風館, 1987.12
- [4] Erdogan, F. and Sih, G.C.: On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear, Journal of Basic Engineering, Transactions of ASME, pp.519-527, December, 1963
- [5] Murakami, Y., Aoki, S., Hasebe, N., Itoh, Y., Miyata, H., Miyazaki, N., Terada, H., Tohgo, K., Toya, M. and Yuuki, R.: Stress Intensity Factors Handbook, Committee on Fracture Mechanics The Society of Materials Science, Japan, Pergamon Press, Vol.1, pp.13-15, 1987
- [6] RILEM Draft Recommendation (50-FMC): Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beames, Materials and Structures, Vol.18, No.106, pp.285-290, July-August, 1985