

동적하중 하에서의 강도적 불균질재의 연성크랙 발생거동의 실험적 검토

- 강도적 불균질 및 동적부하의 영향에 의한 연성크랙 발생조건 (제1보) -

안규백* · 大畑充** · 豊田政男**

*大阪大學 大學院 工學研究科 (현, 姫路工業大學 大學院 工學研究科)

**大阪大學 大學院 工學研究科

Experimental Examination of Ductile Crack Initiation with Strength Mismatch under Dynamic Loading

- Criterion for Ductile Crack Initiation Effect of Strength Mismatch and Dynamic Loading (Report 1) -

Gyu-Baek An*, Mitsuru Ohata** and Masao Toyoda**

*Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka 565-0871, Japan

(Presently Graduate School of Engineering, Himeji Institute of Technology, Himeji 671-2201, Japan)

**Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka 565-0871, Japan

Abstract

It has been well known that the ductile cracking of steel would be accelerated by triaxial stress state. Recently, the characteristics of critical crack initiation of steels are quantitatively estimated using the two-parameters, that is, equivalent plastic strain and stress triaxiality, criterion.

This study is paid to the fundamental clarification of the effect of geometrical heterogeneity and strength mismatching, which can elevate plastic constraint due to heterogeneous plastic straining, and loading rate on ductile crack initiation behavior. Also, the ductile crack initiation testing were conducted under static and dynamic loading using round bar specimens with circumferential notch and strength mis-matching.

The result showed that the nominal strain at ductile crack initiation of circumferential notch specimens small then the round bar specimens for effect of geometrical discontinuity. Also, the nominal strain at ductile crack initiation was decreased with decrease of notch root radius of curvature.

* Corresponding author : angb@mech.eng.himeji-tech.ac.jp

(Received July 18, 2003)

Key Words : Strength mismatch, Dynamic loading, Ductile crack initiation behavior, Geometrical heterogeneity

1. 서 론

건축 철골 구조물 등의 용접 강구조물에서는, 지진 하중 등에 의해 거대한 변형을 동반하는 경우, 초기결함 등의 응력집중원이 존재하지 않아도, 용접 접합부로 대표되는 구조적인 응력·변형을 집중부에서 큰 소성변형을 동반한 연성크랙이 발생하여, 그것이 취성파괴의 기점이 되는 경우가 많이 있다. 일본의 효고 남부 대지

진에서는, 진동의 변형속도가 100kine (cm/s)을 넘는 동적·대변형에 의해서, 건축 철골 구조물의 보와 기둥의 용접 접합부에 있어서 이러한 연성크랙의 발생·진전을 동반한 취성적인 파괴사례가 적지 않게 발견되었다^{1,3)}. 이처럼 구조적 불안전 현상을 가지고있는 강구조물의 취성파괴를 방지하고, 적절한 안전성평가를 수행하여 취성파괴에 선행하여 발생하는 연성크랙의 발생조건과 지배인자를 해명하여, 그 한계평가수법을 확립하는 것이 매우 중요하다고 생각한다.

중래 부터, 강재의 연성크랙발생은 다축응력장에 의해 촉진되는 것이 크랙발생에 지배적인 보이드 성장이론으로 부터도 설명되고 있고⁴⁾, 주로 원주노치 환봉시험편을 사용한 실험에 의하여 노치가 날카롭게 될수록 크랙 발생 한계변형률이 저하한다고 하는 실험결과가 다수 보고 되어 있다⁵⁻¹⁰⁾. 이것은, 노치의 존재에 따른 형상적 불연속이 소성구속의 정도를 높이는 것에 기인한 것이고, 이러한 연성크랙 발생 특성의 정량적 평가가 상당소성변형률과 응력다축도의 2파라메타를 이용해서 정리되고 있다⁸⁻¹⁰⁾.

한편, 강구조물에 있어서 용접 접합부에는 형상적 불연속부만 존재하는 것이 아니라, 일반적으로 강도적 불연속부가 존재하는 경우가 많다. 이처럼 강도적 불균질의 존재는 소성변형의 불균일로부터 갖게되는 소성구속의 영향으로부터, 저강도부의 강도를 상승시켜 부재의 변형거동에도 영향을 미친다¹¹⁻¹²⁾. 즉, 강도적 불균질에 있어서는 고강도재료에 의한 소성변형의 구속효과에 따른 저 강도 재료의 응력다축도가 상승하는 것으로부터, 연성크랙의 발생거동 또한 영향을 받게 될 것이라고 생각한다. 또한, 강재가 동적부하를 받아 변형률속도가 틀린 경우에 기계적 특성이 변화한다는 것은 잘 알려져 있고¹³⁻¹⁵⁾, 그 응력-변형률 특성은 고속부하에 따른 단열적 소성변형이 갖게되는 온도상승의 영향을 받는다. 일반적으로 강재의 가공경화능이 작을수록 소성변형의 국재화가 현저하게 되고 응력다축도가 상승하는 경향이 있는 것으로부터, 응력-변형률 특성의 영향에 따른 동적부하가 연성크랙의 발생거동에 영향을 주는 것으로 생각된다. 더욱이 강재의 강도 레벨에 의해서는 기계적 특성에 의한 변형률속도의 영향의 정도가 틀려지는 것으로부터¹⁴⁻¹⁶⁾, 강도적 불균질재에서는 그 변형거동과 크랙의 발생거동이 불균질에 의해서 소성구속과 변형률속도의 양 인자가 복잡하게 영향을 주는 것이라고 생각한다.

본 연구에서는, 이처럼 강도적 불균질이 존재하는 부재, 또한 이것이 동적부하를 받는 경우의 연성크랙 발생거동을 평가하기 위하여, 환봉 인장시험편을 사용하여, 원주에 노치를 넣은 형상적 불연속재 및 대상강재를 그것보다도 강도가 높은 강재에 양면 집합한 강도적 불균질재를 사용하여, 정적 및 동적하중하에서 인장시험을 실시하여, 연성크랙발생거동에 대하여 실험적인 고찰을 수행하였다.

2. 대상시험편 및 실험방법

본 연구에서는, HT50강의 연성크랙 발생거동에 의

한 형상적 불연속 및 강도적 불균질의 영향, 또한 동적부하에 따른 영향에 대하여 실험적인 측면에서 검토하였다.

실험에서는, HT50강의 크랙발생거동에 의한 형상적 불연속에 따른 소성구속의 정도의 영향을 살펴기 위하여, Fig. 1에 나타난 직경 10mm의 환봉시험편과, 그 시험편에 노치를 넣은, 노치반경 R이 각각 다른 2종류의 원주 노치시험편(R1, R2)을 사용했다. 또한, 강도적 불균질이 갖는 소성구속과 그 정도의 영향을 검토하는 것을 목적으로, 폭 H를 3종류로 변화시킨 HT50강(H=1.5, 3.0, 10.0mm)의 양측에 고강도의 HT80강을 확산접합 (가압력 100Mpa, 1050℃에서 30분간 유지)하여 인위적으로 강도적불균질재를 제작하여, Fig. 1에 나타난 것처럼 HT50강의 상대두께 $X (= H/D, D : 직경=10mm) = 0.15, 0.3, 1.0$ 의 3종류의 환봉시험편을 제작하여 인장시험을 실시하였다¹⁷⁾. 한편, HT50강의 균질재의 환봉 및 원주노치 시험편에 대하여서는, 확산접합 할 때와 동일조건에서 열처리를 실시한 평판으로부터 시험편을 제작하였다. 또한, 동일 열처리후의 HT80강의 기계적 특성을 알기 위하여, HT50강의 환봉시험편과 동일한 형상·사이즈의 시험편을 제작하여 인장시험을 실시하였다.

각 강재의 화학조성은 Table 1에 나타냈으며, 환봉

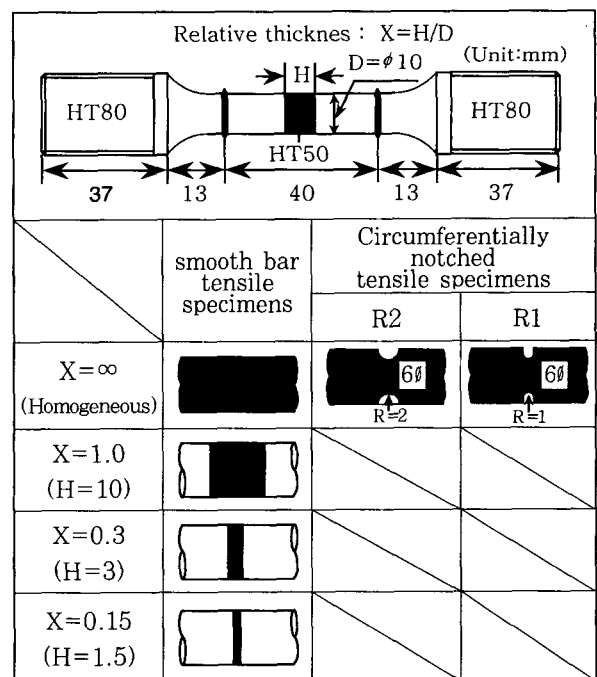


Fig. 1 Configuration of round-bar tensile specimens with geometrical heterogeneity and strength mismatch

Table 1 Chemical compositions of HT50 and HT80 steels used

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	Al	B	C _{eq}	P _{cm}
HT50	0.17	0.31	1.48	0.011	0.002	-	-	-	-	-	-	-	0.016	-	0.43	0.25
HT80	0.10	0.26	0.85	0.004	0.002	0.23	1.16	0.49	0.47	0.037	0.016	0.011	0.046	0.0012	0.50	0.25

$C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)5 + (Cu + Ni)/15$
 $P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$

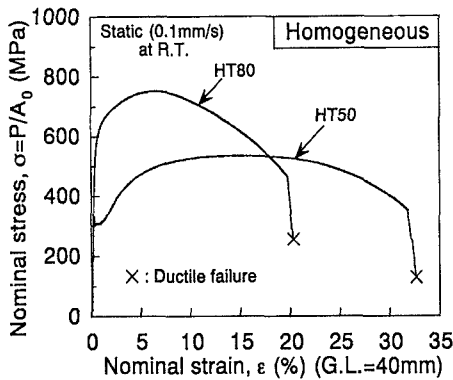


Fig. 2 Nominal stress σ —nominal strain ϵ curves obtained by tensile tests for homogeneous specimens (HT50, HT80) under static loading $0.1mm/s$

Table 2 Mechanical properties of HT50 and HT80 steels used

Steel	σ_Y	σ_T	YR	ϵ_T	EL	RA	$S_r(Y)$	$S_r(T)$
HT50	298	522	57	14.1	30.8	68	1.81	1.41
HT80	537	737	73	6.6	20.2	64		

σ_Y : Lower yield stress, σ_T : Tensile strength
 YR : Yield-to-tensile ratio (σ_Y/σ_T)
 ϵ_T : Uniform elongation
 EL : Elongation (G.L. = 40mm, Dia = 10mm)
 RA : Reduction in area,
 $S_r(Y) : \sigma_Y^{HT80}/\sigma_Y^{HT50}/S_r(T) : \sigma_T^{HT80}/\sigma_T^{HT50}$

의 인장시험에서 얻은 응력-변형률(열처리후)관계 곡선 및 그 기계적 특성을 정리한 것을 각각 Fig. 2, Table 2에 나타내었다. 각 강재의 항복강도비 ($S_r(Y)$)는 약 1.8, 인장강도비 ($S_r(T)$)는 약 1.4 정도이다.

인장시험은 크로스헤드 변위속도가 $0.1mm/s$ (정적하중)과 $100mm/s$ (동적하중)에서 실온에서 실시하였다. 시험은 유압사보식 고변형률속도 인장시험기를 사용했고, 시험 중에는 하중을 로드셀에서, 표점간변위를 고속제하의 응답성을 고려한 강성이 높은 캔틸레버식의 변위계를 이용하여 자동 계측·기록하였다. 또한, 균질시험편 및 강도적 불균질재에 대한 실험에서는, 실험중의 온도상승량을 파악하기 위하여, 시험편 중앙부 표면에 동-콘스탄탄 열전대를 부착하여 온도상승량을 측정하였다.

3. 정적·동적하중 하에서의 형상적 불연속재 및 강도적 불균질재의 연성크랙 발생 거동

3.1 정적하중 하에서의 연성크랙 발생거동에 의한 형상적 불연속의 영향

환봉 및 원주노치 시험편을 사용한 균질재 (HT50 강)의 정적하중 ($0.1mm/s$) 하에서의 연성크랙 발생 거동의 실험 및 상세한 관찰을 수행했다.

Fig. 3에 모든 시험편의 파괴까지의 하중 P —크로스헤드 변위 D_x 의 관계를 나타내었다. 어떠한 시험편에 있어서도 $P-D_x$ 의 관계에 있어서 파괴직전에 변곡점이 보였으며, 그후 급속히 하중이 저하한 후 파괴에 도달하였다. 파괴후의 시험편은 전형적인 cup and con 형태의 파면을 나타내었으며, 파면 중앙부에서는 등축딤플이 관찰되었다. 이것으로부터 시험편 중앙부 부근에서 보이드의 발생·성장에 기본 하여 연성크랙이 발생한 것이라고 추정된다.

연성크랙의 발생거동을 더욱 상세하게 관찰하기 위하여, 하중 P —변위 D_x 관계에서 나타난 변곡점의 직전 및 직후에 제하후, 시험편의 중앙단면을 SEM에 의해서 관찰하였다. 한편, 제하시험중에는 하중, 크로스헤드

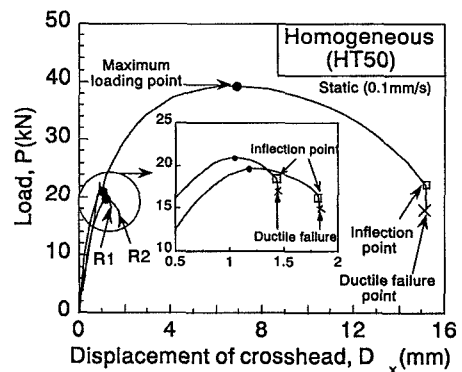


Fig. 3 Load P —displacement D_x of crosshead obtained by tensile tests for smooth and circumferentially notched specimens under static loading $0.1mm/s$

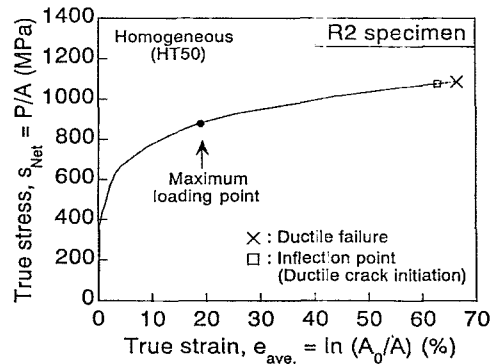
변위의 계측과 최소단면직경의 변화를 얻기 위하여 CCD내장 마이크로스코프에 의해서 관찰·녹화를 수행하였다. 예로서, R2 시험편의 변곡점 직후에 제하한 시험편의 관찰결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(c)로부터, 시험편의 잘록해진 단면의 중앙부에서 큰 보이드가 관찰되었으며, 그 보이드 사이에서 미소 보이드가 발생·연결에 의해서 발생한 것이라고 생각되는 연성크랙이 명료하게 관찰되었다. 환봉 및 R1 시험편에 있어서도 동일한 결과를 얻었다. 한편, 어떤 시험편에 있어서도 변곡점 직전에 제하한 시험편에서는, 고립되어 있는 보이드는 관찰되었지만, 그것이 연결되어서 연성크랙을 형성하는 것은 발견할 수 없었다. 이러한 관찰로부터, 파괴 직전의 급속한 하중 저하는, 시험편 중앙부에서 크랙이 발생하여, 그것이 표면으로 진전하는 과정에서 생기는 부가단면수축에 기인하는 것이라고 생각되고⁸⁾, 하중 P -크로스헤드변위 D_X 관계에서 보여진 변곡점이 크랙발생시의 부하레벨에 상당하는 것이라고 추정하였다.

실험 및 관찰로부터 얻은 균질재의 연성크랙 발생 한계변형률 ($e_{ave.1}$)_I (마이크로스코프에 의한 관찰로부터 얻은 크랙발생시의 최소단면 직경으로부터 얻은 무한소 표점간 평균변형률)을 Fig. 5에 정리하였다. 한편, 크랙발생시의 한계 신변형률은 파괴후의 직경으로부터 얻은 신변형률에 대해서 작고, 환봉시험편에서는 약 10% 정도의 변형률량의 저하가 보였다. 이처럼, 크랙발생 한계변형률은 형상적 불연속에 따른 응력다축장의 영향을 받아, 노치반경이 작아질수록 저하 하게되었다.

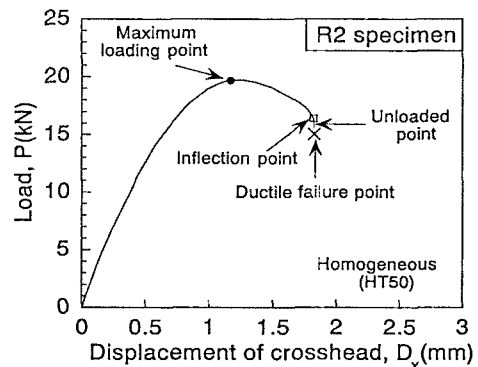
3.2 강도적 불균질재의 연성크랙 발생거동과 동적부하의 영향

균질재의 정적 인장시험에서 얻은 HT50강의 연성크랙 발생거동이, 강도적 불균질에 따른 소성구속에 의한 영향과 동적부하에 따른 영향의 중첩효과에 대하여 검토하기 위하여, HT50강의 상대두께 X (=0.15, 0.3, 1.0)를 변화시켜 이음재에 대하여 정적 및 동적 인장시험을 실시하였다.

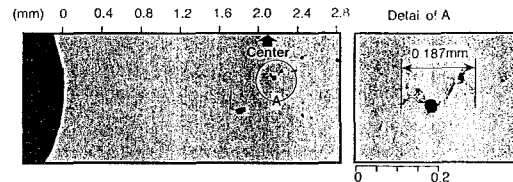
Fig. 6은 정적시험의 공칭응력과 표점간의 변위에서 얻은 공칭변형률의 관계를 나타낸 것이다. 이것을 보면, 공칭응력—공칭변형률 곡선에서도 전술에서 얻은 균질재의 거동과 같이 파괴 직전에 변곡점이 관찰되었으며, 그후 하중이 급격하게 저하하는 현상이 나타났다. 또한, 모든 시험편에 있어서 중앙부에서 등축딴플을 형성한 전형적인 cup and con형의 파면을 나타내었으며, 모두 HT50강에서 파괴가 발생한 것이 확인되었다. 이러



(a) True stress—true strain curve



(b) $P-D_X$ curve



(c) SEM micrographs of the specimen sectioned near the center of specimen just before ductile failure

Fig. 4 Ductile crack initiation behavior of R2 specimen under static loading 0.1mm/s

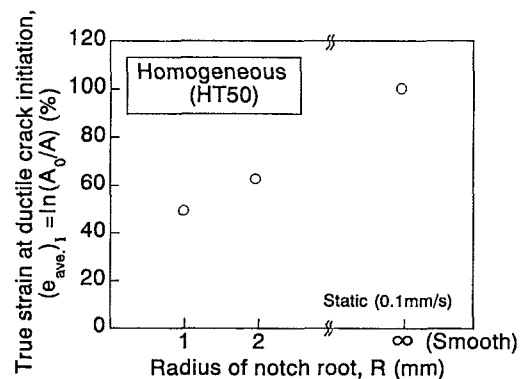


Fig. 5 Effect of notch radius R on ductile crack initiation strain ($e_{ave.1}$)_I in homogeneous HT50 specimens

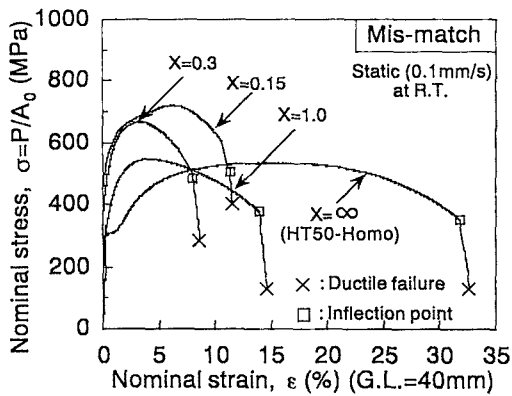


Fig. 6 Nominal stress σ —nominal strain ϵ curves obtained by tensile tests for homogeneous and strength mismatch specimens under static loading 0.1mm/s

한 관찰결과, 정하중에서의 강도적 불균질이 존재하는 경우도, 연성크랙은 시험편 중앙부에서 발생하고, 공칭 응력—공칭변형률 관계에서도 변곡점이 발생부하 레벨에 대응하는 것이라고 추정된다.

Fig. 7은 강도적 불균질재의 연성크랙발생시의 변형·연신률 특성을 나타낸 파라메타로서 공칭변형률 ϵ 을 채용하여, 한계변형률 ϵ_I 에 대한 상대두께 X 의 영향을, 상대두께와 인장강도 σ_T 의 관계와 동시에 정리했다. 이음부의 인장강도가 상대두께의 저하와 함께 크게되고 고강도재료(*HT80*강)의 강도에 접근하는 경향이 있는 것은, X 의 저하와 함께 소성구속의 정도가 상승하는 것을 나타내는 것이다^{11,12)}. 한편, 연성크랙의 발생 한계변형률 ϵ_I 는 이처럼 소성구속의 영향에 의해 상대두께의 저하와 함께 작게되는 경향이 있다. 그러나 상대두께 $X=0.15$ 와 $X=0.3$ 에서는 역전 현상이 보이는 것처럼 소성구속의 정도가 크게되거나 이음부강도가

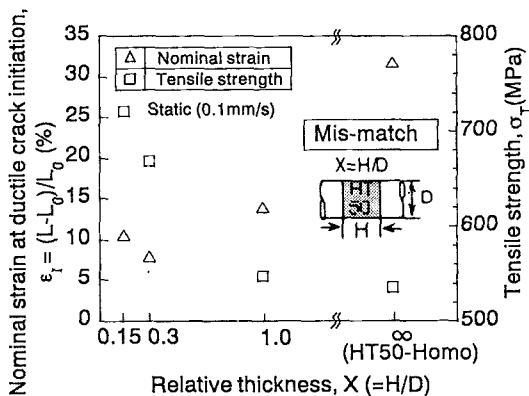


Fig. 7 Effect of relative thickness X on ductile crack initiation strain ϵ_I and tensile strength σ_T under static loading 0.1mm/s

*HT80*강과 같은 정도로 상승하면, *HT50*강의 변형뿐만 아니라 고강도인 *HT80*강의 변형도 현저하게 나타나기 때문에, 이러한 경우, 표점간 변형률로 평가한 크랙발생 한계변형률은 상승경향이 변하게된다. 즉, 강도적 불균질재의 연성크랙 발생 한계는, 표점간 변형률로 평가하면 반듯이 소성구속의 정도에 상응해서 저하하는 것이 아니라 이음재의 변형 거동에도 의존하게된다.

강도적 불균질재가 동적부하를 받는 경우의 연성크랙 발생 거동을 검토하기 위하여 실시한 인장시험 결과로서, Fig. 8에 공칭응력—공칭변형률 곡선을 나타내었다. 동적부하를 받는 경우에도 파괴직전에 명백하게 변곡점이 관찰되었다. 파면관찰의 결과로부터, 동적부하를 받는 경우에도 시험편 중앙부에서 공칭응력—공칭변형률 곡선상의 변곡점에 대응하는 부하 레벨에서 연성크랙이 발생한 것이라고 생각된다.

Fig. 9에 강도적 불균질재의 동적 인장강도를 정적 인장강도와 비교하여 정리하였다. 동적 인장강도는 정적 인장강도의 경향과 같이 상대두께가 작은 것일수록 크게되었고, 모든 시험편에서 동적부하의 영향에 의한 강도 상승이 나타났다. 또한, *HT50*강의 균질재의 강도에 대하여 불균질재의 강도비는, 상대두께가 작게되면 동적부하의 쪽이 저하 하고 있지만, 각각 고강도재(*HT80*강)의 강도비에 접근하는 경향이 있다. 즉, 동적부하에 의한 불균질재의 강도상승량이 저하하는 것은 양재료의 강도에서의 부하속도의 의존성이 틀리기 때문이고, 그 결과로써 양강재간의 강도 차가 저하한 *HT50*강에의 소성구속의 정도가 저하 한 것에 기인하는 것이라고 생각된다.

동적부하에서의 연성크랙 발생 한계변형률 ϵ_I 에 의한 상대두께의 영향을 Fig. 10에 나타내었다. 상대두께와 한계변형률의 관계는 정적 시험결과와 동일한 경향을

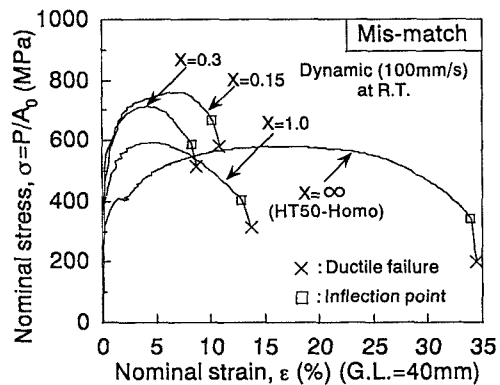
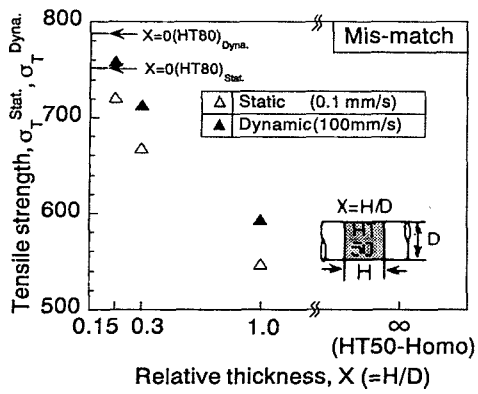
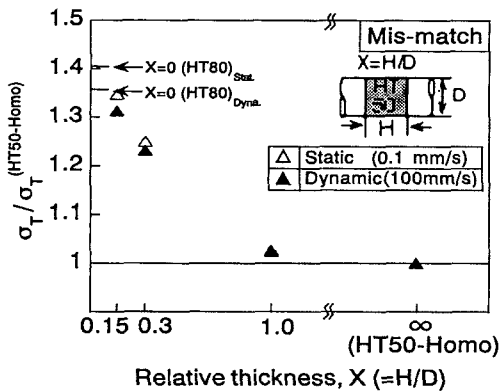


Fig. 8 Nominal stress σ —nominal strain ϵ curves obtained by tensile tests for homogeneous and strength mismatch specimens under dynamic loading 0.1mm/s



(a) Tensile strength.



(b) Tensile strength normalized by $\sigma_T^{(HT50-Ho)}$

Fig. 9 Effect of relative thickness X on tensile strength under static loading 0.1mm/s and dynamic loading 100mm/s

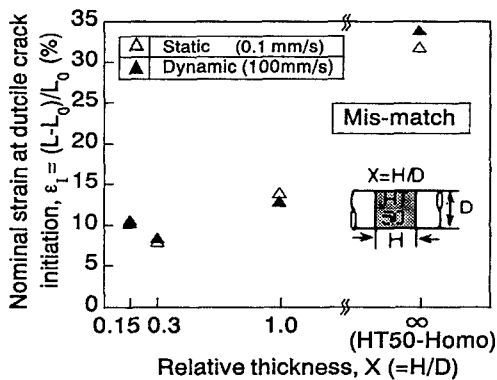


Fig. 10 Dependence of loading rate on effect of relative thickness X on nominal strain at ductile crack initiation ϵ_I

나타내고 있다. 또한, 불균질재의 한계변형률은 부하속도에 관계없이 거의 같은 값을 나타내지만, 균질재 (HT50강)에서는 종래의 결과¹⁴⁻¹⁶⁾과 동일하게 동적부하에 따른 한계변형률이 정적부하의 한계변형률보다 조금 크게 되었다.

4. 결 론

강재의 연성크랙 발생 조건에 대하여 형상적 불연속 및 강도적 불연속의 영향, 동적부하의 영향에 대하여 실험적으로 검토하였다. 원주노치 및 강도적불균질재를 갖는 환봉시험편을 이용하여 정적 및 동적하중 하에서 인장시험을 실시하여, 연성크랙의 발생거동에 대하여 관찰하였다. 이하에 얻은 결과를 요약하여 나타내었다.

(1) 연성크랙발생 한계변형률은 형상적 불연속이 갖는 소성구속의 영향을 받아, 노치시험편(R2, R1)의 한계변형률은 환봉시험편(R ∞)보다도 작고, 또한 노치시험편에서는 노치반경이 작게되면 될수록 연성크랙 발생 한계 변형률은 저하한다.

(2) 강도적불균질재의 정적하중 (0.1mm/s) 하에서의 연성크랙의 발생한계변형률 ϵ_I (표점간변형률로 평가)는 필히 소성구속의 정도에 상응해서 저하하는 것이 아니고, 구속의 정도에 따라서 이음부의 변형거동에도 의존한다. 또한, 이 한계변형률은 동적하중 (100mm/s) 하에 있어서도 거의 같지만, 균질재에서는 종래의 결과와 같이 동적하중에 의한 한계변형률이 정적하중에 의한 한계변형률보다 조금 크게 되었다.

참 고 문 헌

1. ALJ : Steel Committee of Kinki Branch. Reconnaissance Report on Damage of Steel Building Structures Observed from the 1995 Hyogoken-Nanbu (Hanshin/Awaji) Earthquake. (1995). (in Japanese)
2. M. Toyoda : How Steel Structures Fared in Japan Great Earthquake. Welding Journal. 74-12 (1995). 132-136
3. K. Okashita, R. Ohminami, K. Michiba, A. Yamamoto, M. Tomimatsu, Y. Tanji, C. Miki : Investigation of the Brittle Fracture at the Corner of P75 Rigid-Frame Pier in Kobe Harbor Highway during the Hyogoken-Nanbu Earthquake. Journals of the Japan Society of Civil Engineers. 591/I-432 (1998). 43-261. (in Japanese)
4. F A. McClintock : A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Holes. Journal of Applied Mechanics Transactions of the ASME. 35 (1968). 363-371
5. A C. Mackenzie, J W. Hancock, K K. Brown : On the Influence of State of Stress on Ductile Failure Initiation in High Strength Steels. Engineering Fracture Mechanics. 9 (1977). 167-188
6. J W. Hancock, A C. Mackenzie : On the Mechanisms of Ductile Failure in High-Strength Steels Subjected to Multi-Axial Stress-States. Journal of Mech. Phys. Solids. 24 (1976). 147-169
7. A. Otsuka, T. Miyata, S. Nishimura, M. Kimura,

- M. Mabuchi : Effect of Stress Triaxiality on Ductile Fracture Initiation Low Strength Steels. *Journal of The Society of Materials Science of Japan*. **29-322** (1976). 717-723. (in Japanese)
8. H. Shimanuki, H. Furuya, T. Inoue, Y. Hagiwara, M. Toyoda : Effect of Stress Triaxiality and Strain Rate on Ductile Fracture Initiation in Steel. *Journal of The Society of Naval Architects of Japan*. **186** (1999). 475-483. (in Japanese).
 9. M. Toyoda, M. Ohata, N. Ayukawa, G. Ohwaki, Y. Ueda, I. Takeuchi : Ductile Fracture Initiation Behavior of Pipe under A Large Scale of Cyclic Bending. *Proc. 3rd Int. Pipeline Technology Conf., Brugge, Belgium*. **2** (2000). 87-102
 10. O. Yasuda, M. Hirono, M. Yokota, M. Ohata, M. Toyoda : Criterion for Ductile Crack Initiation of Structure Steel under A Large Scale of Cyclic Loading. *Journal of Constructional Steel*. **8** (2000). 425-432. (in Japanese)
 11. K. Satoh, M. Toyoda : Tensile Behavior and Strength of Soft Welded Joints. *Journal of The Society of Naval Architects of Japan*. **2** (1972). 132:381-393. (in Japanese)
 12. M. Toyoda : Study on Static Tensile Behaviors of Welded Joints with a Lower Strength Weld Metal. Doctor Thesis. Osaka University. (1973). (in Japanese)
 13. A R. Rosenfield, D T. Hahn : Numerical Description of the Ambient Low-Temperature and High-Strain Rate Flow and Fracture Behavior of Plain Carbon Steel. *Transaction of ASM*. **59** (1966). 962-980.
 14. H. Kuwamura, K. Maeda : Strain-rate effects on the Mechanical Properties of Low-Yield-Ratio High-Strength Steel. *Journal of The Society of Civil Engineerings of Japan*. **36B** (1990). 89-101. (in Japanese).
 15. APD Committee : *The Japan Welding Engineering Society. JWES-IS-9603* (1966). (in Japanese)
 16. N. Ishikawa, Y. Kobayashi, K. Tsukada, H. Maenaka, M. Toyoda : Effect of Strain Rate on Deformation and Fracture Properties of Structural Steels. *Journal of Construction of Steel*. **4** (1996). 113-120. (in Japanese)
 17. M. Mochizuki, G.-B. An, T. Ohmura, M. Toyoda : Thermal Elastic-Plastic Stress and strain Analysis Considering Temperature Rise due to Plastic Deformation by Loading in Undermatched Joint -Studies on Characteristics of Dynamic Deformation and Fracture in Welded Joint with Strength Heterogeneity(Report 1). *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*. **19-3** (2001). 537-546