

空孔配置が誘導する応力波干渉による爆破ひび割れ制御技術

Blasting Fracture Controlling Technique Using Stress Wave Interference Induced by Disposition of Blank Dummy Holes

技術研究所 山地 宏志 YAMACHI HIROSHI
技術企画部 中森 純一郎 NAKAMORI JUNICHIRO

爆破による構造物解体において、躯体の一部領域を爆破損傷から保護したい場合、保存領域を細い溝等で囲い隔離する工法がしばしば採用される。しかしながら、この隔離工法は RC 構造物等に適用することが難しく、またその施工コストや施工期間の面でも問題がある。筆者らは、RC 構造物でも容易に施工できる $\phi = 20 \text{ mm}$ 程度の空孔群を配置することで、爆破による引張の応力波伝播を遮断することの出来る新しい隔離技術を開発した。本報告は、その空孔配置法の実際と、その隔離効果の実験的および解析的検証結果を示すものである。

キーワード：SMart-BD, 空孔群, 応力波誘導技術, 爆破ひび割れ制御

When some area of structural body needs to be protected from blasting damage, isolation technique with enclosed thin grooves is often employed. However it is difficult to apply this isolating techniques to RC-structure demolition and there are also problems in its application cost and period. The authors developed the new isolation technique which was capable of blocking tensile stress wave propagation by blasting with disposing a group of about 20mm diameter holes which can easily executed even in RC structures. This paper describes the practical arrangement of the dummy holes and the results of experimental and numerical verification about the effect of this isolation method.

Key Words: SMart-BD, Empty Dummy Holes, Stress Wave Guidance Technique, Fracture Control

1. はじめに

社会インフラの維持・補修工事では、不可避免的に既設躯体の解体撤去、あるいは部分解体作業が発生する。その作業箇所は、橋梁下部のような狭隘空間や、工場内部の設備密集個所であることが多く、大型重機を使用した解体作業が難しく、人力による苦渋作業を避けられない場合も多い。

筆者らは、屋内でも実施可能な爆破工法を採用し、精度良く、効率的に、かつ低環境負荷で解体作業を実施することを目的としてSMart-BD (Sumitomo-Mitsui Advanced stress wave Reflecting Technique for Blasting Demolition) 工法を開発してきた。当該工法は、爆破に伴い発生する応力波の伝播経路を任意の方向に誘導することにより、構造物に発生するひび割れや損傷領域を制御する工法であり、従来の爆破制御とは全く異なる概念の爆破解体技術

である^{1), 2), 3), 4)}。

爆破に伴い発生する応力波を誘導する手法の一つとして、筆者らは $\phi = 30 \text{ mm}$ 程度の空孔を起爆孔周辺に配置することで、写真-1のように任意方向へひび割れを誘導する技術を開発し、爆破実験と数値シミュレーションにより、そのひび割れ制御メカニズムを詳らかにした²⁾。筆者らは、この空孔配置をさらに工夫し、爆破によるひび割れの発生域を特定領域内に制御する応力波誘導法を開発した。本稿では、その概要を示すとともに、爆破解体実験結果、ならびに数値シミュレーションを通して、その制御メカニズムを考察する。

2. 空孔配置による応力波伝播の遮断

RC 構造物の解体工の中には、機械基礎の解体のように、躯体全体を解体するのではなく、特定領域だけを解

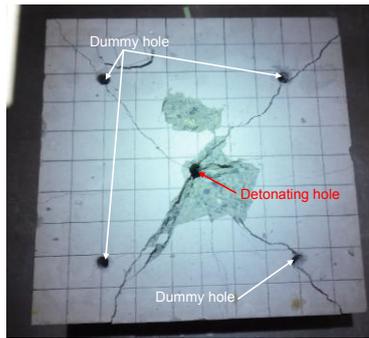


写真-1 空孔を利用したひび割れ方向の制御例

体し、残置領域は機械更新後にも有効に利用する場合もある。このような解体工事に、爆破解体工法が採用される時、残置領域を爆破損傷から保護するため、対象領域の周囲を溝等で囲み、爆破により生じる応力波の伝播から残存領域を隔離する対策工がある。

当該対策工に供せられる溝幅 t は、 $t = 1 \text{ mm}$ もあれば、十分に応力波の伝播を遮断することができるが、その施工は難しい。例えば、ダイヤモンド・カッターを使用した場合、容易に溝を形成できるが、その溝の深さ h は、 $h = 400 \sim 500 \text{ mm}$ 程度に限定される。また、ボーリングによるライン・ドリリングは、費用と期間の面で大きな負荷が生じ、RC 構造では連続した溝を形成することが難しい。さらに、ワイヤーソー工法では、適用できる躯体形状に制限がある。

一方、筆者らは、爆破による応力波の伝播経路上に設けられた空孔の表面で、衝撃波が反射・回折することを実験や解析で詳らかとし、その応用の一例として写真-1のように空孔方向へとひび割れを誘導する技術を開発した。この知見に基礎的な波動理論を適用すると、波動経路の誘導による、以下のような残置領域保護対策が考えられた。

すなわち、図-1のように起爆孔と空孔を配置すれば、起爆孔から伝播する応力波は、空孔で反射・回折し、その反射・回折成分は、隣接する空孔の成分と相互に干渉し、空孔が配置された線上よりも右の領域に有意な損傷を発生させないのではないかと推論が成り立った。このためには、図-1の起爆孔と空孔の配置において、以下の幾何学条件が成立しなければならない。すなわち、

$$b < a \tag{1}$$

また、式 (1) の関係から、当然のことながら、 $c < 3a$ の関係も満たされねばならない。以下、上記の空孔配置により、任意領域を爆破に伴う損傷から遮断し得るかを実験的、解析的に検証する。

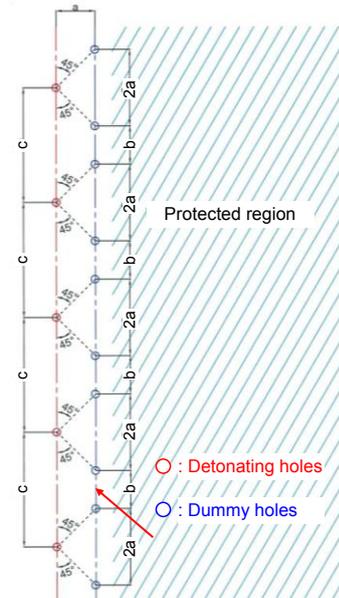


図-1 爆破による損傷を遮断する起爆孔・空孔配置

3. 空孔による応力伝播遮断の実験的検証

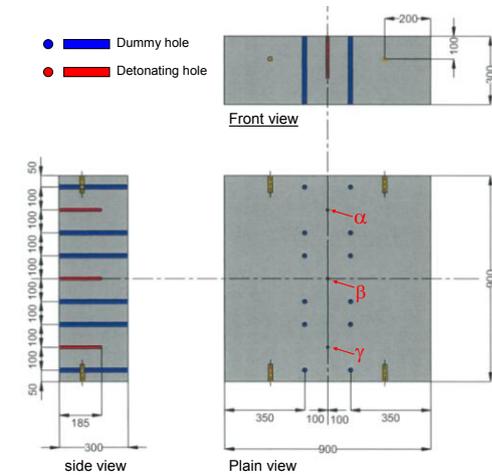
(1) 実験概要

試験爆破に供する試験体は、図-2に示す直方体の無筋コンクリート試験体で、その寸法は $900 \text{ mm} (L) \times 900 \text{ mm} (W) \times 300 \text{ mm} (H)$ とした。この試験体に対し、図-2に示す二つの装薬、空孔配置で起爆し、その破壊形態、ならびにひび割れ発生過程を比較することでその効果を検証する。

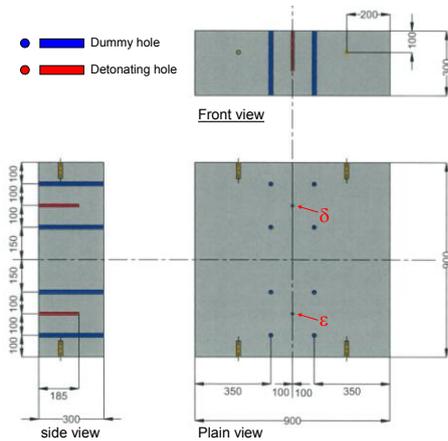
図-2(a)に示す case-A は、筆者らが提案する図-1の起爆孔・空孔配置に従い、試験体中央に $AD = 250 \text{ mm}$ の間隔で3つの起爆孔を設け、各起爆孔を中心にした一辺 $S = 200 \text{ mm}$ の正方形配置で、試験体を鉛直に貫く空孔を設けた。case-A では起爆孔の両側に空孔を対称に配置したため、爆破によるひび割れは、試験体端部の自由面近傍を除き、両側の空孔で反射した引張の応力波が中央で重なり合い、起爆孔間を結ぶひび割れが形成されることが期待される。なお、起爆孔深さ d は試験体中心と起爆中心が一致するよう $d = 185 \text{ mm}$ とした。

これと比較するため、図-2(b)に示す case-B では、試験体中央の上端・下端から $D = 300 \text{ mm}$ 離れた位置に削孔深さ $d = 185 \text{ mm}$ の起爆孔を、またこの各起爆孔を中心に一辺 $S = 200 \text{ mm}$ の正方形配置に試験体を鉛直に貫く空孔を設けた。この配置は、case-A の中央部の起爆孔とそれに随伴する空孔を省略した配置であり、図-1において提案する空孔配置が満たすべき式 (1) の条件に従わない空孔配置である。言い換えれば、空孔で反射・回折した応力波が相互に干渉する可能性の低い配置である。したが

って、case-A と case-B のひび割れの成長・発達や損傷の程度を比較することで、提案する起爆孔・空孔配置の妥当性が検証し得ると考えた。



(a) case-A



(b) case-B

図-2 実験に供した試験体と起爆孔・空孔配置

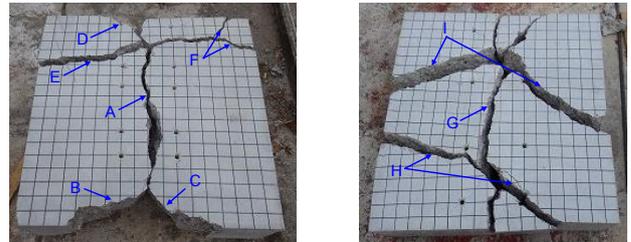
起爆には、(株)ニチゾウテックが提供する放電破砕工法 EDICS(Electric Discharge Impulse Crushing System)^{5),6)} を採用し、起爆カートリッジはS-カートリッジとした。S-カートリッジを使用した場合、そのカートリッジ長 L は $L = 70 \text{ mm}$ なので、 $d = 185 \text{ mm}$ の起爆孔を削孔すれば、起爆中心深さは $d_d = 150 \text{ mm}$ となり、試験体の中央で起爆されることとなる。起爆は、技術研究所内の起爆ピット内で実施し、専用観測台から試験体の破壊状況をビデオカメラ、ならびにハイスピードカメラにより撮影した。

(2) ひび割れ誘導効果の実験的検証

写真-2に、case-A と case-B の破壊モードを比較して示し、写真-3, 4にはハイスピードカメラが捉えたそれぞれのひび割れ発生・成長、破壊過程を示す。

写真-2(a) をみると、期待したように各起爆孔 α, β, γ

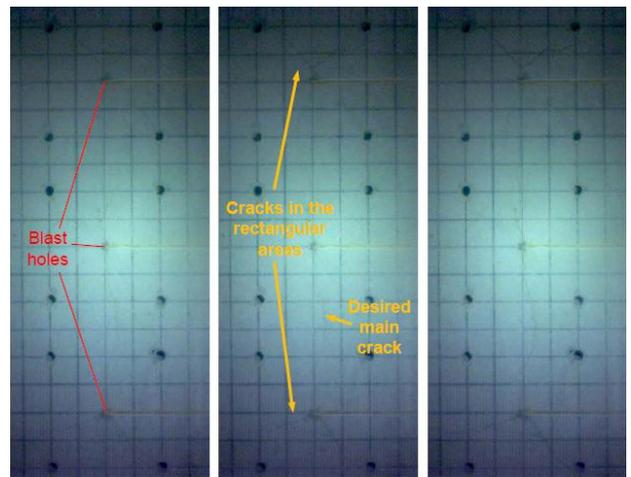
を結ぶひび割れAが形成されている。しかしながら、試験体境界近くの起爆孔 α, γ の周辺には、試験体端部境界へ斜めに成長するひび割れB, C, D, ならびにAと直交して成長するひび割れE, さらにはそれから派生するひび割れFなどのように、試験体端部面での反射波に影響されたと考えられる、ひび割れが発生している。



(a) Case-A

(b) Case-B

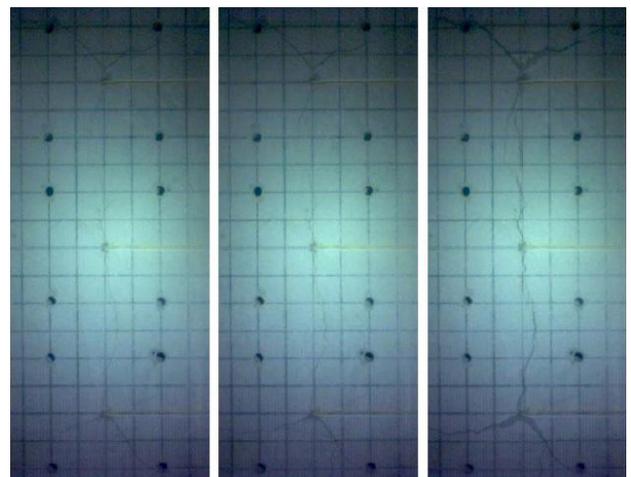
写真-2 起爆孔・空孔配置による破壊形態の違い



(a) 孔配置

(b) $t = 100 \mu\text{s}$

(c) $t = 200 \mu\text{s}$

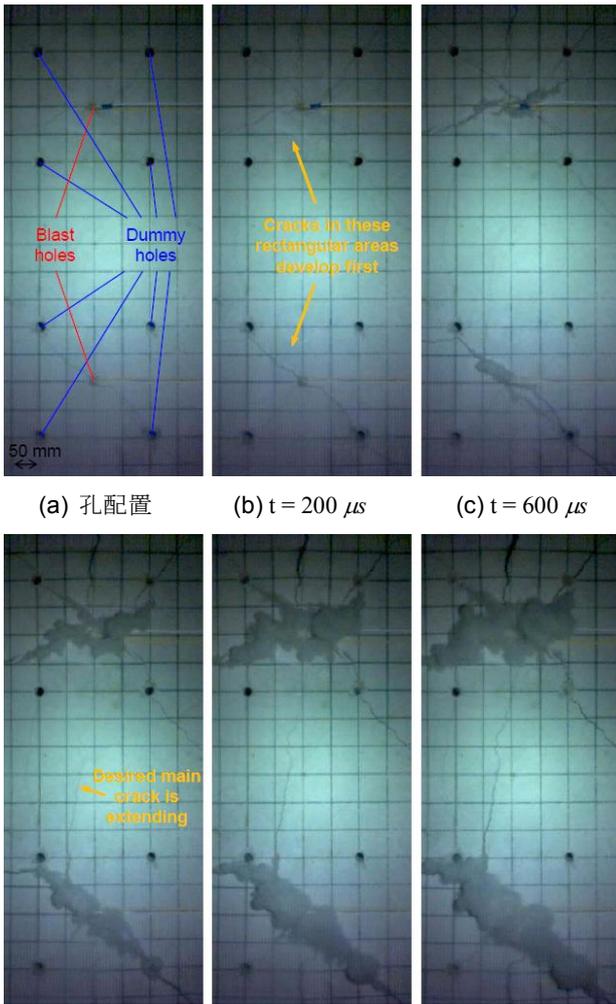


(d) $t = 300 \mu\text{s}$

(e) $t = 400 \mu\text{s}$

(f) $t = 1,000 \mu\text{s}$

写真-3 case-A のひび割れ発生・成長、破壊過程

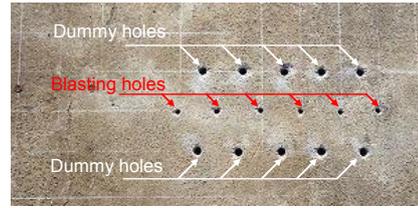


(a) 孔配置 (b) $t = 200 \mu s$ (c) $t = 600 \mu s$

(d) $t = 1,000 \mu s$ (e) $t = 1,400 \mu s$ (f) $t = 1,800 \mu s$
写真-4 Case-Bのひび割れ発生・成長、破壊過程

このひび割れ群の形成過程を 50,000 fps (frames per second) で撮影した写真-3でたどると、起爆直後の写真-3(b)の時点で、起爆孔間 α, β, γ を結ぶひび割れ A と、起爆孔から試験端部境界へ成長するひび割れ B, C, D が発生しており、これらが時間の進行とともに、ひび割れ幅が増大し、成長している。写真-3(f)で示される、 $t = 1,000 \mu s$ の時点でも、ひび割れ A と直交するひび割れ F の発生は明確に確認できない。したがって、当該ひび割れ F は、ひび割れ A の副次的な共役ひび割れであるように推測される。

ひび割れ B, C, D 等は、爆破による圧縮応力波が、試験体端部の自由面で反射し、引張応力波に位相を変えて伝播することで形成されると推定される。この自由面反射の影響を検証するため比較的広い RC 床版において、全ての端部境界から 1 m 以上離れた位置で、写真-5(a)のように、削孔深度 $d = 150 \text{ mm}$ の起爆孔を一直線上に $\Delta D = 100 \text{ mm}$ の間隔で削孔し、その両側に空孔（削孔深度 $d = 150 \text{ mm}$ ）を離間 $\Delta L = 100 \text{ mm}$ で、両側に千鳥で配置



(a) 起爆孔・空孔削孔状況



(b) 装薬・結線状況



(c) ひび割れ発生状況

写真-5 case-a の追加検証実験状況

した。なお、爆破媒体が RC のため、削孔時に鉄筋が現れた孔は、起爆孔、空孔ともに削孔位置に $d_{error} = 10 \text{ mm}$ 程度のずれがある場合がある。

写真-5(c)を見ると、空孔で囲まれる領域内に起爆による部分的な表面剥離が生じているものの、期待した起爆孔間を結ぶひび割れ以外は、顕著なひび割れが発生していないことが確認できる。したがって、写真-2(a)のひび割れ B, C, D 等は、爆破による応力波が試験体端部表面で反射して形成されたものとほぼ判断できる。

次に、写真-2(b)をみると、起爆孔 δ, ϵ を結ぶひび割れ G のほかに、起爆孔から試験端部に走る大きなひび割れ H, I が形成されている。写真-2(a), (b)だけを比較すると、case-A, B のひび割れ形態は類似するものと判断することも可能であるが、その生成過程を見ると、ひび割れの発生機構は全く異なり、空孔のひび割れ制御機能も全く異なることが分かる。

case-B のひび割れ群の形成過程を 50,000 fps (frames per second) で撮影した写真-4でたどると、起爆直後の写真-4(b)の時点で、起爆孔間 δ, ϵ のそれぞれから、これらを囲む空孔へ向かうひび割れが発生している。このひび割れは、各起爆孔から 4 つの周辺空孔へ向かいほぼ同時に発生しているが、時間の経過とともに、徐々にひび割れ幅に差が現れ、卓越するひび割れ方向が決定され、試験体を破断する。すなわち、ひび割れ H, I は、写真-1と同様に、空孔側にひび割れが誘導されて発生・成長し

ている。

起爆孔 δ, ε 間を結ぶひび割れ G が、ハイスピード画像で確認されるのは、図-4(d) の $t=1,000 \mu s$ の時点で有り、上記の空孔へ向かうひび割れよりもかなり遅れて発生していることから、case-Bの起爆孔・空孔配置では、こちらが副次的・派生的なひび割れであると判断される。また、そのひび割れ方向が、必ずしも起爆孔 δ, ε を結ぶ線に一致しないことも写真-2(b)、写真-4から明らかであろう。

4. 空孔による応力波伝播遮断の解析的検証

3. (2) 節に示した、case-Aの爆破状況を数値的にシミュレーションし、その波動や応力伝播を評価することで、空孔による応力波伝播の遮断効果を検証する。

シミュレーションには、東京大学上西幸司准教授と共同開発した、高速波動伝播 / 破壊解析コード BLAST-3D を用いて実施する¹⁾。解析モデルは、図-2(a) を等間隔 ($\Delta x = 10 \text{ mm}$) に、3次元的に直交分割した。このとき、節点数は $91 \times 91 \times 31 = 256,711$ 節点となる。

表-1 解析に供したコンクリート試験体物性

properties	value
density	$2,320 \text{ kg/m}^3$
Young's modulus	34.2 GPa
Poisson's ratio	0.25
longitudinal wave speed	$\approx 4,200 \text{ m/s}$
shear wave speed	$\approx 2,400 \text{ m/s}$

また、コンクリート物性は、試験体作成時の物性試験より表-1のように与えた。このとき、安定した伝播計算を実施するため、計算上のタイムステップ Δt を以下のように定めた。

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{2V_p} = \frac{0.01m}{2 \times 4,200m/s} \approx 2.381 \times 10^{-6} \text{ sec} \quad (2)$$

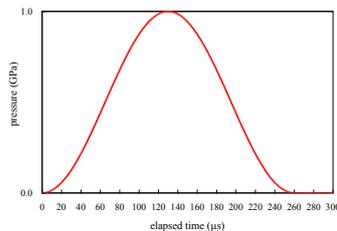


図-3 起爆孔へ作用する放電衝撃圧の時間変化

起爆により、各起爆孔壁に作用する放電衝撃圧 $P(t)$ は、これまでの研究成果を基に図-3、ならびに式 (3) のように設定した。

$$P_t = \begin{cases} A \sin^2\left(\frac{\pi t}{T}\right) & 0 \leq t \leq T \\ 0 & T < t \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) において、 A は最大作用圧を示し、 T は衝撃圧の継続時間をそれぞれ示し、これまでの研究成果から $A = 1 \text{ GPa}$ 、 $T = 260 \mu s$ とした。

図-4に、シミュレーションで得られた放電衝撃に誘起された体積ひずみ ε_{kk} の時間変化を示す。コンクリート

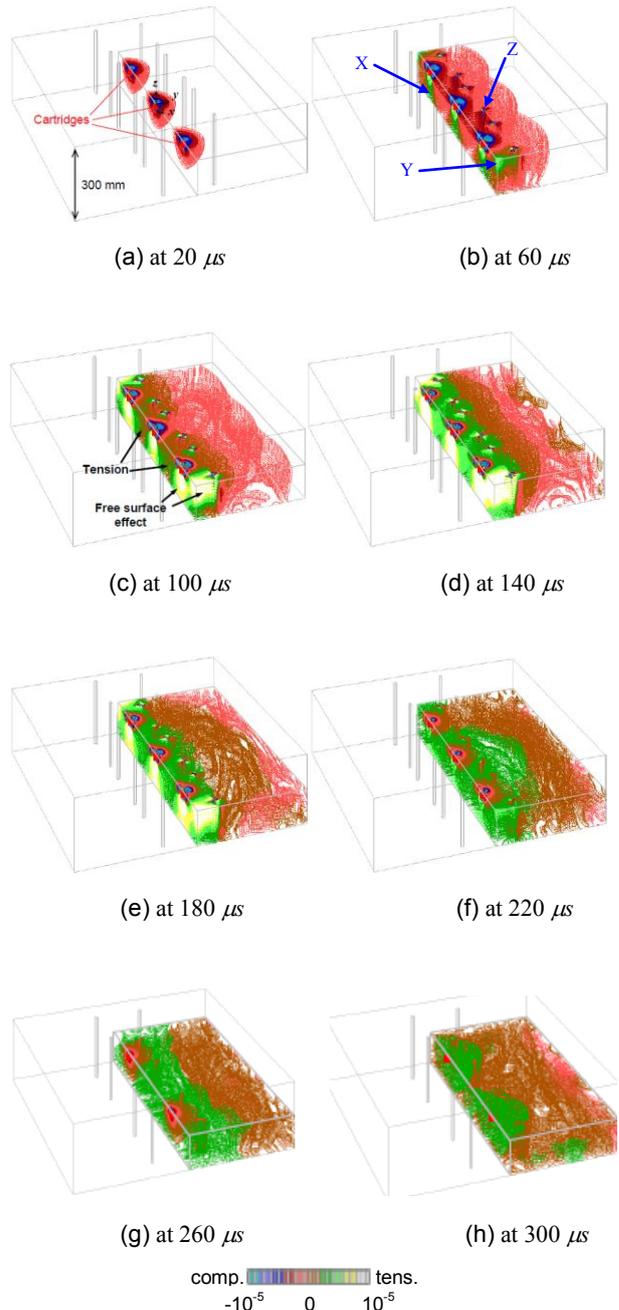


図-4 放電衝撃に誘導される体積ひずみ ε_{kk} の経時変化

のような脆性材料が高速で破壊されるとき、応力再配分によるせん断破壊が形成される以前に、引張の体積ひずみによる引張破壊が先行するため、爆破事象による破壊を評価するのに適すると考えた。

図-4を見ると、起爆直後の $t = 20 \mu\text{s}$ の時点では、各起爆孔の起爆中心から、同心円状に圧縮の体積ひずみが独立して広がっているが、 $t = 60 \mu\text{s}$ の時点では隣接する起爆孔からの圧縮体積ひずみと相互に重なり合うとともに、Xの領域では緑色で示される引張体積ひずみの領域が形成される。これは圧縮の体積ひずみが底盤で反射し、位相が反転し、引張体積ひずみとして伝播することを示すものである。また、Yの領域では、側面で反射し、緑色～白の引張体積ひずみが形成される。これらは、それぞれに成長し、写真-2(a)のひび割れA、ならびにひび割れB,C,Dを形成していくことは、以降の伝播状況から容易に理解されよう。

また、 $t = 60 \mu\text{s}$ の時点のZの領域では、空孔を取り囲むように青い圧縮体積ひずみの領域が形成されているが、これは空孔周りを回折する波の成分を示すものであり、またわずかに確認できる緑色の領域は空孔に反射して位相が転換した引張ひずみ成分を示すものである。この緑色の領域は、 $t = 100 \mu\text{s}$ から $t = 140 \mu\text{s}$ にかけて成長し、 $t = 140 \mu\text{s}$ の時点では、試験体中央のほぼ全断面で大きな引張体積ひずみが発生し、破壊に至ると考えられるが、これには空孔で反射した引張ひずみ成分も寄与するものである。

図-4全体を通して、最も特徴的な点は、空孔を境として、体積ひずみの伝播と成長のモードが明瞭に異なることである。これは、空孔で反射・回折した応力波が相互に干渉しあうことで、空孔の配列線が一種の応力波を遮断するように働いていると考えられよう。

なお、解析上では、 $t = 220 \mu\text{s}$ の時点を除き、空孔外部に明瞭な引張体積ひずみは成長していないが、 $t = 220 \mu\text{s}$ の時点では、試験体中央にひび割れAが形成されている。したがって、以降はこのひび割れが新しい反射面として働くため、解析上と実際問題の伝播境界が異なってくる。当該の解析コードは、ひび割れ形成以降の波動伝播までを対象とするものではないから、これ以降の解析結果の妥当性は保証されるものではないことに注意しなければならない。

以上のように、case-Aの実験結果はほぼ波動論的に説明することができ、提案する孔配置は工学的に妥当であるものと考えられる。

5. おわりに

筆者らは、起爆孔周辺に空孔を配置することで、応力波の伝播を阻害し、コンクリート躯体の任意領域を爆破の損傷から保護することを考え、その空孔配置法を提案し、その妥当性を実験的、解析的に証明した。

ここに提案した、ひび割れ制御技術は、十分に実務に供し得るものと考えられるが、構造物の爆破部分解体において、残存部の健全性を担保するためには、爆破破壊のより定量的破壊規準を詳らかにする必要がある。今後は、工法開発とともに、その規準制定に関しても研究を実施する予定である。

謝辞：本報告での爆破解体実験と解析は東京大学大学院上西幸司准教授のご指導の下、実施いたしました。また、放電破碎工法EDICSの操作には、いつも株式会社ニチゾウテック 坂本良様、ならびに SMC テック株式会社 須藤俊憲様にご協力いただいています。各位には深甚の謝意と、今後も変わらぬご指導・ご助力を請い、本小文の結びとさせていただきます。

参考文献

- 1) Uenishi K., H. Takahashi, H. Yamachi and S. Sakurai: PC-based simulations of blasting demolition of RC structures, Construction and Building Materials, Vol.24, pp. 2401-2410, 2010.
- 2) Uenishi K., H. Yamachi, K. Yamagami and R. Sakamoto: Dynamic fragmentation of concrete using electric discharge impulses, Construction and Building Materials, Vol.67, pp. 170-179, 2014.
- 3) Uenishi K., N. Shigeno, S. Sakaguchi, H. Yamachi and J. Nakamori: Controlled disintegration of reinforced concrete blocks based on wave and fracture dynamics, Procedia Structural Integrity, Vol. 2, pp.350-357, 2016.
- 4) Uenishi K. and H. Yamachi: Development of Simulation Tools for Precisely Controlled Dynamic Demolition of Structure, Proceedings of Computational Engineering Conference, Vol.1, pp.2016.
- 5) 株式会社ニチゾウテック：放電破碎工法, <http://www.nichiztech.co.jp/products/15houden/index.html>, 2015.
- 6) 山地宏志, 中森純一郎：放電衝撃波動伝播の数値解析的評価, 三井住友建設技術研究開発報告, Vol.13, pp.55-60, 2015.