

บทที่ 2
ขบวนการชายฝั่งทะเล



ในบทนี้จะกล่าวถึงขบวนการชายฝั่งทะเล (coastal process) เพื่อแนะนำให้ทราบถึงปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากคลื่นที่เคลื่อนเข้าสู่ชายฝั่งทะเล ซึ่งเริ่มต้นจากคลื่นที่เกิดในทะเลลึก (deep water) ปรากฏการณ์ต่าง ๆ เมื่อคลื่นเข้าสู่บริเวณที่ความลึกของท้องทะเลตื้นขึ้น และท้ายสุดเป็นการเปลี่ยนแปลงของชายฝั่งทะเลเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะชายฝั่ง พร้อมทั้งการทบทวนผลการศึกษาดังกล่าว ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งของไทยและต่างประเทศ

2.1 คลื่นลม

คลื่นในทะเลโดยมากก่อตัวขึ้นจากอิทธิพลของลม (wind generated wave) การถ่ายทอดพลังงานจากลมมาสู่ผิวน้ำอิสระทำให้เกิด gravity wave ขึ้น จึงทำให้เรียกว่าคลื่นลม (wind wave) ซึ่งแบ่งได้ 2 ชนิด ดังนี้

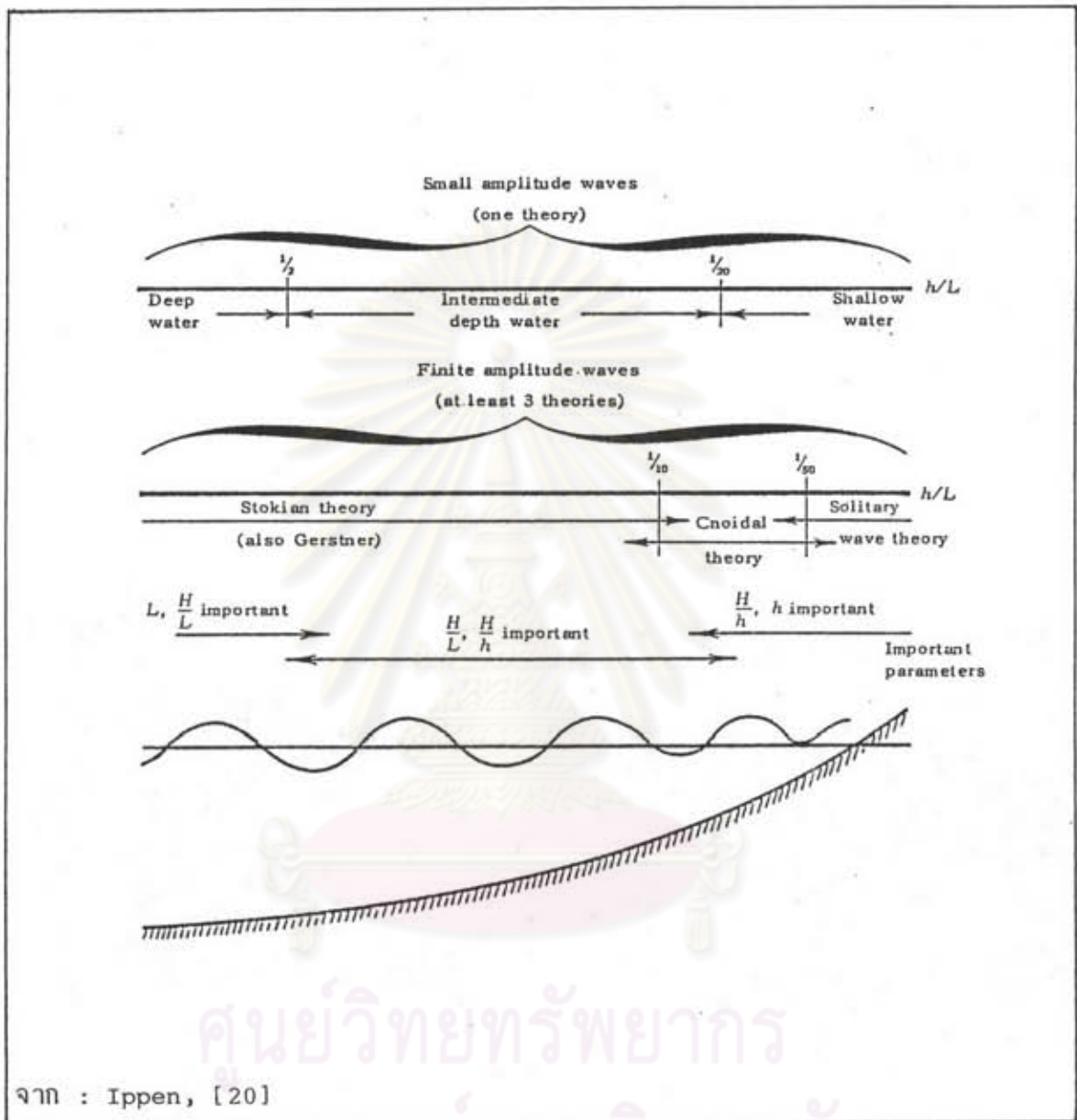
- 1) Sea ได้แก่คลื่นที่เกิดขึ้นจากแรงลมและยังคงอยู่ภายใต้การกระทำของลมในบริเวณพื้นที่กำเนิด (generating area)
- 2) Swell ได้แก่คลื่นที่เกิดขึ้นจากแรงลมและได้เคลื่อนตัวออกนอกบริเวณพื้นที่กำเนิดและไม่อยู่ภายใต้การกระทำของลมอีกต่อไป ซึ่งหมายความว่าคลื่นจะอ่อนตัวลงตามลำดับ เมื่อเคลื่อนตัวออกจากบริเวณพื้นที่กำเนิด

คลื่นเมื่อเคลื่อนตัวออกจากพื้นที่กำเนิดแล้วจะเริ่มมีลักษณะเป็นระเบียบและสม่ำเสมอมากขึ้นตามระยะทาง สันคลื่น (crest) และท้องคลื่น (trough) เริ่มจะปรากฏเด่นชัดแต่ก็ยังมีสลับซับซ้อนและแปรเปลี่ยนตลอดเวลา ทั้งนี้เนื่องจากการไม่คงที่ของลักษณะคลื่น (irregular wave form) และทิศทางของการเคลื่อนที่ (propagation) โดยเฉพาะคลื่นที่เกิดจากการกระทำของลม Silvestor [27] ได้กล่าวว่าขบวนการถ่ายทอดพลังงานจากลมสู่ผิวน้ำจะมีลักษณะที่ค่อนข้างไม่แน่นอน มีลักษณะเป็นขบวนการผันแปร (random process) แม้กระทั่ง

ลักษณะของลม เช่นความเร็วและทิศทางก็แปรเปลี่ยนผันผวนตลอดเวลา ทิศทางของคลื่นสามารถประเมินได้จากทิศทางเฉลี่ยของทิศทางแต่ละคลื่น คลื่นสามารถเดินทางออกไปได้ไกลมากอาจจะถึงหลายพันกิโลเมตรจากบริเวณพื้นที่กำเนิด พลังงานคลื่น (wave energy) จะลดลงไปเรื่อย ๆ เนื่องจากการสูญเสียภายใน (internally dissipated) โดยความเสียดทานของผิวน้ำและอากาศ การเสียดทานของท้องทะเล (sea bottom) ในน้ำตื้น (shallow water) และการปั่นป่วนเนื่องจากการแตกกระจายของคลื่น (wave breaking)

เนื่องจากความสลับซับซ้อนในรูปคลื่นมีลักษณะ nonlinearity สูงมาก และเป็นสามมิติ (three dimensional) และยังมีลักษณะเป็นขบวนการผันแปร (random process) สาเหตุอันเนื่องมาจากลมมีความไม่สม่ำเสมอ [US.Army Coastal Engineering Research Center ,17] ดังนั้นการบรรยายลักษณะของคลื่นทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้เพื่อเป็นการประมาณคร่าว ๆ (approximation) เท่านั้น เพื่อนำไปสู่หลักเกณฑ์และความพยายามในการที่จะทำความเข้าใจปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้น และได้นำความรู้ความเข้าใจให้ใช้เป็นประโยชน์ต่อมนุษยชาติในการเก็บเกี่ยวประโยชน์จากมหาสมุทรและทะเล ทฤษฎีต่าง ๆ ในการแทนลักษณะของคลื่น ได้แบ่งออกเป็น 2 ทฤษฎีใหญ่ ๆ ตามลักษณะ linearity ของทฤษฎีที่ใช้ในการพิสูจน์ (derivation) ทฤษฎีที่ได้จากการวิเคราะห์สมการพลศาสตร์ (hydrodynamic equation) ของการเคลื่อนที่ของของเหลวไม่มีการหดตัว (incompressible fluid) ดังนี้

1. Small Amplitude Wave Theory ทฤษฎีนี้มีชื่อเรียกอื่น ๆ อีก เช่น Airy Theory หรือ Linear Wave Theory เป็นทฤษฎีเบื้องต้นที่สุดและใช้มากที่สุดในปัจจุบัน
2. Finite Amplitude Wave Theory ทฤษฎีในกลุ่มนี้มีชื่อเรียกว่า Nonlinear Wave Theory ประกอบด้วยทฤษฎีหลายทฤษฎี และมีขอบเขตที่ทฤษฎีแต่ละอันให้ความถูกต้อง (คงแสดงในรูป 2-1) ทฤษฎีที่สำคัญในกลุ่มนี้ได้แก่ ทฤษฎีคลื่นของ Grestner ทฤษฎีคลื่นของ Stokes ทฤษฎีคลื่นช็อนอยคอลล (Cnoidal Wave Theory) ทฤษฎีคลื่นโดดเดี่ยว (Solitary Wave Theory) และทฤษฎีคลื่นฟังก์ชันกระแสหน้า (Stream Function Wave Theory)



รูป 2-1 การจำแนกขอบเขตของทฤษฎีคลื่นความสูงมาก (finite amplitude wave theory)

2.2 ปรากฏการณ์บริเวณชายฝั่งทะเล

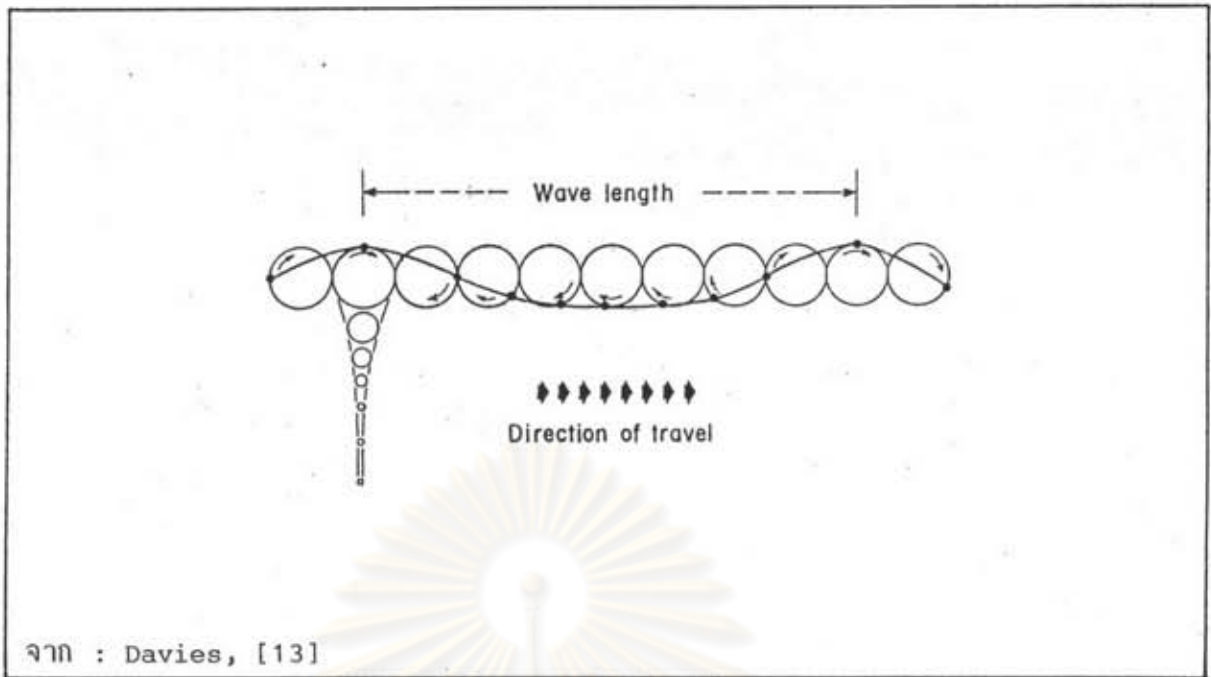
คลื่นลมเมื่อเคลื่อนตัวออกจากพื้นที่กำเนิด แต่ยังคงอยู่ในบริเวณน้ำลึก (deep water) ซึ่งจำแนกโดยใช้ความลึกสัมพัทธ์ (relative depth, d/L) มีค่ามากกว่า 0.5 ($d/L > 0.50$) ลักษณะต่าง ๆ ของคลื่น เช่น ความเร็วคลื่น (wave celerity, c) ความยาวคลื่น (wave length, L) และความสูงคลื่น (wave height, H) ลักษณะเหล่านี้ถือว่ามีความคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง คลื่นเคลื่อนตัวโดยมีลักษณะวงโคจรของอนุภาคน้ำ (trajectories) เป็นรูปวงกลม ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางของวงที่ผิวน้ำอิสระ (orbit) เท่ากับความสูงคลื่นและเส้นผ่าศูนย์กลางของวงโคจรจะลดลงตามกำลังฐาน e (exponentially) จนกระทั่งถึงความลึกประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น หลังจากความลึกดังกล่าวถือว่าไม่มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำ รูป 2-2 แสดงลักษณะวงโคจรของอนุภาคน้ำในน้ำลึก ในบริเวณน้ำลึกนี้ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำ (water particle movement) ถือว่าการเคลื่อนที่ของตะกอนสุทธิ (net mass transport) เป็นศูนย์ อนุภาคน้ำในคลื่นจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมารอบจุดตำแหน่งเฉลี่ยเท่านั้น

เมื่อคลื่นเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณน้ำลึกปานกลาง (intermediate depth, $0.04 < d/L < 0.50$) ลักษณะต่าง ๆ ของคลื่นจะเปลี่ยนไป ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของน้ำตื้น (shoaling effect) คลื่นที่อยู่ในบริเวณนี้มีความยาวคลื่นสั้นลง ความสูงคลื่นสูงขึ้น ความเร็วคลื่นลดลง แต่อย่างไรก็ตาม คาบเวลา (wave period, T) ไม่เปลี่ยนแปลง ทางเดิน (passage) ของอนุภาคน้ำจะถูกอิทธิพลของน้ำตื้น ทำให้วงโคจรมีลักษณะเป็นวงรี (ellipse) รอบ ๆ จุดตำแหน่งเฉลี่ย โดยมีแกนใหญ่ (major axis) อยู่ในแนวราบขนานกับท้องน้ำ และแกนเล็ก (minor axis) อยู่ในแนวตั้ง วงโคจรของอนุภาคน้ำเป็นรูปวงรี และลดลงตามความลึกจนกระทั่งเป็นเส้นตรง (linear) ที่บริเวณท้องน้ำ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่บริเวณท้องน้ำ ลักษณะวงโคจรรูปวงรีนี้จะเริ่มราบขึ้นเรื่อย ๆ และความเร็วที่ท้องน้ำจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อคลื่นเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณน้ำตื้น (shallow water, $d/L < 0.04$) รูป 2-3 แสดงทางเดินของการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำภายใต้คลื่น ณ บริเวณน้ำลึก น้ำลึกปานกลาง และน้ำตื้นตามลำดับ รูปร่างคลื่น (wave form) ในบริเวณน้ำลึกปานกลางนี้มีลักษณะคล้าย Trochoidal ซึ่งเปลี่ยนจากรูปแบบ Simple Harmonic ในน้ำลึก โดยความสูงที่สันคลื่นมากกว่าความลึกที่ท้องคลื่นซึ่งเป็นลักษณะของคลื่นที่มีสันคลื่นสูงแหลมและสันกว่าในช่วงท้องคลื่น อันเนื่องมาจากความเร็วและตำแหน่งของวงโคจรไม่เท่ากัน

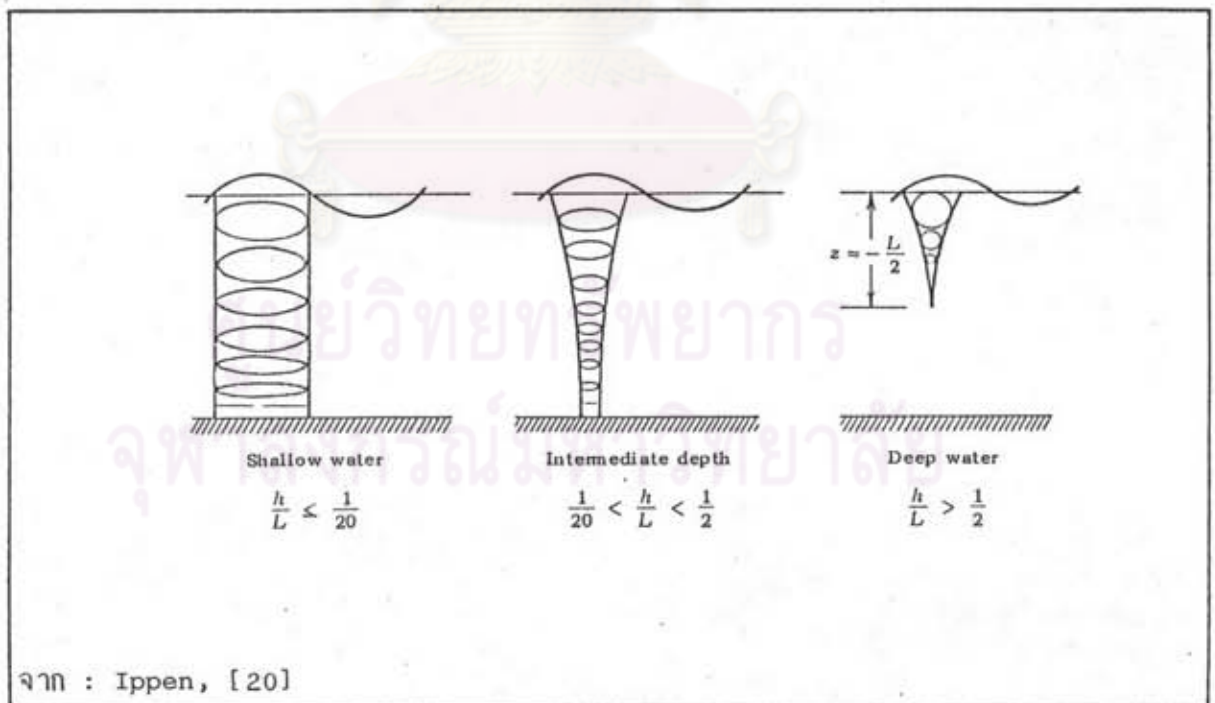
เมื่อคลื่นเคลื่อนตัวมาถึงความลึกหนึ่ง (ประมาณ 1-1.5 เท่าของความสูงคลื่น) ซึ่งความลึกนี้ไม่เพียงพอที่จะถ่ายพลังงานคลื่น จึงทำให้เกิดการแตกตัวของคลื่น (wave breaking) และคลื่นจะเริ่มฟอร์มรูปร่างขึ้นมาใหม่ เป็นคลื่นซึกใหม่ที่มีพลังงานน้อยกว่าและเคลื่อนตัวต่อไปเข้าหาฝั่ง จนกระทั่งถึงบริเวณที่ความลึกไม่เพียงพอ คลื่นก็จะเริ่มแตกตัวอีก เช่นนี้เรื่อยไป บริเวณที่คลื่นแตกตัวนั้นจะเกิดการปั่นป่วน (turbulence) มาก เนื่องจากถ่ายทอดพลังงานคลื่นทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของตะกอนทรายท้องน้ำ ตะกอนขนาดเล็กจะถูกยกตัวขึ้นและถูกคลื่นพัดพาในสภาพสารแขวนลอย (suspension)

ปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนตัวอยู่ในบริเวณน้ำลึกปานกลางและน้ำตื้น คือ การหักเหของคลื่นเมื่อทิศทางคลื่นทำมุมกับเส้นระดับท้องน้ำ (wave refraction) ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนตัวจะขึ้นอยู่กับความลึกของท้องน้ำ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของความลึกนั้น ความเร็วของคลื่นจะไม่เท่ากัน แนวสันคลื่น (wave crest) ที่เคลื่อนตัวผ่านตำแหน่งที่ลึกกว่าจะเคลื่อนตัวด้วยความเร็วที่เร็วกว่าตำแหน่งที่ตื้น เหตุการณ์เช่นนี้ทำให้แนวสันคลื่นเกิดการบิดแนว (bend) ซึ่งเรียกว่าการหักเหนั่นเอง รูป 2-4 แสดงตัวอย่างรูปแบบการหักเหของคลื่น บริเวณ Arena Cove, California, USA. จากรูป 2-4 จะสังเกตเห็นบริเวณรวมตัว (convergence) และกระจายตัว (divergence) ของพลังงานคลื่น ซึ่งบริเวณดังกล่าวจะมีศักยภาพในการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลที่ต่างกัน

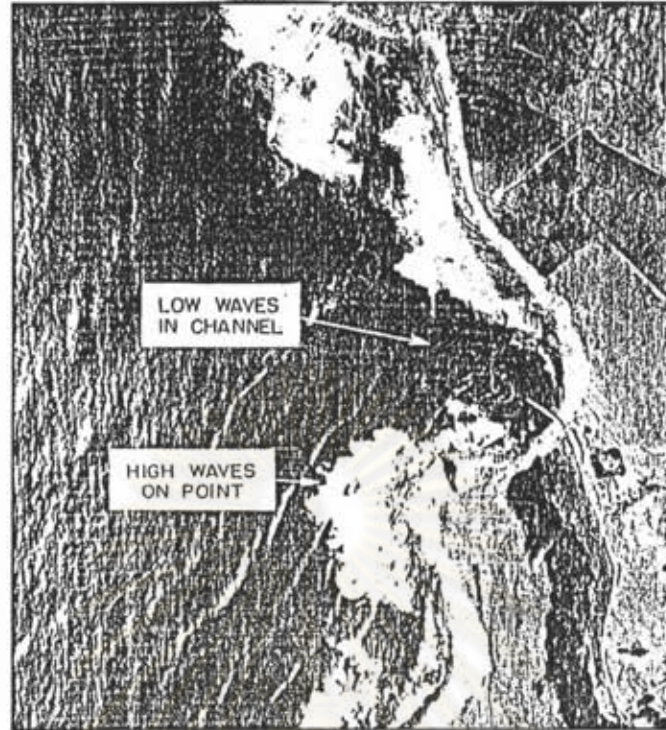
ในบริเวณน้ำตื้นนั้น ปรากฏการณ์อื่น ๆ นอกจากการแตกตัวของคลื่นและการหักเหของคลื่นแล้วยังมีปรากฏการณ์อื่นอีกได้แก่ การสะท้อนของคลื่น (wave reflection) เมื่อคลื่นปะทะเกาะหัวหาด (headland) หรือโครงสร้างบริเวณชายฝั่ง การกระจายของคลื่น (wave diffraction) เมื่อคลื่นเคลื่อนตัวผ่านช่องว่างระหว่างหัวหาดหรือโครงสร้างที่ขวางทิศทางเดินของคลื่น รูป 2-5 แสดงตัวอย่างการเกิดปรากฏการณ์การกระจายและการสะท้อนของคลื่นเมื่อเคลื่อนตัวปะทะ/ผ่านโครงสร้างบริเวณชายฝั่ง



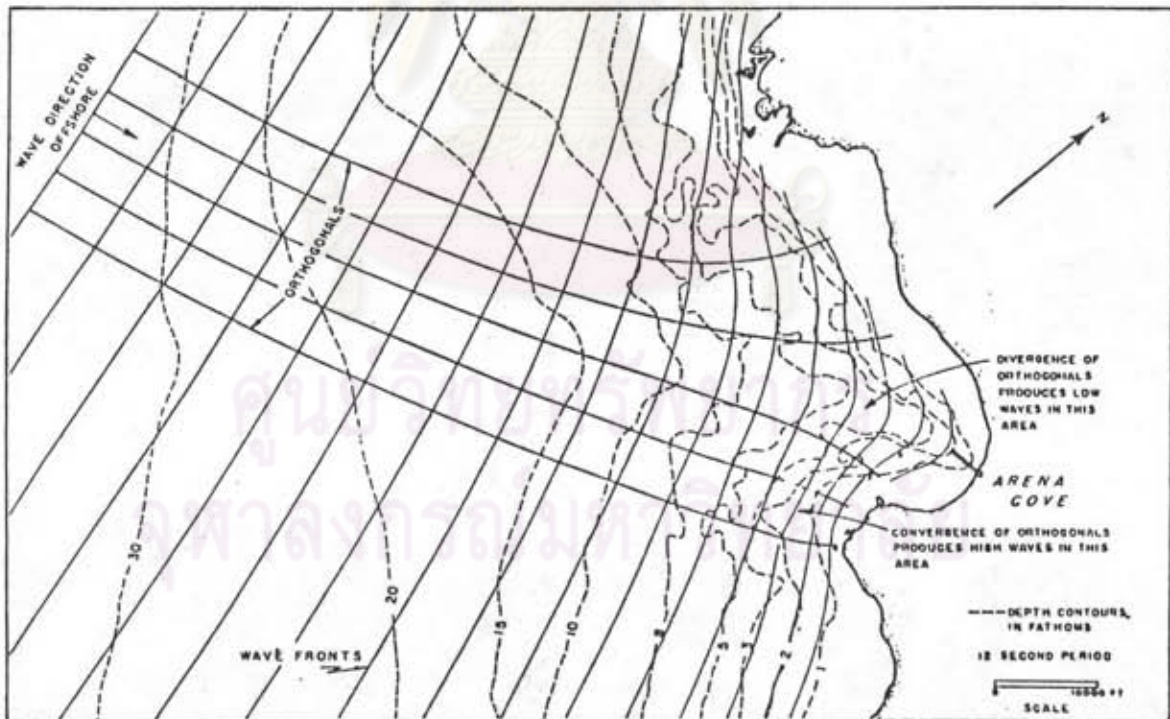
รูป 2-2 การโคจรของอนุภาคน้ำภายใต้คลื่นในบริเวณน้ำลึก



รูป 2-3 ทางเดินของการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำภายใต้คลื่น



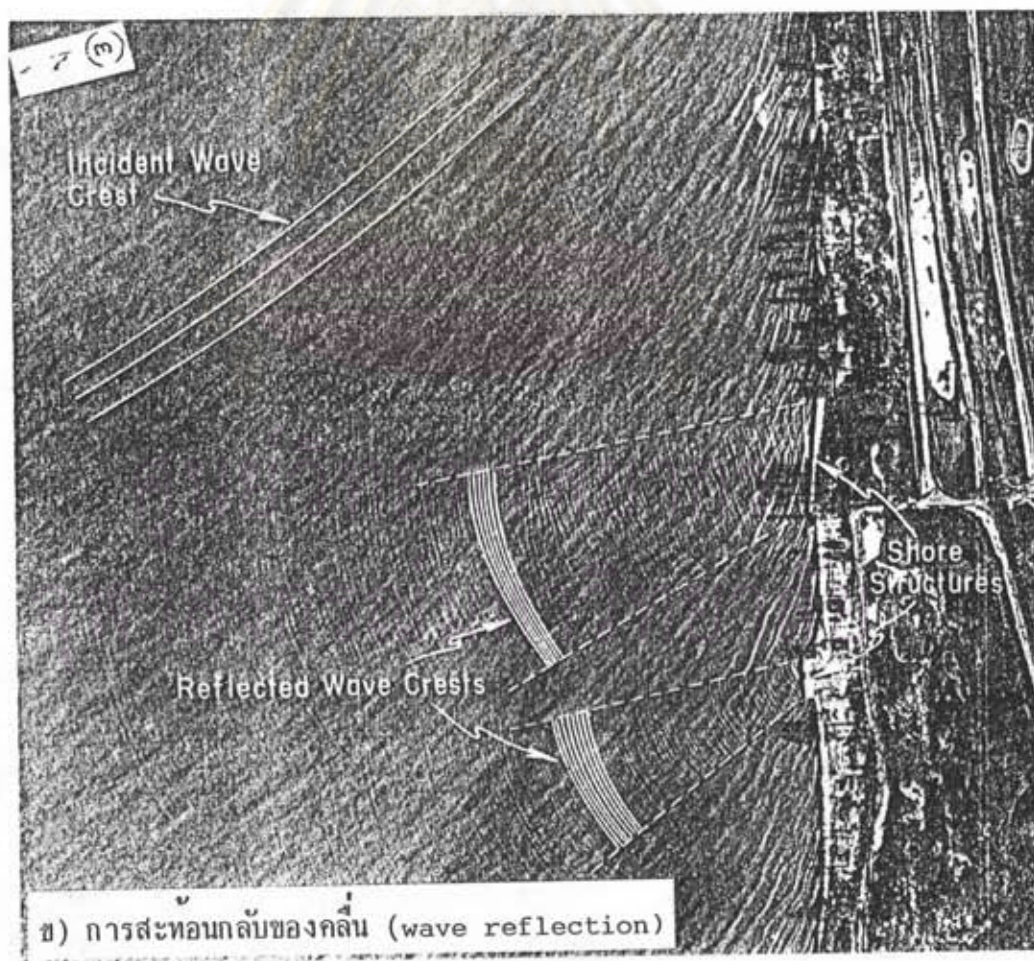
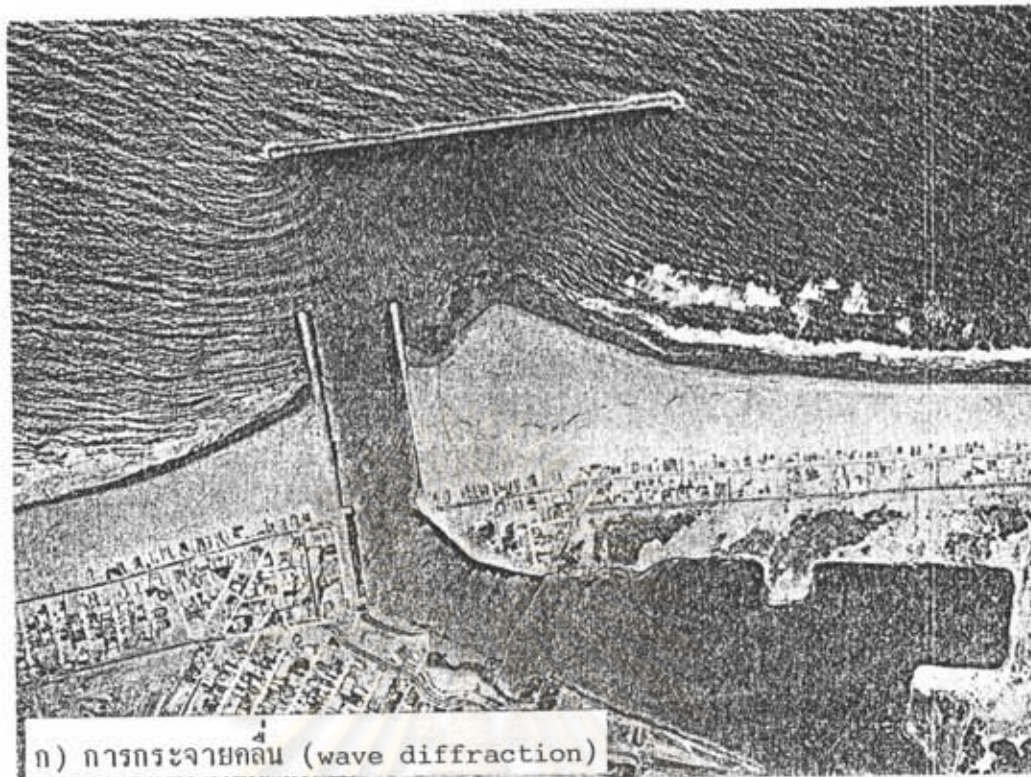
ก) ภาพถ่ายทางอากาศบริเวณ Arena Cove, California, USA



ข) รูปแบบการหักเหของคลื่น (wave refraction diagram)

จาก : Wiegel, [31]

รูป 2-4 เปรียบเทียบรูปแบบการหักเหของคลื่นกับภาพถ่ายทางอากาศบริเวณ Arena Cove, California, USA



จาก : US.Army Coastal Research Center, [17]

รูป 2-5 ตัวอย่างการเกิดปรากฏการณ์การกระจายและการสะท้อนของคลื่น

011969

2.3 การเปลี่ยนแปลงบริเวณชายฝั่ง

ชายฝั่ง คือ ส่วนของแผ่นดินที่อยู่ติดกับทะเล รูป 2-6 แสดงรูปตัดตามยาวของชายฝั่งทะเล โดยธรรมชาติชายฝั่งทะเลมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา สาเหตุจากอิทธิพลของคลื่นที่กระทำต่อชายฝั่งจะก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของตะกอนทราย กล่าวคือ คลื่นที่เคลื่อนตัวทำมุมกับแนวชายฝั่งจะก่อให้เกิดกระแสขึ้น 2 ชนิด คือ กระแสน้ำในแนวตั้งฉากกับชายฝั่ง (rip current) และกระแสน้ำชายฝั่ง (longshore current) ซึ่งกระแสน้ำทั้งสองนี้เป็นตัวพัดพาให้ตะกอนเคลื่อนที่ในแนวต่าง ๆ

บริเวณใกล้ชายฝั่ง (littoral zone) เป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณนี้จะเกิดการปั่นป่วนของพลังงานอันเนื่องจากการแตกตัวของคลื่น ทำให้ตะกอนทรายที่ก้นน้ำถูกยกตัวขึ้น และถูกพัดพาไปกับกระแสน้ำ และจากเหตุผลอีกประการหนึ่ง คือ ความลึกของท้องน้ำในสภาพธรรมชาติไม่เท่ากัน ทำให้คลื่นที่เคลื่อนตัวเข้าสู่ชายฝั่งเกิดการหักเหหรือบิดแนวของแนวคลื่น ซึ่งเกิดการรวมและการกระจายของพลังงานคลื่นที่เคลื่อนเข้าปะทะชายฝั่ง ทำให้บริเวณต่าง ๆ มีศักยภาพในการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งที่แตกต่างกัน บริเวณที่พลังงานคลื่นรวมตัวย่อมมีโอกาสถูกกัดเซาะสูงกว่าบริเวณที่พลังงานคลื่นกระจาย

การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลหรือการกัดเซาะและทับถมของตะกอนทราย เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ โดยมีคลื่นและกระแสน้ำชายฝั่งเป็นตัวแปรสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลง การกัดเซาะและทับถมของตะกอนทรายมักจะแตกต่างกันในแต่ละฤดูกาลและแต่ละปี บริเวณใดที่มีอัตราการทับถมมากกว่าการกัดเซาะ ก็จะเกิดการยื่นของแผ่นดิน ในทางตรงข้าม ถ้าอัตราการกัดเซาะสูงกว่าการทับถม บริเวณนั้นจะเกิดการหดหาย/ถดถอยของแผ่นดิน และถ้าอัตราการกัดเซาะเท่ากับการทับถม บริเวณนั้นจะไม่เปลี่ยนแปลง

โดยทั่วไป การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ การเปลี่ยนแปลงในระยะสั้น (short-term) และการเปลี่ยนแปลงในระยะยาว (long-term) การเปลี่ยนแปลงระยะสั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแต่ละฤดูมรสุมซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพคลื่น กล่าวคือ คลื่นที่มีความสูงมากหรือคลื่นพายุ (storm wave) คลื่นประเภทนี้จะมีพลังงานสูง มีโอกาสที่ปะทะชายฝั่งและกัดเซาะสูงกว่าคลื่นที่มีขนาดเล็กกว่า ดังแสดงในรูป 2-7 และในขณะเดียวกัน ถ้าระดับน้ำทะเลขึ้นสูงด้วย ยิ่งส่งผลต่อการกัดเซาะสูงขึ้นด้วย สำหรับการเปลี่ยนแปลงระยะยาวนั้นขึ้นอยู่กับความ

ไม่สมดุขยของอัตรการกั้เซาะและทั้บดมของตะกอนทรายในแต่ละปี ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณืการทศหายและการยื่นของแผ่นดิน

การกั้เซาะชายฝั่ง มักจะเกิดขึ้นในช่วงฤดูมรสุมซึ่งคลื่นมีขนาดใหญ่ คลื่นที่มีความชัน (wave steepness) สูงเคลื่อนเข้าปะทะชายฝั่ง กั้เซาะและพั้คพาตะกอนทรายลงมาเมื่อคลื่นเคลื่อนตัวกลับ (downward) ตะกอนทรายที่ถูกกั้เซาะจะถูกคลื่นและกระแสน้ำพั้คพาไปตกตะกอนเกิดเป็นสันคองทรายใต้น้ำในบริเวณนอกชายฝั่ง ดังแสดงในรูป 2-8 หลังฤดูมรสุมซึ่งคลื่นมีความรุนแรงน้อยกว่า ตะกอนทรายเหล่านี้ จะถูกคลื่นยกขึ้นและพั้คพามาตกตะกอนใกล้ชายฝั่งเรื่อย ๆ จนในที่สุดตะกอนทรายส่วนหนึ่งถูกพั้คพามาตกตะกอนบนชายฝั่งทะเล รูป 2-9 แสดงขบวนการของการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายเข้าสู่ชายฝั่ง ในช่วงหลังฤดูมรสุมของชายฝั่งบริเวณ Lake Michigan ลักษณะการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายเข้าออกนั้คือ การเปลี่ยนแปลงในระยะสั้น

นอกจากคลื่นแล้ว กระแสน้ำและการเคลื่อนที่ของตะกอนชายฝั่ง เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเล การเคลื่อนที่ของตะกอนประกอบด้วยการเคลื่อนที่ของตะกอนในแนวตั้งฉากกับชายฝั่ง (onshore-offshore transport) และการเคลื่อนที่ตะกอนตามแนวชายฝั่ง (longshore transport) การเคลื่อนที่ของตะกอนทรายทั้งสองทิศทางนี้เกิดจากกระแสน้ำชายฝั่งซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากคลื่นเคลื่อนตัวเข้าทำมุมกับแนวชายฝั่ง ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น Horikawa [19] กล่าวว่า การเคลื่อนที่ของตะกอนทั้งสองทิศทางนี้มีความสัมพันธ์กันอย่างมาก แต่การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากมีอิทธิพลมากกว่าสำหรับการเปลี่ยนแปลงในระยะสั้น คือเกิดการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายเข้าออกมากกว่าการเคลื่อนที่ในแนวขนานชายฝั่ง และการเคลื่อนที่ในแนวขนานกับชายฝั่งมีอิทธิพลมากกว่าสำหรับการเปลี่ยนแปลงในระยะยาว คือกระแสน้ำชายฝั่งจะพั้คพาตะกอนทรายให้เคลื่อนตัวตามไปด้วย ทำให้ตะกอนทรายไปตกทั้บดมบริเวณอื่น ตะกอนทรายจะถูกพาไปใ้ไกลขนาดไหนขึ้นอยู่กับความแรงของกระแสน้ำและขนาดของตะกอนทราย ดังนั้นจึงพอสรุปได้ว่า การเคลื่อนที่ของตะกอนตามแนวชายฝั่ง เป็นตัวแปรสำคัญในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในระยะยาว J. Munch-Peterson [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลประเทศเคนมาร์มาเป็นเวลา 40 ปี ได้กล่าวในเชิงเปรียบเทียบว่า เราจะเข้าใจปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ตะกอนชายฝั่ง โดยมองคลื่นที่ซัดเข้าหาฝั่งเป็นรดตักดินและกระแสน้ำชายฝั่งเป็นสายพานลำเลียงตะกอนทราย โดยมีมุมที่คลื่นเคลื่อนเข้ามาเป็นตัวขับเคลื่อนกำลังของสายพาน

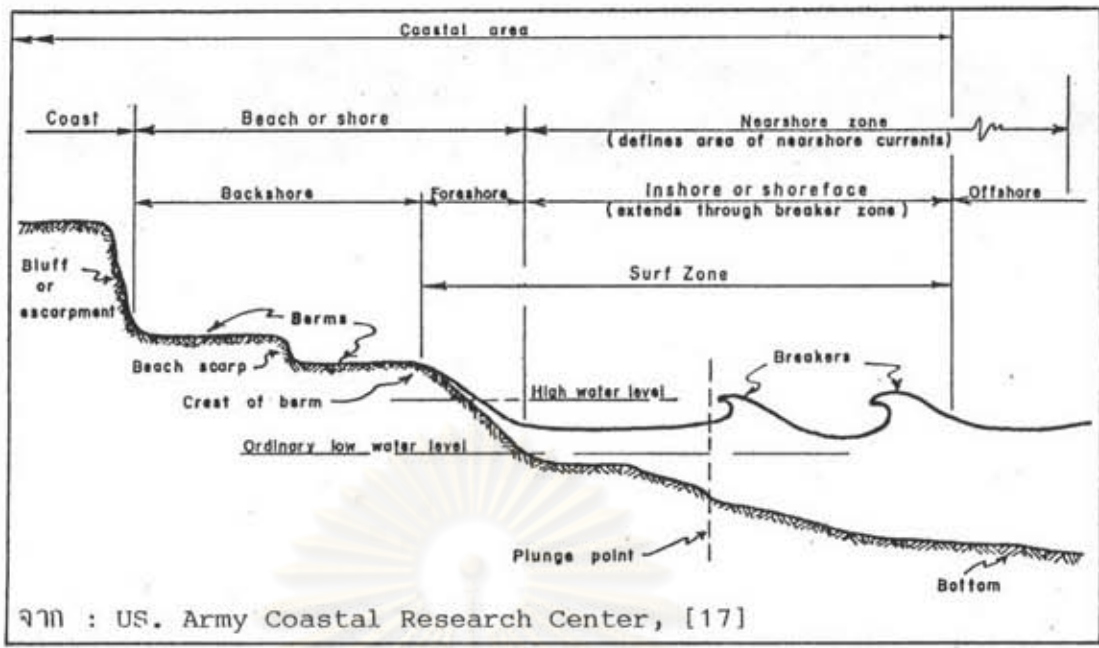
เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลมีลักษณะเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ ที่ค่อนข้างจะสลับซับซ้อน โดยมีคลื่นและกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งเป็นตัวแปรในการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการอธิบายการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในเชิงปริมาณ (quantitative) เป็นสิ่งที่ยากมาก การบรรยายปรากฏการณ์ต่าง ๆ สามารถทำได้เพียงในเชิงอนุมาน (qualitative) เท่านั้น ทั้งนี้เพื่อความเข้าใจถึงกลไกของการเปลี่ยนแปลง และนำมาเป็นข้อมูลสำหรับการป้องกัน และอนุรักษ์ชายฝั่งทะเลต่อไป

2.4 การทบทวนการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเล

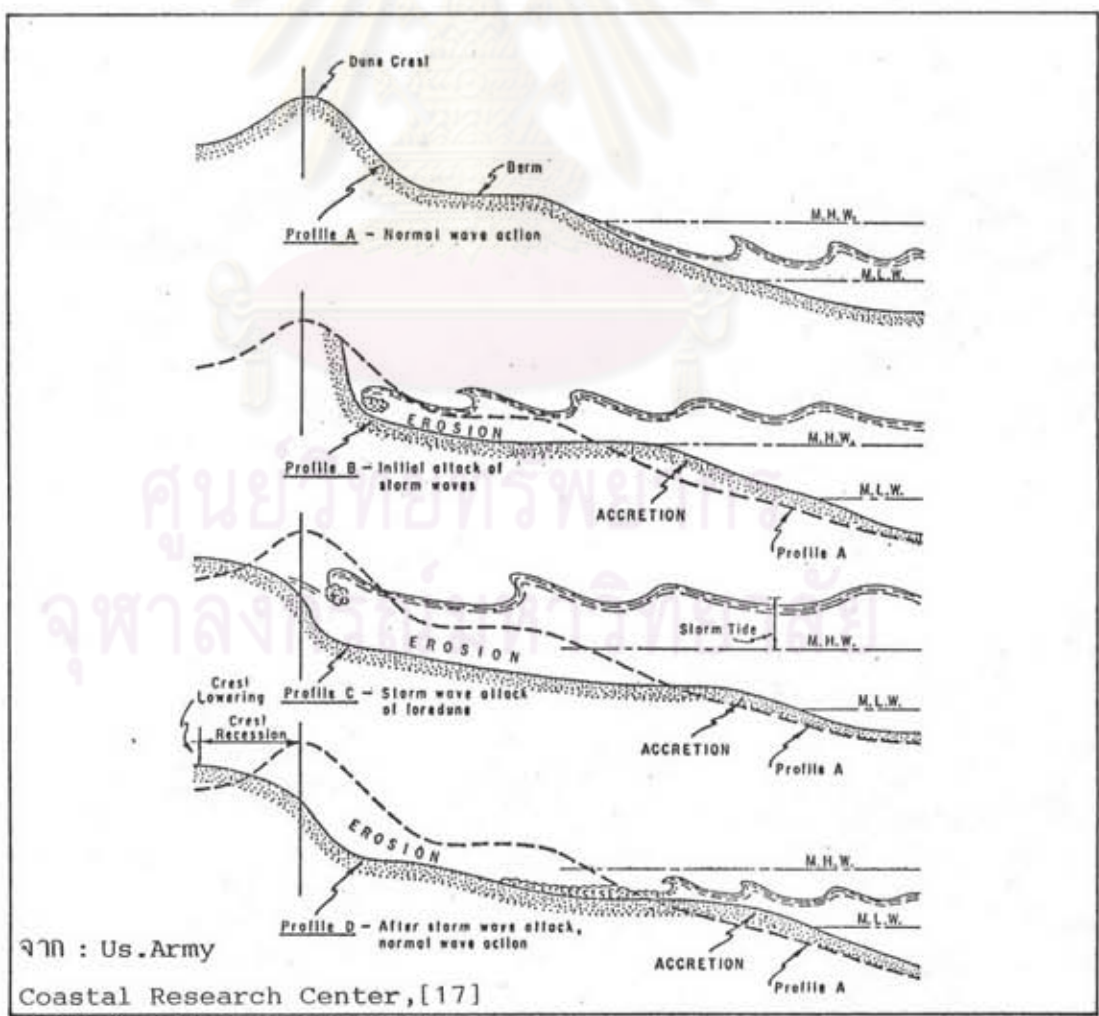
ปัญหาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลซึ่งเกิดจากอิทธิพลของคลื่น กระแสน้ำและตะกอนชายฝั่งนั้น เป็นปัญหาค่อนข้างจะสลับซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทั้งนี้เนื่องจากเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติและมีลักษณะผันแปร (random) การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งย่อมส่งผลกระทบต่อสภาพความเป็นอยู่และสภาพเศรษฐกิจของราษฎรที่ดำรงชีวิตอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล เพราะทำให้เกิดการสูญเสียดินแดนซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติ อย่างไรก็ตามหากการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งที่เกิดขึ้นในรูปแบบของการทับถม/ยื่นของแนวแผ่นดินก็ย่อมจะเอื้ออำนวยประโยชน์ แต่ถ้าวอยู่ในรูปแบบของการกัดเซาะ/ถดถอยของแนวแผ่นดินก็ย่อมส่งผลกระทบต่อดินแดนชายฝั่งบริเวณนั้น

ในปัจจุบัน การศึกษาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลในต่างประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา มาเลเซีย ญี่ปุ่น เป็นต้น ได้รับความสนใจและคำเนิงานศึกษามาเป็นเวลายาวนาน อันจะเห็นได้จากรายงานการศึกษาและวารสารทางวิชาการต่าง ๆ ใ้มีการบันทึกข้อมูลสมุทรศาสตร์ ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศมาเป็นเวลานาน การสำรวจภาคสนามเพื่อศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเล และทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกับตัวแปรต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อทำความเข้าใจกับปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนแปลง และนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับการเก็บเกี่ยวผลประโยชน์จากทะเลและมหาสมุทร ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีค่าทางธรรมชาติ

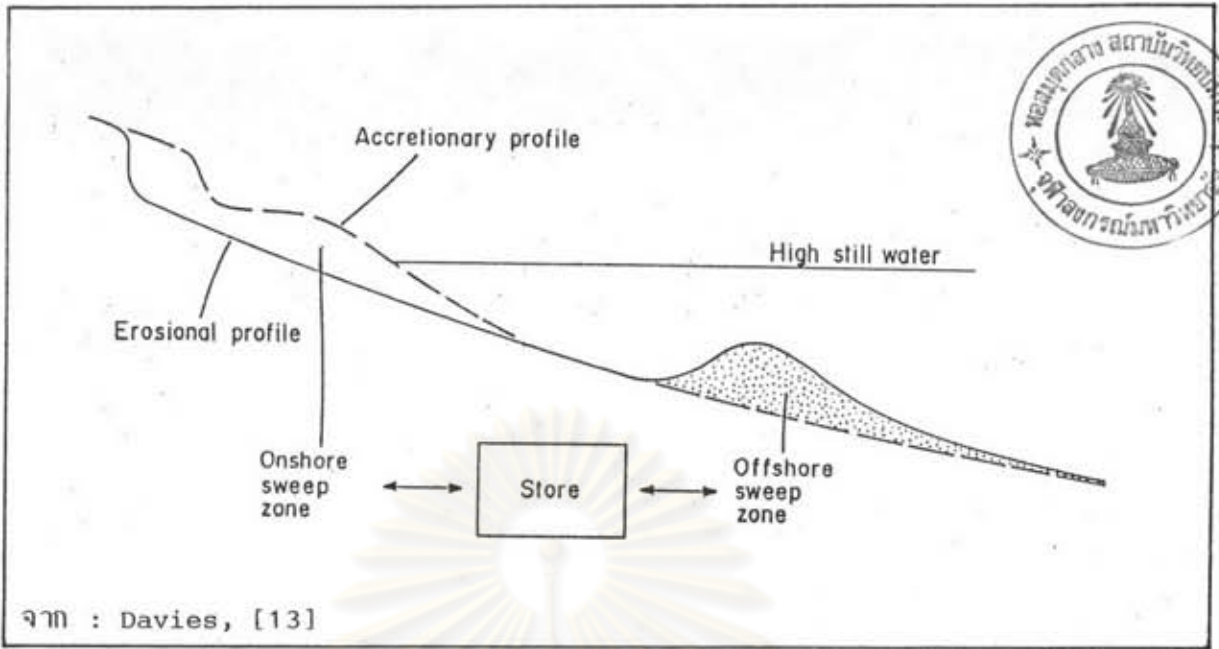
สำหรับประเทศไทยเรา ปัญหาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลโดยทั่วไปแล้วยังไม่ได้รับความสนใจจากสังคมและหน่วยงานราชการเท่าใดนัก ทั้งนี้เนื่องจากว่าพื้นที่เสียหายส่วนใหญ่เป็นเขตพื้นที่ยากจนและไม่เป็นพื้นที่เศรษฐกิจ เมื่อประสบปัญหาการกัดเซาะ/ถดถอยของแนวชายฝั่ง



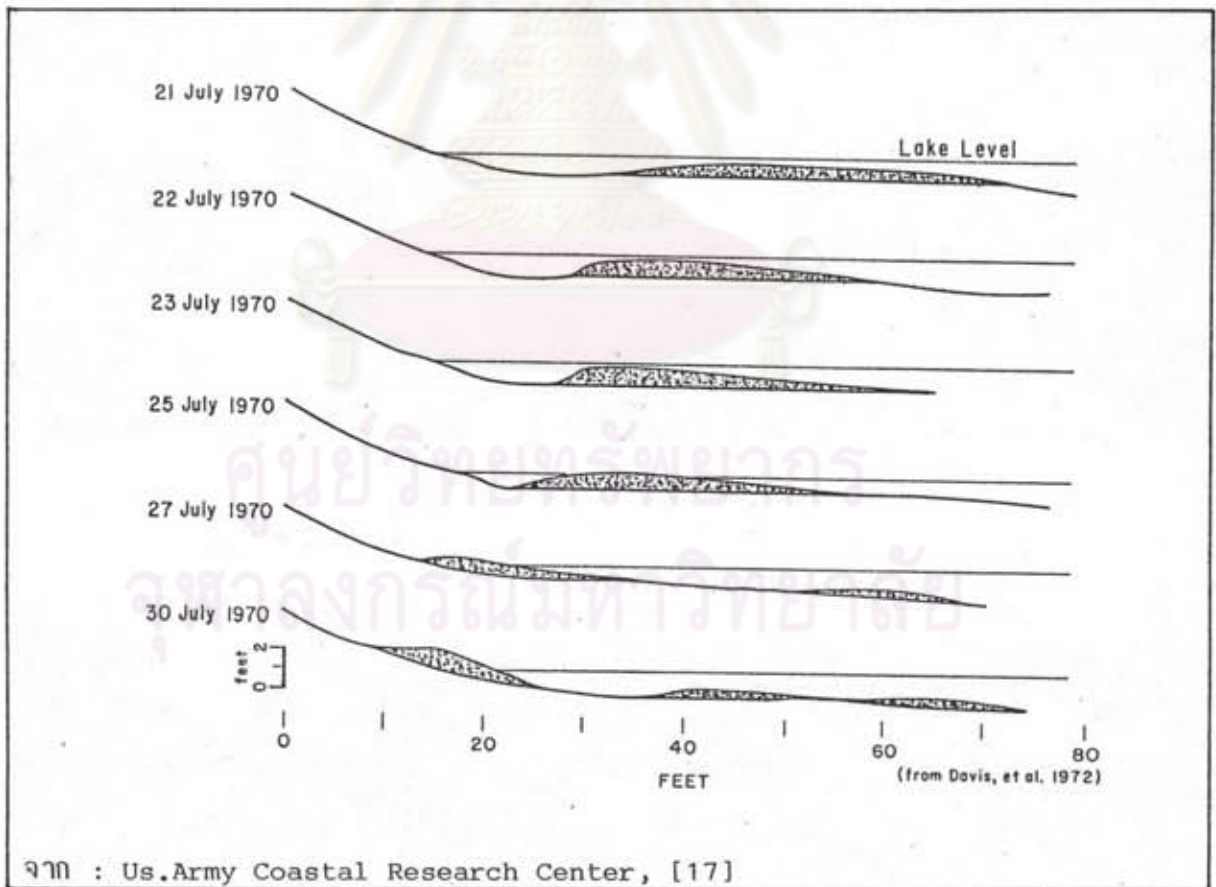
รูป 2-6 รูปตัดตามยาวของชายฝั่งทะเล



รูป 2-7 การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลเนื่องจากคลื่นพายุ (Storm Wave)



รูป 2-8 การเกิดสันคอนทรายใต้น้ำในบริเวณชายฝั่งในช่วงฤดูมรสุม



รูป 2-9 การฟื้นฟูสภาพชายฝั่ง (Beach recovery) หลังฤดูมรสุมของชายฝั่ง Lake Michigan

จนถึงบริเวณที่อยู่อาศัย ชาวบ้านจะใช้วิธีถอนย้ายบ้านเรือนทางออกไปจากแนวชายฝั่ง มีบางพื้นที่
ส่วนน้อยที่ได้รับความสนใจต่อสภาพปัญหาการกัดเซาะ/ถดถอยของแนวชายฝั่ง พื้นที่ดังกล่าวมักจะมี
มีความเกี่ยวข้องกับโครงการประเภทอื่นของหน่วยงานราชการ เช่นโครงการระบายน้ำจังหวัด
นครศรีธรรมราช และจังหวัดอื่น ๆ ของกรมชลประทาน หรือโครงการก่อสร้างท่าเรือบริเวณปาก
แม่น้ำต่าง ๆ เป็นต้น

ชัยพันธุ์ รักวิจัย และ สุจริต คุณธนกุลวงศ์ ในปี 2528 ได้ทำการสำรวจสภาพชายฝั่ง
ปากหนัง-ปากกระวะ จังหวัดนครศรีธรรมราช เมื่อวันที่ 24-25 ตุลาคม 2528 สาเหตุสืบเนื่อง
จากชาวบ้านได้ทำหนังสือร้องเรียนไปที่สำนักงานชลประทานที่ 11 แจ้งให้ทราบถึงการกัดเซาะ
ของแนวชายฝั่งได้ก่อผลเสียหายต่อพื้นที่ของชาวบ้านขึ้นแล้ว ซึ่งทางเจ้าหน้าที่กรมชลประทานได้
เสนอแนะให้ทางส่วนราชการจังหวัดติดตามดูแลปัญหาการกัดเซาะ และได้ติดต่อกับคณะวิศวกรรม
ศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในด้านความช่วยเหลือทางวิชาการ ชัยพันธุ์ และสุจริต [8]
ได้สรุปว่า แนวชายฝั่งทะเลของจังหวัดนครศรีธรรมราชถูกกัดเซาะอย่างต่อเนื่องในตลอด 10-20
ปีที่ผ่านมาโดยอัตราการถดถอยของแนวชายฝั่งประมาณ 8 ม/ปี และคาดว่า การกัดเซาะ/ถดถอย
ของแนวชายฝั่งเกิดขึ้นตลอดแนวชายฝั่งด้านอ่าวไทยของภาคใต้ตอนกลางและตอนล่าง และมีความ
สัมพันธ์กันตลอดแนว โดยบริเวณภาคใต้ตอนล่างจะมีอัตราการกัดเซาะ/ถดถอยมากกว่าส่วนบน
(ประมาณ 15-30 ม/ปี) ตามความรุนแรงของสภาพคลื่นที่เกิดขึ้น สำหรับรายงานผลการสำรวจ
ได้เสนอในภาคผนวก ก

ในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลเช่นกัน ใน
บริเวณปากแม่น้ำโกลก การศึกษาส่วนใหญ่จะคาบเกี่ยวกับปัญหาเขตแบ่งพรมแดนระหว่างประเทศ
ไทยกับมาเลเซีย ซึ่งได้ดำเนินการศึกษาตั้งแต่ปี 2522 เป็นต้นมา โดยหน่วยงานราชการต่าง ๆ
เช่น คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ [6] ประเสริฐ ทัพยธรรม [9] กรมทรัพยากรธรณี
[10] รายละเอียดและผลการศึกษานี้จะเสนอต่อไปในหัวข้อ 3.4 ของบทที่ 3 (การศึกษาการ
เปลี่ยนแปลงชายฝั่งที่เกี่ยวข้อง)

ปัญหาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลในต่างประเทศ ได้รับความสนใจมาเป็นเวลานาน
ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น การศึกษา/วิเคราะห์ถึงปัญหาการเปลี่ยนแปลงกระทำโดยหน่วยงานของ
รัฐและมหาวิทยาลัยต่าง ๆ เช่น US. Army Coastal Research Center ในประเทศสหรัฐ
อเมริกา ซึ่งรับหน้าที่เกี่ยวกับกิจกรรมต่าง ๆ ทางด้านวิศวกรรมชายฝั่งทะเล การรวบรวมและ

บันทึกข้อมูลสมุทรศาสตร์ เป็นต้น สำหรับผลการศึกษาทางวิชาการของหน่วยงานและบุคคลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลในต่างประเทศสรุปได้ดังนี้

ในปี 1936 Beach Erosion Board [31] ได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งกับคลื่นในลักษณะเงื่อนไขต่าง ๆ ซึ่งพบว่าในสภาพคลื่นปกติ (normal wave conditions) นั้น คลื่นจะพัดพาตะกอนทรายในบริเวณนอกฝั่ง (offshore) ให้เคลื่อนตัวเข้าหาฝั่ง คลื่นในสภาพพายุ (storm wave) จะก่อให้เกิดการกัดเซาะชายฝั่ง และพัดพาตะกอนทรายไปตกทับถมบริเวณนอกชายฝั่ง เกิดเป็นสันคอนทรายใต้น้ำ (offshore bar) และจะถูกพัดพากลับเข้าสู่ฝั่งอีกครั้งเมื่อคลื่นอยู่ในสภาพปกติซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 4-6 เท่าของเวลาในการเกิดสันคอนทราย

การศึกษาถึงอิทธิพลของคลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งเริ่มต้นโดย Meyer ในปี 1936 Meyer [31] ได้ทำการทดลองใน wave basin ซึ่งพบว่าความลาดชันชายฝั่ง (fore-shore slope) ขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดทรายและความชันคลื่นในน้ำลึก (deepwater wave steepness, H_0/L_0) และต่อมาในปี 1949 Johnson [31] ได้ศึกษาเพิ่มเติมและพบว่าความชันคลื่นที่สูงกว่า 0.06 จะทำให้เกิดการกัดเซาะชายฝั่ง และเกิดการพัดพาตะกอนทรายมาทับถมเมื่อความชันคลื่นมีค่าน้อยกว่า 0.02 ผลสรุปของ Johnson ได้ถูกปรับปรุงโดย Saville ในปี 1950 Saville [31] ได้ทำการทดลองใน wave channel โดยใช้ขนาดเม็ดทรายเฉลี่ย (d_{50}) เท่ากับ 0.30 มม. และสรุปสอดคล้องกับ Johnson ว่า การเปลี่ยนแปลงความลาดชันชายฝั่งขึ้นอยู่กับความชันคลื่น โดยการกัดเซาะจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นมีความชันมากกว่า 0.03 และเกิดการทับถมเมื่อความชันน้อยกว่า 0.025 และผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าความลาดชันชายฝั่งและนอกฝั่ง (offshore slope) มีความสัมพันธ์กับขนาดของคลื่นด้วย ในช่วงปีต่อ ๆ มาผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการก็ยืนยันถึงความสำคัญของความชันคลื่นในน้ำลึก (deepwater wave steepness, H_0/L_0) ที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความลาดชันชายฝั่ง

ในแง่ของความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเม็ดทราย คลื่น และการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง ในปี 1950 Johnson and Shay [31] ทำการศึกษาโดยวิธีการศึกษาแบบ 2 มิติ (two dimensional) ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า Stable beach จะเกิดขึ้นเมื่อเม็ดทรายมีขนาดใกล้เคียงกัน (well-sorted) และเป็นไปได้ยากมากในการพยากรณ์รูปตัดชายฝั่งว่าจะมีลักษณะเป็นอย่างไร เมื่อกำหนดเงื่อนไขของคลื่นมาให้ เพราะส่วนประกอบของเม็ดทรายในสภาพธรรมชาติ

ชาติมักจะไม่ค่อยแน่นอน ในอีกมุมหนึ่งของการศึกษา Equilibrium profile ซึ่งมีอิทธิพลของระดับน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง พบว่าชายฝั่งจะถูกกัดเซาะและเลื่อนเข้าด้านในเมื่อเกิดคลื่นพายุ และระดับน้ำขึ้นสูงควย

Scott [31] ในปี 1954 ได้ยืนยันผลการทดลองของ Saville (1950) และ Johnson and Shay (1950) ในการทดลองของ Scott ได้ใช้เม็ดทรายเฉลี่ยเท่ากับ 0.31 มม. ในแบบจำลอง และสังเกตการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งเมื่อเปลี่ยนค่าความชันคลื่นต่าง ๆ โดยในครั้งแรกทดลองโดยใช้ความชันคลื่นเท่ากับ 0.016 จำนวน 12,000 คลื่น และปรับค่าความชันเป็น 0.044 จำนวน 113,000 คลื่น แล้วลดความชันเหลือ 0.017 จำนวน 106,000 คลื่น ในท้ายสุดเพิ่มค่าความชันเป็น 0.041 จำนวน 19,000 คลื่น ดังแสดงในรูป 2-10 (ก) ผลของการเปลี่ยนแปลงรูปตัดในแง่ของไซความชันคลื่นต่าง ๆ ได้แสดงในรูป 2-10 (ข) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชายฝั่งจะถูกกัดเซาะเมื่อความชันคลื่นสูงและทับถมเมื่อความชันคลื่นต่ำ และผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าไม่ว่าคลื่นในสภาพรุนแรงหรือราบเรียบที่กระทำต่อชายฝั่งมีโอกาสทำให้เกิดการสูญเสียตะกอนทรายไปยังน้ำลึก โดยเฉพาะทรายประเภทละเอียด

Maurice Schwartz [25] ในปี 1965 ได้ทำการทดสอบความเป็นไปได้เบื้องต้นของทฤษฎีที่กล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเลมีอิทธิพลต่อการกัดเซาะชายฝั่งทะเล แนวความคิดนี้เสนอโดย Per Brunn (1962) Schwartz ได้ทำการศึกษาด้วยแบบจำลองขนาดเล็ก (small-scale model study) ในห้องปฏิบัติการของ Columbia University

ในปี 1965 Krumbein and Graybill [22] ได้ศึกษา/วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติคลื่น (wave characteristics) กับความลาดชันชายฝั่ง การวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองทางสถิติ (statistical models) โดยสร้างสมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (linear equation) ดังแสดงในรูป 2-11 (ข) กำหนดความลาดชันชายฝั่งเป็นตัวแปรอิสระ (independent) และขนาดเม็ดทรายเฉลี่ยกับคุณสมบัติคลื่นเป็นตัวแปรตาม (dependent) ดังแสดงในรูป 2-11 (ก) หลังจากกำหนดสมการแล้ว ทำการวิเคราะห์โดยใช้ Stepwise regression analysis ระหว่างตัวแปรตามแต่ละตัวที่มีผลต่อความลาดชัน Krumbein สรุปว่า ขนาดเม็ดทรายเฉลี่ยมีความสัมพันธ์กับความลาดชันชายฝั่งสูง (63.1%) ความสูงคลื่นมีความสัมพันธ์รองลงมา (11.0%) และมุมคลื่นมีความสัมพันธ์น้อยที่สุด (0.6%) ดังแสดงในรูป 2-11 (ค)

Dal Cin [26] ในปี 1976 ได้ศึกษาวิเคราะห์การกระจายของเม็ดทรายเพื่อหาความสัมพันธ์กับสภาพการทับถมและกัดเซาะชายฝั่ง พบว่าชายฝั่งที่มีการทับถมมักจะเป็นชายฝั่งที่มีเม็ดทรายละเอียดมาก ส่วนชายฝั่งที่เกิดการกัดเซาะมักจะเป็นชายฝั่งที่ประกอบด้วยเม็ดทรายที่มีขนาดปานกลาง

นอกจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ แล้ว การศึกษาการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งได้จากการวิเคราะห์/แปลความหมายจากภาพถ่ายทางอากาศเพื่อศึกษาถึงประวัติสภาพชายฝั่ง รูปแบบของการเปลี่ยนแปลงและความรุนแรงที่เกิดขึ้นในอดีต ทั้งนี้เพื่อนำมาเป็นข้อมูลสำหรับการตัดสินใจในการวางแผนพัฒนาและอนุรักษ์สภาพชายฝั่งในอนาคต

รูป 2-12 แสดงการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลที่เกิดขึ้นในบริเวณมลรัฐ New Jersey, USA. การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งที่เสนอในรูป 2-12 นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในระยะยาวที่เกิดขึ้น อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของอัตราการกัดเซาะและทับถมของตะกอนทรายในบริเวณนั้น ซึ่งได้แก่ รูปแบบการถดถอยของแนวชายฝั่งดิน รูปการกัดเซาะ/ถดถอยและการยื่นของแผ่นดิน และรูปแบบของชายฝั่งที่ไม่เปลี่ยนแปลง

เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของแนวโน้มนำการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในอนาคต นอกเหนือจากผลการวิเคราะห์จากภาพถ่ายทางอากาศและการสำรวจภาคสนาม ควรมีการทดลองในห้องปฏิบัติการควบคู่กัน รูป 2-13 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบรูปร่างชายฝั่งและความลึกของท้องน้ำที่เปลี่ยนแปลง ระหว่างผลการทดลองในห้องปฏิบัติการกับสภาพจริงในช่วงเวลาต่าง ๆ กัน ที่บริเวณ Thyboron Channel, Denmark.

รูป 2-14 แสดงการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งบริเวณ East Rockaway Inlet, N.Y., USA. ระหว่างปี 1835-1927 และรูป 2-15 เป็นการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งบริเวณ Sandy Hook, USA. ระหว่างปี 1835-1932

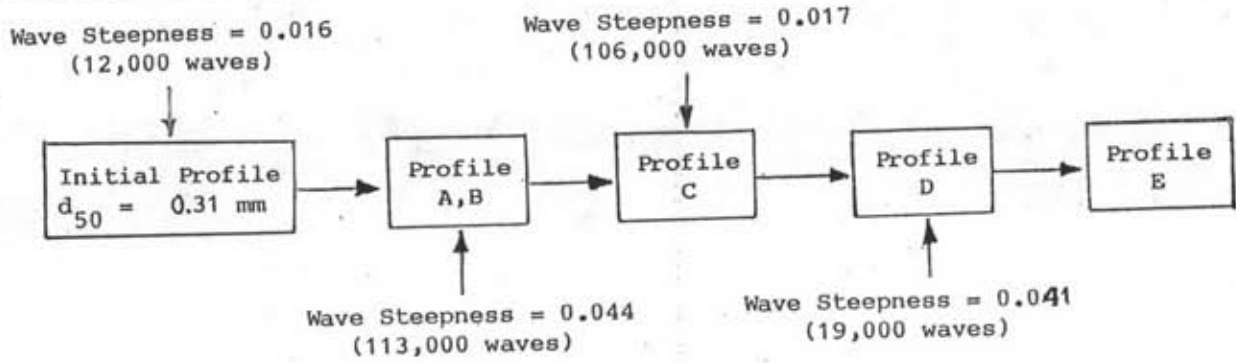
ประเทศญี่ปุ่นเป็นประเทศหมู่เกาะ ซึ่งประสบปัญหาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลที่รุนแรงและต่อเนื่องมาเป็นเวลานาน ญี่ปุ่นมีความยาวชายฝั่งทะเลประมาณ 31,400 กม. ซึ่งประมาณครึ่งหนึ่งของความยาว (ประมาณ 15,000 กม.) มักจะได้รับอันตรายจากคลื่นทำให้ชายฝั่งถูกกัดเซาะและถดถอยอย่างรุนแรง การดำเนินการป้องกันและแก้ไขปัญหาคือการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งกระทำโดยการสร้างโครงสร้างป้องกันชายฝั่งทะเล (Coastal Protection works) ชนิดต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ตามภายหลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 อัตราการกัดเซาะชายฝั่งที่

ประเทศญี่ปุ่นจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งนี้เนื่องจากการพัฒนาประเทศในการสร้างเขื่อนและโครงสร้างชายฝั่งทะเลต่าง ๆ มีจำนวนมากขึ้น ทำให้ปริมาณตะกอนในลำน้ำส่วนใหญ่จะถูกกักไว้ตอนบนของแม่น้ำ ซึ่งเป็นการลดปริมาณตะกอนบริเวณชายฝั่งทางอ้อม จึงทำให้อัตราการกัดเซาะชายฝั่งสูงขึ้น

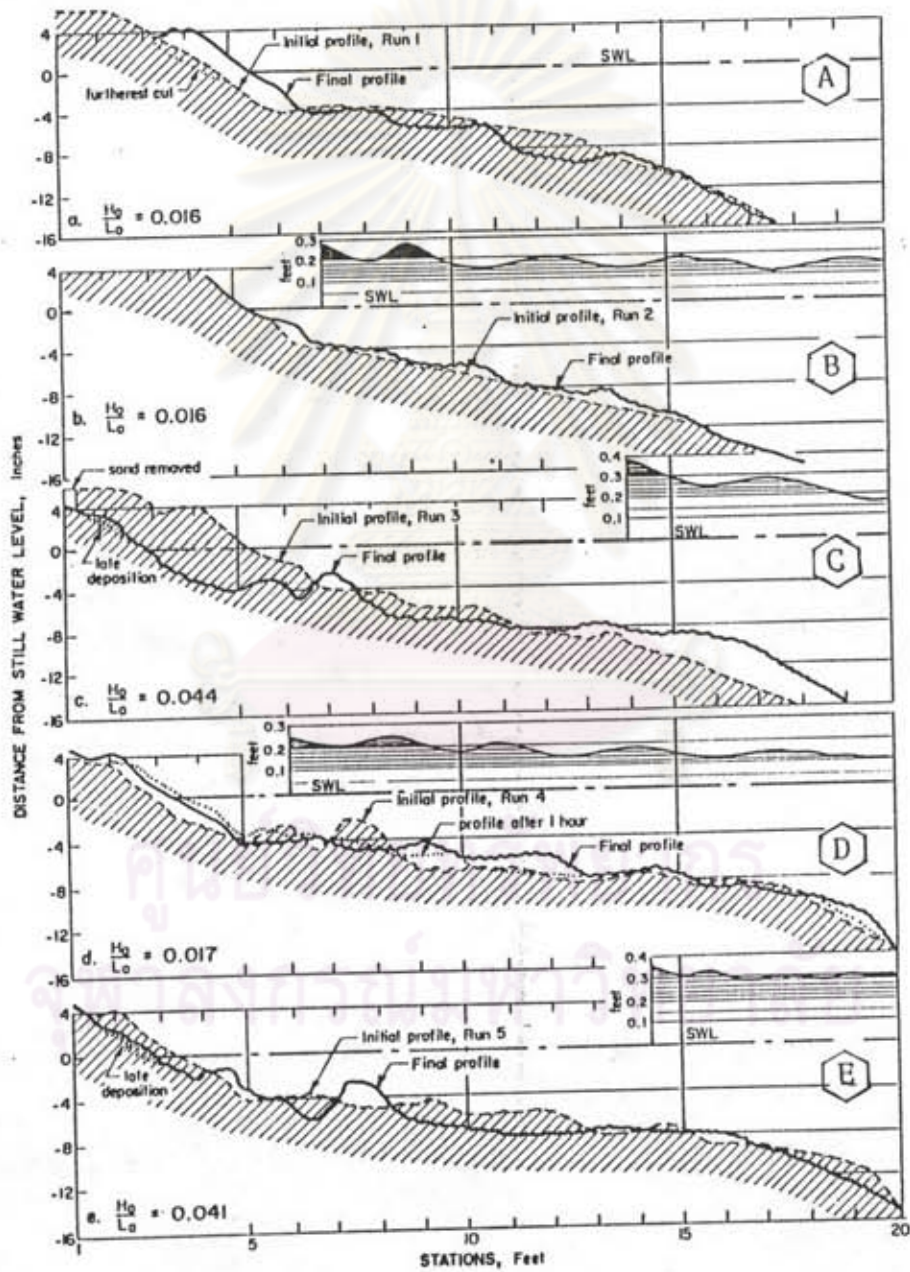
Horiaki Ozasa [18] ในปี 1977 ได้ศึกษาประวัติการเปลี่ยนแปลงสภาพชายฝั่งของประเทศญี่ปุ่นในอดีต ดังแสดงในรูป 2-16 ในการศึกษา/วิเคราะห์ได้อาศัยการแปลความหมายจากภาพถ่ายทางอากาศในปี 1946 และ 1948 ซึ่งสำรวจโดย US. Air Force และภาพถ่ายทางอากาศช่วงเวลาต่าง ๆ ซึ่งดำเนินการโดย Geographical Survey Institute ตั้งแต่ปี 1961 เป็นต้นมา Horiaki พบว่าชายฝั่งประมาณครึ่งหนึ่งของความยาว (บริเวณที่ลงเส้นทึบ ใน Fig.1) เป็นชายฝั่งที่มีการกัดเซาะสูง รูป 2-16 แสดงผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในบริเวณต่าง ๆ จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางอากาศ จะเห็นได้ว่าบริเวณที่มีการสร้างโครงสร้างชายฝั่งทะเลเช่น Jetty (ดู Fig.4) การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งที่เกิดสอดคล้องกับทฤษฎี คือบริเวณด้านหน้าของ Jetty จะเกิดการทับถมของตะกอนทราย สำหรับบริเวณท้าย (downdrift) จะเกิดการกัดเซาะชายฝั่ง

Akira Watanabe [30] ในปี 1983 ได้ศึกษาทบทวนประวัติสภาพชายฝั่งและโครงสร้างต่าง ๆ ตั้งแต่ปี 1945 จนถึงปัจจุบัน (1983) ในการศึกษาได้เลือก Niigawa Coast, Shimo-niigawa Coast และ Fujigawa Coast เป็นชายฝั่งตัวอย่างในการศึกษาหาตัวแปรซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการกัดเซาะชายฝั่งและเปรียบเทียบหา effectiveness ของโครงสร้างป้องกันชายฝั่งทะเลชนิดต่าง ๆ

จากการทบทวนผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในต่างประเทศ มีข้อน่าสังเกตคือ ปัญหาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลนั้น ได้รับความสนใจและดำเนินการศึกษามาเป็นเวลานาน แต่สำหรับปัญหาดังกล่าวในประเทศไทยเรายังไม่ได้รับความสนใจเท่าที่ควร ดังเหตุผลที่ได้อธิบายข้างต้น ดังนั้นผู้ศึกษามีความคิดเห็นว่า หน่วยงานราชการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องควรเริ่มต้นให้ความสนใจต่อปัญหาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งที่เกิดขึ้น ทั้งนี้เพื่อเป็นการสงวนไว้ซึ่งทรัพยากรที่มีค่าทางธรรมชาติ



ก) แผนภูมิการทดลองของ Scott (1954) เพื่อหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งกับความชันคลื่น (wave steepness)



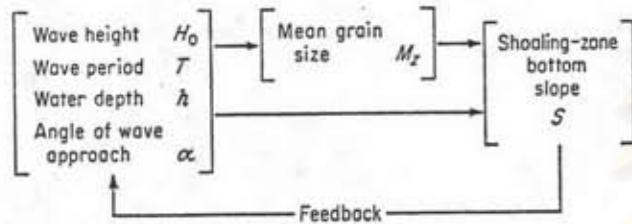
ข) การเปลี่ยนแปลงรูปตัดชายฝั่ง (foreshore slope) เมื่อเปลี่ยนค่า wave steepness

จาก : Scott, [31]

รูป 2-10 ผลของการเปลี่ยนแปลงความชันคลื่นที่มีต่อชายฝั่ง

PROCESS ELEMENTS

RESPONSE ELEMENTS



ก. แผนผังแสดง process-response model

ข. วิธีการวิเคราะห์

In stepwise regression analysis, the coefficients, β 's in the regression equation, are derived from regression techniques or with multiple or correlation techniques based on the general linear model

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + C.$$

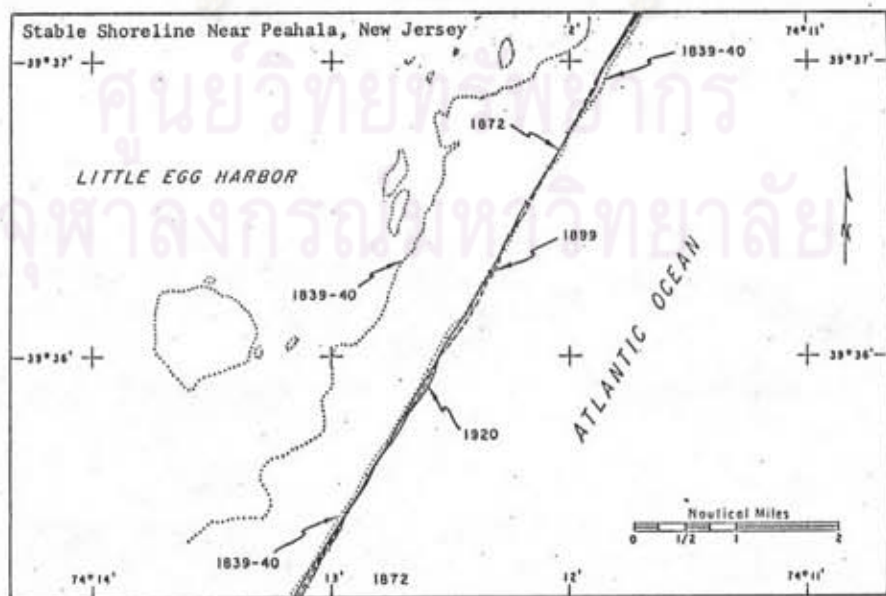
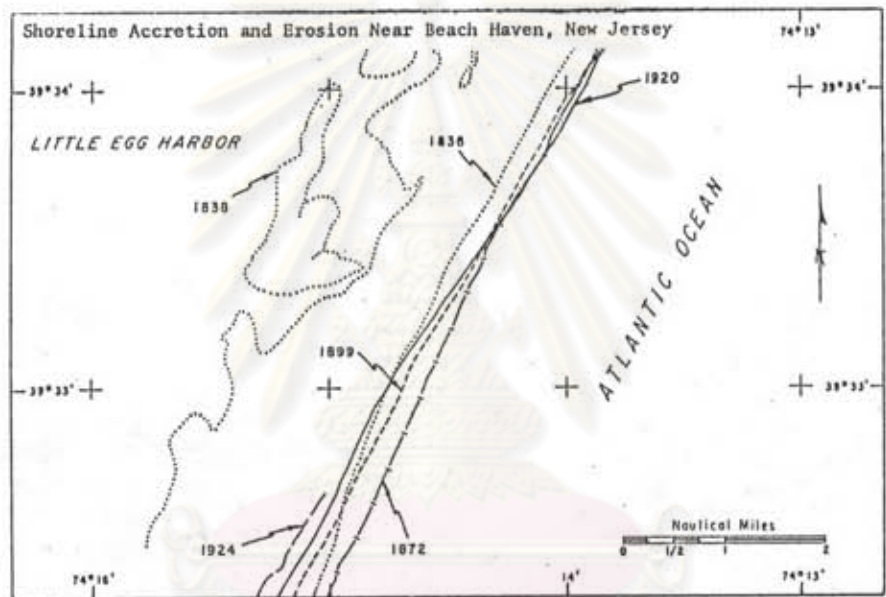
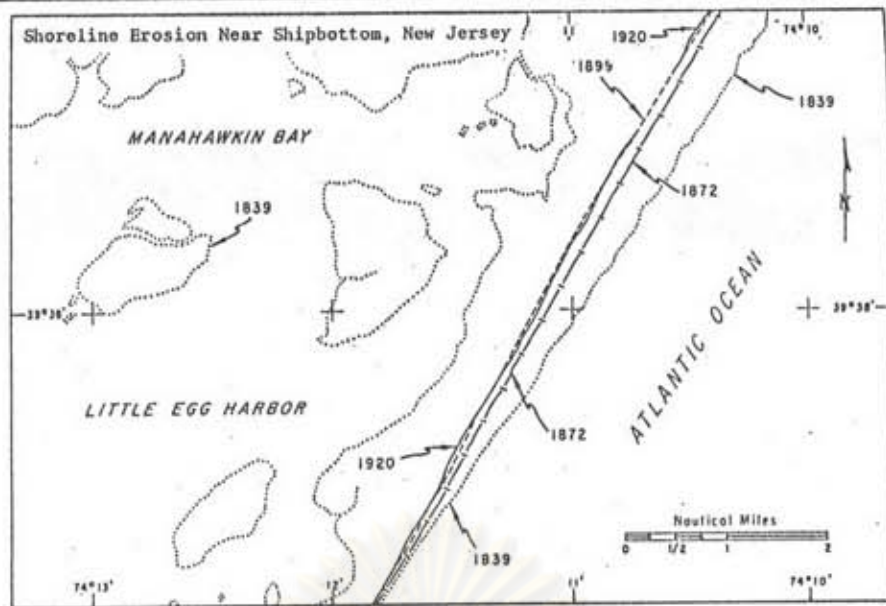
Bottom slope—S	Y
Mean grain size—Mz	X ₁
Wave period—T	X ₂
Wave height—H ₀	X ₃
Wave angle—A	X ₄
Water depth—h	X ₅

The three strongest combinations of X's taken one, two, three, and four at a time

process element combinations					percentage of sum of squares of Y accounted for	
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅		
1					63.1	
		3			23.7	
			4		5.6	
One at a time						
1		3			74.1	
1				5	66.4	
1	2				65.5	
Two at a time						
1	2	3			75.9	
1		3		5	74.8	
1		3	4		74.1	
Three at a time						
1	2	3		5	78.1	
1	2	3	4		75.9	
1	2		4	5	74.9	
Four at a time						
1	2	3	4	5	78.7	
Five at a time						
					net contributions of ranked variables, %	
					X ₁	63.1
					X ₂	11.0
					X ₃	1.8
					X ₄	2.2
					X ₅	0.6
						78.7

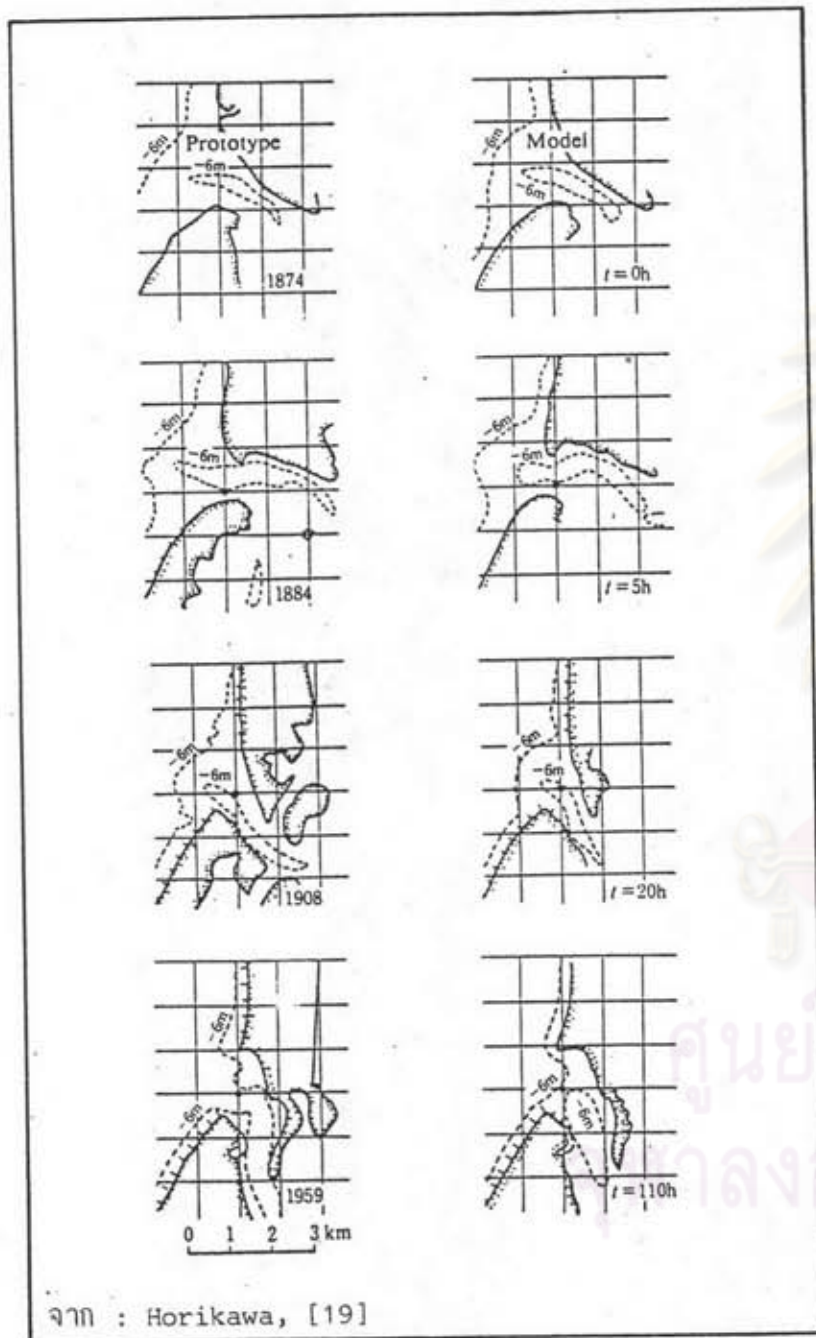
จาก : Krumbein and Graybill, [22]

ก. ผลการศึกษาโดย Stepwise regression analysis

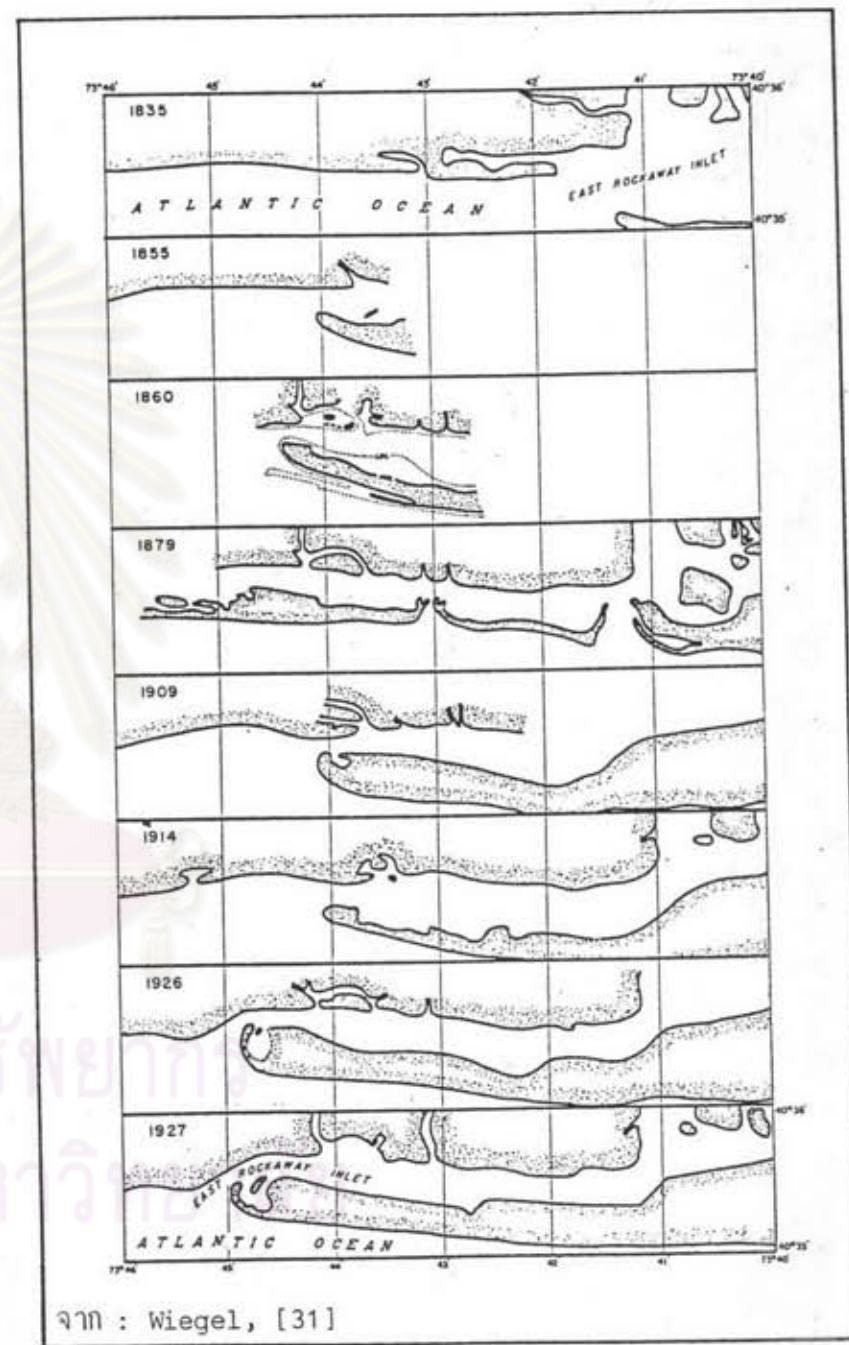


จาก : US.Army Coastal Research Center, [17]

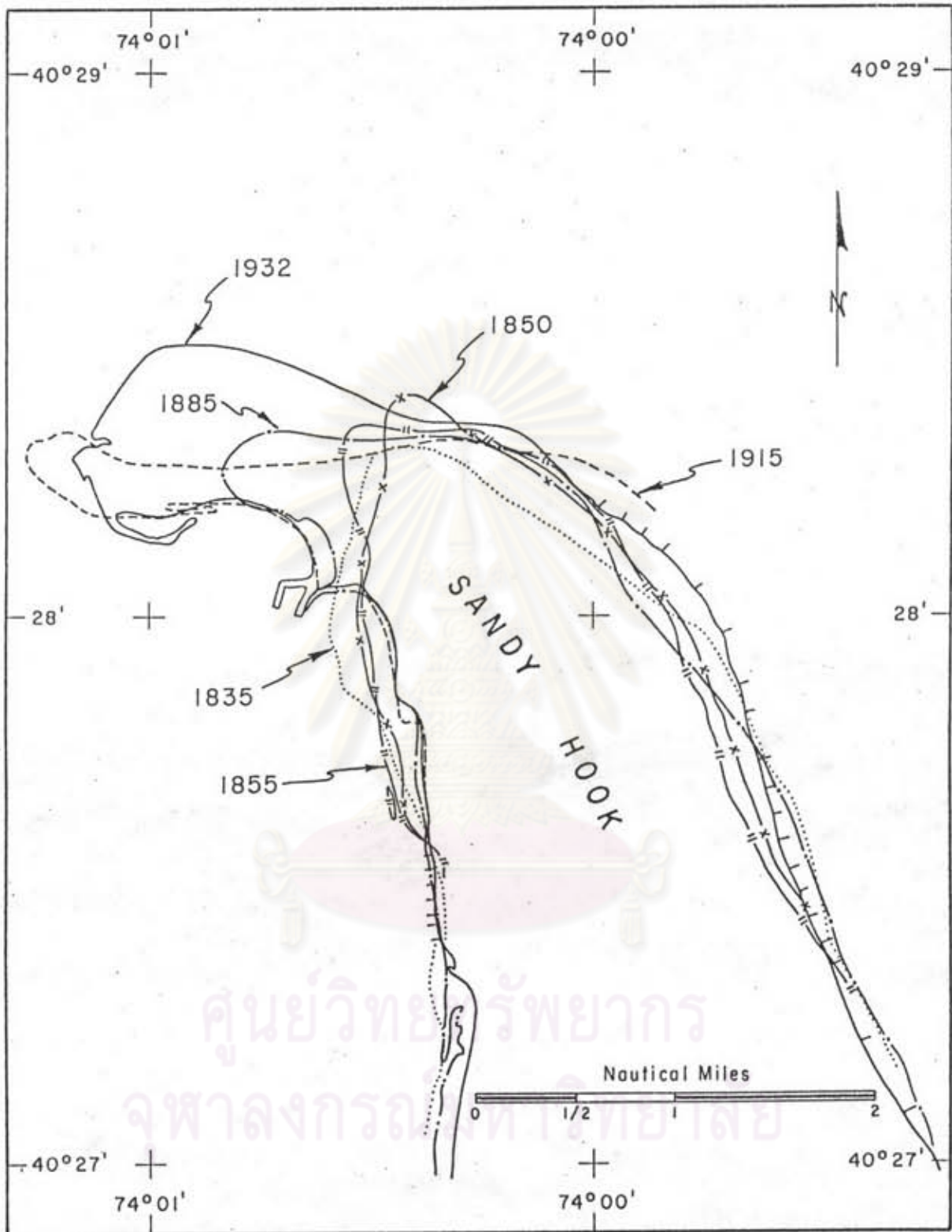
รูป 2-12 การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งบริเวณ New Jersey, USA



รูป 2-13 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงบริเวณ Thyboron Channel, Denmark ระหว่างแบบจำลองกับสภาพจริง



รูป 2-14 การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลบริเวณ East Rockaway Inlet, N.Y., USA



จาก : US.Army Coastal Research Center, [17]

รูป 2-15 การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งบริเวณ Sandy Hook, USA (1835-1932)

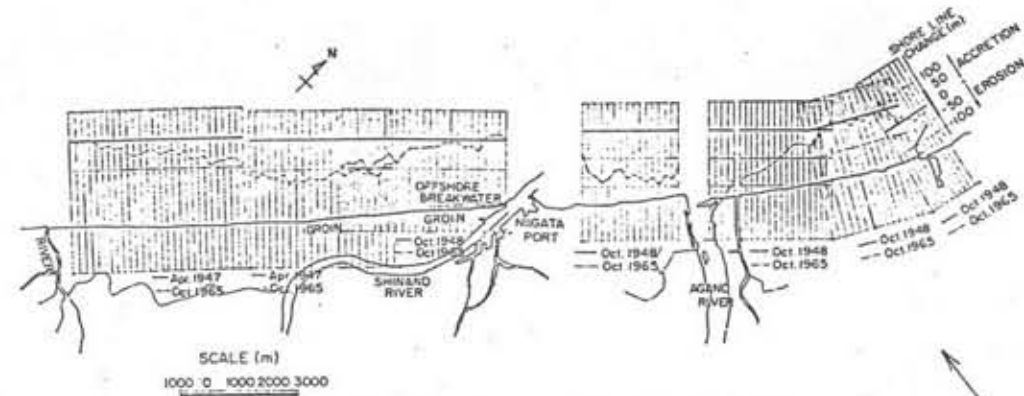


Fig. 7 Shoreline changes at the Niigata Coast

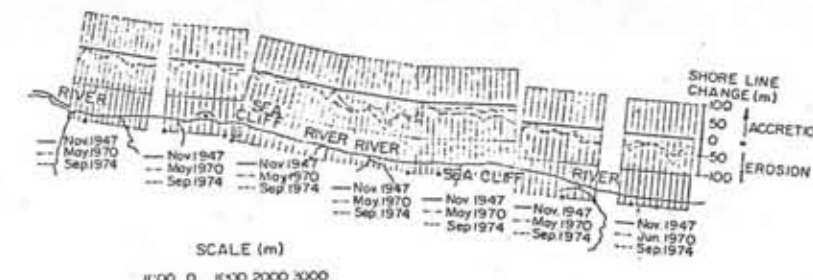


Fig. 9 Shoreline changes at the Fukushima Coast.



Fig. 8 Shoreline changes at the coast around the mouth of the New-Shinano River.

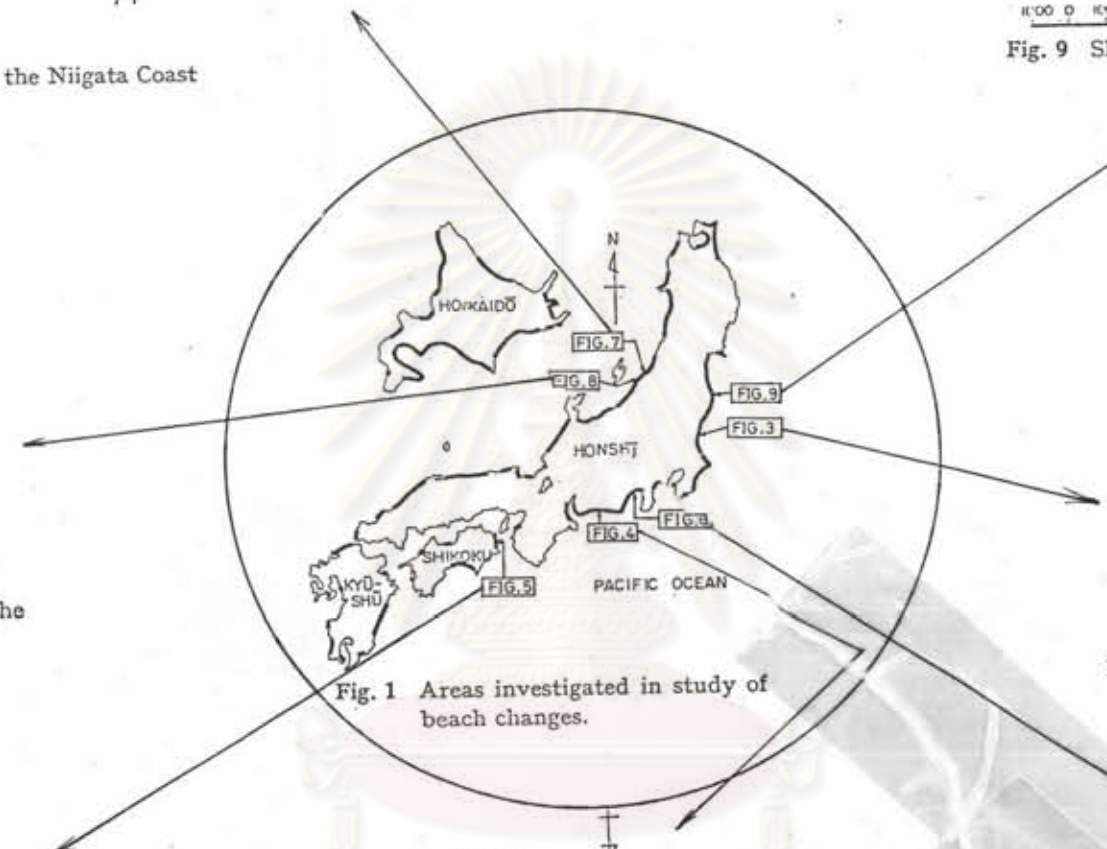


Fig. 1 Areas investigated in study of beach changes.

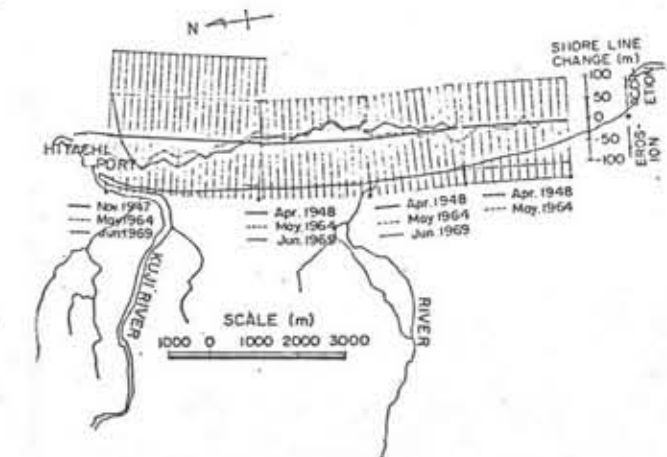


Fig. 3 Shoreline changes at the coast south of Hitachi Port.

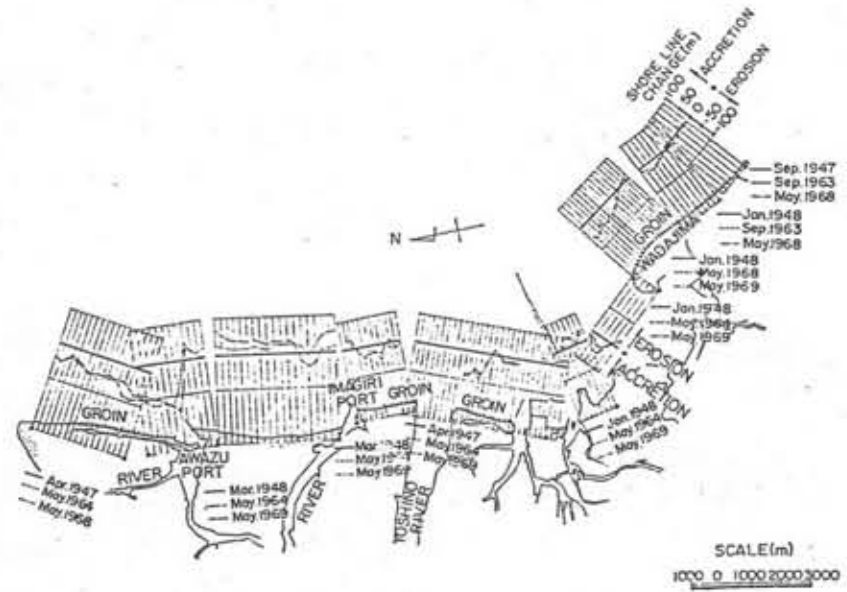


Fig. 5 Shoreline changes at the Tokushima Coast.

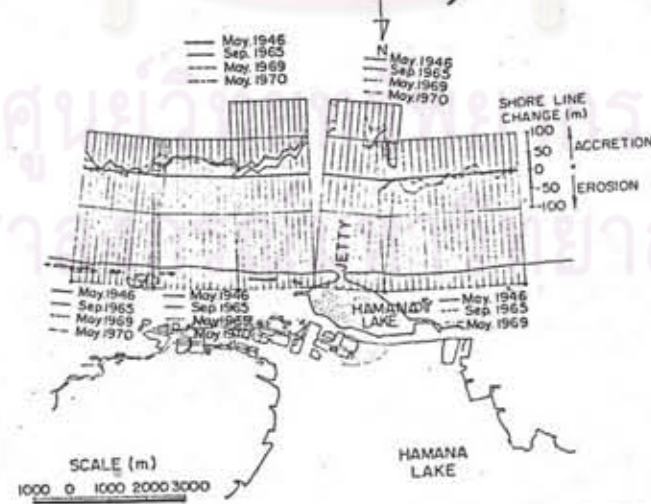


Fig. 4 Shoreline changes at the coast around the mouth of the Hamana Lake.

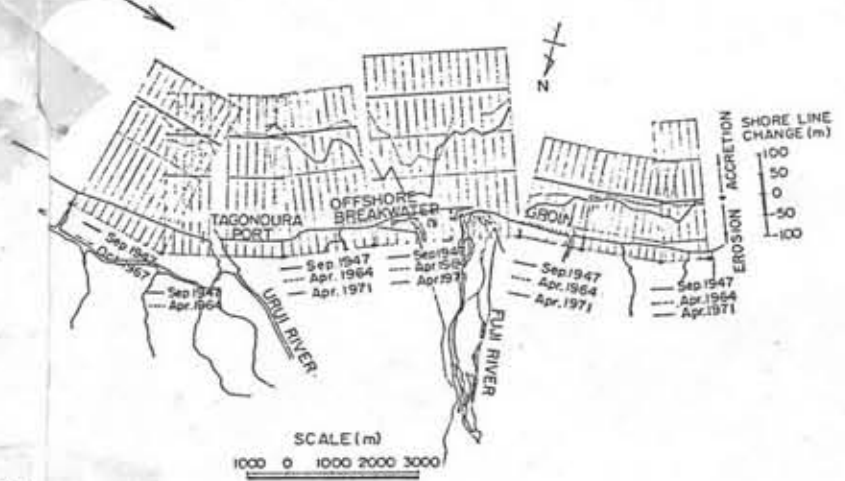


Fig. 6 Shoreline changes at the coast around the mouth of the Fuji River.

